

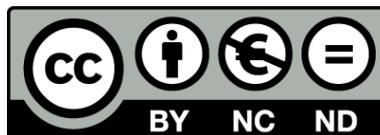


UNIVERSITAT DE
BARCELONA

La historia, la fenomenología y la epistemología de la física

Orientaciones conceptuales, pedagógicas y didácticas
para la enseñanza de la termodinámica en el contexto
de formación de profesores

Marina Garzón Barrios



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial – SenseObraDerivada 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial – SinObraDerivada 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0. Spain License.**

TESIS DOCTORAL

La historia, la fenomenología y la epistemología de la física

Orientaciones conceptuales, pedagógicas y didácticas para la
enseñanza de la termodinámica
en el contexto de formación de profesores.

Marina Garzón Barrios



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

2023



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

La historia, la fenomenología y la epistemología de la física

Orientaciones conceptuales, pedagógicas y didácticas para la
enseñanza de la termodinámica
en el contexto de formación de profesores.

Programa de doctorado en
Didàctica de les Ciències, les Llengües, les Arts i les
Humanitats

Línea de investigación:
Didàctica de les Matemàtiques i de les Ciències Experimentals

Facultat d'Educació

Doctoranda: Marina Garzón Barrios
Directores: Dra. Marina Castells Llavanera
Dr. Emilio Balzano
Tutor: Dr. Joaquin Giménez Rodríguez

Dedicatoria

A mis estudiantes y maestros,
porque este trabajo está inspirado en ellos y para ellos,
porque el aprendizaje más valioso sucede cuando se enseña y se comparte.

A mi familia,
Soporte y estímulo de mi existencia.

Agradecimientos

Esta tesis fue dirigida por la doctora **Marina Castells-Llavanera** a quien agradezco su valiosa colaboración, las pertinentes sugerencias y sobre todo su amabilidad siempre dispuesta, a lo largo de este proceso. También fue dirigida por el doctor **Emilio Balzano**, quien con sus comentarios y experiencia amplió nuestra perspectiva y alcance en el desarrollo del documento. A los dos, mi mayor agradecimiento por brindarme ánimo, apoyo y confianza para culminar estos estudios.

A **María Mercedes Ayala Manrique**, quien me introdujo en el campo de los estudios históricos y los procesos de formalización para la enseñanza de la física, sin duda este trabajo es continuación y fruto de muchos diálogos e intereses compartidos.

De igual manera, agradezco al doctor **Joaquín Giménez Rodríguez** quien estuvo al frente de los procesos académico-administrativos. Y a la **Universidad Pedagógica Nacional** por permitir que la investigación fuera desarrollada en el **Departamento de Física** en el marco de los programas de Especialización en Docencia de las Ciencias para el nivel básico y Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales. Un reconocimiento especial a los profesores en formación de estos programas a quienes acompañé en el curso sobre la Organización de los fenómenos térmicos, durante el primer semestre de 2021, y quienes me concedieron su autorización para hacer de sus producciones objeto de mi investigación.

A mis estudiantes, hoy día apreciados colegas **Nohora Alejandra Hernández Cepeda** y **Armando Antonio Palacios Hernández**, con quienes discutí en medio de la pandemia, muchos aspectos relacionados con las comprensiones que se podían derivar de los estudios de los textos históricos, y gracias a sus aportaciones se consolidaron algunas de las actividades que se propusieron en la secuencia didáctica para el Seminario de la organización de los fenómenos físicos: Fenómenos térmicos.

Finalmente, agradezco de manera muy especial a mi hermana **Lucy Garzón Barrios**, cuya presencia ha sido un gran apoyo y soporte emocional.

Tabla de Contenido

Introducción	21
1 Campo temático y planteamiento de la problemática	29
1.1 La formación de conceptos, modelos y teorización como problema de estudio de la epistemología, la filosofía y la historia de las ciencias	29
1.2 La formación de conceptos, modelos y teorización como problema de estudio para la enseñanza de las ciencias.....	36
1.3 Planteamiento de la pregunta y objetivos de investigación.....	42
1.3.1 Preguntas de investigación	44
1.3.2 Objetivos de la investigación	45
1.4 Contexto de investigación y descripción de los grupos de docentes participantes .	49
2 Diseño metodológico	53
2.1 Etapa 1. Desarrollo de los estudios histórico-críticos para orientar la enseñanza de la física.....	56
2.1.1 Tendencias y enfoques para abordar la historia de las ciencias en contextos de enseñanza.....	58
2.1.2 El análisis histórico - crítico	60
2.1.3 La finalidad de los estudios histórico- críticos en esta investigación	62
2.2 Etapa 2. El diseño de la secuencia didáctica para la enseñanza- aprendizaje.....	65
2.2.1 Primer momento: La preparación	65
2.2.2 Segundo momento: Decisiones sobre el diseño de la secuencia didáctica. -	67
2.2.3 Tercera fase: Estructura de la secuencia didáctica por secciones.....	67
2.2.4 Elementos fundamentales en el diseño de la secuencia didáctica	67
2.3 Etapa 3. Incorporación de la fenomenología como orientación epistemológica y como método para la enseñanza de las ciencias.....	69
2.3.1 La fenomenología en la filosofía y la epistemología.....	69
2.3.2 La fenomenología hermenéutica como método de investigación.....	72
2.3.2.1 La descripción fenomenológica	73
2.3.2.2 La reducción fenomenológica	74
2.3.2.3 Recopilación de la información y descripción de acciones para el análisis cualitativo	75
Fundamentación Teórica	82
3 Conceptualización, modelación y teorización en física. Reflexiones desde la Filosofía de la Ciencia	83
3.1 La formalización.....	84
3.1.1 La escuela clásica de filosofía de las ciencias: Vocabularios y Teorización -	85
3.1.2 Nuevo Experimentalismo	91
3.1.3 La concepción semántica o enfoque modelista.....	95

3.2	La crítica a la axiomatización de la ciencia	98
3.2.1	La escuela Piagetiana y la Teoría de Campos Conceptuales de Gérard Vergnaud	102
3.2.2	Epistemologías constructivistas	106
3.2.3	El giro cognitivo de la epistemología de la ciencia (finales siglo XX)	107
3.2.4	La conceptualización desde una mirada fenomenológica	110
Etapa 1. Estudios Histórico – Críticos sobre teorías del calor		121
4	La doctrina de los calores	122
4.1	El enunciado de la segunda ley de la termodinámica como consecuencia de la unificación de las sensaciones térmicas calor y frío	125
4.2	Las hipótesis sobre la naturaleza del calor: El fluido calórico y la Vis viva.....	128
4.3	La medida termométrica. La diferencia entre calor y temperatura	131
4.4	El método de las mezclas y la medida de las acciones del calor.....	136
4.5	Principio de equilibrio y de conservación.....	139
5	De las propiedades de las sustancias a las propiedades de los sistemas	141
5.1	De Watt a Clausius. Las teorías del calor durante el siglo XIX.....	141
5.1.1	Watt y las máquinas de vapor.....	142
5.1.2	Sobre la potencia motriz del fuego. Los gases y sus calores específicos --	145
5.1.3	La geometrización. Intercambio térmico y potencia motriz	153
5.2	Clausius. La medida del calor como suma del trabajos interno y externo.....	158
5.2.1	Observaciones generales sobre The Mechanical Theory Of Heat	158
5.2.2	La desigualdad de la relación calor – trabajo.....	160
5.2.3	El trabajo interno de un sistema y el principio de conservación	163
6	Reflexiones para orientar la enseñanza: La termodinámica, un campo de estudio polémico y polisémico	170
6.1	El siglo XVIII, una mirada sustancialista de los fenómenos térmicos.....	170
6.2	El siglo XIX, una mirada mecánica y dinámica	171
6.3	Dos formas de pensar ¿en disputa?	174
6.4	La mirada sustancialista también es conveniente en el estudio de los fenómenos térmicos	175
6.5	Otras miradas de la termodinámica.....	176
6.6	Los problemas del estudio de los fenómenos térmicos en su enseñanza.....	177
Etapa 2. Diseño de la secuencia didáctica: Criterios pedagógicos y didácticos		181
7	Estudios para el diseño de la secuencia e intervención didáctica:----	182

7.1	Criterios pedagógicos y didácticos para la formación de docentes considerados en esta propuesta de aula.....	182
7.1.1	Tematizar: Primer criterio pedagógico para la formación de docentes----	183
7.1.1.1	La tematización en relación con los fenómenos térmicos-----	185
7.1.1.2	El compendio de los textos en la secuencia didáctica-----	186
7.1.1.3	La organización y objetivos de las fases de trabajo en el aula -----	191
7.1.2	Criterios didácticos al tematizar-----	194
7.1.2.1	Tipos de situaciones recurrentes para el análisis de los fenómenos ----	196
7.1.3	Experimentar: Un segundo criterio pedagógico para la formación de docentes -----	197
7.1.4	Criterios didácticos para el planteamiento de situaciones experimentales.	198
7.1.4.1	Las actividades experimentales en el estudio de lo térmico-----	200
7.1.5	Formalizar. Un tercer criterio pedagógico para la formación de docentes	201
7.1.6	Criterios didácticos para formalizar -----	202
7.1.6.1	Formalizar en relación con los fenómenos térmicos-----	203
Etapa 3. La investigación fenomenológica en el aula -----		205
8	La Documentación fenomenológica-----	206
8.1	Descripción fenomenológica. Lo que aparece conforme aparece.....	208
8.1.1	Dimensiones para el análisis de la intervención didáctica -----	208
8.1.2	Los docentes participantes -----	209
8.2	La intervención didáctica	211
8.2.1	Concepciones iniciales de los docentes sobre lo térmico-----	211
8.2.1.1	Sensación térmica-----	212
8.2.1.2	Temperatura -----	213
8.2.1.3	Calor como energía y energía como transferencia -----	214
8.2.2	Las sensaciones de calor y frío -----	214
8.2.3	El problema de los termómetros y medida de la temperatura -----	219
8.2.4	La búsqueda de una escala de medida-----	223
8.2.5	El método de las mezclas y las medidas calorimétricas -----	228
8.2.6	La presión, el volumen y la temperatura, variables térmicas -----	233
8.2.7	El comportamiento de los gases respecto al calor -----	237
8.2.8	Calor y movimiento -----	239
8.2.9	Los diagramas de fase-----	242
8.2.10	El problema de la interpretación Calor – Trabajo -----	245
8.3	Reflexiones finales del ejercicio de documentación.....	247
Etapa 4. Exposición de resultados y conclusiones. -----		249
9	Resultados y discusión respecto a la documentación -----	250

9.1	El dominio perceptual de lo térmico.....	251
9.2	La idea de equilibrio, un invariante operatorio necesario para conceptualizar	254
9.3	La equivalencia de magnitudes, soporte de las representaciones térmicas y del principio de conservación.....	256
9.4	La representación y modelación geométrica de las variables termodinámicas	258
9.5	El tiempo, representante del cambio en los fenómenos térmicos	261
9.6	Reflexiones finales de este apartado	261
10	Conclusiones generales -----	263
10.1	Sobre la constitución de los procesos de conceptualización como campo de estudio	264
10.2	Sobre los análisis históricos	265
10.3	Sobre los criterios pedagógicos y didácticos	267
10.4	Sobre los procesos de formalización en el aula	268
10.5	Sobre los objetivos didácticos desarrollados a través de la secuencia didáctica.....	269
10.6	Rutas de continuidad y ampliación de esta investigación.....	269
10.7	Nuestra reflexión final.....	271
11	Bibliografía -----	274
12	Anexo 1. Secuencia: Organización de los Fenómenos Térmicos ----	287
12.1	Introducción	289
12.1.1	El estudio de los fenómenos térmicos -----	289
12.1.2	Sobre la propuesta y su problemática -----	289
12.1.3	Perspectivas-----	290
12.1.4	Los estudios históricos-críticos-----	291
12.1.5	Objetivos Generales-----	291
12.1.6	Sobre las actividades en el seminario-----	292
12.1.7	Criterios de evaluación-----	293
12.2	Construyendo la base fenomenológica de los procesos térmicos	295
12.2.1	Sobre el calor, el frío y la comunicación del calor-----	295
12.2.2	Sobre las fuentes de calor y el frío, y como se genera el calor -----	300
12.2.3	Cualidades de las sustancias que varían cuando se someten a la acción del calor -----	309
12.2.3.1	Puntos de ebullición y congelamiento en sustancias termométricas----	310
12.2.4	La medida de la dilatación como medida de la temperatura-----	311
12.2.4.1	Un aparato para medir la dilatación de las sustancias -----	312
12.2.4.2	Tras la búsqueda del cero absoluto-----	314
12.2.4.3	La escala absoluta de temperatura -----	315
12.2.4.4	Diferenciando las magnitudes calor y temperatura -----	317
12.2.5	Sobre la naturaleza del calor -----	318
12.2.5.1	Exposición de una forma de medir el calor-----	319

12.2.6	La medida de la acción del calor. La invención del calorímetro y el método de las mezclas-----	327
12.2.7	La presión y el volumen como variables térmicas-----	338
12.3	La máquina de vapor y la búsqueda de la eficiencia.....	341
12.3.1	El calor y el movimiento-----	341
12.3.1.1	Construcción y análisis de termómetros de aire-----	351
12.3.2	La acción mecánica y la medida del calor-----	353
12.3.2.1	La máquina de Vapor-----	353
12.3.2.2	Los procesos de transformación calor - trabajo-----	356
12.4	Entropía y Reversibilidad.....	364
12.4.1.1	Segunda Parte. Procesos reversibles e irreversibles, y las leyes de la termodinámica-----	368
12.4.1.2	Tercera Parte. La entropía y la eficiencia de las máquinas térmicas ----	371
13	Anexo 2. Actividades para la consolidación de experiencia investigativa en enseñanza de las ciencias 2016 -2023-----	378
13.1	Cursos:	378
13.2	Invitaciones Académicas:.....	378
13.3	Participación en proyectos de Investigación Universidad Pedagógica Nacional...	378
13.4	Publicaciones	379
13.5	Participación en la organización en eventos de socialización sobre enseñanza de las ciencias y de la física:	380
13.6	Participación en eventos de socialización sobre enseñanza de las ciencias y de la física:	380
13.7	Dirección de trabajos de Grado y Maestría.....	382

Tabla de Cuadros

Cuadro 1. Pregunta y objetivos de investigación.....	47
Cuadro 2. Créditos Académicos para la asignatura Termodinámica.....	52
Cuadro 3. Diseño Metodológico que involucra las acciones en el aula.....	55
Cuadro 4. Esquema de la metodología de trabajo en el aula.....	76
Cuadro 5. Áreas de formación de docentes participante en la investigación.....	77
Cuadro 6. Síntesis de Objetivos y actividades de investigación.....	81
Cuadro 7. Esquema general de las intenciones de la investigación.....	120
Cuadro 8. Esquema Tematizar - Experimentar – Formalizar (Izquierda), inspirado en el esquema de Paolo Guidoni (Derecha).....	183
Cuadro 9. Propuesta de enseñanza sobre los fenómenos térmicos a través de episodios históricos de las teorías del Calor.....	190
Cuadro 10. Estructura de las fases de la secuencia didáctica Organización de los fenómenos térmicos.....	191
Cuadro 11. FASE 1. Organización de temáticas y objetivos.....	193
Cuadro 12. FASE 2. Organización de temáticas y objetivos.....	194
Cuadro 13. Esquema de las dimensiones de interpretación.....	208
Cuadro 14. Expresiones de los docentes respecto a sus conocimientos en el campo de estudio.....	210
Cuadro 15. Ejemplo de situaciones discutidas para identificar las ideas de los docentes. .	211
Cuadro 16. Expresiones de los docentes. El calor como sensación térmica.....	212
Cuadro 17. Expresiones de los docentes. El calor como temperatura.....	213
Cuadro 18. Expresiones de los docentes. El calor como energía.....	214
Cuadro 19. Identidad entre calor y temperatura expresado por un grupo de docentes.	215
Cuadro 20. Ejemplo de intervención docente moderadora del seminario.....	216
Cuadro 21. Primer acercamiento de los docentes con una fuente primaria.....	217
Cuadro 22. Descripción más detallada de razonamientos propios.....	217
Cuadro 23. Contradicción en la dirección del flujo de calor.....	218
Cuadro 24. Construcción de termómetros líquidos.....	222
Cuadro 25. G5. Interpretación del flujo de calor en los procesos de dilatación y compresión de sustancias termométricas.....	224
Cuadro 26. Reflexión sobre la diferencia entre calor y temperatura a través de la gráfica T vs Q	226
Cuadro 27. Diferencia entre Calor y Temperatura a través de la construcción del termómetro.....	226
Cuadro 28. Criterios de calibración de termómetros y construcción de calorímetros propuestos por los docentes.....	227
Cuadro 29. Actividades experimentales propuestas por los docentes.....	230
Cuadro 30. Ejemplo de descripción que involucra la incorporación de los nuevos conceptos en el discurso.....	235
Cuadro 31. Ejemplo de correlación que emerge en la discusión y análisis.....	236
Cuadro 32. Termómetros de aire a presión constante construidos por los docentes.....	238

Cuadro 33. Docentes expresan dificultad para comprender algunos fragmentos.....	239
Cuadro 34. La importancia que dan los docentes a identificar los experimentos que conducen a los resultados de las tablas.....	241
Cuadro 35. El docente se pregunta por el calor específico en los gases.....	241
Cuadro 36. Pregunta que muestra la importancia que adquiere la experimentación en el aula para la comprensión.	242
Cuadro 37. Conclusiones de los docentes sobre la relación calor – trabajo.....	246

Tabla de Imágenes

Imagen 1. La formación de docentes un territorio de construcción de significados.	22
Imagen 2. Esquema de modelo de (Giere, 1988).....	108
Imagen 3. Representación de una teoría (Giere, 1988).	109
Imagen 4. Comparación de escalas termométricas. (Black, 1807. pág., 217)	128
Imagen 5. Calorímetro de Lavoisier y Laplace. (1780)	136
Imagen 6. Máquina de Vapor de Watt. (3rd edición británica 1797)	144
Imagen 7. Tabla de calores específicos de los gases. (Carnot, edición inglesa de 1897, pág.76)	149
Imagen 8. Tabla de elevación de temperaturas. (Carnot, edición inglesa de 1897, pág.78).	150
Imagen 9. Calor específico de aire. (Carnot, edición inglesa de 1897, pág.86).	151
Imagen 10. Representación gráfica de curva isotérmica. (Clapeyron, 1834)	155
Imagen 11. Representación gráfica curva desconocida (adiabática). (Clapeyron, 1834).....	155
Imagen 12. Representación gráfica del ciclo de Carnot. (Clapeyron, 1834).	156
Imagen 13. Aparato referenciado por Clausius con el cual Joule obtiene el equivalente mecánico del calor actuando sobre gases. (Clausius, 1856. pág. 67).	169
Imagen 14. Cycle of concept formation. The process is directed from phenomena to theory. (Koponen, Kurki-Suonio, Jauhiainen et al. 2001).	199
Imagen 15. Determinación de los puntos máximo y mínimo G4.	225
Imagen 16. Gráfica de cambios de temperatura del agua en función del Calor (http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/fusion/fusion.htm).	226
Imagen 17. La escala termométrica construida a través del método de las mezclas.	231
Imagen 18. Conclusiones de un grupo de docentes que refleja rasgos de miradas sustancialistas.....	232
Imagen 19. Ejemplos de Actividades con jeringas para identificar características del comportamiento del aire.....	235
Imagen 20. Ejemplos de actividades con jeringas para establecer relaciones entre variables P, V y T	235
Imagen 21. Conclusión de la influencia de presión en los puntos de fusión y ebullición de las sustancias.....	236
Imagen 22. Calorímetro de Flujo. Imagen tomada de (Mejía, 2008).....	242
Imagen 23. Ejemplo de representaciones P, V, T en diagramas de fase y conclusiones....	243

Imagen 24. Comprensiones sobre la generación de calor por cambios de presión o volumen.	244
Imagen 25. Los docentes describen el ciclo de Carnot con las representaciones gráficas de Clapeyron.	245
Imagen 26. Tipo de animaciones usadas por los docentes para establecer la relación Calor – Trabajo.	246

Tabla de tablas

Tabla 1. Diferencia entre calores específicos de los gases a presión y volumen constantes.	149
Tabla 2. Diferencia de los valores consecutivos entre las presiones.	152

La historia, la fenomenología y la epistemología de la física

Orientaciones conceptuales, pedagógicas y didácticas para la enseñanza de la termodinámica en el contexto de formación de profesores.

Marina Garzón Barrios (mgarzonb@pedagogica.edu.co). Profesora Departamento de Física. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad Pedagógica Nacional (Colombia).

Doctorat en Didàctica de les Ciències, les Llengües, les Arts i les Humanitats. Facultat d'Educació. Àrea: Didàctica de les Matemàtiques i de les Ciències Experimentals.

Universitat de Barcelona. Catalunya. España.

RESUMEN

La investigación que se presenta en la memoria de Tesis Doctoral surge en el contexto de la formación de profesores de física motivada por la intencionalidad pedagógica de encontrar orientaciones para significar y favorecer la estructuración y comprensión de los fenómenos físicos para enseñanza – aprendizaje de la física a través de un acercamiento fenomenológico.

Es una investigación de tipo cualitativo- descriptivo que parte de constatar que en enseñanza de la física se continúa asumiendo mayoritariamente que el contenido conceptual de la ciencia es estándar, uniforme y estrechamente compartido por toda la comunidad científica, que se construye por vías únicas, cuyas representaciones formales son universales, y donde el trabajo del profesor es transmitirlo sin cuestionamientos. Sin embargo, vemos cómo estas miradas coexisten con un amplio número de investigaciones que ejemplifican la diversidad de estrategias a través de las cuales se ha desarrollado el conocimiento científico, las miradas contrastantes en la forma de comprender y producir fenómenos, y la creatividad de la actividad científica en la producción y validación de ese conocimiento.

Por lo cual, enfocamos la investigación en identificar rasgos o estrategias en la formación de conceptos a través de un caso de la física que se ocupa del estudio de los fenómenos térmicos, con el fin de derivar desde allí criterios pedagógicos y didácticos para la enseñanza - aprendizaje de las ciencias del profesorado. Se hizo un acercamiento a los estudios histórico – críticos y epistemológicos de las ciencias para diseñar e implementar una secuencia didáctica sobre termodinámica dirigida a la formación universitaria de docentes: profesores de física y ciencias que trabajan en educación secundaria. Nos propusimos caracterizar los

procesos de formalización que involucran la conceptualización, modelización y teorización de las teorías del calor para la propuesta de la secuencia y describir los desarrollos conceptuales elaborados por un grupo de profesores de la Especialización en Docencia de las Ciencias para el nivel básico y Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales de la Universidad Pedagógica Nacional en Colombia al utilizar la secuencia didáctica.

Los fundamentos que formaron parte de nuestro marco teórico son: en primer lugar, los estudios histórico-críticos de las ciencias (Mach, Duhem, Ayala) que nos llevaron al análisis de procesos de conceptualización en la historia de las teorías del calor. En segundo lugar, diversos estudios en el contexto de la epistemología y filosofía de la ciencia, cuyos objetos de investigación son: el conocimiento científico, la función y la estructura de las teorías científicas y más recientemente el papel de los datos observacionales y la experimentación en la producción de explicaciones y criterios de validación de la ciencia, nos condujeron a adoptar la perspectiva fenomenológica de Maurice Merleau Ponty que entretajamos con la orientación fenomenológica de Paolo Guidoni y su escuela. Influenciadas por la visión de estos autores, generamos un enfoque fenomenológico particular hacia la enseñanza de las ciencias y la investigación en el aula. En tercer lugar, aportaron en la comprensión de procesos cognitivos, los estudios sobre la organización conceptual (Piaget) e intersubjetiva (Vygotsky, Bruner, entre otros), y la noción de los campos conceptuales (Vergnaud) como estructuras organizativas de la conceptualización en ciencias. Asimismo, los estudios sobre los procesos de formalización ligados al desarrollo del lenguaje verbal y a otras formas de expresión (fórmulas, representaciones no verbales) en la organización de fenómenos (Guidoni, Balzano, Rangel), tanto como aquellas investigaciones realizadas sobre concepciones científicas y formas de razonar en ciencias (Guidoni, Vicentini, Besson).

En conclusión, los estudios históricos de la física y la perspectiva fenomenológica para su enseñanza proporcionaron orientaciones conceptuales, pedagógicas y didácticas para la enseñanza de la termodinámica en el contexto de formación de profesores.

Universitat de Barcelona, Barcelona. 2023

Palabras Clave: Historia y enseñanza de la física, Epistemología y Filosofía de las ciencias, Fenomenología, Estudios histórico – críticos, Procesos de formalización, Formación de docentes, Termodinámica.

La història, la fenomenologia i l'epistemologia de la física

Orientacions conceptuals, pedagògiques i didàctiques per a l'ensenyament de la termodinàmica en el context de formació de professors.

Marina Garzón Barrios (mgarzonb@pedagogica.edu.co). Professora Departament de Física. Facultat de Ciència i Tecnologia. Universitat Pedagògica Nacional (Colòmbia).

Doctorat en Didàctica de les Ciències, Llengües, Arts i Humanitats. Facultat d'Educació.

Àrea: Didàctica de les Matemàtiques i Ciències Experimentals.

Universitat de Barcelona. Catalunya. Espanya.

RESUM

La investigació que es presenta a la memòria de Tesi Doctoral sorgeix en el context de la formació de professors de física motivada per la intencionalitat pedagògica de trobar orientacions per significar i afavorir l'estructuració i comprensió dels fenòmens físics per a ensenyament – aprenentatge de la física a mitjançant un acostament fenomenològic.

És una investigació de tipus qualitatiu-descriptiu que parteix de constatar que en ensenyament de la física es continua assumint majoritàriament que el contingut conceptual de la ciència és estàndard, uniforme i estretament compartit per tota la comunitat científica, que es construeix per vies úniques, les quals representacions formals són universals, i on el treball del professor és transmetre'l sense qüestionaments. Tot i així, veiem com aquestes mirades coexisteixen amb un ampli nombre d'investigacions que exemplifiquen la diversitat d'estratègies a través de les quals s'ha desenvolupat el coneixement científic, les mirades contrastants en la manera de comprendre i produir fenòmens, i la creativitat de l'activitat científica en la producció i la validació d'aquest coneixement.

Per tant, hem centrat la recerca en la identificació de trets o estratègies en la formació de conceptes a través d'un cas de la física que tracta de l'estudi dels fenòmens tèrmics, per tal de derivar-hi criteris pedagògics i didàctics per a l'ensenyament-aprenentatge de les ciències per al professorat. Ens vam apropar als estudis històrico-crítics i epistemològics de la ciència per tal de dissenyar i implementar una seqüència didàctica de termodinàmica adreçada a la formació del professorat universitari: professorat de física i de ciències que treballa a secundària. Ens hem proposat caracteritzar els processos de formalització implicats en la

conceptualització, modelització i teorització de les teories de la calor per a la proposta de la seqüència i descriure els desenvolupaments conceptuals elaborats per un grup de professors de l'Especialitat en Didàctica de les Ciències del Grau Bàsic i del Màster. en Docència de Ciències Naturals de la Universitat Pedagògica Nacional de Colòmbia quan s'utilitza la seqüència didàctica.

Els fonaments que van formar part del nostre marc teòric són: en primer lloc, els estudis històrico-crítics de les ciències (Mach, Duhem, Ayala) que ens van portar a l'anàlisi de processos de conceptualització en la història de les teories de la calor. En segon lloc, diversos estudis en el context de l'epistemologia i la filosofia de la ciència, els objectes d'estudi dels quals són: el coneixement científic, la funció i l'estructura de les teories científiques i més recentment el paper de les dades observacionals i l'experimentació en la producció d'explicacions i criteris de validació de la ciència, ens van conduir a adoptar la perspectiva fenomenològica de Maurice Merleau Ponty que entreteixim amb l'orientació fenomenològica de Paolo Guidoni i la seva escola. Influenciades per la visió d'aquests autors, generem un enfocament fenomenològic particular cap a l'ensenyament de les ciències i la investigació a l'aula. En tercer lloc, van aportar en la comprensió de processos cognitius, els estudis sobre l'organització conceptual (Piaget) i intersubjectiva (Vygotsky, Bruner, entre d'altres), i la noció dels camps conceptuals (Vergnaud) com a estructures organitzatives de la conceptualització en ciències. Així mateix, els estudis sobre els processos de formalització lligats al desenvolupament del llenguatge verbal i a altres formes d'expressió (fórmules, representacions no verbals) a l'organització de fenòmens (Guidoni, Balzano, Rangel), tant com aquelles investigacions realitzades sobre concepcions científiques i formes de raonar en ciències (Guidoni, Vicentini, Besson).

En conclusió, els estudis històrics de la física i la perspectiva fenomenològica per a l'ensenyament van proporcionar orientacions conceptuals, pedagògiques i didàctiques per a l'ensenyament de la termodinàmica en el context de formació de professors.

Universitat de Barcelona (Barcelona). 2023

Paraules Clau:

Història i ensenyament de la física, Epistemologia i Filosofia de les ciències, Fenomenologia, Estudis històric – crítics, Processos de formalització, Formació de docents, Termodinàmica.

The history, epistemology and phenomenology of physics

Conceptual, pedagogical and didactic orientations for the teaching of thermodynamics in the context of teacher training.

Marina Garzón Barrios (mgarzonb@pedagogica.edu.co). Teacher, Physics Department. Faculty of Science and Technology, Universidad Pedagógica Nacional (Colombia). PhD in Didactics of Science, Languages, Arts and Humanities Faculty of Education. Area: Didactics of Mathematics and Experimental Sciences. Universitat de Barcelona. Catalunya. Spain.

ABSTRACT

The research presented in the doctoral thesis report arises in the context of the training of physics teachers motivated by the pedagogical intention to find guidelines to mean and promote the structuring and understanding of physical phenomena for the teaching-learning of physics by means of a phenomenological approach.

This is a qualitative-descriptive type of research that starts from the observation that in physics teaching it is still mostly assumed that the conceptual content of science is standard, uniform and widely shared by the whole scientific community, that it is built by unique ways, whose formal representations are universal, and where the teacher's job is to transmit it without questioning. Even so, we see how these views coexist with a wide range of research that exemplifies the diversity of strategies through which scientific knowledge has developed, the contrasting views on the way in which phenomena are understood and produced, and the creativity of scientific activity in the production and validation of this knowledge.

Therefore, we focused the research on identifying features or strategies in the formation of concepts through a case of physics that deals with the study of thermal phenomena, in order to derive from there pedagogical and didactic criteria for the teaching-learning of science for teachers. We approached the historical-critical and epistemological studies of science in order to design and implement a didactic sequence on thermodynamics aimed at university teacher training: physics and science teachers working in secondary education. We set out to characterise the formalisation processes involved in the conceptualisation, modelling and theorisation of heat theories for the proposal of the sequence and to describe the conceptual

developments elaborated by a group of teachers of the Specialisation in Science Teaching for the basic level and Master's Degree in Natural Sciences Teaching of the National Pedagogical University in Colombia when using the didactic sequence.

The foundations that will form part of our theoretical framework are: firstly, the historical-critical studies of science (Mach, Duhem, Ayala) that will lead us to the analysis of processes of conceptualisation in the history of theories of heat. Secondly, various studies in the context of epistemology and philosophy of science, the objects of study of which are: scientific knowledge, the function and structure of scientific theories and more recently the role of observational data and experimentation in the production of explanations and criteria for the validation of science, led us to adopt the phenomenological perspective of Maurice Merleau Ponty, which we intertwined with the phenomenological orientation of Paolo Guidoni and his school. Influenced by the vision of these authors, we generate a particular phenomenological approach to science teaching and research in the classroom. Thirdly, studies on conceptual organisation (Piaget) and intersubjective organisation (Vygotsky, Bruner, among others), and the notion of conceptual camps (Vergnaud) as organisational structures of conceptualisation in science contributed to the understanding of cognitive processes. Likewise, studies on the processes of formalisation linked to the development of verbal language and other forms of expression (formulas, non-verbal representations) in the organisation of phenomena (Guidoni, Balzano, Rangel), as well as research on scientific conceptions and ways of reasoning in science (Guidoni, Vicentini, Besson).

In conclusion, the historical studies of physics and the phenomenological perspective for teaching will provide conceptual, pedagogical and didactic orientations for the teaching of thermodynamics in the context of teacher training.

University of Barcelona, Barcelona. 2023

Keywords: History and teaching of physics, Epistemology and philosophy of science, Phenomenology, Historical-critical studies, Formalization processes, Teacher training, Thermodynamics.

Introducción

El presente trabajo de investigación surge en el contexto de la formación de profesores de física motivado por la intencionalidad pedagógica de encontrar orientaciones hacia: 1) la producción de sentido en el aula de clase a través de la estructuración y comprensión de los fenómenos físicos, en particular de los fenómenos térmicos, 2) la creación de escenarios significación para la enseñanza de la física.

El trabajo hace énfasis en el estudio de los procesos de formalización conceptual y teorización porque consideramos que la caracterización de estos procesos aporta rasgos para responder ¿cómo se construye el conocimiento sobre el mundo físico? pregunta fundamental para propiciar estrategias que aporten en la construcción de conocimiento en física en las aulas. Es habitual que la enseñanza de las ciencias se focalice en utilizar los resultados del conocimiento científico: definiciones, teorías, instrumentos tecnológicos, experimentos, etc. y en menor medida se enfoque en los procesos constructivos de ese conocimiento: cómo se llega a establecer cierto tipo de afirmaciones sobre un fenómeno natural, cómo operamos para llegar a ese conocimiento, qué estrategias cognitivas utilizamos para saber lo que sabemos, con qué finalidad.

Observamos que en la enseñanza de la física se continúa asumiendo que el contenido conceptual de la ciencia es estándar, uniforme y estrechamente compartido por toda la comunidad científica, que se construye por vías únicas, que sus representaciones son universales, y que el trabajo del profesor es básicamente transmitirlo. Sin embargo, vemos cómo estas miradas coexisten con un amplio número de investigaciones que ejemplifican la diversidad de estrategias a través de las cuales se ha desarrollado el conocimiento científico, las miradas contrastantes en la forma de comprender y producir fenómenos, y la creatividad de la actividad científica en la producción y validación de ese conocimiento.

Desde este panorama, consideramos importante vincular la formación de profesores de física con los problemas de construcción de conocimiento en la disciplina, porque consideramos que el conocimiento es un conjunto de procesos y acciones que nos permiten comprender y actuar en el mundo que nos rodea a través de interrogantes. Por una parte, creemos que este vínculo aporta en el fortalecimiento de la comprensión disciplinar, y por otra, que genera concepciones sobre las dinámicas de la actividad científica; sobretodo pensamos que sitúa al

profesor como sujeto implicado en la organización de conocimiento y constructor de significados sobre el mundo, en el aula de clase.

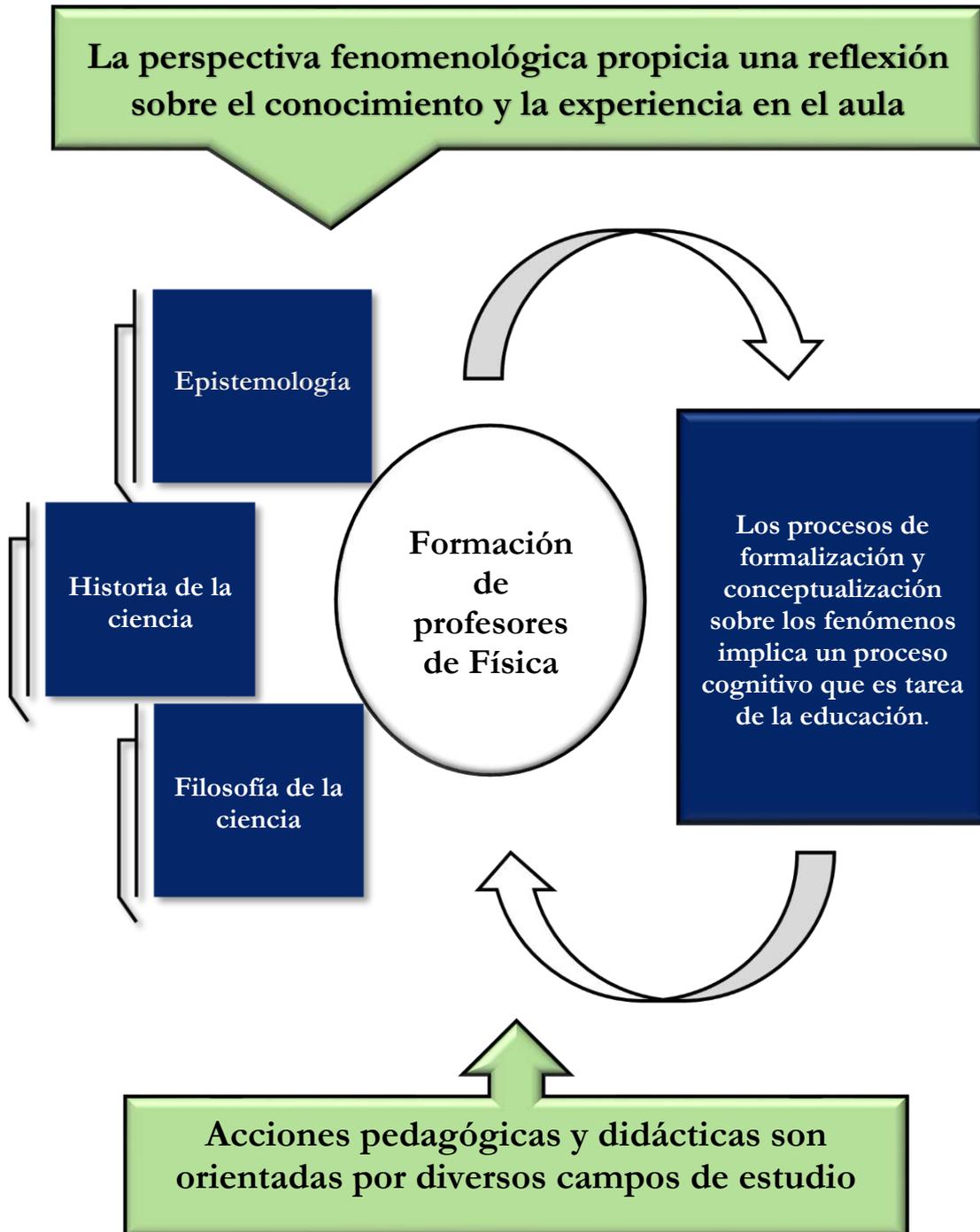


Imagen 1. La formación de docentes un territorio de construcción de significados.

De acuerdo con lo anterior, enfocamos la investigación en identificar rasgos o estrategias en los procesos de formación conceptual para la enseñanza - aprendizaje de las ciencias a través de un caso de la física que se centró en el estudio de los fenómenos térmicos, para lo cual se hizo un acercamiento a los estudios histórico – críticos y epistemológicos de las ciencias. Nos propusimos caracterizar los procesos de conceptualización, modelización y teorización en la organización de las teorías del calor a los que denominamos *procesos de formalización*, para desde esta caracterización derivar criterios pedagógicos y didácticos que surgen de este estudio particular, y que consideramos que aportan orientaciones para la enseñanza de los fenómenos térmicos en el contexto de formación de profesores.

En este sentido, caracterizar los procesos de conceptualización, modelización y teorización sobre los fenómenos térmicos ha sido también una estrategia para identificar cómo orientar una comprensión de la física desde su historicidad, que proporcione fundamentos para la selección y estructuración de fenómenos o temáticas que pueden ser trabajados como objetos de estudio con docentes en formación. Hacemos del análisis de los estudios históricos de las ciencias un instrumento de reflexión sobre la ciencia misma, en relación con los fenómenos que estudia, considerando que esta reflexión permite ubicar los contextos de producción del conocimiento científico y dinamizar los contextos de enseñanza-aprendizaje para la reinterpretación y configuración del conocimiento científico en las aulas.

En este caso, nos ocupamos de la termodinámica como objeto de estudio para la enseñanza-aprendizaje, con una doble intencionalidad: 1) la comprensión de los fenómenos térmicos, y 2) la comprensión de la organización conceptual que derivó en la construcción de una perspectiva sistémica que es el marco paradigmático contemporáneo para abarcar procesos de todo tipo, que incluyen desde luego los procesos físicos, químicos y biológicos. La termodinámica efectivamente aportó a las ciencias la lógica de pensar los fenómenos identificando sistemas y transformaciones globales.

David Jou (1999) muestra dos grandes aspectos de los que trata la termodinámica, el cambio y la conservación:

Parmènides i Heràclit havien discutit, el segle V abans de Crist, si la conservació o bé el canvi són la característica més profunda de l'Univers. Per al primer autor, l'ésser del món és immutable; per al segon, el món és un canvi constant. En la termodinàmica trobem dos grans principis, referits també a la conservació i al canvi: el primer estableix la conservació

de l'energia i posa de manifest, doncs, una característica immutable de l'univers; el segon es refereix a la degradació de l'energia (o increment de l'entropia) i subratlla el canvi sobre les permanències.

El primer principi s'ha estudiat tradicionalment dins de la termologia, de vegades, sense dir-ne primer principi de la termodinàmica. El segon principi ja entra de ple en un dels conceptes fonamentals de la termodinàmica i que té, i ha tingut, molta transcendència (també) en altres àmbits fora de la física. (Jou, Escrits fonamentals sobre el segon principi de la termodinàmica, 1999)

Expresa, también, la importancia de esta ciencia en su contexto histórico y cultural. Desde los años 60s se ha ido extendiendo, con mayor frecuencia, la opinión de que los conocimientos sobre la historia y epistemología de la ciencia son saberes fundamentales que deben ser incluidos en la formación de los profesores de ciencias, para que mediante esta formación los profesores tengan una visión abierta sobre cómo se desarrolla la actividad científica, y en particular, sobre cómo se han ido construyendo los conceptos, modelos y las teorías de la ciencia, así como los lenguajes de formalización que son propios de sus distintos campos de estudio. El consenso es que este conocimiento puede facilitar orientaciones fundamentadas para el desarrollo de actividades escolares y secuencias didácticas.

En particular, nosotros consideramos que sería útil para los docentes reconocer que, algunas de las teorías interpretativas sobre los fenómenos térmicos se sustentan en construcciones explicativas basadas en supuestos muy distintos entre sí, por no decir opuestos en muchos casos. El reconocer esa diversidad de formas de explicación podría favorecer su visión crítica del desarrollo de la ciencia y de sus propias comprensiones, y favorecer también la visión de la diversidad de explicaciones que pueden surgir en el aula.

Consideramos que el contexto de la historia y epistemología, especialmente de la que va ligada a la nueva filosofía de la ciencia¹ (Duschl, 1990; Echevarria, 1995; Moulines 1987), les ayudaría a comprender las dificultades actuales en su enseñanza-aprendizaje, a ser críticos con los libros de texto que se usan para la enseñanza, que en muchas ocasiones son la guía en sus actividades. En consecuencia, por su acercamiento a estas problemáticas, los docentes

¹ Utilizaremos los términos: Epistemología y Filosofía de las ciencias en el sentido que asigna Gregorio Klimovsky, en su obra *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*. Klimovsky restringe la palabra epistemología al estudio sobre el conocimiento científico en particular, dice: *“la epistemología sería, entonces, el estudio de las condiciones de producción y validación del conocimiento científico”*. Por otra parte, señala que aunque estén estrechamente vinculadas, *“la filosofía de la ciencia, abarca muchos problemas que no son estrictamente epistemológicos. Un problema filosófico sería, por ejemplo, tratar de decidir si la realidad objetiva existe o es una ilusión de los sentidos”* un problema que no atañe a la epistemología. (Klimovsky, 1997, págs. 27-28)

podrían adquirir criterios de orden pedagógico para diseñar propuestas y/o materiales didácticos propios que contemplen reconstrucciones conceptuales y que tengan sentido para ellos por su historia y epistemología, y sobre todo por la fenomenología con la que están relacionadas.

Diversos autores (Bachelard, 1938; Carey, 1985; Piaget & García, 1983; Driver, 1983; Viennot, 1996; Vicentini, 1996; Guidoni, 1984; Besson, 2007; etc.) que han revisado la historia de la ciencia consideran que se pueden establecerse paralelismos entre algunas concepciones presentes en la historia y aquellas que muestran nuestros estudiantes o algunos de los libros de texto que se usan en las universidades y en escuelas de secundaria, sobre la comprensión de la termodinámica.

Por lo tanto, para nuestro propósito fue de gran ayuda conocer los resultados de investigaciones realizadas sobre concepciones y tendencias de razonamiento de los estudiantes en termodinámica (Vicentini, 1999), así como identificar las dificultades más comunes que pueden aparecer en las investigaciones sobre su enseñanza-aprendizaje (Besson, 2014), para poder orientar el proceso formativo de profesores de secundaria en relación al campo de la termodinámica, y entre otros también fueron muy útiles los estudios sobre los procesos de formalización ligados al desarrollo del lenguaje verbal y de otras formas de expresión en la comprensión de fenómenos y su comunicación (Guidoni, 1986; Balzano, 2007; Fagúndez, 2006; Rangel, 2020).

En definitiva, nuestro punto de partida fue considerar que en la formación de profesores se ha de profundizar en la recontextualización de la historia y epistemología de la ciencia, pero no para formar expertos en historia de la ciencia, y/o en epistemología, sino para formar profesores cuya visión histórica y epistemológica les permita hacer sus propias reconstrucciones conceptuales y teóricas para sus aproximaciones didácticas, incorporando en todo momento formalizaciones correspondientes con sus modelos construidos. Teniendo en consideración que en nuestras comunidades hay una diversidad y pluralidad epistémológica que corresponde ser explorada por los mismos docentes. (Olivé, y otros, 2009)

En este contexto, la investigación fue tomando un rumbo particular en el cual la perspectiva fenomenológica se convirtió en un referente tanto para abordar los fenómenos térmicos como para investigar sobre la experiencia de construcción de conocimiento en el aula. El

pensamiento fenomenológico permitió fortalecer una mirada constructivista y epistemicamente plural, al hacer énfasis sobre la experiencia de los sujetos vista como un agente de organización del conocimiento en la cual las percepciones, las vivencias, las reflexiones de los sujetos sobre el mundo físico son significativas por su práctica y su contexto, este énfasis demarca un sentido para la enseñanza y el aprendizaje desde el cual son los intereses de conocimiento de los sujetos colectivos los que en su práctica cognitiva enriquecen los significados sobre sus problemas de estudio. Así, quien investiga en y para el aula, quien enseña, quien aprende, todos estamos involucrados en la acción de conocer y ampliar nuestras propias experiencias intersubjetivas, en este sentido la perspectiva fenomenológica articula un campo tan complejo como la enseñanza de las ciencias y en el que confluyen diversas disciplinas, saberes y culturas.

En esta memoria se han resumido nuestras reflexiones e indagaciones que parten de reconocer la diversidad epistemológica en relación con la formación de conceptos, modelos, teorías o representaciones en el estudio de la historia de las teorías del calor. Esta diversidad epistemológica nos conduce a generar una perspectiva sobre la enseñanza de la física orientadora de la formación de profesores de física en particular, o de ciencias en general.

En el capítulo 1: Campo temático y planteamiento de la problemática, presentamos cómo la formación de conceptos y la teorización han sido problemas de estudio tanto en la ciencia como en su enseñanza, entretejiendo una problemática que involucra los estudios históricos, filosóficos/epistemológicos, y que nos muestra los retos para plantear propuestas de enseñanza, y la posibilidad de generar criterios pedagógicos y didácticos utilizando como recursos la historia, la epistemología y la filosofía de las ciencias. A partir de esto contextualizamos las preguntas y objetivos de esta investigación.

En el capítulo 2: Diseño metodológico, mostramos cómo hemos tenido que transitar etapas de investigación diferenciadas por sus métodos, que corresponden a: 1) el estudio de los episodios históricos de las teorías del calor, que requieren adoptar un método de análisis histórico-crítico 2) la configuración de una secuencia didáctica sobre los fenómenos térmicos que selecciona aspectos derivados de los estudios históricos de las teorías del calor, 3) la incorporación de la perspectiva fenomenológica como lugar de comprensión del conocimiento científico y como metodología de investigación en el aula, 4) la implementación de la secuencia didáctica y la documentación fenomenológica de la

experiencia en el aula. A través de estas etapas detallamos el proceso de formalización: conceptualización, modelación y teorización sobre el estudio de los fenómenos térmicos.

En el capítulo 3: Conceptualización, modelación y teorización en física. Reflexiones desde la filosofía de la Ciencia, profundizamos en el marco epistemológico que delimita la propuesta. Reflexionamos sobre las posturas interpretativas respecto a *los procesos de formalización*, discutiendo cómo hemos llegado a: 1) asumir una perspectiva fenomenológica que se encuentra en consonancia con la selección del método de investigación en el aula, 2) significar qué entendemos por conceptualización, modelación y teorización en ciencias.

Los capítulos 4 y 5, titulados respectivamente, 4: La doctrina de los calores, y 5: De las propiedades de las sustancias a las propiedades de los sistemas; aunque diferenciados entre sí, corresponden a los estudios histórico-críticos que hemos realizado sobre las teorías del calor, y tienen el propósito de describir procesos de formalización en el desarrollo histórico en el estudio de los fenómenos térmicos, estudiamos obras emblemáticas del campo de la calorimetría y de la termodinámica clásica elaboradas por Joseph Black (1766 -1799), Lavoisier y De Laplace (1780), Sadi Carnot (1824), Emile Clapeyron (1834) y Rudolf Clausius (1856) entre los siglos XVIII y XIX. A partir de estas descripciones caracterizamos desarrollos conceptuales de estos periodos históricos, uno de los dos grandes objetivos de nuestra investigación.

En el capítulo 6, Reflexiones para orientar la enseñanza: La termodinámica, un campo de estudio polémico y polisémico, mostramos la diversidad epistémica en la que se ha desarrollado y se encuentra actualmente la termodinámica, diversidad que conlleva a ubicar un contexto problemático en relación con la búsqueda de un enfoque para la enseñanza de la termodinámica.

En el capítulo 7, Estudios para el diseño de la secuencia e intervención didáctica, describimos 1) los criterios pedagógicos y didácticos que orientan el diseño de una secuencia didáctica titulada: Organización De Los Fenómenos Térmicos.

En el capítulo 8, La Documentación fenomenológica, describimos la experiencia de formación con profesores de ciencias de la especialización y maestría en Docencia de las Ciencias Naturales de la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, en el curso llamado Organización de los Físicos: Fenómenos Térmicos. Proponemos las dimensiones de análisis

con las cuáles pretendemos dar cuenta de los procesos de organización conceptual en relación con las fuentes primarias y los experimentos exploratorios que desarrollaron los docentes.

En el capítulo 9, Resultados y discusión respecto a la documentación, distinguimos aquellas estrategias de organización conceptual en el estudio de las teorías del calor, que nos permiten señalar rasgos comparativos del proceso en el desarrollo histórico de la ciencia y en las actividades desarrolladas por los docentes participantes de la investigación.

En el capítulo 10, Conclusiones generales, recapitulamos sobre esta propuesta de investigación, señalamos hasta qué punto cumplimos con los objetivos y cómo respondimos a nuestras preguntas, concluyendo sobre los conocimientos obtenidos a lo largo de su desarrollo, en concreto sobre implicaciones didácticas de los resultados obtenidos, así como sobre las limitaciones y posibles ampliaciones de nuestros estudios.

En el apartado número 11, Bibliografía presentamos las fuentes de referencia de la memoria escrita.

En el apartado número 12, Anexo 1, se presenta la secuencia didáctica titulada: Organización De Los Fenómenos Térmicos, que es una primera aproximación didáctica sobre fenómenos térmicos que incluye la selección textos históricos (fuentes primarias y secundarias), las actividades y los experimentos con los cuales se pretendió fortalecer la conceptualización de los estudiantes sobre la termodinámica clásica.

Finalmente, en el apartado número 13, Anexo 2, se presentan las Actividades para la consolidación de experiencia investigativa en enseñanza de las ciencias 2016 -2023, actividades que se han desarrollado paralelamente con el desarrollo de esta investigación y que han permitido acrecentar experiencia en el campo de la enseñanza de la física desde la perspectiva fenomenológica con énfasis en la actividad experimental para la enseñanza de fenómenos físicos.

1 Campo temático y planteamiento de la problemática

☞ Presentamos a continuación cómo la formación de conceptos, modelos y la teorización han sido problemas de estudio tanto en la ciencia como en su enseñanza, entretejiendo una problemática que abarca los estudios históricos, filosóficos, pedagógicos y didácticos. A partir de esto contextualizamos nuestra pregunta y objetivos de investigación. Exponemos nuestras reflexiones sobre la mirada epistemológica, filosófica e histórica que ha aportado elementos de discusión sobre la formación de conceptos, modelos y teorías científicas, sobre cómo se estructuran y se expresan en lenguajes formales, constituyendo sobre este aspecto un problema de estudio vigente.

1.1 La formación de conceptos, modelos y teorización como problema de estudio de la epistemología, la filosofía y la historia de las ciencias

El fin del siglo XIX es un periodo interesante en la historia de la física para entender por qué los procesos teorización y de formación de conceptos se convierten en un problema de análisis tan importante para los físicos y los filósofos.

La mayoría de científicos de esta generación veía en la mecánica el mejor modelo para conseguir que de un principio general, o de unos pocos principios, se derivaran múltiples casos particulares y que se lograra así reunir fenómenos aparentemente desligados bajo una misma estructura teórica, siguiendo el modelo de *La Mécanique Analytique* (Lagrange, 1811)²; o el de *A Treatise on Electricity and Magnetism* (dos volúmenes, Maxwell, 1873)³. Estos dos tratados fueron ejemplos máximos de la organización teórica del siglo XIX y, por lo tanto,

² Joseph Louis Lagrange (1736-1813) reformuló entre 1772 y 1788 la Mecánica clásica de Isaac Newton para simplificar fórmulas y facilitar los cálculos. Esta mecánica reformulada se llama *Mecánica Lagrangiana*, y es el origen de la *Mecánica Analítica*. Su monumental *Tratado de Mecánica Analítica* (que reformuló su anterior texto de mecánica analítica el 1811) recoge, completa y unifica los conocimientos acumulados desde Newton. Este libro, para sus contemporáneos una referencia, es una apología de la utilización de las ecuaciones diferenciales en mecánica, en el mismo partiendo de la ley del Trabajo virtual, que toma como un principio fundamental, y con el uso del cálculo diferencial, deduce toda la mecánica de sólidos y de líquidos. El objeto del Tratado es mostrar que la mecánica está implícitamente incluida en un solo principio, que permite dar fórmulas generales de las que puede obtenerse cualquier resultado particular.]

³ James Clerk Maxwell (1831-1879).

mostraban ejemplarmente una supuesta superioridad de la física y de su estructura teórica frente a otras disciplinas de la ciencia y de las humanidades (Staley, 2008)⁴.

Para explicar cómo se formulaban los principios generales y unificadores en la física era necesaria una reflexión sobre cómo la mecánica había avanzado en esta dirección. El físico y matemático austriaco Ernst Mach (1838-1916) publicó, en 1883, un trabajo titulado *Die Mechanik in ihrer Entwicklung Historisch-kritisch Dargestellt* (Desarrollo histórico-crítico de la mecánica, Mach, 1949), en el cual hacía una revisión histórica de los principios de la mecánica notando cómo estos principios habían sido organizados en un vínculo muy estrecho con la práctica experimental.

En relación con este estudio de 1883, Mach invitó a tratar la mecánica como una de las ciencias físicas y no como una rama de las matemáticas, y señaló además que sólo la práctica experimental desplazaría cualquier mirada metafísica del estudio de las ciencias. Otra obra que publicó solo tres años después fue *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, Jena, 1886⁵ (El análisis de las sensaciones), ayuda a entender su orientación epistemológica⁶, pues Mach sostuvo que para la ciencia no hay afirmación de conocimiento que se pueda admitir a menos que se pueda comprobar empíricamente.

Esa corriente se denominó el empiriocriticismo y se fundamentó como teoría de conocimiento por Mach y por el filósofo austriaco Richard H. L. Avenarius⁷ (1843-1896) con

⁴ Staley, Richard (2008) *The Fin de Siècle Thesis* First published: 12 December 2008, *Journal Citation Reports* (Clarivate, 2023): (History & Philosophy of Science (Science) Volume 31, Issue 4. Special Issue: The Cultural Alchemy of the Exact Sciences: Revisiting the Forman Thesis. Pages: 303-427 This paper examines the relations between John Heilbron's argument that fin de siècle physicists adjusted the image and substance of their discipline to cultural concerns, and Paul Forman's approach to a causality in the Weimar period. In addition to their focus on representation rather than truth, adherents of the "descriptionist" epistemologies that Heilbron identified also promoted an emphasis on method, statistical rather than causal explanations, historical understandings of epistemology, and stressed the relations between physics and other disciplines. Their views provide an intellectual context – within the physics discipline – for at least some part of what Forman had described as a capitulation to the hostile social environment expressed in Oswald Spengler's *Der Untergang des Abendlandes*.

⁵ Ernst Mach (1886) *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, Traducción: *El análisis de las sensaciones*, Alta Fulla Editorial, 1987 (traducido ya en 1925)

⁶ Mach además de ser muy buen matemático y físico, se ocupó de la filosofía, la psicología y la fisiología, y rechazó de forma contundente toda metafísica y religiosidad en su pensamiento sobre el conocimiento científico, convirtiéndose así en uno de los representantes más destacados del positivismo renovado de inicios del siglo XX.

⁷ Profesor de filosofía en Zúrich desde 1877 hasta poco antes de su muerte, desarrolló, independientemente de Mach una orientación filosófica fenomenológica parecida a la de Mach. Ambos empezaron una correspondencia el 1882, y Mach intentó en vano que pudiera hacer una estancia profesional en Praga, donde él fue profesor e inició su segundo rectorado el 1882, pero que no lo consiguió. Fue Avenarius que llamó a su

quien compartía la idea de que todo conocimiento se origina en la sensación, y se consideró un acercamiento fenomenológico ya que surgía de fundamentar la construcción del conocimiento en los fenómenos, o sea, en la experiencia. En este sistema filosófico, las teorías físicas se establecen en el proceso de organización de las sensaciones, por esto el empiriocriticismo se convirtió para ellos en una teoría general de la experiencia desde el punto de vista formal (Carstanjen, 1897)

Empiriocriticism, on the other hand, takes up the position that everything is experience when it has been stated as experienced by an individual—though it may be that primarily it is only experience for this one individual in question. (If, e.g., a child states that it has seen angels, then the angels are an experience for the child.) But then we investigate the difference between this concept of experience which is valid for the individual and the concept of experience which is universally valid [...]. Thus empiriocriticism also approaches experience critically, but it does not determine its concept of experience beforehand; it begins by admitting everything as experience, provided only that it is at the moment predicated and characterised as experience by an individual. It does not arbitrarily limit its sphere, but says: If I am to approach experience critically, then I must include in the object of my investigation all predications which contain an experience; I must not prejudge the question of true and false, for the decision as to that can only follow from the theory. (Carstanjen, 1897, pág. 451).

En el mismo sentido, Pierre Duhem⁸ (1861-1916) expresaba en 1906 en su libro *La théorie physique son objet et sa structure* que la teoría física es una construcción artificial, fabricada mediante magnitudes matemáticas; que la relación entre esas magnitudes y las nociones abstractas surgidas de la experiencia es simplemente la relación que se establece entre los signos y las cosas representadas; que la teoría es como un cuadro sinóptico, un esquema capaz de resumir y clasificar las leyes de la observación (Duhem, 2003, pág. 364).

fenomenología “empirio-criticismo”, un título que se utilizó bastante hasta la primera Guerra Mundial. La influencia de Avenarius, así como la de March en relación a su epistemología, empezó a decaer con el cambio de siglo, en parte por la muerte de Avenarius, pero también por el aumento del prestigio científico de Mach⁷ y por el hecho que los libros de filosofía de Mach eran mucho más fáciles de leer que los de Avenarius. En esta corriente también se abordó una crítica a la experiencia (empirio-criticismo), a pesar de no haber precisado de antemano cuál es su concepto concreto de experiencia.

⁸ Pierre Duhem⁸ (1906) *La théorie physique son objet et sa structure* Traducción : Duhem (2003) *La teoría física, su objeto y su estructura*. Editorial Herder.

Mientras tanto Henry Poincaré (1854-1912) argumentaba la existencia de dos fuertes tendencias válidas y contrarias para la explicación de los principios físicos -la mecánica y la energética en su libro *Mécanisme et Expérience* (1893), y defendía el gran valor de la experiencia en la elaboración de estos principios, resaltando, a su vez, que las leyes experimentales no podían ser otra cosa más que leyes aproximadas.⁹

Las publicaciones de estos autores: *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen* (Mach, 1986); *Mécanisme et Expérience* (Duhem, 1893), *Science et Hypothesis* (1902); *The Théorie Physique, son Object et sa Structure* (Duhem, 1906) centraron esta gran temática sobre los procesos perceptivos, las leyes empíricas y los criterios organización de la teoría física. También, con estos escritos Mach, Duhem y Poincaré tocaron dos puntos sensibles para la física de la época, por una parte, mostraron la debilidad existente en la pretensión de explicar todos los fenómenos naturales por principios mecánicos, y por otra, pusieron en tela de juicio el realismo cerrado de las teorías físicas sobre el cual se basaba la credibilidad en la ciencia. Así, sentaron las bases de un problema central en filosofía de las ciencias, en palabras de (Suppe, 1979):

Si hay algún problema en la filosofía de la ciencia que, con razón, se puede proclamar el más céntrico o importante es el de la naturaleza o estructura de las teorías científicas, porque las teorías son el vehículo del conocimiento científico y de un modo u otro resultan implicadas en la mayoría de los aspectos de la empresa científica si no fuera por las teorías no habría ningún problema de entidades o términos teóricos ni de confirmación ni de significancia cognoscitiva. (Suppe, 1979, *Las estructuras de las Teorías Científicas*, pág. 15) (Traducción de: Castrillo y Rada).

Bajo la influencia de Mach¹⁰, y en medio de este contexto intelectual motivado por responder a preguntas sobre: ¿cómo conocemos?, ¿cómo se construye el conocimiento, en general?

⁹ Poincaré 1893 *Mécanisme et Expérience* (Traducción, Poincaré, 1902 *MecanismoMecanicismo y experienciaExperiencia*, Pág. 183)

¹⁰ Mach influyó directamente en la formación del Círculo de Viena, representado jurídicamente por la Asociación Ernst-Mach, después de su muerte, a pesar de la existencia de varias divergencias entre las posiciones de los positivistas lógicos y las del físico. El Círculo de Viena estaba formado por un grupo de filósofos y científicos que compartían unas bases comunes pero que diferían en otros muchos temas. Los miembros del Círculo de Viena se proponían desarrollar las reglas lógicas consistentes que permitiesen decir que unas afirmaciones teóricas se derivaban de determinadas afirmaciones observacionales. Se proponían así el análisis y la reconstrucción lógica de las teorías científicas, entendiendo por lógica, algo intemporal, no sometido a variables históricas, sociológicas o psicológicas. Su modelo de ciencia estaría basado en lo que se ha llamado más adelante “el contexto de la justificación”: lo que es válido de las ciencias es el conocimiento teórico,

¿cómo se construye el conocimiento científico, en particular? ¿cuáles son las características de estas construcciones? germinan el círculo de Viena y sus discusiones, que llevaron a interesarse por la forma de producción del lenguaje y su vínculo con la formación de conceptos, la lógica y las representaciones simbólicas, y el papel de las sensaciones en todos estos procesos mentales (Stadler, 2010).

De ahí surgen publicaciones como las de Rudolf Carnap (1891 -1970) o Carl Gustav Hempel (1905 -1997): *La fundamentación lógica de la física* (Carnap, 1966), *Los fundamentos de la formación de conceptos en la ciencia empírica* (Hempel, 1988), *La explicación científica* (Hempel, 1988), entre otros trabajos, interesados por desentrañar la lógica o las leyes del pensamiento científico. El objetivo central fue eliminar de los enunciados científicos aquellos enunciados que pudieran considerarse como no verificables empíricamente: enunciados subjetivos o metafísica.

One of the most important distinctions between two types of laws in science is the distinction between what may be called (there is no generally accepted terminology for them) empirical laws and theoretical laws. Empirical laws are laws that can be confirmed directly by empirical observations. The term “observable” is often used for any phenomenon that can be directly observed, so it can be said that empirical laws are laws about observable. Carnap (*Philosophical Foundations of Physics*, 1966)¹¹.

Esta escuela de pensamiento, llamada también neopositivismo o positivismo lógico, considerada por los epistemólogos y filósofos de la ciencia como la escuela clásica de filosofía de la ciencia, o concepción heredada, y de la cual se criticó -en extenso- su pretensión por mostrar que la teoría científica era el resultado de la correspondencia lógica entre operaciones axiomáticas e interpretaciones observacionales (Suppe, 1979). En otras palabras, se criticó su pretensión de reducir todas las expresiones de la ciencia a una estructura de análisis sintáctico, y, además, sugerir que es posible eliminar la cosmovisión de quienes hacen los enunciados

matematizado, que se obtiene mediante el método científico hipotético-deductivo a partir de la experimentación. El “método científico” constituye así la garantía de la racionalidad científica, porque asegura que el conocimiento teórico se ha obtenido de manera rigurosa y experimental.

La denominación de “empirismo lógico”, y después neopositivismo, es el término que expresa mejor la confluencia entre las dos tradiciones: el empirismo como origen del conocimiento científico a partir de la experiencia, y el racionalismo en tanto que reconoce el valor apriorístico de la lógica y de la matemática. Pero Mach no participa de la concepción cerrada del método científico: hipótesis-deducción-verificación, que rechazaba, sino que ya se acercaba a una postura epistemológica más abierta y crítica, y propia del siglo XX, o sea apunta hacia la Nueva Epistemología del s. XX (Duschl, 1990), (Estany, 1990), (Izquierdo-Aymerich & Adúriz-Bravo, 2003).

¹¹ <https://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/ge/carnap.htm>

de las estructuras teóricas que estas personas generan. Pese a la crítica, estos campos de análisis dirigieron perspectivas filosóficas y epistemológicas que marcaron los movimientos intelectuales del siglo XX, en los cuales, la lingüística y la psicología enfocaron su mirada sobre las formas de adquisición, organización y/o procesamiento de la información que obtenemos del entorno, preguntándose cómo los sujetos asignamos significados a esa información.

Estos estudios posibilitaron un nuevo marco epistemológico para superar dos ideas fundamentales del neopositivismo: 1) que una teoría científica es tan solo un conjunto de conceptos, enunciados, leyes empíricas y formalismos matemáticos que se jerarquizan y se axiomatizan, 2) que el fin último de la teorización es alcanzar un corpus deductivo desde el cual derivar demostraciones y explicaciones sobre los fenómenos.

Así pues, el análisis sobre la formación de conceptos se ha transformado desde los primeros análisis lógico-sintácticos sobre la formación de conceptos hacia el análisis sobre formas de conceptualización o modelación en las teorías científicas, entendiendo estas últimas como sistemas complejos de representación. En relación con la estructura de las teorías se señala que éstas no pueden reducirse únicamente a entidades lingüísticas, o al análisis sintáctico de la estructura lingüística, y estas estructuras se reconocen hoy día desde un enfoque semántico y pragmático en el cual las teorías científicas quedan mejor descritas como conjuntos de modelos que como conjunto de enunciados (Guerrero Pino, 2007).

De acuerdo con Carlos Ulises Moulines (1982), las teorías son mucho más que entidades lingüísticas, son objetos culturales producidos por gente en determinados contextos socioculturales, una teoría se concibe como una estructura conceptual compleja cuyas unidades son estructuras elementales, a veces, llamadas modelos, a veces aplicaciones. En otras palabras, al interior de una estructura teórica es posible encontrar diferentes modelos, y no un único modelo estándar (Moulines, 1982). Por lo cual,

una teoría dada consiste en una multiplicidad abierta de modelos o aplicaciones que, por así decir, sistematizan diferentes pedazos de la realidad en el marco conceptual propio de la teoría. Cada modelo o aplicación es una estructura a dos niveles en la que se distinguen dos clases de conceptos: aquellos que son específicos de la teoría en cuestión y que no tienen sentido fuera de ella, y aquellos que presuponen teorías previas y que constituyen algo así como la base confirmatoria de la teoría en cuestión. Es importante observar, sin embargo, que esta distinción entre

dos niveles conceptuales dentro de cada aplicación no tiene nada que ver con la distinción clásica entre un lenguaje observacional y uno teórico, tal como aparece representada principalmente en la obra de Carnap y Hempel. La nueva distinción no es epistemológica, sino funcional, y no es absoluta, sino relativa a cada teoría. (Moulines, 1982, págs. 57 -58).

De estos análisis y reflexiones proviene, la idea que la epistemología, la filosofía y la historia de las ciencias sean consideradas como un fuerte referente para orientar la enseñanza de las ciencias en lo que corre del siglo XXI. Durante los últimos treinta años se han consolidado líneas de trabajo para la didáctica de las ciencias, y para la formación de docentes de ciencias, en las cuales estas discusiones sobre modelos, leyes y teorías se asumen como herramientas metateóricas que generan imágenes menos dogmáticas de la ciencia y conducen a proponer cambios significativos en su enseñanza (Matthews, 1990) (Holton, 2003) (Forato, Martins, & Pietrocola, 2012) (Besson, 2015) (Izquierdo Aymerich, García Martínez, Quintanilla Gatica, & Adúriz-Bravo, 2016) (Ayala Manrique, 2017) (Prestes & Silva, 2018) (Ariza, 2021), entre muchos otros.

1.2 La formación de conceptos, modelos y teorización como problema de estudio para la enseñanza de las ciencias

- ☞ Una vez que ya hemos mostrado cómo la formación de conceptos, modelos y la teorización se convierten en campo de análisis y reflexiones sobre el conocimiento. En el presente apartado nos proponemos argumentar la pertinencia de hacer de este campo temático un problema de estudio en el territorio de la formación de docentes, y con ello un lugar de reflexión para la enseñanza de las ciencias.

En contraste con los análisis sobre los procesos de construcción de conocimiento que han aportado la epistemología, la filosofía y la historia de las ciencias, la formación científica en Colombia -contexto donde se desarrolla esta investigación- ha privilegiado mayoritariamente una enseñanza a través de aprendizajes deductivos, basándose en: la memorización de definiciones, de conceptos, de reglas de operación o algoritmos (Ayala Manrique, y otros, 2008), en otras palabras, la enseñanza de la física se ha centrado en la reproducción de esquemas canónicos (García Arteaga, 2011). Al parecer este puede ser un problema identificado en diversos contextos de enseñanza en Latinoamérica. Los conceptos, dice (Moreira, 2008)

son importantes en el pensar, en el sentir y en el hacer, son fundamentales en la comprensión humana, en el desarrollo científico, en el desenvolvimiento cognitivo. Los conceptos son relevantes en todas partes. Nuestro mundo es un mundo de conceptos. Sin embargo, incomprensiblemente, la importancia de los conceptos es ignorada en la escuela, en especial en la educación científica. Los profesores de ciencias y matemáticas no dan atención a los conceptos, prefieren las fórmulas, los algoritmos, las reglas empíricas, las demostraciones y experimentaciones que siempre funcionan, las preguntas con respuestas predeterminadas. (Moreira, 2008, pág. 9).

Habitualmente estos esquemas canónicos son el principal referente y punto de partida para la enseñanza (Garzón Barrios, Tarazona Vargas, Sandoval Osorio, Malagón Sánchez, & Ayala Manrique, 2020) las teorías se suelen presentar de forma inconexa, e incluso, modelos divergentes se mezclan como si fueran un solo cuerpo teórico, sin que se reflexione sobre su contenido conceptual; de hecho, se asume que ese contenido conceptual es estándar, uniforme y estrechamente compartido por toda la comunidad científica, por ejemplo, esto suele ocurrir en relación con el electromagnetismo al omitirse la coexistencia de dos teorías en oposición: la teoría de campos y la teoría de acción a distancia, también sucede en el

campo de la termodinámica al omitir que existen modelos macroscópicos, modelos microscópicos y modelos mesoscópicos, además, en mecánica clásica o mecánica cuántica se subestima la diversidad de propuestas teóricas sobre la mecánica. La escuela semántica de filosofía de la ciencia contempla que es posible resolver esta gran diversidad de organizaciones teóricas bajo la idea de que hay una teoría, neutral, estándar, matemática a la cual se le pueden asignar diversas interpretaciones.

En medio de este panorama, también se suele considerar:

- que lo conceptual está libre de relaciones formales y matemáticas, énfasis que se manifiesta en textos clásicos como la Física Conceptual de Paul Hewitt,
- que la teoría o la modelación consisten principalmente en matematizar la física, énfasis que se manifiesta en otro libro clásico en enseñanza de la física como la Física Teórica de L. D. Landau y E.M. Lifshitz.

Esta separación entre lo conceptual y lo teórico genera dificultades en los procesos de enseñanza-aprendizaje: en el aprendizaje de teorías se enseñan formulaciones matemáticas que se ejemplifican y se resuelven ejercicios de aplicación, como se suele encontrar en cualquiera de los libros de texto que dirigen la enseñanza en física e ingeniería. Lo cual identifica con enseñar, la trasmisión de las formulaciones teóricas muchas veces acrítica, poniendo en un segundo plano los procesos de construcción de conocimiento (García Arteaga, 2011). Aunque se reconoce también que hay libros de textos que proponen criticidad sobre el contenido científico y rompen estos esquemas, como: The Feynman Lectures on Physics o Física en Perspectiva de Eugene Hecht, no son, sin embargo, lo común para su uso en propuestas de enseñanza.

Romero y Rodríguez señalan que este tipo de separaciones lleva a que se confundan los procesos de matematización de los fenómenos físicos con la aplicación de fórmulas y algoritmos, y al respecto dicen:

Dado que esta situación puede estar siendo ocasionada por las concepciones que tienen los docentes de las relaciones que existen entre los procesos de matematización y la construcción de los conceptos físicos, concepciones que están basadas, a su vez, en determinadas formas de asumir el conocimiento matemático y el conocimiento científico, indagar por la forma en que se materializa tal relación en el ámbito educativo

indudablemente contribuirá a resolver las problemáticas planteadas. (Romero Chacón & Rodríguez Rodríguez, 2003).

Tal panorama sugiere que en el contexto educativo colombiano es necesario propiciar una formación de docentes mucho más consciente de los procesos de formalización en ciencias, que permita reducir la distancia existente entre la enseñanza – aprendizaje de las ciencias y el discurso elaborado por la epistemología, la filosofía y la historia de las ciencias más recientes, que aporte a cualificar el conocimiento del contenido disciplinar de los profesores de ciencias.

De lo expuesto por (Moreira, 2008):

Los conceptos son los grandes olvidados y subestimados en la educación científica. Sin embargo, hay que revertir esa situación tanto en una educación científica para la ciudadanía como en la preparación de futuros científicos. Los conceptos son más importantes que las fórmulas matemáticas, que los «problemas» de papel y lápiz que no son más que ejercicios mecánicos, que los experimentos que siempre «dan cierto», que los «descubrimientos» que ya estaban previstos teóricamente, que el «método científico» como una receta infalible, y tantos otros lugares comunes de la enseñanza tradicional de las ciencias. Sabemos que poco, o nada de eso, queda en los alumnos después que se ven libres de las clases de ciencias. ¿Por qué entonces no dar más atención a los átomos del pensamiento, a los elementos por los cuales se logra y se expresa la comprensión humana, a las verdaderas razones de las revoluciones científicas, a los constituyentes del mundo en que vivimos, al proceso que es la piedra angular del desarrollo cognitivo, es decir, a los conceptos y la conceptualización? (Moreira, 2008, pág. 26).

De esta manera, se resalta que la conceptualización es un asunto amplio en la construcción de conocimiento y piedra angular de los procesos cognitivos, por lo cual es una prioridad hacer énfasis en estos aspectos cuando se trata de la educación científica.

En concordancia, es evidente que la educación científica representa un desafío desde el cual los docentes de ciencias necesitamos involucrarnos con los saberes de una disciplina específica de la ciencia, en este caso la física, y con disciplinas complementarias que apoyen los procesos de construcción de conocimiento de las nuevas generaciones, mientras que tenemos que tomar decisiones respecto a qué enseñar, cómo y para qué enseñarlo.

El problema de la educación científica es, en definitiva, esencialmente análogo al de la colonización de un territorio, en la que el aspecto más importante no es tanto el de saber entrar por el camino correcto, y recorrerlo hasta cierto punto, como el de encontrar criterios con los que proceder, organizando el territorio mismo, dominando las propias

reservas y las propias posibilidades, y tratando de aumentarlo. (Arcá, Guidoni, & Mazzoli, 1990).

En este sentido, un gran reto para los docentes investigadores, y para la formación de docentes, consiste en articular seriamente los aspectos fundamentales de la disciplina científica, lo que tradicionalmente se ha denominado el conocimiento del contenido, y por otra, propiciar escenarios de significación en el aula que aporten a elaborar comprensiones sobre los fenómenos que se eligen estudiar en los espacios de formación, y en consecuencia que favorezcan aquella educación científica que se considera deseable.

“Education policies across Europe highlight the importance of the role science education plays in ensuring citizens have the requisite knowledge and skills to enable them to become “informed critical consumers of scientific knowledge”, according to the OECD. Today, society faces numerous global challenges, including climate change, pandemics, pollution, malnourishment, and hunger. Science is embedded in these challenges and science education has a crucial role in ensuring our students – future decision makers – have the necessary knowledge and skills to make sense of these challenges and address them.” (ALLEA Science Education Working Group, s.f.).

En el contexto colombiano, en el cual se desarrolla esta investigación, son los Lineamientos Curriculares en Ciencias Naturales los que pautan oficialmente qué es lo que se espera de la enseñanza de las ciencias en el nivel de formación escolar:

“Enseñar ciencias debe ser darle al estudiante la oportunidad de establecer un diálogo racional entre su propia perspectiva y las demás con el fin de entender de mejor manera el mundo en que vive. La perspectiva del estudiante debe ser contrapuesta con otras posibles, de forma tal, que le permitan descentrarse al situarse en otras perspectivas entendibles para él y vea desde ellas la relatividad de sus convencimientos en busca de un conocimiento más objetivo o, lo que es equivalente, un conocimiento más intersubjetivo.

Pero como lo señalamos ya en las primeras líneas, la perspectiva del educando es la que le permite su cerebro infantil en proceso de maduración y de estructuración cognitiva en el contexto de su cultura. En este sentido el niño es cualitativamente diferente del científico quien cuenta con su cerebro plenamente formado y con una historia intelectual que le ha permitido situarse en diversas perspectivas para llegar a una síntesis que él sabe, no es definitiva. Este aspecto debe ser tenido en cuenta cuando el maestro diseñe su plan de actividades que le permitan alcanzar un objetivo social predeterminado.

El maestro que se preocupa por profundizar en el aprendizaje y el desarrollo humanos, intenta buscar una respuesta a la necesidad de saber

quién es ese estudiante que llega a nuestras escuelas, y cuál es su perspectiva del mundo de la vida.” (Ministerio de Educación Nacional (MEN), 2002).

Es evidente en los anteriores fragmentos que la educación científica deseable en el contexto de las políticas públicas de educación, tanto en Europa como en Colombia, está orientada a formar ciudadanos para actuar desde el discernimiento, lo que implica una formación científica enfocada en aportar a educar a la población general en la toma de decisiones conscientes e informadas. En momentos como los que vivimos, sabemos que hay un fuerte desconocimiento de la actividad científica, falta de credibilidad en sus resultados y la opinión pública la sitúa en el vaivén de la desinformación.

En este sentido, es deseable fundamentar propuestas de enseñanza que promuevan al desarrollo del pensamiento crítico en la formación de docentes. Entendiendo el pensamiento crítico como:

[...] el proceso intelectualmente disciplinado de conceptualizar, aplicar, analizar, sintetizar y/o evaluar de forma activa y hábil la información recopilada o generada por la observación, la experiencia, la reflexión, el razonamiento o la comunicación, como guía para la interpretación... (Sobre el pensamiento crítico, Michael Scriven, Richard Paul).

En respuesta a esta problemática, en Colombia, algunos grupos de investigación han venido consolidando líneas de trabajo para fortalecer la formación de docentes de ciencias al indagar sobre los procesos de construcción de conocimiento de algunas fenomenologías que hacen parte central de los currículos de ciencias, siendo el centro de análisis en los procesos de enseñanza.

Este es el caso de los grupos: Grupo de Investigación Ciencia, Cultura y Diversidad del Instituto de Educación y Pedagogía de la Universidad del Valle, Estudios Culturales sobre las Ciencias y su Enseñanza de la Universidad de Antioquia, y finalmente de los grupos Física y Cultura, y Estudios Histórico-críticos y Enseñanza de las Ciencias (EHC^EC) quienes con el auspicio de la Universidad Pedagógica Nacional han producido documentos como: Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos físicos (2008). Construcción de fenomenologías y procesos de

formalización: un sentido para la enseñanza de las ciencias (2013), Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias (2018) ¹².

La problemática que orienta esta línea de investigación se enfoca en 1) hacer evidentes los procesos de formalización conceptual para la enseñanza aprendizaje de las ciencias, e identificar rutas de trabajo que aporten en la formación de docentes mediante la comprensión de estos procesos de formalización, y a su vez, 2) enfrentar el distanciamiento entre la formación científica y su componente histórico – filosófico y epistemológico de las ciencias.

Otros antecedentes importantes, con problemáticas afines a la investigación sobre enseñanza de la física, se adhieren al constructivismo para propiciar procesos de formalización conceptual. Este ha sido el enfoque de: 1) las propuestas desarrolladas por la escuela de Paolo Guidoni sobre formalización y Emilio Balzano sobre modelización, en Italia, 2) los estudios de análisis sobre los procesos discursivos y de argumentación en las aulas desarrollados y dirigidos por Marina Castells, en Barcelona, 3) las construcciones históricas y experimentales con intención en formación de docentes de física, que se proponen en la Universidad de Helsinki, quienes consideran que es posible resolver los desafíos a los que se enfrenta la formación de docentes, cuando el conocimiento del contenido de la física, los aspectos epistemológicos relevantes de la física se entrelazan con los conocimientos pedagógicos y didácticos de la enseñanza y el aprendizaje de la física. Una idea que compartimos en este trabajo, con estos enfoques ha sido la que (Mäntylä, 2011) manifiesta en el siguiente apartado:

The second challenge, connected to the first one, is to understand the role of experiments and models in (re)constructing the content knowledge of physics for purposes of teaching. The third challenge is to provide for pre-service physics teachers opportunities and resources for reflecting on or assessing their knowledge and experience about physics and physics education. (Mäntylä, 2011, págs. 3 - 9).

Esta línea de investigación sobre los procesos de formalización, por su carácter constructivista y por su énfasis en la organización conceptual, hace un análisis del rol que la actividad experimental desempeña en las ciencias mostrando que esta actividad ha de tener

¹² Grupos en los que he trabajado como coinvestigadora y coautora en: Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos físicos (2008), Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias (2018)

un lugar preponderante en la enseñanza de las ciencias en relación con la cual sea posible la construcción conceptual y de modelos para la comprensión de fenómenos.

1.3 Planteamiento de la pregunta y objetivos de investigación

✎ Para ayudar a resolver la problemática planteada en los apartados 1.1 y 1.2 de este capítulo, nos propusimos indagar sobre los procesos de conceptualización, modelación y estructuración teórica, mediante estudios de casos históricos particulares en calorimetría y termodinámica. Desde estos estudios generar criterios pedagógicos y didácticos para su enseñanza poniendo énfasis en la forma de construir conocimientos sobre los fenómenos térmicos.

Consecuentemente con la descripción de la línea de investigación presentada en el anterior apartado, inicialmente surgió para esta investigación un cuestionamiento muy general:

¿Cómo propiciar procesos de construcción de conocimiento en la enseñanza de la física que aporten una mirada crítica y valiosa sobre las ciencias a la formación de docentes de ciencias de la escuela secundaria colombiana?

Esta pregunta manifestó nuestro favoritismo por una enseñanza significativa de las ciencias más que una intención por obtener una respuesta inmediata o única para ella. Y nos llevó a asumir dos ideas de (Arcá, Guidoni, & Mazzoli, 1990) que nos parecen importantes para pensar la enseñanza:

- 1) El desarrollo del proceso cognitivo es una tarea de la educación,
- 2) La educación debe enfocarse en un conocimiento significativo para que estudiantes, docentes y científicos puedan actuar en el mundo participando de una formación cultural consciente y respetuosa del sujeto humano.

Como señala (Adúriz – Bravo, 2017)

la actual educación en física implicaría tanto saber de física como saber sobre física (Adúriz–Bravo, 2008a). Si aceptamos este punto de partida, se reconoce en seguida que los currículos de ciencias naturales –y en particular el de física– incluyen, junto con las competencias científicas estrictas, unas competencias meta-científicas (utilizando para estas últimas el prefijo griego *metà*, con el sentido de “más allá de”). (Adúriz–Bravo, 2017).

En este sentido, la formación profesoral, que parte desde el reconocimiento de la historicidad de las ciencias y su impacto cultural, ha de apuntar tanto a las comprensiones de la naturaleza de las ciencias como a la formación disciplinar que es enriquecida a nivel conceptual desde los estudios históricos y epistemológicos de la disciplina (Izquierdo Aymerich, García Martínez, Quintanilla Gatica, & Adúriz-Bravo, 2016). Los documentos y episodios históricos que se pueden utilizar en los programas de enseñanza de la física permiten acercarse a las dinámicas sociales involucradas en la construcción de conocimiento científico, y que aportan a construir visiones sobre la naturaleza de la ciencia. Por este motivo, este trabajo se ha enfocado en hacer una aproximación a la formación de profesores de física desde los estudios históricos y epistemológicos.

Ahora bien, el enfoque en esta investigación está delimitado por la intención de fortalecer la comprensión conceptual y teórica de los fenómenos, pues también consideramos que es necesario continuar robusteciendo la discusión respecto a los contenidos disciplinares con los docentes en formación, que les proporcione herramientas de juicio y les ayude a abordar los campos de estudio en los cuales se han formado, porque éste será el eje de su trabajo en la formación científica escolar y porque pensamos que los docentes podemos ser más que consumidores del conocimiento científico.

Así que consideramos que para acercarnos a responder la pregunta general enunciada al inicio del apartado, es necesario indagar sobre los procesos de conceptualización, modelación y estructuración teórica, mediante estudios de casos particulares, y esto requiere un abordaje epistemológico e histórico.

En esta investigación seleccionamos como caso para el análisis: la organización teórica de la termodinámica, por varios motivos:

1. Reconocemos que los procesos de formalización en ciencias se manifiestan de diferentes maneras en relación con el fenómeno estudiado y el contexto, como ya ha sido argumentado por la historia, la epistemología y la filosofía de las ciencias.
2. Los estudios históricos sobre la constitución de la termodinámica reflejan una importancia particular de este campo de estudio dentro del pensamiento físico, y es su aportación en la unificación de diferentes campos de la física en relación con las magnitudes: calor, trabajo y energía. Además, que la formulación del principio de conservación de la energía se ha ampliado a campos fenoménicos de diversas ramas de las ciencias.

El estudio de la termodinámica permite evidenciar cambios en la comprensión de los fenómenos físicos a lo largo de su desarrollo histórico conceptual, al pasar de una visión centrada en las sustancias y estática, que es la misma que predomina en la enseñanza de la mecánica a nivel escolar, y llegando a considerar un nuevo paradigma interpretativo al interior de la física y de las ciencias, el cual muestra una mirada sistémica más abierta al estudio de procesos globales. Es emblemático el valor que asume el segundo principio de la termodinámica en el análisis de las transformaciones y en la evolución de los procesos y el aporte de una mirada holística para la explicación de fenómenos naturales, como señala, Marcello Cini,

“todo lo que no está prohibido puede suceder... las leyes físicas se nos aparecen cada vez más como una expresión de restricciones, la formulación de prohibiciones o la solicitud de compatibilidad, más que la manifestación de instrucciones coercitivas que imponen un comportamiento predecible en cada detalle...” (Cini, 2002).

Estos motivos propiciaron un cuestionamiento concreto que ha orientado el desarrollo de la investigación y la selección de las fuentes primarias o episodios históricos:

¿Cómo construir una ruta de trabajo que haga visible al docente en formación las diferentes perspectivas en el estudio de los fenómenos térmicos, y que a la vez le permita tener elementos para desarrollar una mirada sistémica de los fenómenos físicos?

Reconociendo la complejidad de la pregunta y con la intención de tener elementos para abordarla como problemática. Propusimos preguntas más específicas para desarrollar la investigación.

1.3.1 Preguntas de investigación

De este modo las preguntas en la que nos centramos fueron:

P1. ¿Cómo se desarrollan los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos en las teorías del calor y termodinámica clásica?

P2. ¿Cuáles son los criterios pedagógicos y didácticos¹³ que surgen de este estudio de caso, que aportan a la formación de docentes de ciencias?

1.3.2 Objetivos de la investigación

Para responder a tales preguntas, los objetivos generales que planteamos fueron:

O1. Caracterizar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos, en la termodinámica clásica.

O2. Describir los criterios pedagógicos y didácticos que surgen del estudio de caso particular y sus aportaciones al estudio de los fenómenos térmicos en el contexto de formación de profesores de ciencias.

Esta caracterización, sin embargo, puede estar situada en dos ámbitos: 1) en las formas de organización del conocimiento científico y 2) en las formas de organización durante los procesos de enseñanza – aprendizaje de las ciencias. La zona de convergencia de estos dos ámbitos fue la que mayor interés nos generó, al partir de la siguiente hipótesis en la que consideramos que: una comprensión de los procesos de conceptualización a través de la reconstrucción histórica de la termodinámica¹⁴ ayuda a establecer criterios pedagógicos y didácticos para la formación de docentes, con el fin de:

- a. Organizar el conocimiento del contenido de la física
- b. Generar procesos de conceptualización cuando se enseña

¹³ Nos referimos a criterios pedagógicos en el sentido amplio del término que asocia lo pedagógico al campo educativo, en otras palabras son aquellas decisiones que se adoptan sobre la educación, involucradas con las razones globales y trascendentes que responden a la labor social del docente, por ejemplo, en este campo se encuentran las preguntas respecto a la educación científica: qué se propone y qué se espera de la educación es la adopción de criterios pedagógicos. Por otra parte, la didáctica tiene una discusión referida a los aspectos más específicos propios del contenido disciplinar y la gestión de ese contenido para actuar en el aula de clase, está más referida a la enseñanza – aprendizaje de los contenidos disciplinares. Ahora bien, entre lo didáctico y lo pedagógico hay una relación en doble vía pues no es posible pensar la educación sin incluir la enseñanza – aprendizaje y viceversa pensar en la enseñanza – aprendizaje no se puede hacer por fuera de un marco educativo. Una ampliación interesante de esta discusión en el contexto colombiano se encuentra en: Conocimiento didáctico del contenido y formación de profesores de física: elementos para la investigación. (Reyes Roncancio), Y Naturaleza y diferenciación del saber pedagógico y didáctico (Zambrano Leal, 2019)

¹⁴ En este punto es importante señalar que historias de la termodinámica hay muchas, y muy bien escritas. Por lo cual no era nuestra pretensión hacer una historia de la termodinámica, sino entender los procesos conceptuales en esa historia, lo que lleva al estudio de las fuentes primarias y una reconstrucción particularmente intencionada en identificar aspectos para dotar de sentido la enseñanza.

- c. Permitir comprender el papel que desempeñan los experimentos, las representaciones (esquemas, ecuaciones, gráficas, dibujos, etc.), los modelos y problematizarlos con fines didácticos.
- d. Reducir la distancia existente entre la enseñanza – aprendizaje de las ciencias y el discurso elaborado por la epistemología, la filosofía y la historia de las ciencias

De acuerdo con lo anterior, propusimos los siguientes objetivos específicos:

OE1. Describir los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en el desarrollo histórico de las teorías del calor asociados a la organización de: la ley cero de la termodinámica sobre el equilibrio térmico; y de la primera ley, en relación con la dirección de flujos o transferencias de calor y los cambios de procesos termodinámicos que llevan a una organización formal.

OE2. Diseñar una secuencia de enseñanza sobre los fenómenos térmicos basada en la introducción de episodios históricos de las teorías del calor que permita el contexto para interpretar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización.

OE3. Interpretar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos que desarrollan docentes de ciencias al hacer uso del análisis de estos episodios históricos.

Preguntas de Investigación	<p>P1. ¿Cómo se desarrollan los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos, en la termodinámica clásica?</p> <p>P2. ¿Cuáles son los criterios pedagógicos y didácticos que surgen de este estudio de caso, que aportan a la formación de docentes de ciencias?</p>		
Objetivos Generales	<p>O1. Caracterizar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos y la organización por principios que se establece en el campo de la termodinámica.</p> <p>O2. Describir los criterios pedagógicos y didácticos que se surgen del estudio de caso y sus aportaciones a la formación de docentes de ciencias.</p>		
Objetivos Específicos	<p>OE1. Describir los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en el desarrollo histórico de las teorías del calor que constituyen el campo de la termodinámica clásica.</p>	<p>OE2. Diseñar una secuencia de enseñanza sobre los fenómenos térmicos basada en la introducción de episodios históricos de las teorías del calor que permita el contexto para interpretar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización.</p>	<p>OE3. Interpretar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos que desarrollan los docentes de ciencias al hacer uso del análisis de estos episodios históricos de las teorías del calor.</p>

Cuadro 1. Pregunta y objetivos de investigación.

En relación con estos objetivos es importante resaltar que:

- Los procesos de formalización, que corresponden a: conceptualizar, modelar y estructurar las teorías científicas son diacrónicos. Esto quiere decir que la organización de las teorías pasa por largos periodos de análisis e indagación, de procesos de discusión entre múltiples pensadores, programas de investigación y enfoques, y también, por procesos de síntesis que pueden ser acumulativos en el sentido de reunir, agregar, separar los elementos a través de los cuales se organizará una nueva estructura; las teorías son marcos interpretativos que se continúan transformando conforme se amplían y transforman los fenómenos de estudio. En nuestro caso, lo que hoy día llamamos termodinámica clásica es la organización de los comportamientos térmicos hasta principios del siglo XX.
- Mientras que los procesos de formalización desarrollados a través de la enseñanza de las ciencias, en el aula de clase, son sincrónicos. Esto quiere decir que la organización

de los saberes científicos en el aula ocurren en un corto periodo de tiempo y de manera situada: en un contexto, con tiempos específicos, con rutas establecidas sobre lo que se “debe” enseñar y/o aprender, con experiencias cuasi-controladas, con actividades que ya se encuentran de una u otra forma estandarizadas a través de los currículos, de los libros de texto, a través de las prácticas del docente que guía, y a través de la síntesis misma de la historia de la ciencia.

Así pues, no resultaría adecuado afirmar que las operaciones que se han hecho en las ciencias para formalizar: conceptualizar, modelar y estructurar campos teóricos se encuentren en correspondencia directa y uno a uno con aquellas operaciones que se realizan en el aula para estructurar los conocimientos científicos.

Además, es importante resaltar que cuando se estudian las obras de los científicos, o sobre una temática de ciencia, estos escritos han pasado por un proceso de estructuración que no refleja la ruta original del pensamiento del científico y tampoco la ruta de su proceso individual de formalización, refleja la forma terminada, la lógica del proceso más definitivo. En el caso del aula tampoco es posible explicitar una ruta primigenia en el pensamiento de un individuo o describir el proceso secuencial de un razonamiento y generalizarlo a un grupo. Por eso es frecuente encontrar que a estos enfoques históricos en las clases, se les denomine de recontextualización científica o de transposición didáctica.

Privilegiamos lo conceptual y analizamos los desarrollos históricos de la ciencia, para propiciar la profundización disciplinar, abordando los contenidos de la física, pero apoyados en la historia, para reconocer rutas alternativas a los currículos estandarizados. Reconocemos la crítica que se hace a las historias conceptuales de la ciencia que buscan identificar el desarrollo de la ciencia con la idea de la evolución positiva y lineal del pensamiento científico, nuestra perspectiva, aunque con un enfoque sobre el desarrollo conceptual, se distancia de esta consideración de evolución acumulativa y correctiva de los conceptos, presentamos la pluralidad conceptual en las teorías del calor intentando destacar las problemáticas y razones que suscitan su transformación epistémica.

Por nuestro compromiso con la enseñanza, el análisis crítico de los documentos y episodios históricos es el que nos permite desarrollar desde allí criterios pedagógicos y didácticos. Lo que muestra que, en este caso, el acercamiento a la historia se aleja de la pretensión de narrar acontecimientos anecdóticos o de describir una evolución de los conceptos por sí sola, sino

que busca identificar procesos conceptuales desde y para la comprensión de los fenómenos y del estado de diversidad epistemológica de una disciplina.

Por estas razones, nuestra intencionalidad fue hacer un estudio interpretativo sin una pretensión definitoria o prescriptiva de los procesos de organización conceptual; por ello se enfatiza en la caracterización identificada como una acción que encuadra las posibles descripciones de los procesos, sin la pretensión de indicar mecanismos detallados de procesos cognitivos del cerebro para la producción de conocimiento, que es otro campo de estudio.

Buscamos elementos epistemológicos que ayuden a detallar rasgos de la estructuración conceptual de la termodinámica y que posibiliten la comprensión del cambio de perspectiva que ha propiciado la termodinámica, en la física, y en las ciencias en general. (Von Bertalanffy, 1986) Una mirada sistémica que se hace énfasis en los procesos y las transformaciones que ocurren en los sistemas, y que fue resultado de un cambio en la comprensión de los fenómenos térmicos. (García, 2006).

Los criterios metodológicos para abordar tales objetivos y preguntas se amplían en el diseño metodológico propuesto para la investigación. Antes de abordarlos, queremos presentar algunas características generales del contexto de investigación y del grupo de docentes participantes dentro de este estudio.

1.4 Contexto de investigación y descripción de los grupos de docentes participantes

- ☞ La investigación se desarrolló en el Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, con profesores de ciencias en ejercicio que cursaban programas de posgrado en el espacio académico: Seminario de la organización de los fenómenos físicos.

En Colombia, la enseñanza de la física y otras ciencias, se remonta hacia inicios del siglo XIX, solo hacia 1930 se instauró la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales, con el objetivo de desarrollar dichas ciencias, sus aplicaciones y su enseñanza. Así que la enseñanza de la Física como disciplina en la educación superior comienza alrededor de 1960 en la Universidad Nacional de Colombia; posteriormente se abrió esta carrera en otras universidades del país, con el fin de formar investigadores en esta disciplina.

Por otra parte, la formación de profesores de física tiene una trayectoria aún más corta, alrededor de unas seis décadas, durante ese tiempo se han venido actualizando modelos pedagógicos en la búsqueda de generar un mejoramiento continuo de los procesos formativos de la comunidad académica en las instituciones de educación superior, y buscando contribuir a formar docentes de física que fueran capaces de liderar procesos pedagógicos en este campo de la ciencia.

De acuerdo con la información registrada para agosto de 2022, en el (Sistema Nacional de Información para la Educación Superior en Colombia (SNIESC), 2022), en Colombia existen 6 programas activos de Licenciatura¹⁵ en Física en todo el territorio nacional de 51,6 millones de habitantes. Estos programas se desarrollan en las siguientes instituciones académicas, de las ciudades más importantes: la Universidad Pedagógica Nacional (Bogotá), Universidad de Antioquia (Medellín), Universidad Francisco José de Caldas (Bogotá), en estas universidades que son las estatales la Licenciatura en Física tiene reconocimiento de acreditación de alta calidad por parte del Ministerio de Educación Nacional; en la Universidad de Sucre (Sincelejo) y la Universidad del Valle (Cali), también universidades estatales, y en la Universidad de los Andes (Bogotá), el programa únicamente tiene el registro calificado¹⁶.

De estas instituciones, la Universidad Pedagógica Nacional es la única en el país cuyo objetivo es la formación de profesorado en las diferentes áreas del currículo escolar. La presente investigación se realizó en su Departamento de Física que soporta algunos de los espacios académicos en los programas de:

- Especialización en docencia de las ciencias naturales a nivel básico (3 estudiantes) y de Maestría en Docencia de la Ciencias Naturales (un grupo de 12 estudiantes)¹⁷.

¹⁵ Se denomina licenciatura a los programas de formación de profesores, y a la titulación obtenida de estos programas.

¹⁶ Registro calificado es la licencia que otorga el Ministerio de Educación Nacional, que avala académicamente que un programa de estudio pueda ser ofertado por una institución de educación superior. Sin embargo, el registro no certifica la alta calidad del programa que debe pasar por procesos de acreditación para recibir ese concepto.

¹⁷ Estos programas de posgrado en la actualidad se encuentran activos y poseen registro calificado. La maestría es un programa homologable con la titulación de magister del sistema europeo. La duración del programa es de 2 años, 4 semestres académicos. Número total de 50 créditos o 2400 horas. 1 crédito es equivalente a 3 horas de trabajo académico del alumno (1 hora presencial, 2 independiente) o 48 horas por semestre. (Ministerio de Educación Nacional (MEN), 2001). Su propósito es construir un espacio de formación donde los docentes reflexionen sobre los procesos pedagógicos, cognitivos, didácticos y sociales y, asimismo, tengan la oportunidad de asignar un carácter investigativo a su práctica de enseñanza en los distintos niveles educativos. Este proceso

Los docentes participantes de la investigación desarrollan su trabajo profesional como profesoras o profesores de Biología, Química o Física en los colegios de secundaria y bachillerato en la ciudad de Bogotá, o cercanías; participaron del curso denominado Seminario de la organización de los fenómenos físicos: Fenómenos térmicos¹⁸.

Pensando en ellos, y con la disposición de abordar el objetivo de: interpretar los procesos de conceptualización y modelación en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos que desarrollan los docentes de ciencias al hacer uso del análisis de estos episodios históricos y del desarrollo de actividades experimentales, produjimos una secuencia didáctica de trabajo, que se puede ver en el anexo 1 de este documento, en la que se establece una serie de actividades para abordar los fenómenos térmicos con este grupo docentes de ciencias, la secuencia didáctica se implementó durante el primer semestre de 2021, en medio de la pandemia. [Anexo 1, pág. 287].

Respecto de la formación disciplinar específica en la que se enmarca esta investigación:

- La asignatura de termodinámica se identifica con el espacio académico denominado Seminario de la organización de los fenómenos físicos: Fenómenos térmicos, tiene 3 créditos equivalentes a 9 horas de trabajo semanal tanto en el aula como de manera independiente, para sumar una cantidad total 144 horas de trabajo semestral en la asignatura.
- El espacio académico ha sido designado como un componente de formación obligatoria dentro de los planes de estudio; sin embargo, el desarrollo de los contenidos varía de acuerdo con la propuesta académica de cada institución, que determina el número de créditos académicos, y se resume en el siguiente cuadro:

de formación docente está dirigido a la profesionalización de licenciados en ciencias o profesionales de áreas afines.

¹⁸ Presentamos una descripción detallada en el capítulo 7.

Créditos Académicos para la asignatura Termodinámica	
Universidades con programas de formación de docentes de Física	Número de Créditos en Termodinámica
U. Pedagógica Nacional	3
U. de Antioquia	4
U. Distrital Francisco José de Caldas	3
U. de los Andes	No hay asignatura exclusiva
U. de Sucre	3
U. del valle	No hay asignatura exclusiva

Cuadro 2. Créditos Académicos para la asignatura Termodinámica.

Por lo general, la asignatura se cursa en un período académico de 16 semanas que equivalen a un semestre, y un solo crédito implica tres horas semanales de dedicación por parte del estudiante, de acuerdo con (Ministerio de Educación Nacional (MEN), 2001). Así pues, en promedio, los estudiantes han de dedicar al estudio de la termodinámica por lo menos 9 horas de trabajo semanal, en el aula y de manera independiente, para sumar una cantidad total 144 horas de trabajo semestral en la asignatura.

CAPÍTULO 2

2 Diseño metodológico

- ☞ A continuación, exponemos los fundamentos del marco metodológico que sustenta esta propuesta de investigación cuyo enfoque es cualitativo – interpretativo, y se desarrolla en cuatro etapas de estudio diferenciadas: 1) Estudios histórico- críticos de las teorías del calor, 2) Construcción de una propuesta de aula, 3) Documentación del trabajo en el aula a través del enfoque fenomenológico – hermenéutico, y 4) Exposición de resultados y conclusiones.

Enmarcamos el enfoque metodológico de este trabajo en una investigación de tipo cualitativo – interpretativo porque realizamos una caracterización de los procesos de conceptualización y teorización en el estudio de los fenómenos térmicos y la estructutación conceptual de la termodinámica a través de una descripción fenomenológica, tras la búsqueda de una comprensión profunda de aquello que es analizado y que permite organizar o estructurar significados e interpretaciones, propias del enfoque cualitativo, de acuerdo con (Salgado Levano, 2007)

En el marco de las preguntas y los objetivos trazados, nos propusimos cuatro etapas de análisis diferenciadas:

- **Etapa 1.** Desarrollo de estudios histórico-críticos sobre las teorías del calor.
- **Etapa 2.** Construcción de una secuencia didáctica sobre fenómenos térmicos dirigida a docentes de ciencias naturales cuyo hilo conductor son algunos episodios históricos de las teorías del calor.
- **Etapa 3.** Incorporación de la fenomenología como orientación epistemológica y como método de análisis del proceso de enseñanza- aprendizaje.
- **Etapa 4.** Exposición de resultados y conclusiones.

La primera etapa, nos permitió hacer un análisis del desarrollo conceptual de las teorías del calor, identificando problemáticas de lo térmico, formas de indagación, criterios de

organización conceptual y teórica, además, aportó los criterios para la organización de la secuencia didáctica de trabajo que se ha mencionado, se desarrolló en los capítulos 4 y 5.

La segunda etapa, fue la organización de la secuencia didáctica de trabajo con la cual los docentes participantes de la investigación orientaron¹⁹ sus actividades en la clase sobre los fenómenos térmicos, ha quedado descrita en detalle en el capítulo 7. Y se presenta en el Anexo 1, sección 12, del documento.

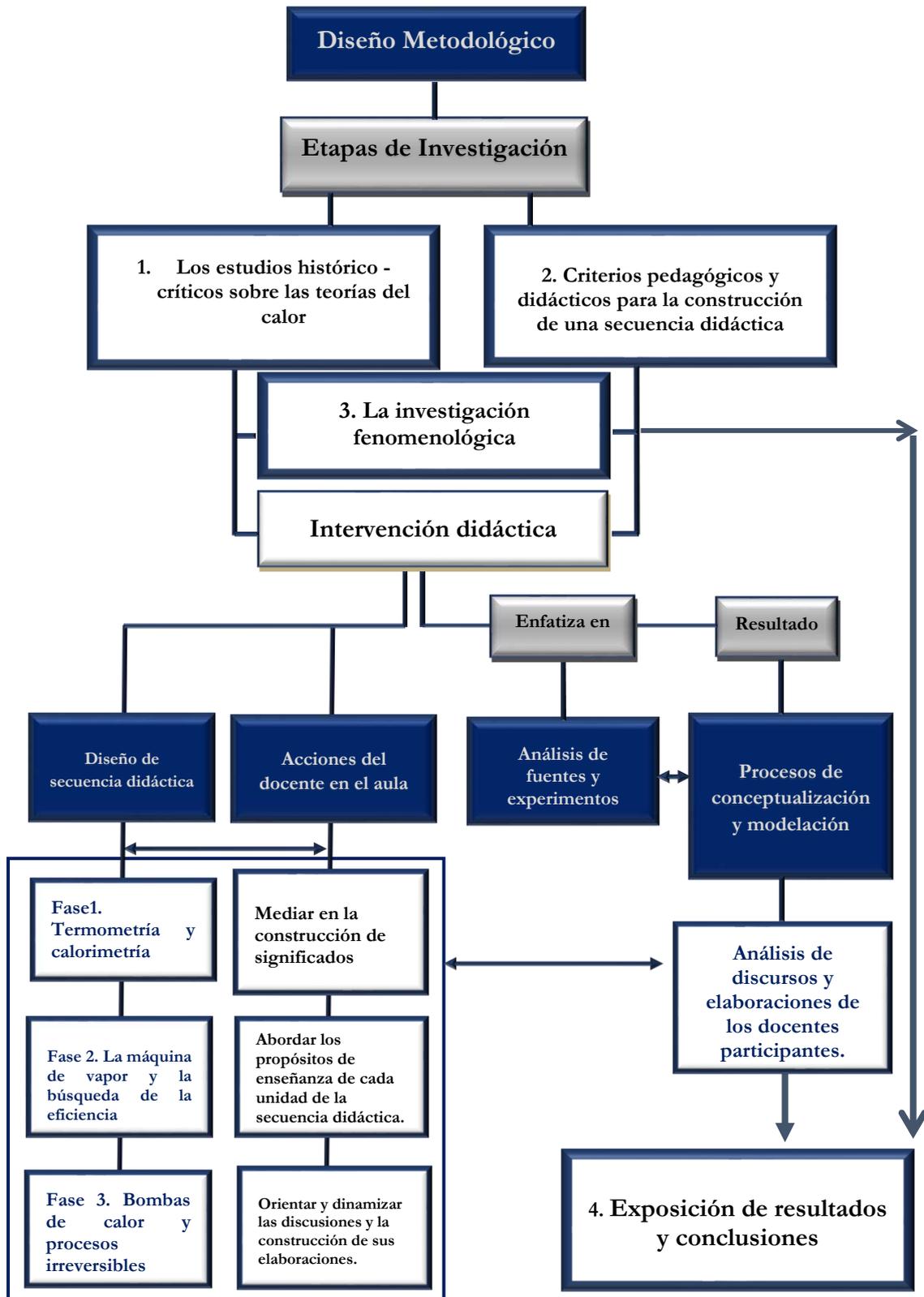
La tercera etapa, contribuyó a desarrollar una mirada interpretativa para el análisis sobre los procesos de formalización sobre los fenómenos térmicos, y para la obtención de resultados, es la perspectiva fenomenológica que tiene lugar a lo largo del documento.

La cuarta etapa, corresponde a sintetizar los resultados de los estudios realizados durante las etapas anteriores y a elaborar conclusiones generales del trabajo de investigación, así como comentar sobre nuevas vías de continuación de la investigación y implicaciones para la formación de docentes de física, ha quedado plasmada en los capítulos 6, 8, 9 y 10.

Las tres primeras etapas de investigación se abordaron desde una intervención metodológica específica, de acuerdo con el tipo de información requerida para su desarrollo, y la última etapa interpreta el conjunto de información que procede desde la investigación. Así, en lo que sigue describiremos con profundidad las tres primeras etapas de la investigación, su pertinencia y su especificidad metodológica.

¹⁹ Las actividades en la secuencia didáctica son actividades consideradas como exploratorias y abiertas, es decir, hay unas preguntas específicas y se proponen diseños experimentales, sin embargo estos se van modificando de acuerdo con las decisiones del grupo de personas que hagan uso de la secuencia didáctica.

Cuadro 3. Diseño Metodológico que involucra las acciones en el aula.



2.1 Etapa 1. Desarrollo de los estudios histórico-críticos para orientar la enseñanza de la física

- ✎ En este apartado se sitúa un marco analítico sobre la pertinencia de los acercamientos desde la historia de la ciencia para fundamentar la selección y estructuración de fenómenos o temáticas que se trabajan con docentes en formación y en ejercicio; se fundamenta también la necesidad de hacer un estudio histórico particular, más internalista, cuya intención es la profundización disciplinar de la física, sin pretender desconocer la riqueza a la formación de profesores que aportan otros enfoques preocupados por el estudio de la naturaleza de la ciencia en la formación escolar.

En este trabajo hicimos de los estudios históricos un procedimiento para el análisis y reflexión de los fenómenos naturales, teniendo en consideración los contextos de producción del conocimiento científico y los contextos de enseñanza-aprendizaje para la reinterpretación de ese conocimiento.

Fue una etapa en la que nos dedicamos a caracterizar los procesos de conceptualización y modelación sobre los fenómenos térmicos para orientar una comprensión de la física desde su historicidad, buscando criterios para fundamentar la selección y estructuración de fenómenos o temáticas en relación con lo térmico que se trabajaron con docentes en formación posgradual y en ejercicio.

Las preguntas que nos formulamos en esta etapa fueron:

1. ¿Cómo estos estudios históricos podían ser vinculados a propuestas de enseñanza, si estos estudios reflejan dinámicas de construcción de conocimiento de los fenómenos térmicos?
2. ¿Cómo abordar estos estudios históricos de la ciencia, y en particular de la física, de tal modo que sea posible identificar los problemas y las lógicas internas en las que se ha edificado la disciplina para generar criterios de movilización cognitiva en el aula?

En este caso, la complejidad dentro de la cual se desarrollan los procesos para la enseñanza y aprendizaje de la física, como bien señalan (Bernardini, Tarsitani, & Vicentini, 1995), involucra la necesidad de proponer un tipo de investigación que permita comprender, caracterizar y resolver problemas disciplinares, cognitivos, comunicativos, contextuales, etc. que se presentan simultáneamente al enseñar ciencias, en general, y física en particular.

“La investigación en Educación en Física tiene que ver con la búsqueda de soluciones al problema complejo de cómo mejorar el aprendizaje y la enseñanza de la física. La complejidad del problema radica en los diferentes campos del conocimiento que deben ser considerados en la investigación. De hecho, además de los conocimientos disciplinarios en física (que deben ser considerados desde el marco conceptual, histórico y epistemológico), hay que tener en cuenta algunos conocimientos básicos en el contexto de la psicología y las ciencias cognitivas (para los aspectos generales y contextuales del aprendizaje) y algunos conocimientos en educación y comunicación (en lo que se refiere a habilidades y estrategias de enseñanza)” (Bernardini, Tarsitani, & Vicentini, 1995).

Por otra parte, esta complejidad exige que se reconozca que los conocimientos disciplinares tienen formas particulares de ser interpretados aún dentro de la ciencia. Los conceptos, leyes y teorías son resultados de formas particulares de comprender el mundo dentro del trabajo de las comunidades científicas, sin embargo, esas diversas interpretaciones no son necesariamente conmensurables entre sí y pueden coexistir a lo largo de la historia de una disciplina manteniéndose en divergencia indefinidamente, lo que sugiere que es necesario argumentar la razón de la elección de unas interpretaciones sobre otras cuando se enseña; de estas problemáticas dan cuenta disciplinas complementarias como la historia, la filosofía y la epistemología de las ciencias, de donde surge la importancia que cobran estos aspectos en la formación de docentes de ciencias.

Desde el punto de vista de la enseñanza, nos interesó la forma en que la historia enriquece las orientaciones con las cuales es posible significar los fenómenos de estudio que se trabajan en el aula de clase. En la actualidad es posible encontrar una extensa bibliografía que fomenta el uso de la historia de las ciencias en la enseñanza (Bevilacqua & Kennedy, 1983) (Matthews, 1990) (Robaret & Guillaumon, 1997) (Nardi & De Almeida, 2008) (Nardi, 2009) (Hosson & Schneeberger, 2011) (Maurines & Beaufils, 2011) (Savaton, 2011) (Peduzzi, Martins, & Ferreira, 2012) (NavarroVeguillas, L., 2014) (Ayala Manrique, 2016) (Izquierdo Aymerich, García Martínez, Quintanilla Gatica, & Adúriz-Bravo, 2016) (Matthews, 2017) (Prestes & Silva, 2018) (García Arteaga E. G., 2018); quienes han señalado diversidad de razones por las cuales los estudios históricos de la ciencia deberían ser introducidos de forma destacada en los planes de estudio para la formación de docentes de ciencias.

Las propuestas de entretener la historia y la naturaleza de la ciencia en la enseñanza de la ciencia en las escuelas y universidades tienen una historia de más de 60 años. Durante este largo periodo, se han producido diversos tipos de materiales educativos que entran la ciencia y la historia de la

ciencia. Los relatos históricos, las lecciones y las unidades por lo general sirvieron al propósito de transmitir una filosofía de la ciencia en la que los educadores creían por ese entonces. Su filosofía de la ciencia identificaba ideas sobre la naturaleza de la ciencia que deseaban que sus alumnos entendieran o apreciaran. Estas ideas servían como pilares para una red, y los hilos de los contenidos científicos y la historia de la ciencia formaban el diseño de la red. Y, sin embargo, cada una de estas redes era frágil; no era frecuente que duraran mucho, y dejaron pocas huellas en el paisaje de la enseñanza de la ciencia (Klopfer, 1992, p. 105.) Citado por (Matthews, La enseñanza de la ciencia. Un enfoque desde la historia y la filosofía de la ciencia, 2017, pág. 162) (Traducción de: Miret, Maia F.).

La anterior cita de Klopfer (1992), recogida de (Matthews, La enseñanza de la ciencia. Un enfoque desde la historia y la filosofía de la ciencia, 2017) que data del siglo XIX permanece vigente y le permite enumerar distintas razones para hacer este tipo de aproximaciones en las clases de ciencias:

- 1) La historia promueve comprender mejor los conceptos y métodos de la ciencia.
- 2) Los enfoques históricos vinculan el desarrollo del pensamiento individual con el desarrollo de las ideas científicas.
- 3) La historia de la ciencia es valiosa por sí misma. Todos los alumnos deberían estar familiarizados con los episodios importantes en la historia de la ciencia y la cultura.
- 4) La historia es necesaria para entender la naturaleza de la ciencia.
- 5) La historia, al examinar la vida y la época de los científicos, humaniza la ciencia como materia y la vuelve menos abstracta y más atractiva para los alumnos.
- 6) La historia permite establecer vínculos entre temas y disciplinas de la ciencia y otras disciplinas académicas; la historia pone en evidencia la naturaleza integradora y mutuamente dependiente de los logros humanos. (Matthews, 2017, pág. 163) (Traducción de: Miret, Maia F.)

Por este motivo, una de las acciones centrales de esta investigación fue articular la historia de las ciencias a los procesos de enseñanza de la disciplina.

2.1.1 Tendencias y enfoques para abordar la historia de las ciencias en contextos de enseñanza

Es de destacar que hay diferentes tendencias y preocupaciones respecto a cómo y para qué abordar la historia de la ciencia en el contexto de la enseñanza, como bien lo plantean (Ayala,

Malagón Sánchez, & Sandoval Osorio, La historia en la enseñanza de las ciencias: una relación polémica, 2013)

“En términos generales, la historia de las ciencias se considera como una gran fuente de recursos a la que puede acudir el maestro desde diferentes planos. Con el primero, que se puede denominar como el plano de la motivación, el maestro puede ubicar espacial y temporalmente muchos de los gestos, descubrimientos y errores que se han dado a lo largo del devenir de las ciencias con el fin de mostrar la dinámica del quehacer científico; éste es quizá uno de los más comunes. Se encuentra particularmente en los textos de enseñanza; es así como frecuentemente se ve en ellos pequeñas secciones o apartes con versiones cronológicas o anecdóticas sobre los creadores y desarrollo de una cierta temática científica. Un segundo plano, menos habitual, es aquel del rescate de argumentos que estuvieron a la base de algunos de los diferentes planteamientos científicos que se han gestado a lo largo de la historia, tratando con ello de reivindicar el carácter racional de las ciencias. Un tercer plano que se destaca es el referido al diseño de estrategias metodológicas; se logra alcanzarlo estableciendo un paralelo entre la dinámica del conocimiento científico y la dinámica del conocimiento individual. En este plano se inscriben muchos de los trabajos de investigación en didáctica de las ciencias de las últimas décadas. Por último, se tiene un plano que se ha venido desarrollando a través de los estudios sociales y culturales de la ciencia, los cuales han permitido circular nuevas imágenes de lo que es la actividad científica. Se busca incidir en la transformación de las imágenes que tienen los individuos en torno a la ciencia, el quehacer científico, en particular de los estudiantes y maestros, y de esta manera, en la transformación de las prácticas pedagógicas en el aula. (pág. 22).

En el caso del uso de la historia de la termodinámica para su enseñanza, se encuentran investigaciones que retoman diferentes recuentos históricos sobre la termometría, con los que se pueden diseñar propuestas de trabajo experimental: replica de termoscopios o termómetros, etc., sin embargo, no se especifica por qué razones estos han de ser abordados o qué implicaciones tienen los instrumentos en la construcción de las magnitudes, y las teorías. [Véase por ejemplo el trabajo de (Pérez, 2013)]

Estos diferentes usos que se han tipificado se encuentran intervenidos por la orientación histórica del maestro. Los estudios históricos y filosóficos de la ciencia señalan la complejidad de la dinámica del conocimiento científico, y destacan que, poner en juego la historia de las ciencias en el aula de clases implica para los educadores reconocer diferentes perspectivas sobre cómo se entiende la ciencia y sobre cómo se entiende su historia. En otras palabras, los educadores en ciencias recurrimos a la historia de la ciencia en relación con nuestra visión

de lo que consideramos es la ciencia y su propia historia, y también en función de la intencionalidad con la que se hace el acercamiento histórico. Algunos docentes ponen énfasis en la dinámica socio-científica con la intencionalidad de explicitar la naturaleza de las ciencias. Otros hacen apuestas por identificar los desarrollos epistemológicos de las teorías científicas con finalidades filosóficas. Y sin duda todos los enfoques enriquecen el campo de la formación de profesores.

En nuestro caso, hemos recurrido a los estudios históricos dirigiendo la atención sobre aquellos aspectos que aporten al desarrollo de procesos cognitivos en física, es decir: nos interesan los científicos, pero sobre todo su actividad, sus objetos de estudio y sus instrumentos, todos ligados al análisis crítico del desarrollo teórico-conceptual, siendo este el lugar de discusión con los docentes y pretendiendo que durante el análisis de los textos históricos también se contribuya a identificar una dinámica plural en la organización del conocimiento científico.

Esto es porque nuestra intencionalidad busca, como ya dijimos antes, generar criterios pedagógicos y didácticos que requieren: 1) la identificación y selección de problemáticas directrices del contenido disciplinar, 2) la identificación de formas epistémicas, razonamientos, conceptualizaciones y formalizaciones en torno a los fenómenos térmicos, 3) la propuesta de actividades para la comprensión de fenómenos.

2.1.2 El análisis histórico - crítico

Así que abordamos los estudios históricos de la ciencia a través del “método” de análisis o estudio histórico-crítico incorporando la perspectiva de autores como Ernst Mach (1838 - 1916) o Pierre Duhem (1861 - 1916), quienes propusieron el análisis histórico-crítico con el objetivo de examinar la estructuración y comprensión de las teorías físicas. Respecto a este tipo de investigación histórica, dice Duhem,

Non seulement cette recherche historique fait mieux comprendre l'état actuel de la science, mais, en montrant qu'il est en partie conventionnelle et accidentelle, elle fait ressortir des possibilités nouvelles. De ce point de vue supérieur, auquel on arrive par des chemins divers, peut embrasser d'un regard plus libre l'ensemble de la science et reconnaître des voies non encore parcourues. (Duhem, 1992, pág. 449).

Es pertinente señalar que, en estricto sentido, ni Mach, ni Duhem, hicieron explícito un procedimiento a través del cual se pretenda establecer pasos definidos para el proceder de la interpretación textual o histórica, y que dentro de ello se establezcan criterios de validación de la interpretación. Se habla de método histórico al ser un estudio relacionado con la necesidad de indagar a través de archivos, de fuentes primarias, de reconstrucciones históricas del desarrollo conceptual, en este caso en el campo de lo térmico.

En consecuencia con lo que se ha venido exponiendo, en esta investigación el análisis histórico-crítico es una forma de proceder de tipo epistemológico para la comprensión de las formas en que han sido estudiados ciertos fenómenos térmicos, y simultáneamente, es una ruta de trabajo para proponer cómo abordar estos fenómenos en el aula de clase e involucrar a los docentes participantes de la investigación en el análisis de fuentes primarias o textos originales de la ciencia, y en el estudio de los fenómenos.

Reconocemos que el carácter histórico permite entender que la ciencia no es únicamente el corpus conformado por una colección de productos -conceptos, teorías, procedimientos, etc. terminados y absolutos, como señala (Ayala Manrique, y otros, 2008). Más allá de estos elementos, supone que a través de la historia es posible una comprensión de la ciencia como actividad cognitiva y sociocultural, que requiere de un ejercicio constante de reinterpretación, análisis y crítica, tanto del contexto de producción de conocimiento como en el contexto de enseñanza.

Es importante tener en cuenta que, en el campo de la enseñanza, nos interesa poder abordar los fenómenos y desarrollar comprensiones sobre éstos contextualizadas en el aula. Lejos de tratar de repetir la anécdota o el acontecimiento de los logros científicos del pasado, nos enfocamos en poner en diálogo y crítica estas elaboraciones en relación también con nuestras formas actuales de acercarnos a los campos de estudio, viéndolos como situaciones con las cuáles se pueden enriquecer las comprensiones de los procesos presentes. De acuerdo con Veera Kallunki (2001),

one aim of the history of science is to function as an analytical instrument for the critical evaluation of methods and concepts that appear in modern science. Thus besides the historical importance of the description of the developments of concepts, the special role of the historical course of events is also in its influence on the physics of today. Jammer clarifies the aim of history of science by pointing out that the aim of it is to lead to a profounder comprehension of the meaning of the term and to a higher

level of understanding of its role and significance in physics. (Kallunki, 2001, pág. 13).

De este modo, el análisis histórico indaga en el contexto de producción de las teorías científicas, las ideas, los métodos e incluso las necesidades y los mecanismos que organizan a las teorías científicas y que posibilitaron su consolidación, para procurar que en la enseñanza de la ciencia se susciten los campos semánticos y comprensiones sobre fenómenos de estudio sobre los cuales ya se han construido significados, con respecto a los cuales se dialoga a través de los procesos de enseñanza, libros de texto y otras formas de divulgación de los contenidos científicos.

Entonces, estos estudios consisten en analizar fuentes primarias, que en este caso son los textos producidos por las y los científicos y, a partir del análisis sobre su contenido [interno], se establecen interpretaciones que den cuenta de las particularidades con las que se tratan los fenómenos de estudio y cómo se llegan a establecer generalidades. En otras palabras, nos importa identificar los criterios o vías a través de las cuáles algunas proposiciones de la física se van transformando en principios descriptivos y explicativos, estos criterios se obtienen de la crítica, en el sentido filosófico del término. Así pues, la crítica es entendida como una actividad dialógica que busca reunir elementos para la configuración y solución de problemáticas o la construcción de una cierta clase de fenómenos o la configuración de rutas de trabajo para el aula.

2.1.3 La finalidad de los estudios histórico- críticos en esta investigación

Silvana Filippi, quien reflexiona sobre el método histórico-crítico en filosofía lo expresa de la manera siguiente:

En efecto, si el método histórico-crítico permanece en el ámbito de un estricto documentalismo erudito, aporta elementos útiles al filosofar, pero termina siendo insuficiente. En la medida en que interviene en la reconstrucción racional de la historia de la filosofía, se vuelve crecientemente valioso; pero, cuanto más se aproxima a juicios que implican cierta opción doctrinal deja de ser un método y puede convertirse, lisa y llanamente, en la formulación o la defensa de una visión filosófica determinada. (Filippi, 2021).

Compartimos con ella la necesidad de mirar la historia con la conciencia de que ha de ser una reconstrucción racional y no un documentalismo erudito. Desde esta forma de entender los estudios histórico críticos, los conceptos, estructuras, leyes y teorías formuladas en la historia

de la ciencia son ubicados en un lugar de análisis, de reinterpretación y de relación con las elaboraciones de quienes están inmersos en las actividades guiadas a través de estos estudios.

También compartimos su siguiente comentario que aplica al lugar del análisis realizado por quien emprende los estudios histórico-críticos:

el papel del historiador no queda reducido a la sola historiografía, sino que la excede, puesto que consiste, precisamente, en volver comprensible las doctrinas tal y como han sido elaboradas bajo particulares condiciones contextuales y, no obstante, reconocer, a la vez, aquellas nociones y tesis que trascienden su tiempo y que, en el fondo, son las que últimamente interesan al filósofo como tal. (Filippi, 2021).

Se resalta entonces, el reconocimiento, selección de aquellas nociones y tesis científicas que trascienden porque en el caso de la enseñanza de las ciencias son también las que proporcionan la comprensión de aquello que se busca reconstruir de ciertos episodios históricos de la ciencia. En nuestro caso, por ejemplo, notamos que hubo un cambio notable en la forma de comprender los fenómenos térmicos que derivó en un campo para la comprensión de otros fenómenos físicos, pero también biológicos o químicos. Cuando se ingresa al análisis histórico se interpreta desde un contexto específico contemporáneo, reconociendo los cambios de las teorías y de sus dinámicas. Por eso, hacer análisis histórico necesita de una perspectiva crítica, de reinterpretación y de re contextualización. (Ayala Manrique, 2016).

De este modo, el acercamiento al estudio de los fenómenos térmicos a través del análisis histórico - crítico tiene dos finalidades superpuestas en la enseñanza:

- La profundización disciplinar a través de la cual se hacen comprensibles las problemáticas en la evolución y transformación de los conceptos.
- La introducción de los docentes en formación en el contenido disciplinar. Al entretener la historia de las ciencias con el análisis de los fenómenos que se estudian en este campo, los docentes también aprenden sobre el desarrollo histórico y epistemológico de la ciencia, aunque esta no es la finalidad de esta investigación.

Hacer énfasis en los fenómenos de estudio implica que no se pretende enseñar historia. La historia de las ciencias aporta en la comprensión a través del análisis de lo que otros (los científicos y científicas) han comprendido. Es importante, entonces, tener en consideración

que el análisis histórico - crítico busca reconocer problemáticas sobre las cuáles hay comprensiones organizadas de antaño, y que en el momento actual son también objeto de análisis importantes para un conjunto de sujetos que se preguntan y cuestionan sobre las mismas problemáticas, quizá con otros enfoques, lo que lleva a nuevo conocimiento.

En este caso, además de estudiar algunos fenómenos térmicos, se caracterizó cómo se presentan estos procesos de formación de conceptos en la ciencia y en el aula donde son reinterpretados por estudiantes que también son docentes. En el caso de la formación de docentes se buscó superar algunas concepciones como aquellas que suponen que saber sobre física implica saber enseñar física y que la buena enseñanza es la transmisión de los resultados de los saberes científicos. (Ayala Manrique, 2017).

En relación con lo anterior, las acciones derivadas de esta etapa consistieron en:

- Identificar y caracterizar los procesos de organización conceptual y de modelación teórica en el ámbito de las teorías del calor.
- Seleccionar varios episodios históricos del proceso de teorización con respecto al estudio de los fenómenos térmicos, para proponer la secuencia didáctica que se presentó a los docentes participantes.
- Identificar los problemas de estudio que orientarán la discusión en el aula.

2.2 Etapa 2. El diseño de la secuencia didáctica para la enseñanza- aprendizaje

- ☞ Se presentan los puntos clave que se tuvieron consideración para el diseño de la secuencia didáctica: La organización de los fenómenos térmicos.

Una ruta de trabajo para el diseño didáctico contempló algunos elementos de los documentos de trabajo que se desarrollan en el Master de Formación del profesorado de la Universitat de Barcelona y se titulan “Com Elaborar una Unitat Didàctica?” “Unitats Didàctiques” (2010-2011), que sugieren los siguientes puntos clave que fueron motivo de análisis dentro de esta propuesta, y que han quedado plasmados principalmente en la introducción de la Secuencia didáctica Titulada: La Organización de los Fenómenos Térmicos. [Anexo 1, pág. 287]

2.2.1 Primer momento: La preparación

Para la organización de la secuencia didáctica se consideró principalmente:

- Situar el tema en el Currículum de su contexto educativo (en nuestro caso, Colombia).
- Analizar críticamente los aspectos conceptuales, modelos y construcciones teóricas que se relacionan con el tema de la secuencia didáctica.
- Revisar investigaciones sobre la enseñanza de los fenómenos térmicos: ideas, concepciones y formas de razonar de estudiantes, y de estudios sobre dificultades de aprendizaje en relación con el tema de la secuencia didáctica y el contexto educativo de su implementación.
- Considerar el entorno educativo en el que se implementa la secuencia didáctica.

Por otra parte, prestamos atención a algunos aspectos que (Izquierdo Aymerich, García Martínez, Quintanilla Gatica, & Adúriz-Bravo, 2016) tienen en cuenta para el diseño de unidades didácticas enfocadas desde la historia y la filosofía de las ciencias. Ellos resaltan que Perkins (1989) muestra:

cuatro características: (i) tiene una finalidad (un problema que debe resolver) que le da sentido, (ii) requiere estructurar lo que se piensa y lo que se hace para resolver el problema y para ello, debe conectar con el conocimiento estructurado de que ya se dispone (iii) se apoya en otros problemas semejantes que fueron resueltos, (iv) se puede argumentar por qué se da por adecuada la respuesta, cuando finalmente se dispone de ella. (Izquierdo Aymerich, García Martínez, Quintanilla Gatica, & Adúriz-Bravo, 2016, pág. 32).

Y que al ser un problema es didáctico, la investigación en Historia y Filosofía de la Ciencia contribuyen a superar algunos problemas como: Encontrar ‘buenas preguntas’, y 2) Elegir y construir hechos ejemplares, según un proceso narrativo.

Por otra parte, nuestro enfoque requirió tomar decisiones sobre el tipo de experimentos que se buscaba desarrollar en el aula: en este caso, experimentos exploratorios caseros, algunos apoyados de simulaciones. Tuvimos en consideración la idea de diseño de actividades experimentales simples, en cuanto no se trata de un experimento específico sino de una serie de ejercicios prácticos que son abiertos para permitir la indagación de los docentes. Al respecto estuvimos de acuerdo con Viennot (2010) con relación a que, al tratarse de experimentos sencillos:

The first – a condition for the relevance of the others – is that even with severe teaching constraints, there are some open choices and levers for targeted actions. Some apparently minor changes in ritualistic practices may bring out important outcomes. These ‘critical details’ of practice, when orientated by a sound analysis of the content and a sufficient knowledge of students’ common ideas and ways of reasoning, open up a range of different targets. (Viennot, 2010, pág. 51)

Y que es importante durante estas prácticas hacer hincapié en los vínculos conceptuales resaltando aquellos que sean consistentes.

Ahora bien, en el diseño de propuestas didácticas para muchos investigadores es una prioridad establecer una correlación entre los objetivos que se proponen y los resultados canónicos de la ciencia planteando rutas didácticas muy delimitadas y definidas por el objetivo general de obtener los mismos resultados del trabajo de los científicos en el aula de clase.

Consideramos que este esfuerzo de delimitación genera un sesgo para poder identificar razonamientos emergentes de los procesos de formalización conceptual. En este sentido, propendemos por tener criterios flexibles. Algunos de ellos son propuestos por Lijnse (2010), quien considera que las secuencias didácticas deberían:

- start with problem identification, e.g. by analysis of current practice, supported by relevant diagnostic research results;
- describe possible aims in relation to views on teaching and learning;
- deal with conceptual analyses of the scientific subject matter;

- describe didactical phenomenologies and common-sense reasoning;
- describe and justify hypothetical learning trajectories;
- describe viable (research-based) didactical structures together with possible teaching-learning scenarios, including theoretical justifications and empirical outcomes as well as discussions of advantages and disadvantages, possible variations, didactical difficulties and ways out. (Lijnse, 2010, pág. 88).

2.2.2 Segundo momento: Decisiones sobre el diseño de la secuencia didáctica.

En esta segunda fase se incluyeron reflexiones para tomar decisiones que orientaran la secuencia didáctica, quedaron detalladas en el capítulo 7. Y que listamos a continuación:

- Qué objetivos de aprendizaje se proponen.
- Cuál es el hilo conductor fundamental o narrativa global de la secuencia didáctica.
- Cuál es la orientación pedagógica que determina la metodología de clase y de las características de las actividades y materiales usados.
- Cuál es la estructura de los aspectos de contenido científico que se proponen.

2.2.3 Tercera fase: Estructura de la secuencia didáctica por secciones

Para hacer la secuenciación se tomaron decisiones en diversos aspectos o dimensiones para las cuales se asumieron los criterios pedagógicos y didácticos.

Se plantearon los objetivos para orientar los bloques y sesiones, siempre procurando una coherencia con el hilo conductor o “narrativa global”.

Con este proceso se diseñaron las actividades de aula.

2.2.4 Elementos fundamentales en el diseño de la secuencia didáctica

El diseño de las actividades de aula, la selección de lecturas y proponer las actividades experimentales para la indagación que acompañaron la estructuración de esos episodios históricos se abordó bajo la consideración de que el material de trabajo diseñado para los docentes, debería contemplar los siguientes aspectos:

Identificar

- Las formas de desarrollo conceptual de los docentes.

- El papel de la experiencia en la explicación de fenómenos físicos.

Promover

- Que se fortalezcan los procesos de formalización de en física mediante la identificación y diferenciación de magnitudes.

La reflexión y el sentido frente a la explicación de los fenómenos físicos.

Permitir:

- Pasar de un nivel de análisis y comprensión cualitativa del fenómeno a un nivel de sistematización del fenómeno.

Servir para:

- Comprender los fenómenos térmicos y los enunciados generales que de allí se derivan.
- Generar pautas para la enseñanza en este campo de la física.

Estos aspectos se articularon en los objetivos específicos del material diseñado que hacen parte de los criterios epistemológicos con los que se ha definido este trabajo.

2.3 Etapa 3. Incorporación de la fenomenología como orientación epistemológica y como método para la enseñanza de las ciencias

- ☞ Se discute el marco filosófico de la fenomenología con la finalidad de argumentar sus aportaciones a la comprensión del conocimiento, sus potencialidades como perspectiva epistemológica y metodológica dentro del discurso educativo, que nos llevó a incorporar la fenomenología también como método de trabajo para la investigación en el aula.

2.3.1 La fenomenología en la filosofía y la epistemología

La fenomenología se reconoce principalmente como una corriente filosófica desde la cual el conocimiento se construye a partir de la percepción, en la relación del sujeto con el mundo. Edmund Husserl (1859 - 1938), siendo uno de los exponentes más reconocidos de esta corriente, expresaba el doble carácter psíquico y extra psíquico de la percepción. Por una parte, la percepción está ligada con lo que es percibido y es externo a nosotros los sujetos cognoscentes, por otra parte, la percepción se organiza de acuerdo a lo que podemos recibir a través de nuestro sistema sensorio.

Si, por ejemplo, una percepción externa cualquiera, digamos este árbol, es apresada y descrita como un dato puramente psíquico, entonces naturalmente el árbol mismo, que está allí en el jardín, no forma parte de ella sino de la naturaleza extra psíquica. A pesar de ello, la percepción es psíquicamente lo que es en cuanto percepción de este árbol"; no es posible describir una percepción según su consistencia psíquica esencialmente propia sin este "de esto y de aquello". La inseparabilidad de este momento se muestra en el hecho de que permanece en la percepción aun en el caso de que ésta se revele como ilusión. Exista o no exista en verdad el objeto [ob] natural, la percepción es percepción de él y como tal me es dada en la reflexión fenomenológica. (Husserl, 1925. Traducción 1990, pág. 23).

Esta doble cualidad de la percepción le lleva a señalar que aquello percibido es un objeto fenómeno, que se forma no en el mundo exterior sino en nuestra mente con los datos que el mundo exterior posibilita. Así el objeto fenómeno, o el mundo fenomenal es una relación de correspondencia entre lo percibido exterior y nuestra posibilidad psíquica de comprenderle. Una relación en la cual el fenómeno es aquello que aparece a la conciencia en una forma que es cambiante conforme se amplían las cualidades percibidas del fenómeno a través de una percepción que también es cambiante. De modo que, el fenómeno se considera inseparable

de los actos mediante los cuales se manifiesta, es construido y es organizado en la conciencia, que él llama una conciencia intencional actuante del sujeto.

Es por esto que afirma:

el objeto [ob] de la percepción pertenece a la consistencia pura de mi percepción, pero puramente en cuanto mentado [vermeint] perceptivamente y por cierto como contenido de sentido (sentido perceptivo) de la creencia de la percepción. Pero en la epojé esta "casa percibida" (la casa puesta entre paréntesis "" [comillas], como se dice) pertenece a la consistencia fenomenológica no como / un momento rígido, sino como unidad que se constituye vivamente en multiplicidades fluctuantes de modos de aparición, cada uno de los cuales posee en sí el carácter de la "aparición de" (por ejemplo, perspectiva-de, aparición-de, etc.) y produce sintéticamente, en el curso de las apariciones concertadas, la conciencia de lo uno y lo mismo. (Husserl, 1925. Traducción 1990).

En consecuencia, la percepción y la experiencia de lo percibido son una misma acción para la conciencia y son resultado de la reflexión, no hay suposiciones, no hay nada por fuera de ellas, la experiencia no existe sin la conciencia de la percepción y la ausencia de conciencia sobre lo percibido no puede generar experiencias. En otras palabras, el fenómeno procede de la experiencia reflexiva, sin la conciencia intencional es imposible la percepción porque ésta es en cuanto se convierte en experiencia para el sujeto.

Desde luego, como corriente filosófica, la fenomenología ha tenido diferentes formas de exponerse y ha aportado una mirada crítica frente al positivismo y al idealismo en el caso de las ciencias naturales.

La fenomenología se distancia de la idea de descubrimiento, que suele admitir que el conocimiento sobre el mundo le pertenece a la esencia de los objetos por sí mismos, bajo esta idea el conocimiento consiste en desvelar el mundo natural que es externo al sujeto y que esconde unas regularidades que son intrínsecas a los fenómenos en sí mismos. De igual manera, se distancia de aquella dicotomía mundo sensible/mundo inteligible que sugiere que los sentidos nos engañan y por lo cual sólo podemos acceder al conocer a través de la mente, enunciando que solo los procesos racionales son los que deben ser considerados como conocimiento.

Corrientes psicopedagógicas como la Teoría Gestalt, uno de cuyos antecedentes importantes es E. Mach, se encuentran muy vinculadas con la escuela fenomenológica y asignan un alto

énfasis a la percepción, comparten con la fenomenología su aproximación al papel de la experiencia reflexiva de los sujetos en las formas de desarrollo del conocimiento empírico.

Considera que todo fenómeno natural es una totalidad y no una simple suma de partes. Esta totalidad se estructura como una configuración o forma, a la que se denomina Gestalt. De modo que resulta imposible obtener la comprensión del todo estructural si se parte del análisis de los elementos o aspectos parciales que los componen. El proceso de comprensión debe comenzar siempre por el del todo estructural, para luego, sólo en un segundo tiempo, intentar la comprensión de las partes que lo componen. (Teoría de la Gestalt. Tercera Parte, s.f., pág. 6).

Así pues, los conceptos no son definiciones aisladas, surgen en el momento en que se empiezan a comprender cuáles son las variables implicadas para describir el fenómeno, para darle significado a través de las relaciones de esas variables. Y esto ocurre porque “la percepción no es la [percepción] de un conjunto de elementos, sino la de un todo unificado. El sujeto no percibe un conjunto de sensaciones elementales, sino una sensación de totalidad.”, de acuerdo con Wertheimer. (Teoría de la Gestalt. Tercera Parte, s.f., pág. 9)

Estos aspectos motivan una perspectiva para la enseñanza de las ciencias²⁰ porque ubican al sujeto cognoscente en el centro de la actividad de conocimiento, el conocer emerge del acto perceptivo y de un proceso de ordenación de la percepción para la estructuración cognitiva que le da forma y sentido, de ahí la expresión: procesos de formalización.

La perspectiva fenomenológica aporta a la enseñanza de las ciencias otro elemento, para nosotros muy importante: la pérdida de sentido sobre ciertas dicotomías que habitualmente orientan la comprensión de los procesos de construcción de conocimiento científico. La fenomenología cuestiona la pertinencia de las dicotomías sujeto – objeto, mundo de las ideas – mundo de lo sensible, cualitativo – cuantitativo. Permite asumir al fenómeno y sujeto como unidad en tanto se constituyen y definen; la relación dinámica entre pensamiento, representación y habla dentro de la comprensión y construcción de fenomenologías y teorizaciones; y la organización de la experiencia sensible dentro de los procesos de formalización. Pensar procesos de ampliación de la experiencia y organización de los efectos sensibles dentro de la actividad de formalización y construcción teórica también implica romper con la dicotomía teoría – experimento. (Sandoval Osorio, Malagón Sánchez, Garzón Barrios, Ayala Manrique, & Tarazona Vargas, Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias, 2018).

²⁰ En enseñanza de la física, se adhieren a esta corriente (Koponen, Kurki-Suonio, Jauhiainen, Hämäläinen, & Lavonen, 2001) (Kallunki, 2001) exponentes de la Universidad de Helsinki.

Entonces, tanto la mirada Gestáltica como la fenomenológica comparten algunos aspectos que se vuelven imprescindibles para ser considerados derroteros en la enseñanza de la física,

- La actividad experimental
- La producción de lenguaje y sistemas simbólicos o representaciones
- La descripción fenomenológica que externaliza la experiencia subjetiva

2.3.2 La fenomenología hermenéutica como método de investigación

En la medida que el objeto fenómeno es organizado y construido en relación con una conciencia, la fenomenología ha sido pensada no sólo como un sistema filosófico sino también como un método de investigación. De ahí que se haya convertido en uno de los enfoques de la investigación cualitativa en el campo de las ciencias sociales. En palabras de Canedo Ibarra, (2009):

la investigación cualitativa toma de la filosofía de la fenomenología el énfasis en la experiencia y en la interpretación. En la conducción de un estudio fenomenológico el foco estará en la estructura de una experiencia (fenómeno) explorando sistemáticamente el sentido de lo que acontece y la forma en la que acontece. (Canedo Ibarra, 2009, pág. 108).

En esta segunda etapa de la investigación nos propusimos identificar cómo un grupo de docentes interpretaban los fenómenos térmicos y cómo conceptualizaban sobre ellos asignando significados y organizando descripciones o explicaciones a través de experiencias durante el desarrollo de actividades que eran guiadas por medio de episodios históricos de las ciencias.

El objetivo en esta etapa, fue nuevamente caracterizar los procesos de formalización: conceptualización y modelación en este campo de los fenómenos térmicos, pero en este caso de los docentes. Se hizo énfasis en la descripción de la organización conceptual que ellos hacían y la descripción es sobre lo que se percibía de sus comprensiones, para organizar dimensiones de análisis que resultan de este proceso.

Merleau - Ponty, como señala (Kafle, 2011), identificó cuatro aspectos comunes en las diferentes escuelas de la perspectiva fenomenológica, estas cualidades son: descripción, reducción fenomenológica, identificación de las esencias e intencionalidad de los sujetos.

2.3.2.1 La descripción fenomenológica

Moustakas define la descripción fenomenológica como: una estrategia de investigación en la que el investigador identifica la esencia de las experiencias humanas sobre un fenómeno tal como lo describen los participantes (Creswell, 2009) Citado por (Flores Macías, 2018). De acuerdo con esto, un proceder metodológico en fenomenología debe recoger diferentes aspectos:

“Leer toda la descripción para tener una idea total de lo expuesto, el investigador relee separando en unidades de significados, desde una perspectiva psicológica enfocado en el fenómeno investigado. Con las unidades de significado claras, se revisa y expresa la revelación encontrada sobre el fenómeno investigado. El investigador sintetiza del análisis generando una declaración consistente sobre las experiencias subjetivas. (Giorgi, 1985) (Flores Macías, 2018, pág. 20).

Esta idea de esencia de las experiencias pertenece al enfoque fenomenológico de Husserl (Giorgi, Giorgi, & Morley, 2017), cuya perspectiva de conocimiento supone la posibilidad de un conocer objetivo y concreto del mundo que se puede alcanzar a través de la búsqueda e identificación de las esencias. Este no es como tal el propósito de nuestra descripción.

Nos parece que caracterizar el proceso de aprendizaje de las ciencias aporta elementos para ser considerados en los procesos de enseñanza desde esta perspectiva particular. Sin embargo, no buscamos resultados para hacer prescripciones sobre cómo debe ser enseñada y aprendida la ciencia. En tanto que, desde la perspectiva de conocimiento de Merleau Ponty, quien como cita Perruchoud González (2017),

“Si queremos pues que la reflexión mantenga para el objeto que ella vehicula sus caracteres descriptivos y verdaderamente lo comprenda, no debemos considerarla como el simple retorno a una razón universal, realizarla de antemano en lo irreflejo, debemos considerarla como una operación creadora que participa, también ella, de la facticidad de lo irreflejo” Merleau-Ponty (1975), p. 82. Lo trascendental no considera únicamente la conciencia en sí como fuente de todo conocimiento, sino afirma que el mundo es más vasto y rico que ella. Al fin y al cabo, su mirada es siempre parcial y su potencia limitada.” (Perruchoud González, 2017, pág. 64).

Por lo cual, en esta investigación se comparten rasgos del proceder del método de la escuela de Husserl, sin embargo, el énfasis se ubica en la búsqueda e interpretación sobre procesos complejos como el conceptualizar, de los cuales reconocemos su carácter contingente, así

como el carácter contingente de los resultados pues éstos son extraídos, contruidos y definidos desde la interacción entre sujetos que trabajan en equipo, a partir de hechos parciales y haciendo una selección particular de aquello sobre lo cual se reflexiona; circunstancias que impiden pretender dar cuenta de mecanismos cognitivos internos o individuales. Afortunadamente, muchos investigadores en el campo de la evaluación de las investigaciones cualitativas, reconocen la dificultad para adoptar criterios fijos de validación en este tipo de investigaciones. (Salgado Lévano, 2007).

2.3.2.2 La reducción fenomenológica

Para nuestro caso, una reducción fenomenológica consiste en utilizar el material textual y expositivo de los docentes: sus actos comunicativos, descripciones, reflexiones y la producción de nuevas experiencias propuestas por ellos, como objeto de estudio; y traer a nuestra conciencia las formas de producir significados sobre los fenómenos térmicos dentro ese acontecer en el aula. Es una reducción fenomenológica en el sentido de que nos permite categorizar elementos comunes a los procesos de conceptualización. Las dimensiones de análisis emergentes de este proceso, se interpretan para identificar rasgos que permitan describir sus procesos de conceptualización.

La reducción es un proceso que consiste en suspender o poner entre paréntesis los fenómenos de modo que se pueda volver a las 'cosas mismas'. Asimismo, una esencia es el significado central de la experiencia de un individuo que lo hace lo que es. Finalmente, la intencionalidad se refiere a la conciencia ya que los individuos siempre son conscientes de algo. Esto significa que la intencionalidad es el significado total del objeto o de la idea que es siempre más de lo que se da en la percepción de una sola perspectiva. (Kafle, 2011).

Entendemos por método fenomenológico hermenéutico, la actitud básica y descriptiva que nos permite captar el objeto fenómeno [construcción conceptual] tal y como se presenta en sus transformaciones, por lo cual no pretendemos establecer unas características definitivas, ni dogmáticas o prescriptivas. Nos interesa la posibilidad de derivar conocimiento sobre los procesos de conceptualización en ciencias que le den sentido y significado a las acciones de enseñanza, y la búsqueda de estructuras de sentido que se pueden derivar de la reflexión fenomenológica, de acuerdo con (Vaquer, 2018):

En la reflexión fenomenológica se aprecia la estructura de la relación de la intencionalidad: como una experiencia se dirige hacia un objeto de la

conciencia a través de un sentido o significado particular. Somos conscientes de cosas -conocemos o intencionamos cosas- solamente a través de estructuras de sentido que presentan o prescriben esas cosas de maneras particulares. Sin embargo, no somos conscientes del sentido a través del cual experimentamos un objeto hasta que no damos un paso atrás de la experiencia y abstraemos su contenido. Solamente mediante la reflexión fenomenológica somos conscientes de los significados a través de los cuales intencionamos los objetos en el mundo circundante. (Vaquer, 2018)

Bajo este panorama, consideramos que la mirada fenomenológica tiene dos lugares importantes en este trabajo:

1. Una perspectiva filosófica sobre la cual se propone un actuar para la enseñanza que involucra la actividad experimental como eje articulador de las experiencias fenoménicas de la física o de las ciencias, y,
2. Un método desde el cual se estructura y organiza aquello que sucede en el aula como experiencia de conocimiento. Se seleccionan hechos y aspectos que creemos fundamentales (ideas y conocimientos) para luego constituir esquemas interpretativos más o menos formales en relación con el contexto en el cual se producen.

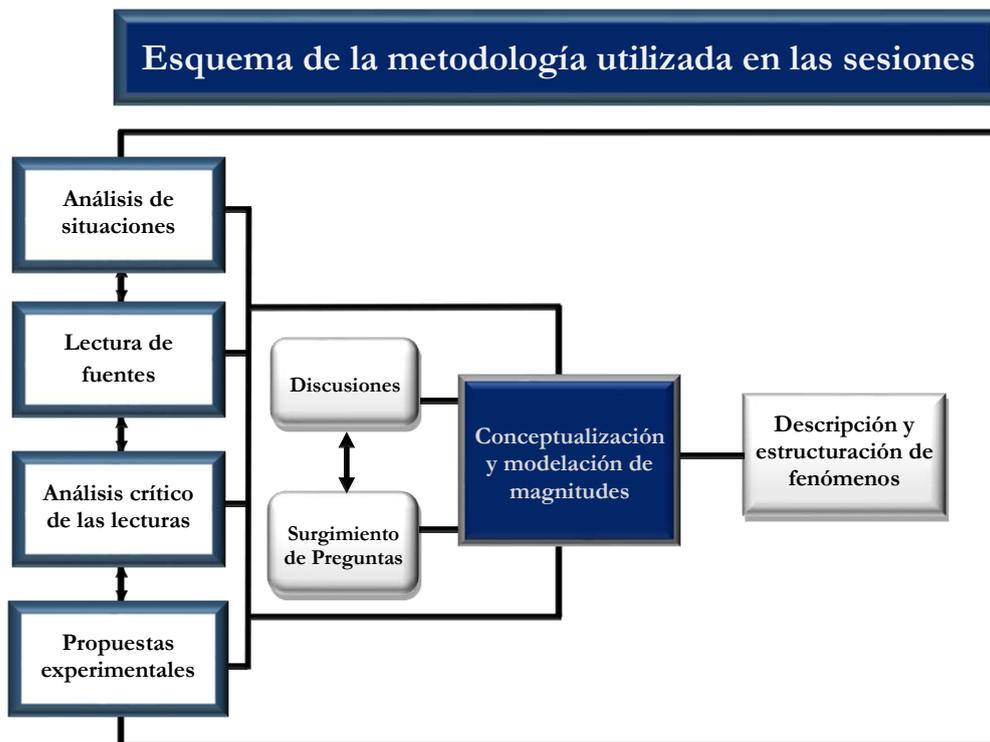
Canedo resalta que, en los estudios fenomenológicos no hay fases definidas para su desarrollo pues el propósito es comprender diferentes sucesos cuando se presentan (Canedo Ibarra, 2009). Se encuentra definido el análisis de contenido a través del cual se rastrean conceptos, ideas principales comunes, representaciones, contradicciones, etc.

2.3.2.3 Recopilación de la información y descripción de acciones para el análisis cualitativo

Como ya hemos señalado, en el desarrollo de las actividades de estudio sobre fenómenos térmicos participaron:

- Docentes en formación posgradual de Especialización en docencia de las ciencias para el nivel básico y Maestría en docencia de las ciencias naturales. Las clases se desarrollaron en compañía de la profesora Liliana Tarazona Vargas, docente del Departamento de Física, quien participó en algunas orientaciones de las actividades en el aula.

A ellos se les invitó a desarrollar la secuencia didáctica titulada: La Organización de los Fenómenos Térmicos (Ver Anexo 1), se les invitó a reflexionar sobre diversas situaciones térmicas y sobre el sentido de los modelos que se construyen a partir de la exploración fenomenológica, en el desarrollo de actividades abiertas, como se representa en el siguiente esquema.



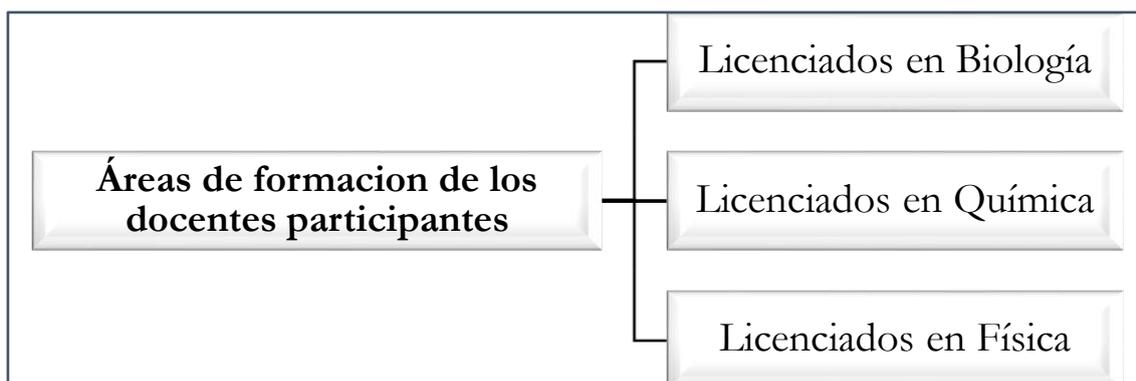
Cuadro 4. Esquema de la metodología de trabajo en el aula.

Se realizaron 16 sesiones de clase²¹ que se orientaron a través de episodios históricos que propiciaron las prácticas experimentales y dialógicas desarrolladas durante el curso, con una duración de 4 horas cada sesión, durante el primer semestre 2021. Los docentes se distribuyeron voluntariamente en equipos tres integrantes que documentaron su trabajo, tuvieron la posibilidad de proponer por sí mismos actividades experimentales de su autoría o de su propia motivación que les permitieran resolver sus preguntas de indagación.

Durante las sesiones de clase, enfatizamos en que los docentes profundizaran a través de la lectura de fuentes primarias, sobre las cuales se generaron discusiones grupales y análisis de las problemáticas allí expuestas. Además, solicitamos que registraran su proceso en una

²¹ Clases remotas a través de la plataforma Teams, pues el proceso de trabajo de aula se hizo durante el periodo de confinamiento (2021) a causa de la pandemia COVID_19.

bitácora, o en una revista, o en un diario de campo o narrativa, sirviéndonos de estrategia para recoger la información de sus producciones. De acuerdo con esto, los docentes documentaron su trabajo grupal, construyendo páginas web en las que organizaron y presentaron sus experiencias, expusieron el resultado de los análisis propios con fotografías, imágenes y videos de las actividades experimentales, resumieron los documentos y mostraron conclusiones coherentes con lo que iba surgiendo dentro del contexto de aula.



Cuadro 5. Áreas de formación de docentes participante en la investigación.

Nuestra siguiente etapa de la investigación consistió en transcribir las intervenciones de los docentes participantes en las diferentes sesiones. A través de las transcripciones describimos aquello vivenciado en el aula, en función de los discursos de los docentes. Y posteriormente, hicimos un análisis interpretativo del discurso que iba acompañado de lo que ellos presentaban en sus sitios web. Es importante resaltar que para realizar el análisis de la información no utilizamos ningún tipo de software especializado y se realizó un análisis manual sobre el corpus textual.

El análisis de contenido e interpretación se realizó examinando los datos, agrupándolos en temas, siguiendo la pista de esos temas y buscando datos emergentes, se elaboraron tipologías propias, (que corresponden a los resultados presentados en el capítulo ocho), y algunas coincidentes con otras investigaciones (descritas a través de las dimensiones de análisis del capítulo seis), sobre las cuales se presentan descripciones, como propone (Salgado Lévano, 2007) dentro del análisis cualitativo de contenido.

De acuerdo con lo anterior, las acciones derivadas de esta etapa consistieron en:

- Análisis de las transcripciones del material audiovisual de las 16 sesiones desarrolladas y del material que los docentes organizan en páginas web.

- Identificación de aspectos vinculados con procesos de conceptualización y modelación.
- Organización de las dimensiones de análisis para la tipificación por temas.
- Descripción de los procesos de organización conceptual y de modelación teórica en el ámbito del estudio de los fenómenos térmicos.
- Caracterización de los procesos de organización conceptual y de modelación teórica en el ámbito de las clases de termodinámica y estudio de los fenómenos térmicos.

Como hemos señalado anteriormente, la reducción fenomenológica en este caso corresponde a la elección de las dimensiones de análisis y la tipificación por temas que resulta de esto. Ahora bien, estas dimensiones buscaban captar aspectos de la experiencia de los sujetos en la inmersión de este trabajo de aula, que nos proporcionaron un panorama frente a los procesos conceptuales elaborados por los docentes y que nos parecen relevantes.

Implican un "corte" o una selección particular hecha por nuestra mirada, una proyección que incluye algunos aspectos que nos atañen del proceso desde una perspectiva en la cual el conocimiento mismo es un proceso, buscamos dar cuenta de éste y no del estado final de la comprensión sobre un asunto, porque nos parece que ninguna comprensión está predeterminada ni siquiera desde el corpus de las teorías científicas, por lo cual excluimos otros aspectos, como aquellos que indican si los docentes responden bien o mal frente a algún corpus teórico particular.

Por lo cual, la imagen del "cortar" implicó leer e interpretar los procesos desde una perspectiva que como se ha señalado no busca ser de ninguna manera prescriptiva y que tiene por objeto narrar, desde la perspectiva de esta investigación, la experiencia de la propuesta desde la lectura de las acciones de los sujetos participantes por lo cual también se refiere a nuestras formas de investigar y describir.

La identificación y tipificación de temas vinculados con procesos de conceptualización y modelación, sugiere los elementos de intencionalidad de este trabajo que hacen énfasis en el proceso de significación de la experiencia en el aula con estos grupos de docentes.

Y la descripción y la reflexión fenomenológica se convierten en los elementos clave en la caracterización de los procesos de organización conceptual y de modelación teórica en el ámbito del estudio de los fenómenos térmicos, con los docentes en formación y en ejercicio profesional, por lo cual hemos detallado aún más estos aspectos en el capítulo siete, con la finalidad de presentar mayor precisión tanto epistemológica y ejecutiva sobre el desarrollo de la descripción fenomenológica.

En concordancia, interpretamos cómo se desarrollan los procesos de conceptualización referidos a los fenómenos térmicos de calentamiento, enfriamiento, expansión, compresión que, en un primer lugar, vinculan aspectos propios de la calorimetría o termometría, y que posteriormente, conducen al establecimiento de una mirada dinámica de los fenómenos térmicos. De acuerdo con Roth et al. (1997):

suggest that instead of rejecting or neglecting students' non-canonical observations and interpretations, teachers need to establish forums in which the diversity of interpretations can be discussed and contrasted with the canonical views, which the teacher may have to contribute him- or herself. Citada por (Østergaard, Dahlin, & Hugo, 2008).

En ese sentido, siguiendo el planteamiento de Roth, nuestra interpretación o descripción fenomenológica asumió que:

... every interpretation emerges from the interaction of the 'horizon' individuals bring to the situation and the 'horizon' of the text/thing. In this interaction, world is divided into foreground and background. This foregrounding brings out the aspects of the thing, the particular understanding of the text the individual looks at. Because students 'put their minds on' to make sense of observations these are in most cases not those of scientists. (pp. 130–131; italics in original) (Østergaard, Dahlin, & Hugo, 2008, pág. 105).

En síntesis, a través del diseño metodológico buscábamos responder los objetivos de investigación de la siguiente manera:

El primer objetivo se abordó través del análisis histórico-crítico de algunos episodios históricos en la constitución de las teorías del calor. En una primera etapa describimos cómo las experiencias sensoriales forman las bases para comprender fenómenos térmicos organizados en las teorías del calor de los siglos XVIII y XIX, teorías estructuradas a través de los conceptos fundamentales sobre los que describen las actuales leyes de la termodinámica: calor, energía y entropía, a estas experiencias las hemos llamado la base

fenomenológica en la organización teórica de la termodinámica. Mostramos aquí cómo se van modificando las ideas sustancialistas del calor por ideas en las cuales es necesario introducir nuevas conceptualizaciones y representaciones como la relación calor-trabajo que deriva en energía. También exponemos cómo esas nuevas conceptualizaciones implican una mirada dinámica y generalista de los procesos físicos.

Posteriormente, en la segunda etapa de investigación, estructuramos la secuencia didáctica titulada: La Organización de los Fenómenos Térmicos, un compendio de los documentos históricos, organizado como material de trabajo para los docentes, en el cual la lectura de los textos se acompaña de actividades lecto – escriturales y experimentales con la finalidad de movilizar sus saberes disciplinares. Ahora bien, para intervenir en el aula debimos explicitar los criterios pedagógicos y didácticos que surgen del estudio de caso y que aportan a la formación de docentes de ciencias.

En la tercera etapa de la investigación, interpretamos cómo un grupo de docentes en formación posgradual organizaban sus conceptualizaciones en el estudio de los fenómenos térmicos al involucrarse en el análisis de los episodios histórico y a través de las actividades experimentales que se iban desarrollando en la clase, porque nuestra finalidad consiste en caracterizar estrategias en los procesos de los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos, en la termodinámica clásica.

En la cuarta etapa, hacemos el proceso de reducción fenomenológica, en otras palabras sintetizamos los resultados de los estudios realizados durante las etapas anteriores y elaboramos las conclusiones generales del trabajo de investigación.

SÍNTESIS DE OBJETIVOS Y ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN				
Preguntas de Investigación	<ol style="list-style-type: none"> ¿Cómo se desarrollan los procesos de los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos, en la termodinámica clásica? ¿Cuáles son los criterios pedagógicos y didácticos que surgen de este estudio de caso y qué aportan a la formación de docentes de ciencias? 			
Objetivos Generales	<ol style="list-style-type: none"> Caracterizar los procesos los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos, en la termodinámica clásica. Describir los criterios pedagógicos y didácticos que surgen del estudio de caso y sus aportaciones a la formación de docentes de ciencias. 			
Objetivos Específicos	<p>OE1. Describir los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en el desarrollo histórico de las teorías del calor que constituyen el campo de la termodinámica clásica.</p>	<p>OE2. Diseñar una secuencia de enseñanza sobre los fenómenos térmicos basada en la introducción de episodios históricos de las teorías del calor que permita el contexto para interpretar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización.</p>	<p>OE3. Interpretar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos que desarrollan los docentes de ciencias al hacer uso del análisis de estos episodios históricos de las teorías del calor.</p>	
Etapas de la Investigación	Etapa 1. Análisis histórico -crítico	Etapa 2. Construcción de la Secuencia didáctica de trabajo	Etapa 3. Interpretación fenomenológica	Etapa 4. Exposición de resultados y conclusiones (Reducción fenomenológica)
Acciones para el cumplimiento de objetivos según las etapas de investigación	<p>Seleccionar episodios episodios históricos, que permitan:</p> <p>Identificar y caracterizar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en el ámbito de las teorías del calor.</p>	<p>Identificar los problemas de estudio que orientarán la discusión en el aula, en relación con los episodios históricos seleccionados.</p> <p>Diseñar actividades de aula, proponer arreglos experimentales para la indagación.</p> <p>Implementar la secuencia didáctica con los docentes participantes.</p>	<p>Establecer dimensiones de análisis y tipificación de aspectos para la caracterización de los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en el ámbito de las clases de termodinámica y estudio de los fenómenos térmicos.</p> <p>Análizar las transcripciones del material audiovisual de las 16 sesiones desarrolladas y del material que los docentes organizaron en páginas web.</p>	<p>Identificar aspectos vinculados con procesos de de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos, en la termodinámica clásica.</p> <p>Sintetizar los resultados de los estudios realizados durante las etapas 1, 2 y 3 y elaborar las conclusiones generales del trabajo de investigación.</p>

Cuadro 6. Síntesis de Objetivos y actividades de investigación.

Fundamentación Teórica

3 Conceptualización, modelación y teorización en física. Reflexiones desde la Filosofía de la Ciencia

∞ Ya que nuestra inclinación hacia los procesos de conceptualización surgen motivados por generar aproximaciones al estudio de la física que sean significativos para docentes y estudiantes, en este capítulo presentamos un panorama respecto a los estudios de la filosofía de la ciencia sobre la formación de conceptos y estructuración teorías científicas, en el cual se discuten los puntos de vista de diferentes corrientes que nos llevaron a incorporar una mirada fenomenológica pertinente en el contexto de la enseñanza. Consideramos que abordar estas problemáticas genera criterios para asumir la enseñanza de la física, en tanto, a los docentes, nos provee de comprensiones sobre cómo los sujetos asignamos significados a las situaciones del mundo físico que queremos abordar en las aulas.

Al definir el campo temático de este trabajo, en el capítulo uno, quisimos mostrar un panorama general sobre cómo y por qué los procesos de formalización: formación de conceptos y de teorización se convierten en un problema de análisis importante en la epistemología, la filosofía y la historia de las ciencias, y en un ámbito ineludible para problematizar su enseñanza en el contexto de formación de profesores. Se mostró que epistemólogos, historiadores y filósofos de las ciencias han tenido diversas maneras y criterios para pensar los procesos de conceptualización y de teorización, procesos dentro de los cuales la física ha sido un campo emblemático al ser considerado como altamente estructurado en su teoría.

No obstante, consideramos que era necesario presentar un contexto más específico y profundizar sobre los asuntos que nos llevan a enfatizar en la organización o formalización conceptual, y adoptar una mirada fenomenológica sobre la teoría que sea pertinente para dotar de significado el estudio de la física con docentes. Nos pareció imprescindible presentar el panorama en el que se desarrollan las discusiones de la filosofía de las ciencias, para finalmente, explicitar las diferentes perspectivas respecto a la teorización y formación de conceptos y señalar dentro de ese contexto: qué entendemos por concepto, por modelo, por formalización. Así, detallamos algunos enfoques desde los cuales se comprenden estas

nociones, con la finalidad de presentar nuestro marco interpretativo para caracterizar las acciones de conceptualizar, modelar y teorizar en el caso de estudio de la termodinámica²².

3.1 La formalización

☞ Veremos a continuación que la formalización ha sido estudiada desde diferentes facetas en un intento por entender cómo los sujetos asignamos significados a las situaciones del mundo físico. Se ha estudiado desde enfoques lógicos, semánticos, experimentales, psicológicos y también desde la enseñanza de las ciencias.

Las expresiones: lógica formal, lenguaje formal, ciencias formales están asociadas a la idea específica de alcanzar una estructuración axiomática muy estable, de un sistema de proposiciones que se consideran verificables y que se ordenan siguiendo algunas reglas. La formalización en física ha estado vinculada con la idea de que la estructura de la matemática es aplicable a los fenómenos físicos porque el lenguaje formal de la física es el lenguaje matemático. Esto ha llevado a considerar que dentro de una teoría es importante:

1. La adecuación de las estructuras axiomáticas de las matemáticas (álgebra) a las proposiciones, como fue expuesto por el enfoque clásico de filosofía de las ciencias.
2. La adecuación de las estructuras matemáticas (teoría de conjuntos) a conjuntos de proposiciones, como fue expuesto por el enfoque modelista o semántico de las teorías.

Estos dos enfoques tienen sin duda grandes diferencias que se expondrán más adelante. No obstante, comparten la idea más aceptada de que la teorización es la acción de formalizar a través de una estructura matemática deductiva que sistematiza el conocimiento científico.

Veremos a continuación que los estudios sobre el lenguaje han sido un campo fértil para caracterizar las relaciones entre lo que consideramos el mundo sensible o físico y el mundo de las ideas, un asunto que lejos de resolverse por caminos únicos nos lleva a problematizar sobre: cómo entendemos los fenómenos, la experimentación, las medidas, los datos, las

²² Resaltamos que no es nuestra pretensión definir cada concepto en una única vía o con una mirada prescriptiva, consideramos que estos procesos son contextuales, por lo que es pertinente en la comprensión identificar su estudio en el contexto del análisis teórico, reconocemos que el estudio caso nos ayuda a caracterizar estos términos.

representaciones y modelos, en el campo de la enseñanza de las ciencias, de la física en particular.

3.1.1 La escuela clásica de filosofía de las ciencias: Vocabularios y Teorización

La escuela clásica de filosofía de la ciencia, o Concepción Heredada, aborda el problema de la conceptualización proponiendo que los conceptos de la ciencia, como los de la vida cotidiana, se pueden dividir en: clasificatorios, comparativos y cuantitativos.

Los conceptos clasificatorios permiten ubicar un objeto o entidad dentro de una clase o conjunto, son los conceptos mediante los que se construyen las tipologías y las taxonomías, son descriptivos y hacen parte de un lenguaje cualitativo.

Los conceptos comparativos establecen ordenes entre los objetos (más o menos alto que, más o menos frío que, etc.) aportando a la descripción que hacen los conceptos clasificatorios, por lo cual, también hacen parte de un lenguaje cualitativo. Los conceptos comparativos son la base para la construcción de conceptos cuantitativos.

Los conceptos cuantitativos por su parte, se construyen a través de la elaboración de métricas que consisten en la asignación de valores numéricos que corresponden a señalar cuánto más o menos en los términos de la comparación (es dos veces más alto o 3 veces más frío o la mitad de pesado, etc.), hacen parte de un lenguaje cuantitativo. (Carnap, 1985, págs. 77 - 90).

Como se aprecia, estos conceptos tienen su origen en la observación, por lo cual son los conceptos que forman la base del vocabulario observacional o empírico referido a los objetos físicos y sus características. Sin embargo, desde esta organización los conceptos cuantitativos son superiores a los conceptos comparativos y mucho más elaborados que los conceptos clasificatorios, son elementos del vocabulario que da forma al lenguaje cuantitativo. Para Carnap, todo vocabulario estructura un lenguaje.

De acuerdo con esto, la escuela clásica establece una jerarquía que diferencia entre lenguaje cualitativo y lenguaje cuantitativo. Mientras el lenguaje cualitativo se dedica a asignar características a los objetos, es decir, a establecer predicados, el lenguaje cuantitativo introduce símbolos para establecer relaciones y funciones que adquieren valores numéricos. El lenguaje de la física es, para Carnap, un lenguaje cuantitativo, simbólico y construido mediante reglas que permiten describir los hechos de la naturaleza a través de valores

numéricos, lenguaje en el cual el papel de la medición ha sido preponderante siendo la matemática la que aporta los métodos para la medición (el método de conteo, el cálculo infinitesimal, etc.).

Todo lenguaje, dice él, es un sistema de conceptos y todo lenguaje está constituido por reglas de vocabulario, reglas para construir oraciones, relaciones entre oraciones, etc. (Carnap, pág. 87) Al ser las proposiciones y las relaciones entre proposiciones los objetos de estudio de la lógica, entonces es posible aplicarla a este lenguaje cuantitativo y obtener de allí deducciones lógicas. Esta perspectiva, conduce a la escuela clásica a estudiar la teoría desde la sintaxis de un lenguaje y en forma de premisas lógicas, identificando el orden y las relaciones de los términos del lenguaje cuantitativo, desdeñando aquello que no pueda ser lógicamente posible dentro del sistema.

Por otra parte, la escuela clásica reconoce que leyes de la física también pueden expresarse en un lenguaje cualitativo (Carnap). En las etapas iniciales de la investigación científica, dice Hempel, las descripciones y las generalizaciones se establecen en el vocabulario del lenguaje cotidiano. Sin embargo, el crecimiento de una disciplina científica siempre trae consigo el desarrollo de un sistema de conceptos más o menos abstractos, y de una terminología técnica correspondientemente especializada. (Hempel, 1971) La necesidad de axiomatización resulta ser entonces no sólo una intención de ordenación de proposiciones, sino y sobre todo, el proceso de filtro para distinguir que aquellas proposiciones que entran en el sistema axiomático son aquellas que han sido verificadas y probadas de forma tal que el sistema se considera consistente.

Por lo cual, en una estructura teórica axiomática, las leyes se encuentran relacionadas y jerarquizadas, la estructura es establecida mediante conceptos cuantitativos (magnitudes), que se relacionan estableciendo funciones, lo cual lleva a que un pequeño número de premisas fundamentales puedan ser definidas a través de operaciones lógicas con otros enunciados, lo que muestra la posibilidad de que leyes cualitativas puedan ser expresadas a través de reglas de correspondencia entre conceptos cualitativos y conceptos teóricos, y operadores lógicos.

Un buen ejemplo para comprender estas operaciones (reglas de correspondencia) es la construcción de la escala de temperatura propuesta por Carnap (1985), y que sintetizamos a continuación:

La temperatura es inicialmente un concepto pre-cuantitativo, se puede diferenciar qué cuerpos están más calientes o fríos comparativamente a través de la sensación percibida de dos o más cuerpos. Sin embargo, las personas pueden tener sensaciones diferentes para determinar cuáles objetos están más calientes o fríos, por lo cual, al ser en ese momento una comparación de carácter subjetivo, se necesita precisar cuán caliente está un objeto en relación con otro. El termómetro brinda el método para hacer una comparación de carácter objetivo.

Decir que un objeto está igualmente caliente que otro es establecer una relación de identidad entre temperaturas, llamada: Relación I. Decir que un objeto es menos caliente que otro es establecer una relación de orden entre temperaturas, llamada: Relación L.

Estas relaciones I_T y L_T para la magnitud de la temperatura, se pueden definir mediante el termómetro, cuando se ha hecho el siguiente proceso:

Se identifica que el mercurio se dilata cuando se pone en contacto con agua caliente y se contrae cuando se pone en contacto con agua fría. Se pone en contacto un cuerpo a con el termómetro, se espera a que no haya ningún cambio en la altura del mercurio y se marca el nivel. Se aplica la misma operación a un cuerpo b . La relación I_T queda definida si los dos cuerpos llegan a la misma marca, mientras que la relación L_T queda definida si el cuerpo a queda en una marca inferior a la marca del cuerpo b . Las reglas simbólicas que definen estas operaciones son:

Regla 1: Si $I_T(a,b)$, entonces $T(a) = T(b)$

Regla 2: Si $L_T(a,b)$, entonces $T(a) < T(b)$

Para asignar un valor numérico se requieren otras reglas adicionales.

Regla 3: Se identifica un estado fácilmente reconocible y reproducible para asignar un valor numérico cero. En este caso, el punto de congelación del agua.

Regla 4: Se identifica otro estado igualmente reconocible y fácilmente reproducible para asignar otro número que sirve de patrón o unidad. En este caso, el punto de ebullición del agua, número 100 de la escala centígrada.

Regla 5: Se identifican las diferencias entre dos valores para especificar las condiciones empíricas ID_M , dos diferencias (D) entre dos valores, son iguales a la diferencia de magnitud (M) entre los valores. La diferencia entre dos valores a y b , es la misma diferencia entre dos valores distintos c y d . Esta diferencia especifica la escala.

Si $ID_M(a, b, c, d)$, entonces $M(a) - M(b) = M(c) - M(d)$

Esta regla señala que cuando los volúmenes de mercurio entre a y b , son iguales a la diferencia de volúmenes entre b y c , entonces las diferencias de temperatura son iguales y se puede establecer la escala. ID_M es, por lo tanto, la identidad entre las unidades de medida que definen la escala del termómetro.

Carnap finaliza señalando que el uso de números como valores de nuestra escala supone una estructura de relaciones lógicas que no son convencionales porque no podemos abandonarlas sin incurrir en contradicciones lógicas. (Carnap, 1985, págs. 91 - 100)

A través del ejemplo anterior, se describen las reglas de operación para construir una magnitud o concepto cuantitativo. Las reglas establecen la correspondencia entre:

Los conceptos observacionales, que son los criterios empíricos que se tienen en cuenta para construir el termómetro: como la identificación de las condiciones físicas necesarias para establecer la medida de un termómetro: los puntos de congelación y ebullición del agua, las comparaciones entre objetos a través de un instrumento y la definición de una distancia métrica dentro de la comparación.

Los conceptos teóricos, que constituirán los valores de la unidad de la escala, donde la expresión resultado de la comparación $M(a) - M(b) = M(c) - M(d)$ garantiza la métrica, es decir, que la diferencia entre un grado medido entre las líneas 10 y 11 de la escala de un termómetro sea la misma diferencia de un grado entre 50 y 51 de la misma escala del mismo termómetro.

Según esta escuela, la introducción de criterios para cuantificar la medida de las comparaciones ayuda a establecer un lenguaje objetivo, libre de especulaciones y entidades metafísicas que fortalece la eliminación de la subjetividad. Esta es entonces la contribución, y también el objetivo, del lenguaje teórico.

Suppe (1979) resume las operaciones de esta concepción de siguiente manera:

En lo esencial, esa versión inicial de la Concepción Heredada concebía las teorías científicas como teorías axiomáticas formuladas en una lógica matemática L , que reunía las siguientes condiciones:

(I) La teoría se formula en una lógica matemática de primer orden con identidad, L .

(II) Los términos no lógicos o constantes de L se dividen en tres clases disjuntas llamadas *vocabularios*:

a) *El vocabulario lógico* que consta de constantes lógicas (incluidos términos matemáticos)

b) *El vocabulario observacional* V_o que contiene términos observacionales.

c) *El vocabulario* V_t , que contiene términos teóricos

(III) Los términos de V_o se interpretan como referidos a objetos físicos o a características de los objetos físicos directamente observables.

(IV) Hay un conjunto de postulados teóricos T , cuyos únicos términos no lógicos pertenecen a V_t .

(V) Se da una definición explícita de los términos de V_t en términos de V_o mediante reglas de correspondencia C , es decir, para cada término 'F' de V_t debe de ser dada una definición de la siguiente forma:

(x) / $(Fx = Ox)$, donde 'Ox' es una expresión de L que contiene símbolos solamente de V_o y posiblemente del vocabulario lógico. (Suppe, 1979, pág. 35).

En síntesis, los términos o conceptos teóricos establecen correspondencia con los términos observacionales a través de reglas y operadores lógicos. Estas reglas operan en el establecimiento de los conceptos cuantitativos que han resultado de conceptos clasificatorios y comparativos, por lo tanto, los conceptos cuantitativos son los que pueden constituir el lenguaje cuantitativo de la ciencia con el cual se supera la expresión de enunciados subjetivos.

En ese sentido, en la concepción heredada, los términos teóricos son los que entran en el proceso de axiomatización y sientan la base para que se considere que una teoría es la expresión formal de los enunciados cuantitativos, de ahí que se suele considerar que la teoría es la matematización de las leyes de la experiencia, y que la organización de modelos matemáticos es la acción de teorizar.

De este modo, la concepción heredada propone que los términos teóricos son configurados desde los términos observacionales mediante un proceso inductivo en el cual se van produciendo las leyes y ordenando los enunciados teóricos definitivos. Las leyes empíricas se transforman en definiciones formales y, finalmente, en leyes teóricas y principios. En el proceso de generalización, los principios se convierten en las premisas básicas o axiomas a partir de los cuales se establece la estructura teórica, las leyes teóricas subsumen todas las leyes empíricas o casos particulares derivados de la experiencia.

En este desarrollo, los procesos experimentales a través de los cuales se generan los conceptos observacionales y cuantitativos, sirven de sustento a la verificación de los conceptos teóricos. La jerarquía que se establece entre los tipos de conceptos, que estima que los conceptos cuantitativos son superiores, es la misma jerarquía que sostiene que la teorización, entendida principalmente como matematización, es una actividad superior a la experimentación, así las teorías científicas cumplen la mayor función de sistematización de un corpus de conocimiento.

A partir de esta jerarquía, se considera, que las ciencias organizadas formalmente mediante la lógica binaria y la matematización tienen en su estructura criterios cuantitativos que proporcionan objetividad a los datos, por lo tanto, son más elaboradas y mejores que aquellas ciencias descriptivas. De ahí que se haya considerado que la física teórica fuera la ciencia más desarrollada y modelo a seguir de las otras disciplinas. De acuerdo con lo anterior, las ciencias, en general, deberían tender hacia la elaboración de conceptos cuantitativos.

Este enfoque de la concepción heredada conduce a asumir que el lenguaje teórico es aquella sistematización que aporta la simbología lógica - matemática, que puede considerarse libre de interpretaciones y además perfectamente validable a través de la lógica binaria o la experimentación. La pretensión de cuantificación de todos los observables y la objetivación de la ciencia a través de datos numéricos es una de las grandes críticas que se hace a esta mirada positivista.

Pese a la crítica que recibe esta escuela, es posible resaltar que puso el foco de atención en el análisis de las magnitudes físicas como lugares centrales para comprender la formación de conceptos en física. Tal como señaló, Brian Ellis (1966), este formalismo es un logro comparativamente reciente, muchas proposiciones aritméticas fueron descubiertas como un

resultado de operaciones de conteo y de medida (Ellis, 1966, pág. 17). Michel Paty (2003) señala, por su parte que,

algunas de tales operaciones que vinculan magnitudes físicas con procesos de matematización son un requisito de acuerdo con las magnitudes que se toman en consideración, no siempre ha existido esta vinculación y la forma en que se han relacionado la física y matemática se ha modificado a lo largo de la historia, aspecto que discutiremos más adelante. (Paty, 2003).

3.1.2 Nuevo Experimentalismo

Se venía diciendo que una de las críticas que se hace al Círculo de Viena es la pretensión de aislar los conceptos en definiciones que a su vez están separadas del corpus fenoménico del cual hacen parte, y vincularlos únicamente mediante un procedimiento observacional.

Suppe (1979) lo pone en los siguientes términos:

Dado que los conceptos o propiedades se identifican con una única combinación de operaciones, cada diferente procedimiento experimental define un concepto diferente, hay tantos conceptos distintos de masa como procedimientos para determinarla. En la práctica científica, no obstante, estos diferentes procedimientos se considera que miden la misma cosa, la masa; por tanto, la definición operacional no es satisfactoria como análisis del significado (ni, por consiguiente, de la significación cognitiva) de los términos teóricos. (Suppe, pág. 39).

Esta pretensión, sin embargo, tiene una razón de ser muy válida, la masa como magnitud, usando el ejemplo que propone Suppe, no puede tener un significado distinto cuando el fenómeno en el que se estudia la masa es mecánico, a aquel que tiene cuando la masa está involucrada en un proceso químico, o térmico o electro, etc. en tanto es una característica general y organizadora de nuestras comprensiones sobre la materia; por ejemplo, 5 gramos de aluminio que se ponen en juego para nivelar una balanza, medirán los mismos 5 gramos si esta sustancia se pone en una reacción, y en ese caso, se espera que este concepto masa no se modifique de acuerdo al tipo de fenómeno en el cual interviene la masa.

De la misma manera ocurre con nuestro ejemplo de medida de la temperatura, es necesaria una correspondencia estable en significado y cantidad no importa si ésta se mide con la sustancia termométrica mercurio o alcohol, de la misma manera que si se cambia la escala de medida hay una correspondencia con la medida absoluta de temperatura que es la medida que se presupone como teórica. Esta correspondencia en cantidad y significado es necesaria

porque una magnitud física expresa el significado más general posible y no únicamente el caso particular del que trata en un momento dado. De ahí, que los procesos de calibración y adecuación de escalas en los instrumentos de medida sea un aspecto tan importante de la medición.

Es evidente, sin embargo, que hay un problema cuando se quiere asignar un único significado y una única operación a los procesos de conceptualización de magnitudes físicas. Y el problema se debe a que, en la escuela clásica: los experimentos, los datos, las observaciones y los fenómenos sobre los que se teoriza, quedan todos ellos reducidos únicamente a los enunciados observacionales. (Guerrero Pino, Datos, fenómenos y teorías, 2012)

Las preguntas: ¿cuál es el estatus de los datos dentro de los procesos experimentales? ¿Cuál es el lugar o el papel de la experimentación en la construcción del conocimiento científico? derivadas de estas dificultades, introducen nuevos campos de análisis para describir los vínculos entre teoría y procesos empíricos. Estos estudios llamados nuevo experimentalismo, con el trabajo de Ian Hacking a la vanguardia, organizan en filosofía de las ciencias la denominada epistemología de la experimentación. (Franklin, 2019).

Al hacer un análisis del papel de los experimentos en Física, esta escuela del nuevo experimentalismo pudo identificar que la experimentación tiene múltiples roles en el proceso de construcción de conocimiento científico, roles que superan con creces aquella idea de que el papel del experimento es la verificación o contrastación de hipótesis y de teorías o que en ausencia de hipótesis o teorías que probar, y que aplicar, la experimentación carece de sentido.

La escuela clásica, como se señaló anteriormente, redujo los enunciados observacionales al lenguaje cualitativo de forma que la experimentación, a su vez, quedó reducida a dos cosas:

1) A suministrar los datos numéricos que resultan del experimento y que entrarán en las leyes y teorías, o de los cuales resultan leyes y teorías,

y 2) A la comprobación de leyes y teorías a través de las propiedades observables.

Por su parte, Harré (1986) identifica que, en general, todos los experimentos hacen parte de algún programa de conocimiento, algunos anteceden las teorías, otros ayudan a la emergencia de teorías, otros permiten que se elija entre dos teorías en disputa (Harré, 1986). Hay

experimentos que originan entidades y otros que señalan la evidencia de nuevas entidades, hay experimentos que articulan teorías, hay otros que requieren que se modifiquen las teorías, etc. Franklin señala que,

los experimentos pueden proporcionar pistas sobre la estructura o la forma matemática de una teoría y puede proporcionar evidencia de la existencia de las entidades involucradas en nuestras teorías. Finalmente, también pueden tener vida propia, independiente de la teoría. Los científicos pueden investigar un fenómeno solo porque parece interesante. Tales experimentos pueden proporcionar evidencia para explicar una teoría futura. (Franklin, 2019).

Con esto se manifiesta la diversidad de roles que puede tener la experimentación en la ciencia. No obstante, lo más habitual en el campo de la educación científica es que lo que se enseña está más relacionado con los productos que se obtienen que con las actividades y procesos a través de las cuales estos productos se construyen, dejando en un segundo plano el carácter práctico del conocimiento científico.

En este sentido, Ian Hacking (1983) logró introducir una revaloración de la actividad experimental. En ella se asume la expresión “el experimento tiene vida propia” y reclama una revisión de la relación teoría – experimentación que ubicó en dos términos: Representar e Intervenir (1983), que identifican al llamado nuevo experimentalismo.

Hacking se aproxima al problema ubicándolo en la discusión sobre el realismo y el convencionalismo de las teorías científicas. En los términos de la discusión, se distingue entre entidades teóricas (como los quarks) y teorías (como la mecánica cuántica) en las cuales estas entidades tienen lugar. Tanto entidades teóricas como teorías hacen parte de representaciones que están dadas en términos formales de representación, que empiezan a ser identificadas con el nombre de modelos teóricos. En otras palabras, el nuevo experimentalismo comparte la idea de que las teorías son únicamente la estructura matemática, sin embargo, hay un giro en la enunciación, las entidades teóricas no son objetos físicos y el carácter representativo de las teorías modifica la idea de que éstas son una descripción pura o idéntica de la realidad. La idea de modelo representativo amplía el campo de significación que ya venía usando el enfoque semántico y que describiremos en breve, y pone énfasis en las formas de interpretación del mundo sensible que lleva a preguntarse por la observación.

Hacking hace un énfasis en la carga teórica e interpretativa que hay en la acción de observar, y señala cómo las lecturas de los instrumentos de laboratorio y los datos se estructuran, analizan e interpretan en función de esas cargas teóricas, poniendo en juego la necesidad de validez en la observación. Estos problemas son los que constituyen una epistemología de la experimentación que sitúa en el intervenir otra parte del análisis sobre la organización del conocimiento científico, haciendo visible el conocimiento derivado de la acción, del experimento, de los instrumentos, de las técnicas, de los datos que se obtienen, de la validación, etc de la actividad científica y su fenomenotecnia. De ahí la idea de que el experimento tiene vida propia, los problemas de verificación teórica ahora están cruzados por la verificación experimental, para la cual es necesario el desarrollo no sólo de habilidades prácticas sino también el desarrollo de estrategias de validación.

El nuevo experimentalismo ha dedicado sus investigaciones a la indagación de los criterios de validez sobre los datos experimentales, y en el estudio de las prácticas experimentales de las comunidades científicas ha abierto el debate sobre el carácter convencional de los resultados experimentales. Allan Franklin se encuentra más inclinado a confiar en que las comunidades científicas pueden dirimir sobre experimentos en controversia a través de diversas estrategias, mientras Andrew Pickering mantiene una postura que señala que las comunidades científicas aceptan o rechazan resultados experimentales en función de las necesidades de respuesta a un programa preestablecido que no siempre se sostiene por criterios experimentales. (Franklin, 2019).

El debate en esta corriente se encuentra abierto. Con esta presentación sucinta, nuestra intención es identificar cómo se comprenden los procesos de conceptualización en la epistemología del experimento, en este sentido, dentro del nuevo experimentalismo, la representación abarca los corpus teóricos predominantemente matemáticos y la intervención abarca los corpus experimentales centrados en datos. El estatus de conocimiento teórico lo recibe nuevamente el proceso de matematización y la intervención ubicada en el terreno de la experimentación da cuenta de la validación de los instrumentos de laboratorio y los datos que estos ofrecen. Esta perspectiva mantiene una separación entre la teoría y la experimentación. Guerrero (2012) señala:

En realidad, los procesos de selección, interpretación, evaluación y análisis de los datos es independiente de las teorías que dan cuenta de los respectivos sistemas que producen tales datos (véase Bogen y Woodward,

1988: 327). Así por ejemplo, para saber qué datos deben descartarse o reinterpretarse, es necesario saber si pueden replicarse los datos, si se han controlado apropiadamente las distintas fuentes de error, si se han presentado los argumentos de inferencia estadística correctamente, si se han llevado a cabo en forma correcta el tratamiento y análisis de los datos. (Guerrero Pino, Datos, fenómenos y teorías, pág. 22).

Guerrero destaca que tanto el nuevo experimentalismo como el enfoque modelista, proponen tres niveles del conocimiento científico: datos, fenómenos y teorías, en el lugar donde la escuela clásica había propuesto solamente dos: datos o fenómenos, y teorías. Aspectos que serán ampliados en el siguiente apartado.

3.1.3 La concepción semántica o enfoque modelista

Como su nombre indica, el enfoque modelista hace énfasis en los modelos y no en los enunciados. Dentro de este enfoque las teorías son conjuntos de modelos, también llamados elementos teóricos, cada uno contiene un núcleo alrededor del cual se organizan: un conjunto de modelos potenciales, un conjunto de modelos actuales, un conjunto de modelos parciales, un conjunto de condiciones de ligadura; este último conjunto es el que hace posible que se establezca una red entre los modelos de forma tal que éstos sean axiomatizables dentro de la teoría, aunque el proceso de axiomatización no sea idéntico al de la lógica formal. (Moulines, 1982).

Nótese cómo cada núcleo de modelos tiene asociados los conjuntos posibles de enunciados que podrían establecer los cambios dentro del modelo sin que el núcleo teórico como tal sea afectado. Esto se puede interpretar de la siguiente manera, cuando un modelo teórico como el de la mecánica newtoniana está muy establecido, difícilmente podrá aparecer un enunciado nuevo que logre modificar los principios sobre los cuales el modelo se ha establecido, pero cabe la posibilidad de que aparezcan esos nuevos enunciados desde el mundo sensible, además, un modelo teórico es predictivo porque existe la potencialidad de que aparezcan nuevos enunciados que amplíen los alcances del modelo a partir las predicciones. Las condiciones de ligadura, por su parte, están relacionadas con la posibilidad de unión de los núcleos teóricos con otros de su misma clase, por ejemplo, la posibilidad de compartir enunciados con el modelo teórico de la mecánica de Lagrange o con el modelo teórico de la mecánica de Hamilton. Modelos tales que disponen una red teórica sobre la cual se configura toda la estructura de la mecánica clásica.

Es esta última estructura la que recibe el nombre de teoría dentro del enfoque modelista, en ella se ha axiomatizado aquello que es la intersección base del conjunto de modelos: los principios teóricos que se comparten. En palabras de Guerrero (2012):

La mecánica newtoniana se puede presentar, formular, en términos algebraicos, diferenciales, lagrangianos o hamiltonianos. También se tiene el caso bien conocido de la mecánica cuántica, en donde la teoría de las transformaciones de Dirac y Jordan demuestra la equivalencia de la formulación de Born, Heisenberg y Jordan (teoría de las matrices) y la formulación de Schrödinger (mecánica ondulatoria). J. von Neumann demostró la equivalencia de las dos formulaciones demostrando que contienen las mismas estructuras, y este hecho es precisamente lo principal que busca resaltar el enfoque semántico: las distintas formulaciones de una misma teoría, si lo son, describen con distintos recursos lingüísticos y matemáticos las mismas estructuras matemáticas. De modo que a este conjunto de estructuras matemáticas abstractas se le puede llamar teoría con toda propiedad, y no a las formulaciones particulares. (Guerrero Pino, Datos, fenómenos y teorías, pág. 15).

Es importante resaltar que la expresión modelo teórico no es equivalente a la expresión modelo mental. La semántica en este enfoque está referida a que las distintas formulaciones o modelos o elementos teóricos guardan perspectivas interpretativas particulares, aunque sean equivalentes. Es en este sentido que, desde este enfoque semántico se hable de Teoría + Interpretación. De este modo, un modelo semántico es un modelo interpretativo, Moulines (1982) señala que un modelo de la mecánica clásica, por ejemplo, es cualquier entidad constituida por otras cinco entidades: un conjunto de partículas, un intervalo temporal, una función de posición, una función de masa y una función de fuerza, y que cumple las condiciones de los axiomas de la teoría, que se presentan a continuación:

Definición: MCP (x) si y solo si existen P; T, s, m,f, tales que:

$X = \langle P, T, s, m, f \rangle$

P es un conjunto finito no-vacío (que representa un conjunto de partículas físicas)

T es un intervalo cerrado de números reales (que representa el intervalo temporal durante el cual se consideran las partículas).

S es una función del producto cartesiano $P \times T$ es el espacio vectorial R^3 , y s dos veces diferenciable en T (s representa la función que determina la posición en el espacio de cada partícula en cada instante).

M es una función de P en los números reales positivos (que representa la masa de cada partícula).

F es una función de $P \times T$ en \mathbb{R}^3 , (que representa la fuerza resultante que actúa sobre cada partícula en cada instante).

Para todo p en P y para todo t en T se cumple: $m(p) * D^2_t s(p,t) = f(p,t)$

(es decir, la masa de una partícula multiplicada por la derivada segunda de su posición respecto al tiempo es igual a la fuerza resultante). La condición 7 es naturalmente la condición esencial o ley fundamental de esta axiomatización: se trata del famoso “segundo principio de Newton” (Moulines, pág. 79).

Por otra parte, el enfoque semántico propone que las leyes empíricas no hacen parte de la teoría, hacen parte de los fenómenos que son regularidades que describen hechos o datos, regularidades que persisten y que deben ser explicadas dentro de la teoría, al considerar que las leyes empíricas son exclusivamente descriptivas y no explicativas no se consideran dentro de los elementos teóricos.

Entonces, ¿Dónde quedan ubicadas las leyes empíricas? Otro ejemplo de axiomatización de modelos, y no de enunciados, que presenta Moulines respecto a la Termodinámica General, el principio guía de la termodinámica General, es el siguiente:

Para todo sistema termodinámico z existe una descomposición en subsistemas $Z_a, Z_b, \dots; Z_n$, tal que para cada subsistema Z puede encontrarse un funcional f_k^S y ciertas funciones extensivas de estado $G_1^k(z), G_2^k(z), \dots, G_r^k(z)$ tales que, para todo z en Z : $S(z) = \sum_k f_k^S(U_k(z), G_1^k(z), \dots, G_r^k(z))$. (Moulines, pág. 104)

Las leyes empíricas quedan representadas a través de los funcionales f_k^S , la representación es tan general que lo único explícito en ella son la función entropía $U_k(z)$ y energía interna del sistema $G_1^k(z), \dots, G_r^k(z)$. Estos principios, dice Moulines, nunca serán la representación de casos particulares, ni siquiera la descripción de conjuntos de hechos, no describen nada acerca del mundo. (Moulines, pág. 105).

Esto es lo que los hace axiomas eminentemente teóricos.

Como se puede apreciar, el enfoque semántico conserva la idea de que la física alcanza un mayor nivel de teorización y de credibilidad si está expresada en forma matemática, y que la teoría es un corpus deductivo y explicativo de fenómenos que no siempre son observables, pero sí identificables a través de datos. De ahí la idea de los tres niveles de organización del conocimiento científico en datos, fenómenos y teorías.

En el campo de la didáctica de la física se reconoce la tensión entre pensar la enseñanza a partir de los resultados canónicos ya estructurados en las disciplinas científicas, y pensar en generar procesos de construcción de conocimiento escolar. En esta tensión muchos docentes hemos encontrado mayores posibilidades para propiciar campos de significación de la ciencia cuando se aborda la enseñanza haciendo de la organización teórica un lugar de destino, de llegada, y no el lugar de partida, pues se restringe la enseñanza del conocimiento científico a la adopción acrítica de los resultados de la ciencia y sus corpus deductivos.

De ahí que estas perspectivas sobre la organización teórica de las ciencias requieran pasar por el filtro de una crítica cuya intención es identificar el potencial que tienen estas visiones para ser consideradas como marcos interpretativos para construir conceptos y teorías en la enseñanza de las ciencias.

3.2 La crítica a la axiomatización de la ciencia

- ☞ Los modelos teóricos axiomáticos son discutidos a la luz de los desarrollos de la ciencia y de otras corrientes de pensamiento, entre ellas la escuela fenomenológica que considera que no es posible establecer una separación entre teoría y experimentación.

En este punto, hemos resaltado los ejes centrales de cada uno de los enfoques expuestos:

La Concepción heredada o escuela clásica, el nuevo experimentalismo y el enfoque semántico o conjuntista, en su análisis sobre la estructuración teórica del conocimiento científico en física. Destacamos que lo que es común en estas perspectivas es su aceptación de que las teorías estén definidas como estructuras matemáticas (algebraicas o conjuntísticas) representadas a través de un sistema lógico deductivo, aceptan también una relación dicotómica entre teoría – experimentación. Sin embargo, estos enfoques dejan sin justificar o resolver cuestionamientos como: ¿Por qué afirmar que el lenguaje formal de la física es el lenguaje matemático?, ¿Qué hay de espontáneo o de artificial en la descripción de los fenómenos físicos a través de la adecuación a estructuras matemáticas? o si ¿Hay alguna justificación para el uso de unas estructuras en particular?

Es importante para nosotros la formulación de estas preguntas porque están estrechamente ligadas con la respuesta a la pregunta que hila el contenido de este trabajo: ¿Cómo se

configuran conceptualizaciones o representaciones y modelaciones sobre fenómenos del mundo físico?

Stephen Toulmin en la *Estructura de las Teorías Científicas* (1979)²³ señalaba la dificultad que se tiene para sostener que el único modelo de la estructura teórica sea el modelo axiomático. Reconoce que el desarrollo de la ciencia se ha estancado en un solo esquema fijo al llevar al extremo la necesidad de utilizar reglas de correspondencia lógicas entre los enunciados observacionales y la estructura axiomática, que no es más que la separación entre teoría y experimentación. Si bien él hace el llamado de atención al trabajo desarrollado por círculo de Viena, nótese que este llamado puede incluir también al enfoque estructuralista o semántico que, como hemos visto, sustituyó enunciados por conjuntos de modelos y propone una estructura axiomática conjuntista.

Toulmin propone dos preguntas importantes:

1. ¿Existe alguna forma o *algún simbolismo standard y obligatorio* para analizar la estructura axiomática de cualquier teoría científica sea la que sea?
2. ¿Es la forma axiomática la única estructura lógica legítima para la ciencia o puede haber *otras formas lógicas* dentro de las que pueda ser legítimamente analizado el contenido de una teoría científica? (Suppe, pág. 661)

Sugiere que para responder a estas preguntas es necesario un enfoque más dinámico que muestre cómo el contenido intelectual de las ciencias se desarrolla históricamente. La posibilidad que hay de reducir las ciencias a estructuras axiomáticas fijas es posible únicamente cuando la ciencia (a la que se refiere el corpus teórico) ya ha superado sus inconsistencias, tiene sus conceptos completamente definidos, y no requiere de cambios conceptuales. Por el contrario, la ciencia natural típica permanece viva y activa como ciencia o campo disciplinar en relación con sus inconsistencias, fallos, contradicciones que abren el paso a los problemas conceptuales de la ciencia.

La mayor parte de las ciencias naturales se componen de un número de conceptos o familias de conceptos distintos relacionados entre sí de forma más o menos imprecisa, que fueron introducidos en momentos diferentes, en tiempos pasados, que tenían por objeto problemas y cometidos explicativos diferentes. Más que formar un compacto sistema lógico, los

²³ Discurso de Toulmin recogido por Suppe en *La estructura de las teorías científicas*, 1979, páginas 656 -671.

conceptos de una ciencia natural típica son un agregado o cúmulo: en cualquier momento dado no posean todos en mismo campo empírico de aplicación, solo algunos de ellos tienen interdependencia lógica y algunos pueden ser simultáneamente inconsistentes. (Suppe, 1979, pág. 667).

Estamos de acuerdo con Toulmin, la separación teoría - experimento es un marco interpretativo que restringe la comprensión de la dinámica de construcción de conocimiento científico. Por otra parte, es necesario argumentar cómo se despliegan otras lógicas posibles en el desarrollo del contenido intelectual de la ciencia, sobre todo si buscamos que ese contenido intelectual sea un aporte importante y significativo para la cultura, llegue a las poblaciones, tenga un carácter práctico y tenga sentido en el campo de la educación.

Los problemas de las relaciones 1) teoría – experimento y 2) física – matemática, involucrados en el aspecto formal de las estructuras teóricas, requieren el análisis desde la perspectiva histórica para recuperar la significación de los campos de estudio. La justificación de una matematización de la física es resultado de un desarrollo histórico en la comprensión de problemas particulares. Paty (2003) resaltaba que, si bien Descartes o Galileo hacían uso de la representación geométrica, es posterior a Newton que se reconoce que la diferencia entre geometría y física se establece al hacer representaciones en función de las variaciones temporales y no únicamente en términos de la extensión (espacial). Siendo el análisis de funciones un requisito es posnewtoniano.

La nueva concepción de la matematización de la física que ha sido compartida por la mayoría de los científicos desde el siglo XVIII hasta nuestros días, y que ha sido formulada de la manera más clara por d'Alembert, está algo en desacuerdo con la identificación de Descartes de la física con la geometría, pues se admitía, con Newton, que los cuerpos, aun considerados sólo bajo sus «propiedades esenciales», no son reducibles a una mera «extensión» espacial. Además de la extensión, los cuerpos tienen propiedades como la impenetrabilidad y la atracción que no se reducen a ella, y la mecánica (y, más generalmente, la física) se diferencia de la geometría y las matemáticas en que se ocupa de las variaciones en el tiempo (Paty, 2003).

Vemos entonces que el proceso de formalización en física está vinculado a la selección de ciertas cualidades observables que pueden, o no, ser geometrizadas o matematizadas de acuerdo con la forma en que es comprendido y representado el fenómeno ya sea mecánico, térmico, óptico, etc. En este sentido, la descripción física depende de rasgos seleccionados para la representación. De ahí la necesidad de volver sobre el contenido conceptual de la ciencia. Estas consideraciones resultan relevantes desde el campo de la enseñanza de la física,

pues notemos lo difícil que sería abordar la física en las aulas de clase si la presentamos a través de los principios guía, expresados desde el sistema deductivo. Shapere, citado por Toulmin (Suppe, págs. 667 - 668), lo expresó en términos de que es mejor no hablar de cálculo teórico y sus estructuras, sino de la empresa científica y sus problemas, de su racionalidad, de sus procedimientos.

Por otra parte, apoyando la necesidad de ampliar la concepción de la relación física y matemática, la filosofía de las matemáticas contemporáneas también ha puesto su mirada en otras formas de organizar el pensamiento matemático tan interesantes y complejas que no se reducen a la lógica binaria y/o a la teoría de conjuntos. Sus resultados muestran que considerar las construcciones aritméticas, algebraicas, geométricas o topológicas como meros registros lógicos o conjuntísticos, es tan sólo una perspectiva en la cual la matemática se entiende como una estructura axiomática e independiente de procesos observacionales. Solo una perspectiva dentro de un amplio espectro, que oscila entre el idealismo y el realismo extremos, tanto como ocurre con la formación de conceptos físicos. (Zalamea Traba, 2009).

Identificar otro tipo de desarrollos formales en este campo de las matemáticas, que se ha considerado como la más abstracta y teórica de las disciplinas, hace posible afirmar que hay otras formas de organización del conocimiento que difieren de procesos de axiomatización, que también producen estructuras teóricas sólidas y en las cuales se logra articular y producir conocimiento nuevo. Estas formas se han desarrollado a partir de procesos en los cuales la creación de nuevo conocimiento en las matemáticas modernas implica mediaciones, concatenaciones, jerarquizaciones, polarizaciones, inversiones, correlaciones, triadificaciones, transformaciones, como lo expone (Zalamea Traba, 2009, pág. 99) y que amplían la mirada que se tiene de que el objetivo del pensamiento matemático es la axiomatización.

En la búsqueda de comprensión sobre formas de organización conceptual en física y matemática es necesario hacer una pregunta básica ¿De dónde provienen el pensamiento matemático y la lógica?, ¿Cómo se estructura y cómo se valida? ¿Cómo se construyen los datos de la experimentación y cómo se validan? Preguntas que llevan a resignificar el lugar del pensamiento matemático, la actividad experimental y la producción de enunciados en la configuración de teorizaciones sobre el mundo sensible.

3.2.1 La escuela Piagetiana y la Teoría de Campos Conceptuales de Gérard Vergnaud

Este problema del origen de la lógica, del pensamiento matemático y del pensamiento físico, de sus vínculos o sus diferencias, fue un asunto que llevó a Jean Piaget a formular la epistemología genética como una disciplina para estudiar los mecanismos de construcción de conocimiento, especialmente en la comprensión del paso de un nivel de conocimiento a otro que lo llevaron a profundizar en la emergencia de conceptos científicos (epistemología genética de la lógica, del pensamiento matemático, del pensamiento físico) a partir de dos métodos: el análisis histórico-crítico y el método psicogenético, que le conducen a proponer una perspectiva distinta para la comprensión de los procesos de conceptualización y teorización.

Rolando García (1997) en: *La epistemología genética y la ciencia contemporánea*, presenta una gran síntesis de las reflexiones y resultado de las investigaciones que Piaget sostenía sobre los problemas de conocimiento, desde donde se destacan los siguientes aspectos:

- 1) No hay un conocimiento a priori, el conocimiento es un conjunto de procesos cognoscitivos u operaciones que se desarrollan con base en la interacción de los sujetos con los objetos.
- 2) La lógica se desarrolla en el sistema sensorio-motor por el estímulo de las acciones que se pueden hacer sobre los objetos de modo que proviene de un proceso constructivo de inferencias elementales en relación con las acciones.
- 3) Hay una lógica de las acciones anterior a la lógica proposicional y esa lógica se origina en la coordinación de acciones sobre los objetos.
- 4) La coordinación de acciones implica la repetición y variación de acciones sobre los objetos, que genera: esquemas de acción y coordinación de significados. Los esquemas de acción son un conjunto de “formas de actuación generalizables” que permiten repetir las acciones sobre el mismo objeto o situación o sobre nuevos objetos y nuevas situaciones. La coordinación de significados es la asignación de significado a aquellas acciones que se realizan.
- 5) La asignación de significados es un eje central en el proceso de conceptualizar.

García lo expresa mejor de la siguiente manera:

La significación de un objeto está dada por *lo que se puede hacer con el objeto*. Y este “poder hacer” se va transformando en los distintos niveles de desarrollo: primero es puramente la acción material (nivel sensorio motor); luego será también “lo que se puede decir” del objeto, en tanto descripción, y “lo que se puede pensar”, como anticipaciones y predicciones del comportamiento del objeto en ciertas situaciones. En lo que respecta a las acciones, la significación lleva consigo la toma de conciencia de a qué conducen las acciones en función de las transformaciones que ellas producen en los objetos o en situaciones en las cuales se hallan los objetos. Es en tal sentido que las coordinaciones de acciones consisten en la coordinación de significados. (García, 1997, pág. 50).

Esta perspectiva de Piaget es muy importante porque muestra que las construcciones del pensamiento físico, del pensamiento matemático y de la lógica que los sustenta a todos ellos, tienen un mismo origen común en las acciones de los sujetos sobre los objetos. Por lo cual, resulta inadecuado suponer un pensamiento físico al que se le asigne a posteriori una estructura matemática o una estructura lógica configuradas también a priori, estos procesos constructivos son interdependientes, la forma en la que cuantificamos es de igual manera la forma en la que estructuramos nuestras caracterizaciones del mundo sensible. Es en la lógica de las acciones donde se configuran los significados y los esquemas conceptuales.

Los principios lógicos deberían también ser objetos de explicación, en vez de surgir bruscamente *ex machina*, y su acción estabilizadora constituye como tal un problema esencial del funcionamiento mental que no puede resolverse con la simple comprobación del hecho. Precisamente respecto de este punto una psicología de la acción muestra muchas ventajas sobre una psicología de la sensación: la ley fundamental que parece regir la mentalización progresiva de la acción es, en efecto, la del pasaje de la irreversibilidad a la reversibilidad, en otras palabras, de la marcha hacia un equilibrio progresivo definido por esta última. (Piaget, Introducción a la epistemología genética. El pensamiento matemático, 1975, pág. 38).

Así, Piaget aporta en la comprensión de los procesos de conceptualización en ciencia en la medida en que acentúa que la acción es el eje de la actividad cognitiva más que la sensación, y la coordinación de acciones necesita asentarse mediante procesos repetitivos que son reversibles hasta que tal coordinación logre estabilizarse o entrar en equilibrio convirtiéndose en un invariante operatorio.

En relación con esto, propone la idea de que la conciencia sobre los esquemas de acción es la génesis de la construcción de significados y de la conceptualización.

La sensación es el índice de una asimilación mental de objetos, de un esquema de acción y, en consecuencia, conviene remontarse a esta asimilación y a este esquematismo de la acción si quiere captarse el mecanismo psicogenético. (Piaget, Introducción a la epistemología genética. El pensamiento matemático, 1975, pág. 38).

Desde esta perspectiva, la organización conceptual en ciencias dista de identificar o establecer reglas de correspondencia entre las observaciones que algunos llaman conceptos concretos, y los vocabularios teóricos considerados como los datos abstractos. Dista también de establecer asociaciones directas entre estímulos, sensaciones y significados, entre las cosas y las palabras con las que se nombran.

La organización conceptual consiste, entonces, en el establecimiento de estructuras que permiten actuar en el mundo físico y obtener criterios para mejorar esas actuaciones. Los procesos reflexivos en la toma de conciencia de tales esquemas de acción son los que llevan desde niveles de menor conocimiento a niveles de mayor conocimiento, los esquemas de acción explican cómo se establece el vínculo entre la percepción y la formación de conceptos.

Esta idea de esquemas de acción y de esquemas conceptuales, como fuertes herramientas en la construcción conceptual es elaborada por Gérard Vergnaud dentro de su Teoría de los Campos Conceptuales con la cual introduce las ideas concepto-acto y teorema-acto, para dimensionar la necesidad de vivenciar situaciones variadas aunque específicas que desenlazan: 1) Las conceptualizaciones: concepto-acción, y 2) Las proposiciones invariantes que derivan de la organización de las acciones y se convierten en reglas directrices de la acción de los sujetos para responder a las situaciones: teorema -acción.

Estos esquemas se pueden ampliar, mejorar, reestructurar, sin embargo, son constitutivos del pensamiento humano, se estabilizan o automatizan en situaciones conocidas o repetitivas y se actúa con ellos al ponerlos en juego en las situaciones que son nuevas, que son exploraciones (Vergnaud G. , 1990).

Vale la pena resaltar que la investigación de Vergnaud se desarrolla en torno a los procesos de enseñanza de las matemáticas, en el estudio de las estructuras de operaciones aditivas y multiplicativas. Él señala la importancia de tener en consideración los propios contenidos del conocimiento de la disciplina sobre la cual se espera conceptualizar.

La idea de los invariantes operatorios implica para Piaget y para Vergnaud que existen momentos de estabilización o equilibración de operaciones que se convierten en invariantes y con las cuales los sujetos abordarán situaciones nuevas apoyadas en ese esquema, sin tener que construirlo absolutamente todo nuevamente. En este sentido, estos esquemas son síntesis operatorias, esquemas de conceptos y esquemas teóricos simultáneamente.

Desde esta perspectiva, los esquemas de acción están en la base de las organizaciones cualitativas o cuantitativas en el nivel de dominio que requieren las acciones del sujeto, más que lenguajes independientes son estructuras del pensamiento interdependientes. No existe una jerarquía lenguaje cualitativo y lenguaje cuantitativo, señalada por los enfoques axiomáticos, que encuentra en los esquemas un contrargumento importante: los procesos constructivos del pensamiento humano utilizan estrategias para la solución de problemáticas de acción a través de las cuales surgen las significaciones, las operaciones, los lenguajes, las representaciones, etc.

Los datos numéricos o las formas simbólicas y sintéticas de la lógica y la matemática no son más o menos objetivas a priori, la objetividad se construye en la medida en que los esquemas asimiladores del sujeto se adecuan paulatinamente al objeto y a las acciones, se construye activamente al utilizar aquello que ya se ha comprendido que sirve de conocimiento base para operar en situaciones nuevas a través de las cuales se incorporan nuevas adquisiciones, ampliando las estructuras subyacentes y dando la posibilidad a nuevo conocimiento.

En relación con los procesos de formalización resalta la importancia de la significación a través de las representaciones simbólicas:

Una situación dada o un simbolismo particular no evocan en un individuo todos los esquemas disponibles. El sentido de una situación particular de adición no es por tanto el sentido de la adición; el sentido de un símbolo particular tampoco. Cuando se dice que una tal palabra tiene tal sentido, se reenvía de hecho a un subconjunto de esquemas, operando de este modo una restricción en el conjunto de los esquemas posibles. Se plantea sin embargo la cuestión de la función de los significantes en el pensamiento, y de la naturaleza de los esquemas que organizan el tratamiento de los significantes, en su comprensión y en su producción. ¿Qué funciones cognitivas es necesario atribuir al lenguaje, y las representaciones simbólicas, en la actividad matemática? (Vergnaud G. , 1990).

La respuesta a esta pregunta vuelve a ubicar la construcción de conocimiento, en este caso, de pensamiento matemático, en el carácter empírico del conocimiento. Para Vergnaud, las matemáticas forman parte de un cuerpo de conocimientos que responden a problemas prácticos, en función de las características de situaciones sobre las cuales se opera. Por ejemplo, en la acción de agrupar objetos de clase semejante, establecer la semejanza es simultáneamente hacer una clasificación en la que algunos objetos o entidades se diferencian de otros, Piaget llamaba a esto asimilación por semejanza, e inicialmente son las cualidades las que permiten la agrupación, sin embargo, en esta operación se actúa sobre una cantidad de objetos que pertenecen a la clasificación y reunir más o menos implica una interdependencia entre cualidad y cantidad. (Piaget, Introducción a la epistemología genética. El pensamiento matemático, págs. 81 - 90). La clasificación implica además establecer relaciones como $A = B$, $A > B$, $A < B$, sobre las cuales se establecen composiciones operatorias como $A + A = B$ que son resultado de reuniones de objetos clasificados, etc. Estas operaciones de agrupamiento garantizan, para Piaget, parte de las operaciones físicas elementales vinculadas con la construcción de la conservación de la materia y que se operan sobre adición de partes del objeto, aunque no se realicen simultáneamente. (Piaget, Introducción a la epistemología genética. Pensamiento Físico, págs. 119 - 129).

3.2.2 Epistemologías constructivistas

La mayor parte de estas nuevas epistemologías del siglo XX participan de una visión constructivista según la cual, las teorías no pueden salir directamente de los datos de la “realidad” o fenómenos, sino que son construcciones de la mente humana (Popper, Lakatos, Laudan, Toulmin, Kuhn, Feyerabend e incluso Holton), idea ya apuntada en algunas reflexiones de Mach. Estas tendencias o escuelas filosófico-epistemológicas se pronuncian sobre cómo se produce el rechazo y cambio de las teorías científicas y sobre la objetividad del conocimiento científico, pero coinciden en aspectos fundamentales para la didáctica escolar de las ciencias: 1) reconocer el pluralismo de las teorías científicas y 2) aceptar que la ciencia progresa en el conocimiento científico mediante cambios en las teorías. 3) sobre la naturaleza de las observaciones concuerdan en aceptar que ya no pueden ser vistas como objetivas, sino influenciadas por la perspectiva teórica y social del observador. Documento interno. Asignatura de Didáctica de la Física. Grado de Física. (Castells M., 2008).

Los filósofos citados en este párrafo anterior, además, son ‘convencionalistas’. Comparten la afirmación que las leyes y teorías son aproximaciones que se establecen por consensos colectivos, de los cuáles se seleccionan las mejores descripciones (Popper y Lakatos). De hecho, esta concepción ya había sido anunciada por H. Poincaré y sobre todo por P. Duhem. El mismo G. Holton participa de esta perspectiva constructivista de la metodología científica. Asimismo, en el libro de Albert Einstein y Leopold Infeld (1938) podemos leer:

Els conceptes físics són creacions lliures de la ment humana, i no, com hom podria creure, únicament determinats pel món exterior. En el nostre esforç per comprendre l'univers real venim a ser com l'home que intenta de comprendre el mecanisme d'un rellotge tancat. Veu l'esfera i les busques en moviment, fins i tot en sent el tic-tac, però no disposa de cap mitjà per obrir la caixa. Si és enginyós, es pot imaginar un mecanisme responsable de tot allò que observa, però no estarà mai segur que la cosa que ha imaginat sigui l'única que pugui explicar les seves observacions. No podrà comparar mai la imatge que ell s'ha forjat amb el mecanisme real, ni tan sols podrà afigurar-se la possibilitat ni el sentit de tal comparació.... [Einstein & Infeld (1938) Traducció: (1984) L'evolució de la física, pág. 40- 41].

La ciència no és una mera compilació de lleis, un catàleg de fets deslligats entre sí. És una creació de la ment humana amb les seves idees i els seus conceptes lliurement inventats. Les teories físiques es proposen d'afaiçonar una imatge de la realitat i d'establir la seva relació amb el vast món de les impressions sensibles. Així, les nostres construccions mentals es justifiquen en la mesura i en la manera en què les nostres teories formen un tal lligam [Einstein & Infeld (1938) Traducció: (1984) L'evolució de la física, pág. 234-236].

3.2.3 El giro cognitivo de la epistemología de la ciencia (finales siglo XX)

A finales del siglo XX también se ha desarrollado una epistemología más ligada al que se llamado el ‘giro cognitivo’ de la filosofía de la ciencia, a partir del intento de preservar y comprender la racionalidad de la ciencia, pero que quedaría también dentro de las epistemologías constructivistas. En esta aproximación epistemológica, se elabora una teoría cognitiva de la ciencia que intenta explicar cómo el conocimiento individual del científico utiliza sus capacidades cognitivas, control motor, memoria, imaginación y lenguaje- para interactuar con el mundo y construir aspectos que quedan resumidos en la ciencia moderna como resultados colectivos. La corriente cognitiva intenta explicar tanto el carácter estático como el dinámico del conocimiento científico. Intenta enlazar descubrimiento y justificación. El origen de esta perspectiva parece que es la obra de Ronald Giere (1988): Explainig Science.

A cognitive approach, otros filósofos que parece que compartirían esta escuela epistemológica como Thagard (1992) y Nersessian (1992).

De hecho, tratan de elaborar una disciplina filosófica con la sola finalidad de explicar la ciencia tal como es, no como habría de ser. También hablan de Modelos y de Teorías. En este caso, de modelos mentales. Para Giere, los modelos se generan para dar respuesta a una “forma de mirar” la realidad ya que “el ajuste modelo-realidad no es global sino solo relativo a aquellos aspectos del mundo que los modelos intentan de capturar”. Del modelo salen preguntas y se hacen predicciones que se contrastan con datos provenientes de la experimentación. Por eso, de alguna manera se puede decir que la realidad observada (hechos reconstruidos) forma parte del modelo; una vez que se genera el modelo, en relación con éste es que se mira la realidad (Giere, 1996), (Adúriz-Bravo, 1999)

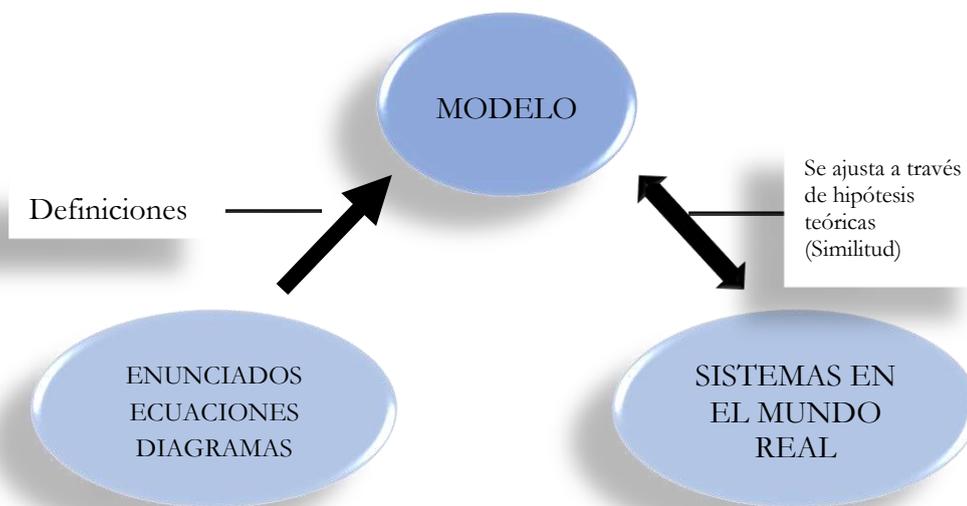


Imagen 2. Esquema de modelo de (Giere, 1988).

Para la relación entre teorías y modelos, en su libro Giere la representa mediante una imagen como la anterior, en ella muestra la relación de “similitud” en algunos aspectos entre la familia de modelos (parte superior) y los sistemas reales relacionados entre sí (parte inferior) de la siguiente representación.

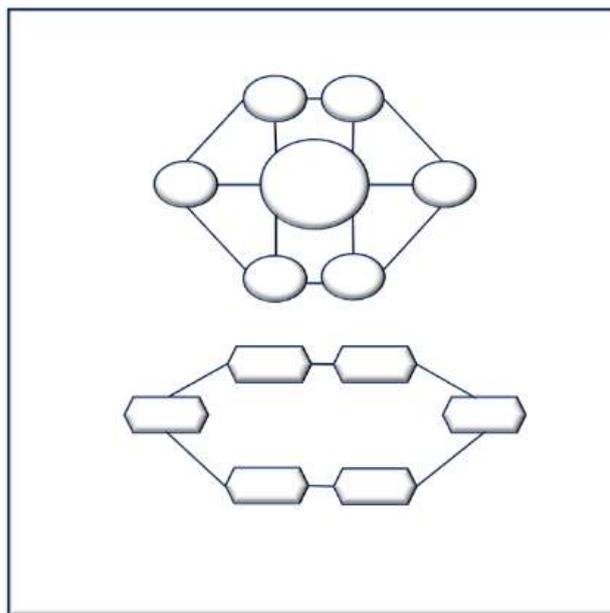


Imagen 3. Representación de una teoría (Giere, 1988).

Giere cree que el acercamiento cognitivista puede contribuir a la superación de los acercamientos estrictamente racionalistas, que no explican, por ejemplo, los desacuerdos dentro de una comunidad científica, como los puramente sociológicos, que ponen énfasis en la importancia del contexto e interpretan el conocimiento científico solo como una construcción social. Giere apunta que una orientación social no puede explicar las interrelaciones causales entre el pensamiento de la comunidad científica y el mundo físico.

Recogemos aquí el resumen de las características de la naturaleza de la ciencia que se desprenden del modelo de Giere (M. Izquierdo, 1999 recogido de Sanmartí, N. 2002 *Didáctica de las Ciencias en la educación secundaria obligatoria*, Madrid: Editorial Síntesis):

Objetivo: Lo que hace que la ciencia tenga sentido no es su método sino su objetivo: intentar interpretar los fenómenos del mundo y actuar sobre ellos relacionándolos entre sí mediante modelos y teorías. Este objetivo no se alcanza fácilmente y por ello las ciencias evolucionan constantemente.

Método: No hay un método único que conduzca al conocimiento científico. Todo parece indicar que los científicos disponen ya de alguna teoría cuando preparan algún experimento y que los resultados obtenidos son interpretados en función de este marco conceptual y procedimental. Los experimentos, los instrumentos, los hechos seleccionados y las aplicaciones forman parte de la teoría científica, ya que, sin ellos, ésta no tendría valor. Consecuentemente, la división entre teoría y práctica no tiene demasiado sentido.

Racionalismo: es imposible saber con certeza si una teoría es verdadera o falsa, pero, a la vez, la confianza en la capacidad humana de pensar y discriminar entre conocimientos más o menos válidos, nos lleva a utilizar la racionalidad de manera hipotética, en función del objetivo y del contexto. Los científicos explicitan razonamientos y juzgan su validez influenciados por muy diversos condicionantes, pero a lo largo del tiempo tiene lugar una selección natural.

Realismo: La mediación teórica no impide pensar que nuestra representación del mundo es realista, aunque se trate de un realismo pragmático. Se acepta que los hechos son reconstruidos en el marco de las teorías científicas para convertirse en hechos científicos, es decir, vistos desde la teoría. Para ello, es necesario representarse de forma coherente tanto el fenómeno o hecho, como el instrumento utilizado y las acciones realizadas en la experimentación. Cualquier cambio en algunas de estas representaciones produce un cambio de significado y una nueva explicación (M. Izquierdo, 1999).

Un aspecto para destacar sobre el trabajo de Giere es su pregunta sobre ¿Cómo son usados los modelos para representar la realidad?

What is special about models is that they are designed so that elements of the model can be identified with features of the real world. This is what makes it possible to use models to represent aspects of the world. So here, finally, we have a candidate for the X in the general scheme for representation with which we started:

Scientists use models to represent aspects of the world for various purposes. On this view, it is models that are the primary (though by no means the only) representational tools in the sciences. How do scientists use models to represent aspects of the world? What is it about models that makes it possible to use them in this way? One way, perhaps the most important way, but probably not the only way, is by exploiting similarities between a model and that aspect of the world it is being used to represent. Note that I am not saying that the model itself represents an aspect of the world because it is similar to that aspect. (Giere, 2004, pág. 747).

Esta visión que nos lleva a preguntar ¿cuál es el grado de correspondencia entre el mundo externo y las representaciones? ¿qué hace suponer que hay mejores representaciones sobre otras? ¿por qué en el mundo de las representaciones son mejores los modelos que los científicos crean?

3.2.4 La conceptualización desde una mirada fenomenológica

Una de las preguntas ya planteadas por Toulmin fue justamente ¿Cuál es la naturaleza de la correspondencia por la que los elementos formales de una teoría científica adquieren relevancia o interpretación empíricas? Vale la pena señalar que la pregunta, está formulada

dando prioridad o relevancia a la teoría por sí misma. Podemos hacer la pregunta invirtiendo el orden: ¿Cuál es la naturaleza de la correspondencia por la cual las interpretaciones empíricas adquieren los elementos formales de una teoría científica?

Los trabajos presentados sobre la epistemología genética ofrecieron una respuesta situando la base de la conceptualización en las acciones y los esquemas operatorios de los sujetos, que coinciden con las posturas fenomenológicas.

De ahí que sea posible afirmar que las interpretaciones empíricas están vinculadas al fenómeno que se interpreta, y están en interdependencia con la estructura cognitiva que nos es posible desarrollar, tienen valor teórico en cuanto interpretación posible. Conceptualizar, teorizar son siempre cortes en el tiempo que fijan en nuestro pensamiento sucesiones de eventos que se organizan para poder comprender y actuar en el mundo.

Desde la perspectiva fenomenológica, comprendemos la teorización como un recurso del pensamiento que permite agrupar experiencias, relacionarlas y posibilitar comprensiones sobre experiencias nuevas sin que ello implique empezar desde cero cada vez. Como resaltan Mach y Duhem, la teoría cumple en nuestra mente una función de economía, sin embargo, no sustituyen las experiencias organizativas de los sujetos.

En Física, esas experiencias organizativas conducen a diversos tipos de formalización: 1) De carácter pragmático, donde la formalización puede darse de manera espontánea, y sin que los sujetos expliciten el proceso mediante el cual obtiene ciertos resultados, 2) De aplicación de las matemáticas, donde se hace uso explícito y consciente de formas ya estructuradas, 3) Por unificación de campos fenoménicos y axiomatización de las teorías, donde los vínculos entre fenómenos de diferente clase apoyan a la organización de principios más generales, 4) Matematización de un campo fenoménico, donde se reflexiona sobre las formas de razonamiento utilizadas en la organización de la experiencia, y se las organiza (Ayala Manrique, Garzón Barrios, & Francisco, 2007) algunas veces se establece una relación de constitución en la cual la estructura matemática se desarrolla simultáneamente con la problemática física que se estudia, en otras oportunidades, un cuerpo matemático ya organizado sirve de base a la solución del problema que propone el fenómeno físico, o propone problemas nuevos en la comprensión de fenómenos, etc. (Tzanakis & Coutsomitros, 2000) (Tzanakis, 2002).

Es por eso, que en este trabajo consideramos que esos procesos de formalización no se pueden analizar al margen del estudio de los fenómenos, y que los procesos de teorización y de conceptualización son contextuales, se refieren a formas de organizar el conocimiento en relación con el fenómeno que se estudia y estas formas no son estandarizadas, aunque puedan expresarse a través de generalizaciones.

La escritura formal, simbólica, no puede aportar al conocimiento nuevo sobre el objeto o fenómeno representado porque ésta se establece a través del conocimiento logrado durante la organización de las magnitudes que permiten describir o explicar el fenómeno estudiado. La estructura matemática, entonces, es a posteriori y sintetiza la forma del razonamiento, en otras palabras, se construye mientras se comprende el fenómeno aportando a la significación asignada por quien propone el modelo, a su vez, permite la lectura e interpretación de aquello que resume, pero no aporta nuevo conocimiento más allá del que se puede encontrar en el fenómeno.

En analogía con otro corpus teórico como es la teoría musical vemos que ésta resume la forma en la que se puede organizar e interpretar el sonido, las combinaciones posibles para generar armonía, y aporta un lenguaje simbólico para el intérprete, pero todos sabemos que no es el sonido, y que tampoco es la música. De la misma manera que el lenguaje con el que se escribe la poesía no es la poesía, en general, el lenguaje no es la comunicación. La teoría física, por su parte, es una ordenación y clasificación en medio de la cual la representación simbólica sintetiza rasgos del fenómeno que se describe.

Hemos señalado anteriormente que la adquisición y elaboración de lenguajes ha sido una tendencia para abordar la formación de conceptos, y con ésta abordar el proceso de formalización, mucho camino se ha recorrido ya en lingüística, filosofía y neurociencias sobre la comprensión de la adquisición y elaboración de lenguajes.

Por ejemplo, en algún momento se consideró que entre el objeto y la palabra para nombrarlo había una asignación directa, y que la construcción de lenguaje había surgido de esa construcción de palabras. Se habló de conceptos concretos y abstractos, concretos porque son referidos a cosas o entidades tangibles, y se diferenció de los conceptos abstractos referidos a entidades que solo podían configurarse en el mundo de las ideas como la mente, dios, etc.

Sin embargo, la profundización en estos campos mostró que la relación entre las palabras y las cosas no es una asignación simple, ni directa y abarca diferentes niveles de complejidad, una relación donde las palabras, y en general los sistemas del lenguaje, juegan un rol en los procesos perceptivos, Alfred Korzybski (1951) afirmó que las formas de nombrar afectan nuestras formas de percibir.

Se consideró también que se podía diferenciar entre conceptos observacionales o conceptos teóricos. En la medida en que se ha comprendido que los conceptos se organizan a través de operaciones cognitivas complejas que involucran representaciones mentales de objetos, cambios y transformaciones que nos impresionan a través de nuestras percepciones, los conceptos han de ser considerados como abstracciones, y en general, los lenguajes, cualquiera que estos sean, como estructuras formales de esos procesos.

Este trabajo se ubica mayoritariamente en este sentido. Es decir, entendemos por formalizar a la acción de estabilizar una estructura conceptual que da significado a un sistema de percepciones, proposiciones, representaciones sobre el mundo físico, en otras palabras, formalizar conduce a explicitar la implicación entre el pensamiento físico y sus representaciones simbólicas en el proceso de dar coherencia a tal sistema.

Por lo cual, consideramos que representar e intervenir no son elementos en oposición, como sugiere el nuevo experimentalismo, cuando se representa se interviene, se interviene para representar, y cuando se interviene ya se ha representado. Representar consiste en formar una imagen, ya sea mental o física (símbolo), es construir simbólicamente aquello representado, siendo lo representado algún signo del mundo sensible que alguien observa.

Desde la perspectiva fenomenológica los procesos de conceptualización y estructuración teórica son interdependientes de los procesos de carácter observacional o experimental. La producción de enunciados sobre el fenómeno no es prescindible porque los enunciados son emitidos dentro de la comprensión del fenómeno, son la exposición de cómo éste se muestra a la conciencia, y en doble vía, también articula lo observable dentro del todo estructural que permite comprenderlo. De modo que: las expresiones teóricas son una forma de expresión o representación de los términos de observación, pero también son lo que se comprende del fenómeno, lo caracteriza y lo conforma.

Así, nos distanciamos de la dicotomía teoría – experimento, específicamente de la idea de que hay dos aspectos de la realidad representar e intervenir, como sugiere la escuela de la nueva experimentación. Consideramos que, al formalizar, lo representado está siendo intervenido, significado a través de una carga conceptual, quien representa no observa pasivamente, lo hace desde una estructura ya configurada en su pensamiento, la representación no es el símbolo, la representación es un todo con el modelo, porque el modelo es sobre todo un esquema mental.

En este sentido, la observación está en relación con el instrumento para observar, sea este instrumento uno de nuestros órganos perceptibles, o sea éste un instrumento de laboratorio, se observa hasta donde ese instrumento lo permite. Como resaltó Hacking la observación está cargada de las representaciones y modelos mentales a través de las cuales el observador observa. Las representaciones y los modelos mentales hacen parte, entonces, de las estructuras conceptuales que están cargadas de abstracciones teóricas.

Duhem, ya afirmaba:

En el segundo caso²⁴, de hecho, es imposible dejar al otro lado de la puerta del laboratorio a la teoría que deseamos someter a comprobación, pues sin teoría no es posible regular un simple instrumento o interpretar una simple lectura. Hemos visto que en la mente del físico están constantemente presentes dos clases de aparatos: uno es el aparato concreto de cristal y metal, manipulado por él, el otro es el aparato esquemático y abstracto cuya teoría sustituye al aparato concreto y sobre el cual el físico desarrolla su razonamiento. Pues estas dos ideas están indisolublemente conectadas en su inteligencia y una llama necesariamente a la otra; el físico no puede concebir el aparato concreto sin asociar con él la idea del aparato esquemático, de la misma manera que un francés no puede concebir una idea sin asociarla con la palabra francesa que la expresa. Esta radical imposibilidad, que nos proviene de disociar las teorías físicas de los procedimientos experimentales apropiados para contrastadas, complica esta comprobación de manera singular y nos obliga a examinar su significación lógica cuidadosamente. (Duhem, 1984, pág. 550).

La respuesta de Piaget a la pregunta ¿cómo se pasa de un nivel de conocimiento a otro? sugiere que las estructuras conceptuales se amplían con la ampliación de las experiencias de los sujetos, en la medida en que con nuevas experiencias se exigen nuevos patrones de coordinación de acciones y la construcción de nuevas significaciones. En otras palabras, los

²⁴ Se refiere a la experimentación en física.

conceptos, estructuras conceptuales o modelos mentales, se pueden pensar como elementos teóricos o micro teorías que se entrelazan generando campos conceptuales más amplios, usando las palabras de Vergnaud.

Aunque estas abstracciones teóricas no son necesariamente expresadas como formalizaciones algebraicas o conjuntistas, son teóricas porque son síntesis más o menos estables de una serie de organizaciones mentales que determinan criterios para actuar, para predecir situaciones, describir fenómenos y generalizar comportamientos del mundo sensible, y se objetivizan en ese proceso.

En este marco, el dato es la cuantificación de una cualidad de lo observado. Cualidad que ha pasado por un proceso de separación y aislamiento de otras múltiples cualidades que puede tener aquello que es representado o interpretado. La intervención es sobre algo que se ha observado y que se representa mentalmente para saber cómo actuar al intervenir.

Estamos de acuerdo con Ian Hacking en que la historia de las ciencias ha puesto en un segundo plano la actividad experimental y con ella las preguntas referentes al rol y valor cognoscitivo que representan los experimentos en ciencias. Sin embargo, objetamos su forma de pensar la teoría en función de un corpus matemático independiente incluso de datos numéricos que esta teoría representa. Nos parece que la nueva experimentación se mantiene en una mirada en la cual se requiere poner en correspondencia el conocimiento empírico y el conocimiento teórico, desde la cual la experimentación parece tener una vida independiente a la teoría.

En este aspecto, aceptamos que el experimento en ciencias tiene un campo particular desde el cual ser estudiado. Sin embargo, nos distanciamos de la idea de que el experimento tiene una vida independiente, propia y separada de la representación. La actividad experimental y la organización conceptual y teórica se encuentran siempre vinculadas en diferentes niveles.

El único propósito de la teoría física es proporcionar una representación y clasificación de las leyes experimentales; el único test que nos permite juzgar una teoría física y pronunciamos sobre si es buena o mala es la comparación entre las consecuencias de esta teoría y las leyes experimentales que ella debe representar y clasificar. Señalaba, (Duhem, 1984, pág. 547).

Considerar que la teorización y la representación son aspectos indisolubles y constitutivos de la manera de pensar e indagar sobre un fenómeno, nos lleva a afirmar que la forma de producción de la representación simbólica es ya una interpretación. Por lo cual, nos distancia también del enfoque semántico que sugiere que un corpus teórico es la representación formal a la cual se le asigna una interpretación: Teoría + interpretación, pues en este enfoque la teoría mantiene una existencia distante de aquello que teoriza. Ahora bien, para esta escuela los modelos se ubican en un terreno intermedio entre lo que expresamos del mundo y los fenómenos, y hace a los modelos parcialmente dependientes tanto de los enunciados lingüísticos como de los resultados experimentales de correspondencia (Ariza, 2022, pág. 100). Para nosotros, sin embargo, el fenómeno es el mundo reflexionado, teorizado, no hay distancias, ni terrenos intermedios, tampoco modelos parcialmente dependientes, es la forma de comprensión la que prevalece a lo acontecido y el modelo, la representación y la teoría son un todo orgánico que manifiesta esa comprensión.

Los conceptos articulan las características fenoménicas que son captadas, se forman y se transforman en la percepción. Son núcleos teóricos o teorías en sí mismas. Cuando se amplían las experiencias en situaciones nuevas, que pueden ser las situaciones experimentales, también se amplían las percepciones sobre los fenómenos, y con ellas las representaciones y teorizaciones, ofreciendo nuevos criterios para actuar; tales criterios indican que la conceptualización sobre la intervención práctica es activa.

Desde la perspectiva fenomenológica de Merleau Ponty,

la cosa percibida no es realmente una cosa, las cosas son estructuras, la variación fenoménica de las cosas no es un dato exterior del sujeto perceptor porque él es parte del mundo: las distintas perspectivas que hacen al ser de la cosa son expresiones de las maneras de relacionarse del cuerpo con el mundo; nada del ser de la cosa puede serle extraño al cuerpo sintiente. A la vez, las invariantes (el tamaño y la forma constante de los objetos, por ejemplo) son correlatos de aquella variación, son correlatos del movimiento del cuerpo vivido. (Ramirez, 2013, pág. 132)

Estas consideraciones son necesarias para señalar que en este trabajo la formalización se refiere a procesos más complejos que aquellos que corresponden al enunciado o definición lingüística de un término. Los conceptos en general, en física en particular, no son exclusivamente definiciones. Y comprender un concepto está muy lejos de asignar vocablos con los cuales describirlo.

Las definiciones son, por lo tanto, una expresión muy sucinta de muchas operaciones mentales o cognitivas sobre acciones que se repiten, sobre acontecimientos que se vinculan y que se realizan durante el proceso de dar forma y significación a una serie de eventos relacionados con aquello que se conceptualiza. Todas esas operaciones mentales o cognitivas están vinculadas con acciones u operaciones sobre los objetos físicos, sobre hechos y eventos; son esos objetos, hechos y eventos los que nos exigen conceptualizar. Las definiciones, cualesquiera que estas sean, todas son ideas abstractas. No existe por lo tanto una diferenciación entre conceptos teóricos y conceptos observacionales, porque los conceptos observacionales se subsumen en un corpus conceptual ya estructurado en la mente haciendo de estos: conceptos teóricos.

Por ejemplo, los conceptos en relación con la configuración de los fenómenos térmicos son utilizados de diferente manera según un contexto o situación, en nuestro caso un concepto como el calor puede estar definido en diferentes situaciones:

- ya sea por variaciones en la temperatura, como cuando se señala que la cantidad de calor es el producto de la masa por la variación de la temperatura, ya sea por calor latente o el calor específico de las sustancias,
- ya sea por la cantidad de acción generada en una relación causa efecto como cuando se enuncia el equivalente mecánico de calor y una unidad de calor es 4,1860 unidades de trabajo realizado en la operación,
- ya sea por una ley como cuando se señala que la cantidad de calor de un sistema es la suma de la energía interna del sistema y la cantidad de trabajo.
- ya sea por definiciones “formales” de calor: energía térmica transferida entre dos sistemas a diferentes temperaturas que entran en contacto.

En estos procesos de estructuración conceptual o teórica, el lenguaje es un articulador que permite expresar la concordancia entre las observaciones de los observadores cuando éstas se establecen en condiciones repetibles, o sobre eventos que ocurren con frecuencia permitiendo identificar patrones. Bajo tal concordancia se nombran, se cualifican, se ordenan las cualidades a través de diversas comparaciones, se cuantifica, se hacen representaciones simbólicas de diferente tipo (gráficos, dibujos, esquemas, ecuaciones, etc.), y todo lo anterior, está a favor de la comunicabilidad y comprensión colectiva de interacciones con el mundo sensible, de ahí la intersubjetividad.

En este sentido, las expresiones formación de conceptos o procesos de conceptualización o modelación se consideran en este trabajo como expresiones equivalentes a *formalización*, y están referidas todas estas expresiones a procesos que son dinámicos; un concepto puede ser transformado en la medida en que se articulan a éste nuevas observaciones que amplían el fenómeno al cual se refiere la conceptualización.

Dentro del constructivismo, la perspectiva fenomenológica comparte una consideración fundamental y elementos comunes con otros acercamientos filosóficos: el estrecho vínculo entre Lenguaje – Experiencia – Conocimiento, que enfatizaron Àrca, Guidoni, & Mazzoli (1990), y que Bruner puso es términos de (Acción, pensamiento y lenguaje). Estos acercamientos han considerado que buena parte de los procesos de comprensión, consisten en la producción de significados asociados a aquello que se busca conocer. Austin (1970) señalaba que:

When we examine what we should say when, what words we should use in what situations, we are looking again not *merely* at words (or 'meanings', whatever they may be) but also at the realities we use the words to talk about: we are using a sharpened awareness of words to sharpen our perception of, though not as the final arbiter of, the phenomena. For this reason, I think it might be better to use, for this way of doing philosophy, some less misleading name than those given above—for instance, 'linguistic phenomenology', only that is rather a mouthful. (Austin, 1970, pág. 182).

Y Jerome Bruner (1990), por ejemplo, manifestaba que

“para comprender al hombre es preciso comprender cómo sus experiencias y sus actos están moldeados por sus estados intencionales” y “la forma de esos estados intencionales sólo puede plasmarse mediante la participación en los sistemas simbólicos de la cultura” porque la cultura “la aprendemos al tiempo que aprendemos a usar el lenguaje que adquirimos y a realizar las transacciones interpersonales que requiere la vida comunitaria”. Siendo la cultura la que confiere significado a la acción, la que conforma sistemas simbólicos. (Bruner, 1990, págs. 47 - 49).

La experiencia como aquello que media en la configuración de significados del lenguaje y la adquisición del lenguaje, a su vez, como consciencia, es también destacada por Merleau – Ponty (1945):

Cualesquiera que hayan sido las mutaciones de sentido que han acabado ofreciéndonos el término y el concepto de consciencia como adquisición del lenguaje, tenemos un medio directo para acceder a lo que designa, tenemos la experiencia de nosotros mismos de esta consciencia que

somos; es con esta experiencia que se miden todas las significaciones del lenguaje y es ésta lo que hace justamente que el lenguaje quiera decir algo para nosotros. (La fenomenología de la percepción, pág. 15).

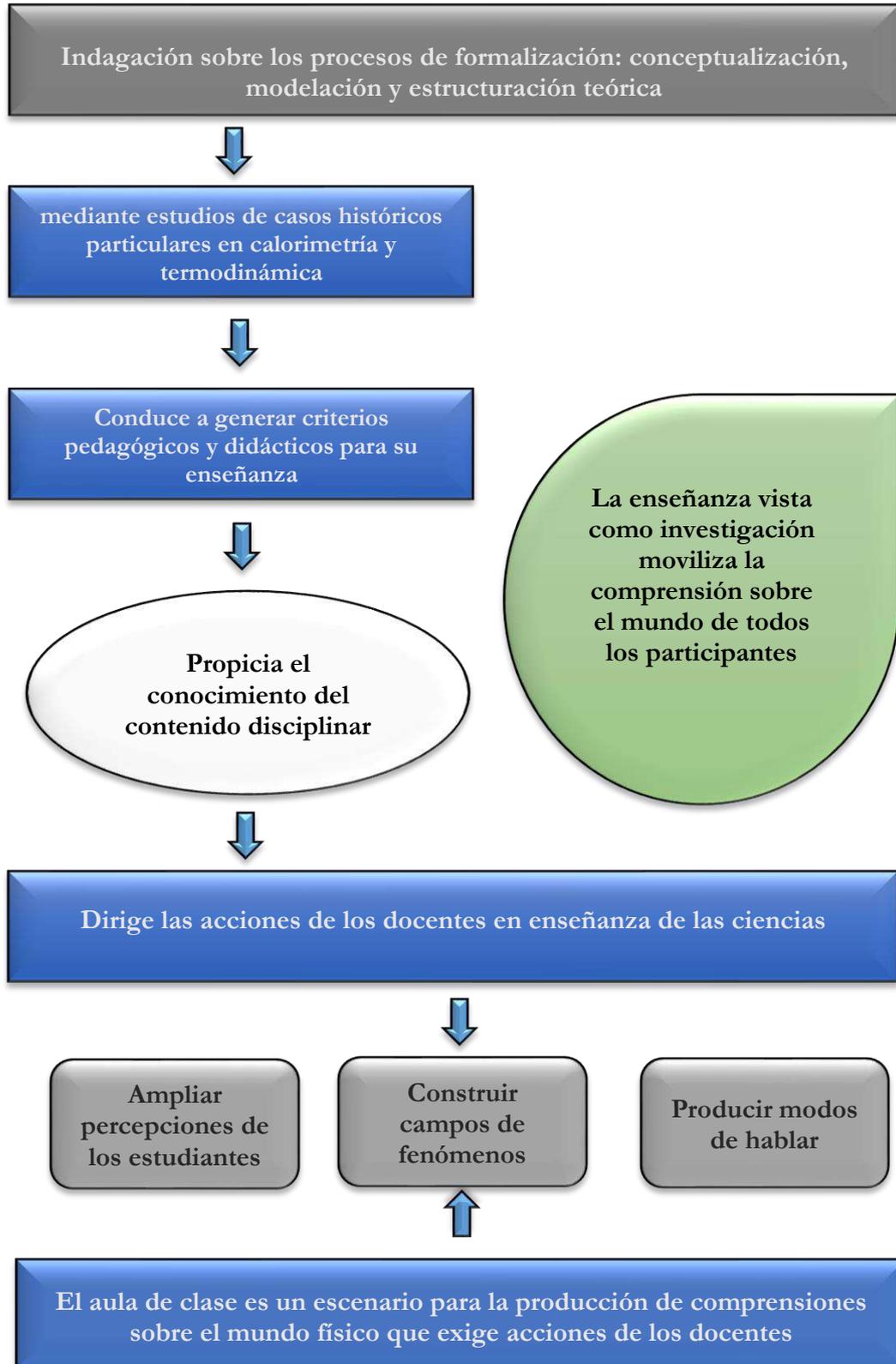
Como vemos, esta corriente nos plantea la consideración de la existencia de una estrecha relación entre los actos de significado, los actos de habla, la producción de sentido, la percepción y el lenguaje, las acciones y la consciencia. Nosotros hemos considerado que la percepción, eje de toda fenomenología, no es el dato sensorial puro que nos ofrecen los órganos sensorios, la percepción hace parte de un complejo marco de interpretación en la relación de la experiencia adquirida por el sujeto con las nuevas manifestaciones que el mundo le provee, como se ha manifestado en otros apartados del documento. (Garzón Barrios, Tarazona Vargas, Sandoval Osorio, Malagón Sánchez, & Ayala Manrique, 2020) (Sandoval Osorio, Malagón Sánchez, Garzón Barrios, Ayala Manrique, & Tarazona Vargas, 2018). En este sentido, nos adherimos a la idea de conocimiento como acto y forma cambiante, en el cual, una fenomenología es una forma de mirar a, interpretar, interactuar amb una classe de esdeveniments físics a través de combinacions d'esquemes de més "elementals" fenòmens. (Millar, Energy Matters 1986 -University of Leeds)

“Un fenomenològic acostament a la construcció del coneixement científic per tant, com a distint d'un acostament teoria -centrat o d'un acostament tecnologia-centrat, tria per a començar el camí cognitiu que condueix a las teòrica i tecnològica estructures de coneixement a partir d'una directa consideració del fenomen present.” (Guidoni, 1986) En: (Millar, Energy Matters 1986 -University of Leeds).

A través de los actos de habla, de significado, las personas van estructurando significados, razonamientos, esquemas conceptuales que son la base del proceso de organización conceptual. Por lo cual estimamos que era fundamental en nuestra propuesta: propiciar un escenario para la participación colectiva, la conformación de representaciones y para el fortalecimiento de la indagación de fenomenologías dentro del entorno grupal en que se desarrollaron las intervenciones.

En el siguiente capítulo, presentaremos cómo las ideas expuestas en este apartado se articulan con los procesos de teorización, se hace un análisis exponiendo los procesos de formalización sobre los cuales se organizó una estructura conceptual sobre el calor, se propuso en su estado más básico la formulación de la segunda ley de la termodinámica, y el fundamento de la ley cero de la termodinámica.

Cuadro 7. Esquema general de las intenciones de la investigación.



Etapa 1. Estudios Histórico – Críticos sobre teorías del calor

4 La doctrina de los calores

∞ Este capítulo reúne los desarrollos teóricos y experimentales sobre la ciencia del calor que tuvieron lugar en el siglo XVIII, y que condujeron a la conceptualización de calores sensibles, calores específicos y calores latentes., con el consecuente establecimiento de la ley cero de la termodinámica y los esbozos conceptuales de la segunda ley.

Los estudios de los fenómenos térmicos de mediados del siglo XVIII cimentaron las bases de una organización teórica sobre la cuales se establecieron los principios de la termodinámica. Se habían estudiado diversos fenómenos térmicos, anteriormente, como: el comportamiento de los gases de Robert Boyle (1627 – 1691), los procesos de combustión desde los cuales se enuncia una teoría del flogisto de Georg Stahl (1660-1734), los procesos de enfriamiento sintetizados en la ley de enfriamiento de Isaac Newton (1643 - 1727), se usaban las máquinas térmicas (1712) de Thomas Newcomen (1663 -1729), entre otros. Y a su vez, se reconocían diversos comportamientos de las sustancias causados por la acción del calor: la dilatación de las sustancias, la generación de movimiento por la producción de vapor, efectos de calentamiento o enfriamiento producidos durante reacciones químicas, evaporaciones o condensaciones a temperaturas constantes, etc.

Sin embargo, no se había estructurado un cuerpo teórico que acogiera de forma sistemática, y menos aún, a través de principios, la diversidad de efectos térmicos provocados por la presencia del calor. Lavoisier y De Laplace (1780)²⁵ lo mencionan de la siguiente manera:

En partant de cette observation générale, qu'une chaleur plus ou moins grande fait varier sensiblement le volume des corps, et principalement celui des fluides, on a construit des instruments propres à déterminer ces changements de volume; plusieurs physiciens de ce siècle ont perfectionné ces instruments, soit en déterminant avec précision des points fixes de chaleur, tels que le degré de la glace et celui de l'eau bouillante à une pression donnée de l'atmosphère, soit en cherchant le fluide dont les

²⁵ Tuve la oportunidad de realizar la publicación de la traducción de este texto para la revista Física y Cultura. Cuadernos sobre Historia y Enseñanza de las Ciencias, 2015. (Garzón Barrios, Memoria sobre el calor por MM. Lavoisier y De Laplace., 2015) Pag 141 -158.

variations de volume approchent le plus d'être proportionnelles aux variations de la chaleur ; en sorte qu'il ne reste plus à désirer, relativement à sa mesure, qu'un moyen sûr d'en apprécier les degrés extrêmes.

Mais la connaissance des lois que suit la chaleur, lorsqu'elle se répand dans les corps, est loin de cet état de perfection nécessaire pour soumettre à l'analyse les problèmes relatifs à la communication et aux effets de la chaleur, dans un système de corps inégalement échauffés, surtout quand leur mélange les décompose et forme de nouvelles combinaisons. (Mémoire sur la Chaleur, 1780, pág. 355).

En contraste, el campo de la mecánica se encontraba en un avanzado estado de teorización, gracias a *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) de Isaac Newton (1642-1727), cuyo soporte geométrico hacía de esta obra una de las más sobresalientes de su tiempo y ejemplo a seguir por otras disciplinas. De este período, Duhem, en su *L'Évolution de la Mécanique* (1903) relata:

Selon Newton comme selon Leibniz, ce qui doit distinguer essentiellement la Physique nouvelle de la Physique de l'École, c'est la *généralité* de ses principes; elle ne doit plus rendre compte de chaque phénomène en créant à son occasion une cause spéciale et nouvelle; elle doit débrouiller tout le détail des faits observés dans la nature corporelle en invoquant un nombre minimum de principes aussi amples que possible. (Duhem, 1992, pág. 42 - 43).

Estos principios mecánicos se sustentaron en las nociones fundamentales: tiempo, extensión, masa y fuerza, a través de las cuales se explicaban fenómenos ópticos, ondulatorios, eléctricos y magnéticos o químicos. Por ejemplo, la hipótesis de que la luz está conformada por pequeños corpúsculos que penetran todos los medios transparentes, en los cuales sufren acciones de atracción o repulsión (Duhem, pág. 553), y que el calor es la manifestación de oscilaciones de las moléculas que conforman la materia, fueron hipótesis originadas en el marco de un mundo físico estructurado bajo la idea de fuerzas de contacto interactuantes entre porciones de materia. Como es el caso de los fenómenos refractivos, algunos otros fenómenos eléctricos como la inducción electrostática, eran difíciles de explicar bajo una mirada corpuscular, y mantener una coherencia conceptual al respecto.

De modo que, apoyados en la descripción de la fenomenología que ofrecían estos otros campos de estudio se abrirían caminos independientes para la explicación de sus nuevas observaciones. Los posteriores estudios en mecánica, aunque siguieron este estilo de

formalismo teórico apoyado en la geometría y el cálculo, pusieron en cuestión tales nociones fundamentales (Duhem, 1992, págs. 33 - 41).

Es visible a través de la historia de las ciencias que lejos de mantener teorías completamente unificadas, ha sido permanente aquella tensión relacionada con la búsqueda de coherencia en la conceptualización y en los esquemas teóricos de la física. Esta tensión se establece en relación con la adopción de, o rechazo a, descripciones y explicaciones de los fenómenos únicamente desde una representación del mundo a través de: tiempo, extensión, masa y fuerza.

Dentro de este contexto, la organización de los fenómenos térmicos avanzó, hasta cierto punto, por un camino independiente de las generalidades alcanzadas por los estudios de la física nueva. De ahí que la estructuración de la termodinámica es un buen ejemplo de estas tensiones. Joseph Black, por ejemplo, consideraba a la química como el estudio los efectos producidos por el calor y por las mezclas (Black, 1807), el calor era para él una noción fundamental en la descripción de las transformaciones de las sustancias. Su aporte en la comprensión del calor consistió en establecer una amplia organización teórica que recibió el nombre de la doctrina de los calores latentes.

Bajo este panorama, se convierte en tema de atención identificar ¿Cuáles y cómo son los procesos de teorización sobre el calor durante el siglo XVIII? y ¿Cómo las teorías del calor se articularon, o coexistieron con aquellas nociones fundamentales de la mecánica?

Un acercamiento al tratamiento de estas preguntas guiará este apartado, se presentará una exposición que describe el proceso de teorización sobre el calor a través del estudio de dos propuestas que muestran la conceptualización de magnitudes como: calor, calor libre, calor latente y calor específico de las sustancias, conceptos que fueron el eje de los estudios calorimétricos. Estas propuestas son:

- La doctrina de los calores latentes, que consistió en exponer que el calor se absorbe y se combina con los cuerpos cuando se transforman en fluidos o vapores, y se enfocó en determinar las cantidades de calor en estas transformaciones. Doctrina sintetizada en “Lectures on the Elements of Chemistry (1803)” una recopilación de los manuscritos de Joseph Black (1728 - 1799) realizados para la Universidad de Edimburgo entre (1766 -1799) , hecha por Jhon Robinson.

- La medida del calor en las mezclas “Mémoires sur la Chaleur, année (1780)” que reúne los trabajos de Antonie Lavoisier (1743 - 1794) y Simón De Laplace (1749 - 1827) en Francia.

Notaremos que, para llegar al nivel de teorización sobre el calor que se alcanza en estos trabajos, fue necesario: a) Examinar características de las transformaciones de las sustancias al calentarse, b) Generar procedimientos e instrumentos que permitieran desarrollar el proceso de medición [Termometría, Calorimetría de Lavoisier y Laplace] y, además, c) Establecer criterios de cuantificación como la construcción de la escala termométrica y termómetro, y la cuantificación de la cantidad de calor usada en ciertos procesos. Estas acciones desarrolladas en la construcción teórica de la ciencia, nos parece que son recursos del intelecto fundamentales para la teorización que se puede desarrollar en las clases de termodinámica.

4.1 El enunciado de la segunda ley de la termodinámica como consecuencia de la unificación de las sensaciones térmicas calor y frío

- ☞ Joseph Black dice que el calor y el frío son grados de una misma cualidad y hace un análisis que lo conduce a afirmar que: el calor fluye desde los lugares de mayor temperatura hacia los lugares de menor temperatura, enunciado que corresponde a la segunda ley de la termodinámica.

Una primera parte importante de los procesos de formalización respecto al calor consistió en identificar que: las sensaciones de calor y frío podían ser grados de una misma cualidad física. Joseph Black dedicó una primera parte de sus lecturas de química a discutir sobre la procedencia del calor y sobre la procedencia del frío, razonamiento desde el cual enunciará la proposición que posteriormente, a su tiempo, se convertirá en principio fundamental de la termodinámica: El calor fluye de los lugares de mayor temperatura a los lugares de menor temperatura.

Sus razonamientos consistieron en identificar cuáles son las fuentes de calor y cuáles son las fuentes de frío, a sabiendas de que algunos de sus contemporáneos consideraban la existencia de partículas frigoríficas, él uso argumentos contra esta concepción que le llevaron a concluir que el calor y el frío son grados o manifestaciones del constante interactuar entre cuerpos con mayor grado de calor y cuerpos con menos grado de calor.

Black, al buscar los causantes del frío y sus manifestaciones, identificó que los días más calurosos ocurren bajo el mayor brillo del sol y su mayor cercanía a la Tierra (perihelio) y que en su ausencia (noche) o en su lejanía (afelio) disminuyen los grados de calor, concluyendo no sólo que el Sol es nuestra principal fuente de calor, sino, sobre todo, que no hay existencia de fuentes reales de frío, concluye que el frío es la manifestación de ausencia de una fuente de calor pues su causa es la ausencia o acción disminuida del sol. En palabras, de Black.

I am ignorant of any general occasion or cause of cold, except the absence or diminished action of the sun, or winds blowing from those regions on which his light has the weakest power. I therefore see no reason for considering cold as anything but a diminution of heat. The frigorific atoms, and particles of frost, which have been supposed to be brought by the cold winds, are altogether imaginary. We have not the smallest evidence of their existence, and none of the phenomena, on account of which they have been supposed to exist, require such a fiction in order to their being explained. (Black, 1807, pág. 26)

Aunque hoy día nos pueda parecer una obviedad, este razonamiento resulta central porque al observar el calentamiento o enfriamiento de los cuerpos, es fácil pensar que los cuerpos fríos enfrían a los cuerpos calientes. Por ejemplo, en entornos fríos, de nieve o en grandes territorios de hielo, se puede admitir que estas grandes masas son las causantes del enfriamiento de cuerpos calientes, argumentos que usaban los defensores de las partículas frigoríficas, y que llevarían a suponer también la existencia de flujos opuestos que hacen que, en el contacto de cuerpos calientes y cuerpos fríos, los cuerpos calientes se enfríen y los cuerpos fríos se calienten. Afirmaciones que aún hacen parte de nuestro lenguaje cotidiano.

Con estas conclusiones Black está planteando dos cosas simultáneamente:

1. Que la causa del frío es la ausencia de calor, de modo que el calor y el frío son manifestaciones, en grado, de una misma cualidad o magnitud: el calor. El único indicador de la dirección de un flujo de calor es su exceso en los cuerpos calientes y su carencia en los cuerpos fríos. Él señala:

Thus heat is perpetually communicated from hotter bodies to the colder around them, and, while it passes from the one to the other, it penetrates all kinds of matter without exception: density and compactness are no obstacle to its progress: it appears to pass even faster into dense bodies, in most cases, than into rare ones ; but the rare and the dense are all affected by it, and transmit it to others : Even the vacuum formed by the air-pump is pervaded by it. (Black, 1807, pág. 22)

Este no es un hecho menor. Aunque se establezca en el desarrollo de una calorimetría elemental, y sobre una mirada sustancialista, corresponde al enunciado del segundo principio de la termodinámica, hoy día reconocido como tal, a través del trabajo de presentado por Clausius (1856) de la siguiente manera:

Heat can never pass from a colder to a warmer body without some their change, connected therewith, occurring at the same time. Everything we know concerning the interchange of heat between two bodies of different temperatures confirms this, for heat everywhere manifests a tendency to equalize existing differences of temperature, and therefore to pass in contrary direction, i.e., from warmer to colder bodies. Without further explanation therefore the true of the principle will be granted (Clausius, 1856, pág. 86)

Tal organización conceptual tiene para Black un solo argumento: la inexistencia de fuentes de frío. Lo demás son los hechos de la experiencia, que Clausius señala en su apartado, y que muestran que cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se juntan, el de mayor temperatura la disminuirá y el de menor temperatura la aumentará. Y por esta razón, solo la ausencia de fuentes de frío es el indicio de la dirección de un flujo de calor.

2. Black manifiesta con este argumento, que la única causa del calentamiento o enfriamiento de los cuerpos es el calor como una acción térmica. De ahí que el Calor para él sea la noción fundamental que explica transformaciones de las sustancias, una acción que es diferente a las acciones manifestadas a través de fuerzas mecánicas.

Él dice:

In this manner, therefore, and upon all occasions without exception, is heat communicated from hotter bodies to colder ones, when they are in contact, or in the vicinity of one another; and the communication goes on until the bodies are reduced to an equal temperature, indicating an equilibrium of heat with one another. (Black, 1807, pág. 24)

Black no requiere decir o suponer algo adicional sobre el calor, es su acción la que se manifiesta. Muy interesante es notar que el equilibrio térmico él lo expresa como el equilibrio del calor cuando hay igualdad de temperaturas, de lo que hablaremos más adelante.

Por ahora, notemos que este concepto de calor como acción, contrasta con otras miradas muy frecuentes del calor, dentro de ese mismo período histórico, la hipótesis de calor como sustancia, y la hipótesis del calor como vis viva. Black, al igual que Lavoisier y Laplace,

adoptarán rasgos de la hipótesis sustancialista, pero su mirada se encuentra enfocada en las transformaciones que el calor produce, no en cuál es su naturaleza.

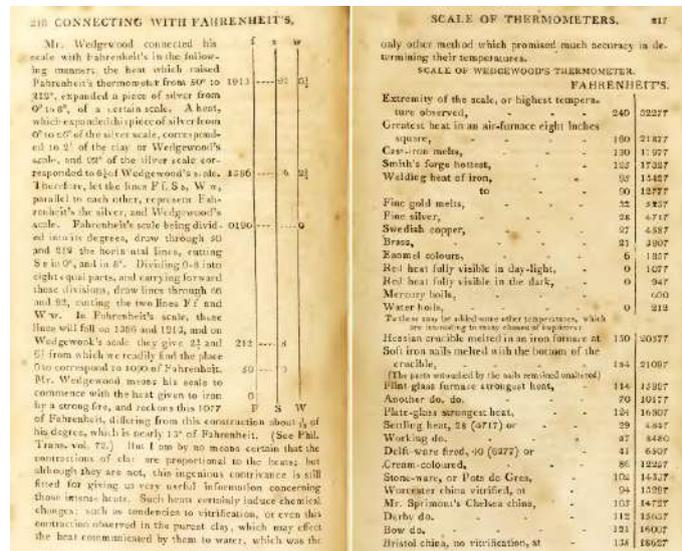


Imagen 4. Comparación de escalas termométricas. (Black, 1807. pág., 217)

4.2 Las hipótesis sobre la naturaleza del calor: El fluido calórico y la Vis viva

- ☞ Durante el siglo XVIII, los científicos están divididos en dos corrientes que se preguntan por la naturaleza del calor. Algunos consideran que es un fluido imponderable y otros que es la manifestación de la vis viva al interior de las sustancias.

Black muestra la división de concepciones sobre el calor que hay entre los científicos continentales (franceses y alemanes) y los científicos ingleses, durante este periodo histórico.

The greater number of the English philosophers supposed this motion to be in the small particles of the heated bodies, and imagine that it is a rapid tremor, or vibration of these particles among one another. Mr. Macquer also, and Mons Fourcroy, both incline, or did incline, to this opinion. I acknowledge that I cannot form to myself a conception of this internal tremor, that has any tendency to explain, even the simpler effects of heat, or those phenomena which indicate its presence in a body; and I think that Lord Verulam and his followers have been contented with very slight resemblances indeed, between those most simple effects of heat, and the legitimate consequences of a tremulous motion. I also see many cases, in which intense heat is produced in this way, where I am certain that the internal tremor is incomparably less than in other cases of percussion,

similar in all other respects. Thus the blows, which make a piece of soft iron intensely hot, produce no heat in a similar piece of very elastic steel.

But the greater number of French and German philosophers, and Dr. Boerhaave, have supposed that the motion in which heat consists is not a tremor, or vibration of the particles of the hot body itself, but of the particles of a subtle, highly elastic, and penetrating fluid matter, which is contained in the pores of hot bodies, or interposed among their particles: a matter, which they imagine to be diffused through the whole universe, pervading with ease the densest bodies -, a matter, which some suppose, when modified in different ways, produces light, and the phenomena of electricity. (Black, 1807, pág. 31)

Por su parte, Lavoisier y Simón De Laplace exponen la división conceptual que tienen los físicos respecto a la naturaleza del calor, de la siguiente manera:

Plusieurs d'entre eux la regardent comme un fluide répandu dans toute la nature, et dont les corps sont plus ou moins pénétrés, à raison de leur température et de leur disposition particulière à le retenir; il peut se combiner avec eux, et, dans cet état, il cesse d'agir sur le thermomètre et de se communiquer d'un corps à l'autre, ce n'est que dans l'état de liberté, qui lui permet de se mettre en équilibre dans les corps, qu'il forme ce que nous nommons *chaleur libre*.

D'autres physiciens pensent que la chaleur n'est que le résultat des mouvements insensibles des molécules de la matière. On sait que les corps, même les plus denses, sont remplis d'un grand nombre de pores ou de petits vides, dont le volume peut surpasser considérablement. Celui de la matière qu'ils renferment; ces espaces vides laissent à leurs parties insensibles la liberté d'osciller dans tous les sens, et il est naturel de penser que ces parties sont dans une agitation continuelle, qui, si elle augmente jusqu'à un certain point, peut les désunir et décomposer les corps; c'est ce mouvement intestin qui, suivant les physiciens donc nous parlons, constitue la chaleur. (Lavoisier & De Laplace, Mémoire sur la Chaleur, 1780)

El origen de estas dos conceptualizaciones sobre la naturaleza del calor parece provenir de tradiciones distintas. Por una parte, la idea de la existencia de un fluido calórico es similar a las ideas que se estaban desarrollando en el estudio de fenómenos diferentes a los mecánicos: eléctricos o químicos, en los cuales actúan o el fluido eléctrico o el flogisto que son identificados con sustancias que atraviesan los cuerpos que se equilibran o neutralizan en ellos, a causa de sus cualidades opuestas: caliente – frío o positivo – negativo, además, hay un límite o una capacidad de los cuerpos para contener estos fluidos, de ahí expresiones como la capacidad calorífica en el caso térmico o la capacidad de condensación o almacenamiento de la electricidad en el caso eléctrico. La característica que se pone allí

alrededor del calor, es que es un fluido imponderable y que se transfiere al interior de los cuerpos.

Por su parte, la perspectiva de los movimientos no sensibles de las moléculas de materia como causa del calor está resguardando las nociones fundamentales de la mecánica, define el calor como una manifestación de la vis viva, mv^2 , la fuerza activa de la naturaleza capaz de generar la transformación mecánica: el movimiento. Si el calor es una manifestación más del movimiento que se imprime a los corpúsculos, tiene que ser entonces causado por movimientos entre partículas al interior de los cuerpos, cuando se ponen en contacto unos con otros. Hoy día esta idea se mantiene vigente al interior de la teoría cinética molecular.

En cualquiera de las dos hipótesis, hay un marco interpretativo independiente de los fenómenos. En este caso, se podría decir que como señala Moulines estamos frente a dos modelos inscritos en una sola teoría: tenemos un marco conceptual o interpretativo + una medida o formulación empírica. Es la medida lo que debería resolver el dilema. Sin embargo, como se verá en lo que sigue, esta medida es construida dentro del modelo interpretativo sustancialista. El modelo corpuscular permite hacer explicaciones y establecer conjeturas pero no cuantificar porque lo que tendría por cuantificar es la velocidad de los corpúsculos.

En esta dirección, la medición del calor es el objetivo que se plantean Lavoisier y Laplace, deciden obtener de estas dos hipótesis sólo los principios que les sean comunes, en virtud de haber sido establecidos y confirmados por la experiencia. De modo que, para ellos, lo importante no son las hipótesis sobre la cual se conciba el calor. Lo importante son sus efectos. Esta decisión es, regresar al fenómeno para poder detallarlo:

Dans l'ignorance où nous sommes sur la nature de la chaleur, il ne nous reste qu'à bien observer ses effets, dont les principaux consistent à dilater les corps, à les rendre fluides, et à les convertir en vapeurs. Parmi ses effets, il faut en choisir un, facile à mesurer, et qui soit proportionnel à sa cause. (Lavoisier & De Laplace, Mémoire sur La chaleur, pág. 357)

Puesto que ambas hipótesis responden bastante bien a algunos fenómenos particulares, señalan que al no tener buenos argumentos para decidir sobre una u otra hipótesis se apoyarán en los efectos que sea posible medir. El efecto de dilatar cuerpos o sustancias es el referente para la construcción de medida de temperatura. Consideran que la dilatación se produce por un calor que llaman calor sensible, es el calor que al aumentar incrementa la

dilatación de una sustancia, se detecta en el termómetro, deduciendo que el calor sensible es proporcional al cambio en la temperatura, $Q \propto T$.

Sin embargo, sustancias diferentes se dilatan de manera diferente, lo que lleva a: 1) requerir criterios para la selección de la sustancia termométrica que servirá de patrón comparativo: la medida termométrica, y 2) manifestar otras formas de calor, el que es capaz de recibir la sustancia, calor específico, y el que es capaz de transformarla a su estado sólido o de vapor.

4.3 La medida termométrica. La diferencia entre calor y temperatura

- ☞ Los experimentos que tienen como finalidad la medida del calor requerían la construcción de instrumentos que a través del efecto de dilatación mostraban una medida de lo térmico. Lavoisier y Laplace construyen termómetros para sus estudios.

La premisa que acompañará las mediciones sobre el calor es bien conocida: los efectos son proporcionales a sus causas. El efecto de la dilatación por lo tanto es indicativo de qué grado de calor ha recibido una sustancia para dilatarse. Y aportará una medida del mismo. Este apartado muestra las consideraciones que fue necesario tener para construir una escala termométrica:

L'effet par lequel on mesure ordinairement la chaleur est la dilatation des fluides, et principalement celle du mercure; la dilatation de ce dernier fluide est, suivant les expériences intéressantes de M. de Luc, à très-peu près proportionnelle à la chaleur, dans tout l'intervalle compris entre le degré de la glace et celui de l'eau bouillante; elle peut suivre une loi différente dans des degrés fort éloignés; nous indiquerons dans la suite un autre effet de la chaleur, qui lui est constamment proportionnel, quelle que soit son intensité. (Lavoisier & De Laplace, pág. 355)

En primer lugar, en todas estas experiencias se reconoce que el hielo y el agua hirviendo son los grados máximo y mínimo que el agua puede tomar, y son efectos fáciles de obtener y replicar. Las sustancias termométricas tienden a contraerse hasta un valor mínimo al ponerse en contacto con hielo, y tienden a expandirse hasta un valor máximo en contacto con agua hirviendo. Al llegar a estos grados ya no sufren más alteración. Lo que lleva a la idea del calor latente, un calor al cual el termómetro no es sensible. El grado de hielo y el grado de ebullición permiten fijar el rango dentro del cual la medida del calor sensible puede realizarse.

Sin embargo, ¿cómo establecer la graduación dentro de ese rango? No hay algún referente que indique que la dilatación de la sustancia termométrica sea una dilatación lineal, tampoco

algo que señale que debajo del punto de fusión del hielo, o sobre el punto de ebullición del agua haya una relación de proporcionalidad entre las variaciones de volumen y las variaciones de temperatura.²⁶

Nous ferons usage du thermomètre de mercure, divisé en quatre-vingts parties égales, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'eau bouillante à la pression d'une colonne de 28 pouces de mercure; chaque partie forme un degré, et l'origine des degrés, ou le zéro du thermomètre, est le terme de la glace fondante, en sorte que les degrés inférieurs doivent être considérés comme étant négatifs; nous supposons l'échelle de ce thermomètre prolongée indéfiniment au-dessous de zéro et au-dessus du degré de l'eau bouillante, et divisée proportionnellement à la chaleur. Ces divisions, qui sont à peu près égales depuis zéro jusqu'à quatre-vingts degrés, peuvent être fort inégales dans les parties éloignées de l'échelle; mais quelles qu'elles soient, chaque degré mesurera toujours une quantité constante de chaleur. (Lavoisier & De Laplace, pág. 358)

Para asegurar que las divisiones miden el grado de calor. Lavoisier y Laplace recurren a otra observación, que dos cuerpos iguales en masa, sometidos al mismo grado de calor, agua hirviendo o hielo, no registran la misma variación. Lo que lleva a dos cosas:

- 1) Reconocer que dos sustancias termométricas diferentes registrarán diferentes variaciones de calor.
- 2) Es importante buscar otro efecto que ayude en la determinación de la medida de un grado de calor: el calor específico.

Toman como indicador o referencia una libra de agua común. Si se toma por unidad aquella que puede elevar un grado la temperatura de una libra de agua común, se plantean fácilmente

²⁶ La recherche de la chaleur spécifique des différents gaz est plus difficile, à cause de leur peu de densité; car, si l'on se contentait de les renfermer dans des vases comme les autres fluides, la quantité de glace fondue serait si peu considérable, que le résultat de l'expérience en deviendrait fort incertain; mais, si dans l'intérieur de la sphère on place un tuyau recourbé en forme de serpent, que l'on établisse dans ce tuyau un courant d'air d'une nature quelconque, et, qu'au moyen de deux thermomètres placés dans ce courant, l'un à son entrée et l'autre à sa sortie de la sphère, on détermine le nombre de degrés dont l'air se refroidit dans son passage, on pourra refroidir ainsi une masse d'air considérable et déterminer avec précision sa chaleur spécifique: le même procédé peut être employé pour avoir la quantité de chaleur qui se dégage dans la condensation des vapeurs des différents fluides. (Lavoisier & De Laplace, Mémoire sur La chaleur, 1780) Se aprecia por la cita, que apenas se están ideando algunas estrategias para hacer medidas con los gases, sabemos que, posteriormente deben adaptarse una serie de dispositivos especiales para producir variaciones sobre los gases a volumen constante o a presión constante, de acuerdo con sus características elásticas.

todas las otras cantidades de calor, respectivas a los diferentes cuerpos y que pueden expresarse como partes de esta unidad.

On a fait usage de la méthode suivante pour avoir ces quantités. Considérons une livre de mercure à zéro, et une livre d'eau à 34 degrés; en les mêlant ensemble, la chaleur de l'eau se communiquera au mercure, et, après quelques instants, le mélange prendra une température uniforme. Supposons qu'elle soit de 33 degrés, et qu'en général, dans le mélange de plusieurs substances qui n'ont point d'action chimique les unes sur les autres, la quantité de chaleur reste toujours la même; dans ces suppositions, le degré de chaleur perdu par l'eau aura élevé la température du mercure de 33 degrés, d'où il suit que, pour élever le mercure à une température donnée, il ne faut que la trente-troisième partie de la chaleur nécessaire pour élever l'eau à la même température, ce qui revient à dire que la chaleur spécifique du mercure est trente-trois fois moindre que celle de l'eau. (Lavoisier & De Laplace, pág. 358)

Nótese que no definen el calor específico como la capacidad del cuerpo para cambiar su temperatura. La medida del calor específico no se presenta como propiedad o característica del cuerpo, sino más bien como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un cuerpo en un grado fijo del termómetro, independientemente de cuál sea el cuerpo: el calor específico es la cantidad de calor que se debe suministrar al cuerpo, para que eleve su temperatura, para una determinada cantidad de masa en ciertos grados de temperatura. Al determinar el calor específico del agua, su valor se puede comparar con el calentamiento de las otras sustancias.

En lo sucesivo, dicen, “nous entendrons dans la suite, par capacités de chaleur ou chaleurs spécifiques, ces rapports des quantités de chaleur nécessaires pour élever d'un même nombre de degrés leur température, à égalité de masse” (Lavoisier & De Laplace, pág. 358)

Pese a mantener rasgos de una hipótesis sustancialista en este ejercicio Lavoisier y Laplace calibran el termómetro, identificando la unidad a partir de las cantidades de calor necesarias para elevar en un grado la temperatura del agua. Si se toma por unidad aquella que puede elevar un grado la temperatura de una libra de agua común y plantean las otras cantidades de calor como proporciones.

Estas medidas Joseph Black las había venido estableciendo casi simultáneamente. En su doctrina de los calores latentes, el calor latente es todo el calor necesario para la transformación de la forma de la sustancia. Por ejemplo, si el hielo cambia de estado ya no

es hielo, éste ha perdido toda su existencia. En este caso se puede afirmar que, el estado de los cuerpos es el ser y no una potencialidad de ser, el agua es agua y el hielo es hielo y hay una medida fija de calor contenido en cada uno de estos estados. El método para su cuantificación es el método de las mezclas.

Si se toma la misma cantidad en masa de agua hirviente, y se mezcla con la misma cantidad en masa de hielo. La temperatura de la mezcla puede considerarse como la temperatura media de la escala termométrica. Y también se pueden establecer los puntos medios, con ese nuevo valor de la escala. Obteniendo subdivisiones que gradúan la escala, llevando a independizar el proceso de medida de la sustancia termométrica.

En cuanto a los procesos de conceptualización y de formalización, es importante señalar que el establecimiento de la medida del grado de calor por el termómetro, o la escala de temperatura, condujo también a distintas medidas de la acción del calor, no sólo por lo que el nuevo instrumento permitió en la medición, sino por los efectos que un mismo grado de calor genera en diferentes sustancias o cantidades de una misma sustancia.

La necesidad de diferenciar entre calor y temperatura ocurre al separar el termómetro (la dilatación de la escala termométrica) de la medida de calor para diferentes sustancias (calor específico). El calor sensible que está relacionado con los grados del termómetro, también depende de la cantidad de sustancia y de la capacidad calorífica de la misma.

En síntesis, de los trabajos de este periodo calorimétrico se obtienen tres conceptos importantes: Calor libre, calor latente y calor específico como manifestaciones distintas del calor sobre las sustancias.

- El calor libre queda definido, entonces, como aquel calor que ocurre en la simple mezcla entre los cuerpos. Este calor es el que actúa cuando un cuerpo más caliente se pone en contacto con uno más frío hasta que los dos cuerpos se encuentran en equilibrio. Este calor depende de la cantidad de sustancia porque se sabe que menor cantidad de sustancia es más fácil de calentar o de enfriar que mayor cantidad de sustancia.

- El calor específico queda definido como la cantidad de calor necesaria para aumentar en un grado una cierta cantidad de masa. Se identifica que para el mismo grado de temperatura hay diferentes cantidades de calor para diferentes sustancias.
- A su vez, el calor latente queda definido como el grado calor necesario para hacer cambiar cierta cantidad de masa de hielo en agua, o de agua en vapor, no es registrado por el termómetro.

En consecuencia, las cantidades de calor no son equivalentes a cantidades de temperatura. Haber obtenido una escala de temperatura, no significó haber obtenido una medida directa del calor. En la descripción del comportamiento de las sustancias al calor es donde puede establecerse que hay cualidades distintas, y por lo mismo, diferencias de magnitud:

- cuando el calor se mezcla produciendo dilatación se mide la variación en el termómetro, pero se reconoce que esa variación depende de la cantidad de masa,
- cuando el calor se combina para el cambio de fase se reconoce que el calor se mantiene en la combinación, pero el termómetro no lo registra,
- cuando dos cuerpos reciben la misma cantidad de calor sus dilataciones pueden ser diferentes, por lo tanto, cada cuerpo recibe un calor específico.

Vemos entonces, que, la cuantificación de estas magnitudes, exige diferenciar los comportamientos de las sustancias, y esto necesariamente llevo a diferenciar los grados de calor de los grados de temperatura, y también las diversas formas de calor que aquí se plantean. Ahora bien, es importante señalar que esos calores que se han manifestado como formas independientes, se conservan dentro de las transformaciones, y la medida total del calor será la suma de los calores que actúan en la transformación.

De este modo, se pueden formalizar algunos principios:

- El calor se conserva dentro de las transformaciones que se generan.

On doit admettre les principes qui leur sont communs; or, suivant l'une et l'autre, la quantité de chaleur libre reste toujours la même dans le simple mélange des corps... Si, dans une combinaison ou dans un changement d'état quelconque, il y a une diminution de chaleur libre, cette chaleur reparaitra tout entière lorsque les substances reviendront à leur premier

état, et, réciproquement, si, dans la combinaison ou dans le changement d'état, il y a une augmentation de chaleur libre, cette nouvelle chaleur disparaîtra dans le retour des substances à leur état primitif.

- El calor pasa de los cuerpos calientes a los cuerpos fríos hasta que se llega al equilibrio de temperatura. O la cantidad de calor que cede el cuerpo con mayor temperatura es recibida por el cuerpo de menor temperatura.

4.4 El método de las mezclas y la medida de las acciones del calor

- ☞ Además de la construcción de termómetros Lavoasier y De Laplace idean otro instrumento para medir calor a través del derretimiento de hielo. Se inventan el calorímetro.

El método de las mezclas propuesto por Lavoisier y De Laplace básicamente se basa en la idea de que la acción del calor se aprecia sólo cuando cuerpos y/o sustancias se afectan al estar en contacto. Ellos perfeccionaron el termómetro e inventan un dispositivo nuevo: el calorímetro (ver imagen), un recipiente aislante que contiene hielo, que se derrite en contacto con cuerpos con mayor grado de calor. La cantidad de masa de hielo derretida equivale a la cantidad de calor suministrado por el cuerpo, o de la mezcla de la que se quiere medir el calor.

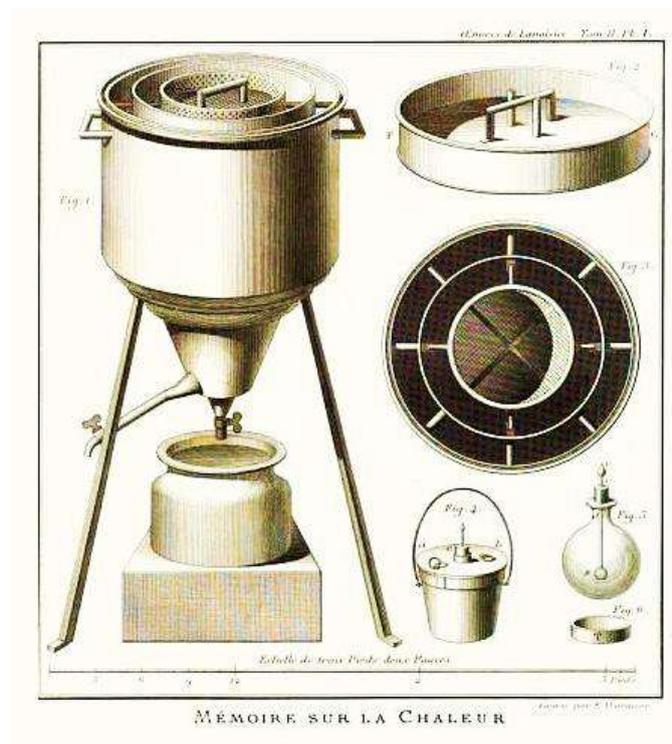


Imagen 5. Calorímetro de Lavoisier y Laplace. (1780)

Ahora bien, al narrar sus experimentos ellos se expresan de la siguiente manera:

Si l'on transporte une masse de glace, refroidie à un degré quelconque, dans une atmosphère dont la température soit au-dessus de zéro du thermomètre, toutes ses parties éprouveront l'action de la chaleur de l'atmosphère, jusqu'à ce que leur température soit parvenue à zéro. Dans ce dernier état, la chaleur de l'atmosphère s'arrêtera à la surface de la glace, sans pouvoir pénétrer dans l'intérieur; elle sera uniquement employée à fondre une première couche de glace, qui l'absorbera en se résolvant en eau; un thermomètre placé dans cette couche se maintiendra au même degré, et le seul effet sensible de la chaleur sera le changement de la glace en fluide. Lorsqu'ensuite la glace viendra à recevoir un nouveau degré de chaleur, une nouvelle couche se fondra et absorbera ainsi toute la chaleur qui lui sera communiquée; en vertu de cette fonte continuelle de la glace, tous les points intérieurs de sa masse se présenteront successivement à la surface, et ce n'est que dans cette position qu'ils commenceront à éprouver de nouveau l'action de la chaleur des corps environnants. (Lavoisier & De Laplace, pág. 360)

Se aprecia en el texto, que el calor puede entrar, salir, o contenerse en los cuerpos. Por lo cual, se pueden identificar rasgos del sustancialismo que se asignan a esta magnitud. De ahí que los calores puedan ser sensibles (que fluyen entre), latentes (contenidos en) o específicos (que se suministran de acuerdo con). Estas formas de hablar son síntesis de conceptualizaciones sobre las características de las transformaciones de las sustancias al calentarse.

Este método de las mezclas se organiza bajo dos inferencias:

- 1) La cantidad de calor que hay al principio es igual a la cantidad de calor que hay al final, cuando ya ha ocurrido toda la transformación.
- 2) En la igualdad de temperaturas se establece el equilibrio térmico.

En otras palabras, Lavoisier y Laplace:

On peut de là tirer une règle générale et fort simple, pour déterminer, par la voie des mélanges, la chaleur spécifique des corps; car, si l'on nomme m la masse du corps le plus échauffé, exprimée en parties de la livre prise pour unité; a le degré du thermomètre qui indique sa température; q la chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'une livre de cette substance; si l'on désigne par m' , a' , q' , les mêmes quantités, relativement au corps le moins échauffé, et qu'enfin l'on nomme b le degré du thermomètre qui indique la température du mélange, lorsqu'elle est parvenue à l'uniformité; il est visible que la chaleur perdue par le corps m

est en raison de sa masse m , et du nombre de degrés $a - b$ dont sa température a été diminuée, multiplié par la quantité q de chaleur qui peut élever d'un degré la température d'une livre de cette substance; on aura donc $m q \cdot (a - b)$ pour l'expression de cette quantité de chaleur perdue.

Par la même raison, la quantité de chaleur acquise par le corps m' est en raison de sa masse m' et du nombre de degrés $b - a'$ dont sa température a été augmentée, multiplié par la quantité q' , ce qui donne $m' q' (b - a')$ pour l'expression de cette quantité de chaleur. Mais, puisque l'on suppose qu'après le mélange la quantité de chaleur est la même qu'auparavant, il faut égaler la chaleur perdue par le corps m à la chaleur acquise par le corps m' ; d'où l'on tire $m q (a - b) - m' q' (b - a')$; cette équation ne fait connaître ni q , ni q' , mais elle donne pour leur rapport, $q / q' = m' (b - a') / m (a - b)$.

On aura donc ainsi le rapport des chaleurs spécifiques des deux corps m et m' , en sorte que, si l'on compare les diverses substances de nature à une même substance, par exemple, à l'eau commune, ou pourra déterminer par ce moyen les chaleurs spécifiques de ces substances en parties de la chaleur spécifique de la substance à laquelle on les rapporte. (Lavoisier & De Laplace, pág. 371).

En este ejercicio de formalización, $m q (a - b)$ es medida del calor sensible (cuando no hay cambio de fase), y $m q (a - b) = m' q (b - a')$ es la ecuación de equilibrio térmico de sustancias, donde m y m' son las masas de las sustancias que se ponen en contacto térmico, q y q' sus calores específicos y $(a - b)$ o $(b - a')$ los cambios de temperatura para cada sustancia. Nótese que el grado de calor en la mezcla está vinculado a qué tanta capacidad de calentamiento tiene estos dos cuerpos que están en contacto. La lógica sería la siguiente, si se requiere cierta cantidad de calor para aumentar la temperatura de una sustancia A y se requiere tanta cantidad de calor para que aumente la temperatura de otra sustancia B. Entonces cuando se realice la mezcla, el calentamiento se dará en términos de la relación que exista entre el calentamiento que se permite la sustancia A y el calentamiento que se permite en la sustancia B.

En otras palabras, el calentamiento que se genera en la mezcla siempre estará en función de cuán capaces son estas sustancias de calentarse entre sí, a través de sus calores específicos.

Ellos culminan su trabajo señalando lo siguiente:

On voit, par le détail dans lequel nous venons d'entrer, que la méthode précédente s'étend à tous les phénomènes dans lesquels il y a développement ou absorption de chaleur. On pourra toujours, dans ces différents cas, déterminer les quantités de chaleur qui se dégagent ou s'absorbent, et les rapporter à une unité commune ; par exemple, à la chaleur nécessaire pour élever une livre d'eau de zéro à quatre-vingts

degrés ; ainsi l'on pourra connaître et comparer entre elles les quantités de chaleur que produisent les combinaisons de l'huile de vitriol avec l'eau, de celle-ci avec la chaux vive, de la chaux vive avec l'acide nitreux, etc. ; celles qui se dissipent dans les combustions du phosphore, du soufre, du charbon, du pyrophore, etc. ; dans la détonation du nitre ; dans la respiration des animaux, etc. ; ce qui était impossible par les moyens jusqu'ici connus. (Lavoisier & De Laplace, pág. 373).

4.5 Principio de equilibrio y de conservación

- ☞ Las dos hipótesis respecto a la naturaleza del calor comparten la idea de que cuerpos con diferentes temperatura al estar en contacto durante algún tiempo se equilibran. El equilibrio es la cualidad a través de la cual se pueden establecer procesos de medida.

Para este período histórico, es un hecho de la experiencia que las temperaturas diferentes de cuerpos en contacto se igualan después de un cierto tiempo, ya vimos atrás como se expresaba Black al respecto.

La hipótesis mecanicista sobre la naturaleza del calor, consideraba la conservación de la fuerza viva como la razón por la cual los dos cuerpos en contacto tendían a igualarse también térmicamente. La hipótesis sustancialista, por su parte, consideraba que el fluido calórico que comparte el cuerpo con mayor temperatura llega por completo al de menor temperatura y su repartición total permanece en el contacto de los cuerpos, por eso su tendencia equilibrarse en la mezcla. En ambos casos las conclusiones fueron las mismas:

- Todo calor será medible por el efecto que produce.
- El calor libre se conserva en el contacto de los cuerpos.

Este equilibrio en las temperaturas mantiene también un equilibrio en el calor. Los desequilibrios de temperatura implican desarrollo de potencia motriz, como los desequilibrios de calor implican temperaturas variables.

Las dos ideas, equilibrio de temperaturas y equilibrio de calor, sustentan la relación de equivalencia $m q (a - b) = m' q (b - a')$, o ley cero de la termodinámica: No hay flujo de calor entre dos cuerpos que se encuentran a la misma temperatura. O como se suele enunciar hoy día: Si dos sistemas están en equilibrio térmico con un tercer sistema, ellos están en equilibrio térmico entre sí.

Concluimos entonces que en este proceso de formalización es difícil, sino imposible, separar el resultado o esquema matemático resultante, de las concepciones sobre el cual ha sido edificado. Esto es lo que nos lleva a distanciarnos de la perspectiva semántica. Nos parece que este caso muestra el estrecho vínculo entre la adopción de unos criterios de organización de los fenómenos que se estudian y el resultado formal que de allí se deriva. Resultado formal que envuelve los conceptos, pero también los procedimientos de medida, las formulaciones matemáticas y sobre todo los principios que allí se establecen.

5 De las propiedades de las sustancias a las propiedades de los sistemas

☞ En el capítulo anterior presentamos algunas consideraciones sobre las organizaciones de las que hoy día conocemos como: ley cero y segunda ley de la termodinámica, cuyas ideas básicas tuvieron origen en los estudios calorimétricos. En este capítulo, mostramos cómo estos principios se articulan con nuevos problemas sobre la medida del calor que estaban inmersos en el estudio de las máquinas térmicas y la búsqueda de su eficiencia mecánica, que fueron un derrotero importante del trabajo experimental durante el siglo XIX.

5.1 De Watt a Clausius.²⁷ Las teorías del calor durante el siglo XIX

☞ Los desarrollos de las máquinas térmicas durante el siglo XIX son el pilar de la revolución industrial y con ella de la búsqueda por obtener mayor eficiencia mecánica. Esto suscita en los científicos su inclinación por el estudio de los gases y vapores y por conseguir máquinas más eficientes.

Los problemas que conducen a diversos aspectos de la formalización de los fenómenos térmicos son aquellos involucrados con: 1) la medición de la dilatación de los gases, y sus calores específicos, 2) la geometrización de procesos de intercambio térmico donde el calor actúa como potencia motriz, y 3) el establecimiento de la primera ley de la termodinámica que organiza consigo la ampliación del principio de conservación, gracias a los numerales anteriores 1 y 2.

Las formalizaciones teóricas de este período traen consigo terminología emergente como los conceptos de energía y entropía, generando cambios en la estructura teórica de la física y aportando argumentos para una perspectiva energetista y sistémica dentro del análisis de los

²⁷ El título hace referencia a una de las obras que inspiraron el tipo de análisis que presentamos en este capítulo. From Watt to Clausius. The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age (1971), del autor, Donald S. L. Cardwell. (Cardwell, 1971), quien con su mirada de la historia amplia, crítica y profunda, aunque no esté citada expresamente en estos apartados, muestra una forma de hacer un análisis histórico – crítico, que vincula los aspectos teóricos y prácticos en el desarrollo de un campo disciplinar. Además, presenta algunos autores imprescindibles, para comprender el desarrollo de la termodinámica en el siglo XIX. Tres de ellos, son los estudiados en este capítulo desde la perspectiva de la formalización conceptual.

fenómenos físicos. Nosotros nos centraremos en la primera ley: principio de conservación de la energía, que por sí sola involucra varios aspectos, destacando, como señala Jou (1985, pág. 9), que la formulación de la primera ley es también una identificación de la naturaleza del calor.

5.1.1 Watt y las máquinas de vapor

☞ Watt propone mejoras a la máquina de vapor de Newcomen, y con estas mejoras da inicio a la exploración sobre el funcionamiento más óptimo de las máquinas térmicas.

En su carta de 1814, *History of the Origin of Mr Watt's Improvements on the Steam-Engine*, James Watt (1736 – 1819) relata cómo introdujo mejoras a la máquina de Thomas Newcomen (1664 -1729), el padre de la revolución industrial, diseñando su propia máquina de vapor (1776) más eficiente tanto en el funcionamiento como en el consumo de carbón.

La máquina de vapor de Newcomen había sido pionera en el uso de la elasticidad de los gases para la producción de trabajo mecánico, aprovechaba el movimiento ascendente y descendente que genera el vapor cuando se contrae al enfriarse y se dilata al calentarse. Dilataciones y compresiones que ocurrían en un solo pistón que era calentado con agua hirviendo y enfriado con agua a baja temperatura. Watt notó que, al tener un solo pistón, en esta máquina se requería aumentar la temperatura desde el mínimo volumen de vapor y elevarla hasta la temperatura de ebullición del agua para obtener el máximo volumen de vapor, y después, se requería volver a enfriar el vapor hasta el valor inicial de condensación, condiciones que implicaban un alto consumo de carbón en la obtención de vapor y trabajo.

Watt muestra que, en el proceso de diseño de su máquina, él mismo tuvo que estudiar diferentes aspectos que hacían parte de la doctrina de los calores latentes. Al ser discípulo y conocedor de la obra de Black, reconoce la importancia de los cambios de fase de las sustancias para obtener eficiencia en la producción de trabajo mecánico. En la carta se presentan los hallazgos que se tenían de la ciencia del calor hasta ese momento:

It was known very long before my time, that steam was condensed by coming into contact with cold bodies, and that it communicated heat to them. Witness the common still, &c. &c.

It was known by some experiments of Dr Cullen, and others, that water and other liquids boiled in vacuo at very low heats; water below 100°.

It was known to some philosophers, that the capacity or equilibrium of heat, as we then called it, was much smaller in mercury and tin than in water.

It was also known, that evaporation caused the cooling of the evaporating liquid, and bodies in contact with it.

I had myself made experiments to determine the following facts.

1st, The capacities for heat of iron, copper, and some sorts of wood, comparatively with water. Similar experiments had also subsequently been made by Dr Irvine, on these and other metals.

2d, The bulk of steam was compared with that of water.

3d, The quantity of water which could be evaporated in a certain boiler by a pound of coals.

4th, The elasticities of steam at various temperatures greater than that of boiling water, and an approximation to the law which it followed at other temperatures.

5th, How much water, in the form of steam, was required every stroke by a small Newcomen's engine, with a wooden cylinder six inches diameter, and twelve inches long in the stroke.

6th, I had measured the quantity of cold water required in every stroke to condense the steam in that cylinder, so as to give it a working power of about 7 lb. on the inch.

Here I was at a loss to understand how so much cold water could be heated so much by so small a quantity in the form of steam, and applied to Dr Black, and then first understood what was called Latent Heat. (Watt, 1820, pág. 4).

En este contexto, Watt reconoce que si introduce un segundo cilindro donde el vapor se condense, no será necesario invertir demasiado carbón para calentar el vapor en el primer cilindro, pues este permanecerá caliente, mientras se mantenga alejado del segundo cilindro.

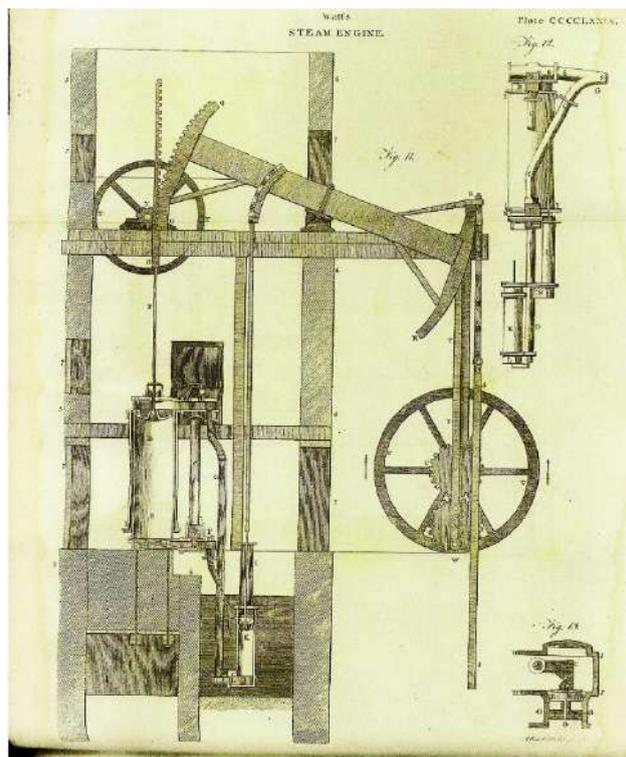


Imagen 6. Máquina de Vapor de Watt. (3rd edición británica 1797)

Los dos cilindros, en la imagen B y K, son conocidos hoy como la fuente caliente y la fuente fría de las máquinas térmicas. Mientras éstas se mantengan alejadas se pueden aumentar el volumen del vapor en un cilindro y reducir el volumen del vapor en el otro, de forma alternada.

But this theory, though useful in determining the quantity of injection necessary where the quantity of water evaporated by the boiler, and used by the cylinder, was known, and in determining, by the quantity and heat of the hot water emitted by Newcomen's engines, the quantity of steam required to work them, did not lead to the improvements I afterwards made in the engine. These improvements proceeded upon the old-established fact, that steam was condensed by the contact of cold bodies, and the later known one, that water boiled in vacuo at heats below 100° , and consequently that a vacuum could not be obtained unless the cylinder and its contents were cooled every stroke to below that heat. (Watt, 1820, pág. 5).

Nótese, que Watt no se refiere únicamente a las cualidades de las sustancias y de sus puntos de fusión y ebullición. Empieza a cambiarse el vocabulario en términos de: cuánto calor es

necesario para la producción de cierta cantidad de trabajo mecánico²⁸: “Había medido la cantidad de agua fría requerida cada vez para condensar el vapor en ese cilindro, a fin de darle una potencia de trabajo que aproximadamente 7Ib, por pulgada.” . (Watt, 1820, pág. 4)

Watt introduce la separación de la fuente caliente y la fuente fría a través de dos pistones y el circuito necesario que mantiene esa disposición en la máquina. Con la introducción de este segundo pistón, se genera una mayor durabilidad de las partes, y también, una búsqueda por la obtención de medidas que mejoren el consumo de carbón. Emerge entonces una nueva problemática, identificar: ¿cuánto calor es necesario producir para obtener una determinada cantidad de movimiento? Estos aportes constituyeron uno de los mayores avances a nivel de ingeniería en su época y marcarían el desarrollo de la revolución industrial y científica del siglo XIX.

They pointed out that, to avoid useless condensation, the vessel in which the steam acted upon the piston ought always to be as hot as the steam itself; that to obtain a proper degree of exhaustion, the steam must be condensed in a separate vessel, which might be cooled to as low a degree as was necessary, without affecting the cylinder; and that as the air and condensed water could not be blown out by the steam as in Newcomen's, they must be extracted by a pump, or some other contrivance; that, in order to prevent the necessity of using water to keep the piston air-tight, and also to prevent the air from cooling the cylinder during the descent of the piston, it was necessary to employ steam to act upon the piston in place of the atmosphere. (Watt, 1820, pág. 6).

5.1.2 Sobre la potencia motriz del fuego. Los gases y sus calores específicos

☞ En 1824 S. Carnot publica la obra más emblemática de los orígenes de la termodinámica. A través de ella los siguientes investigadores como E. Clapeyron desarrollarán teorías matemáticas para describir los procesos en las máquinas térmicas.

En este contexto de optimización de las máquinas de vapor, tiene origen la obra de Sadi Carnot (1796 -1832), *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (1824), una sobresaliente síntesis y descripción sobre los efectos

²⁸ Muriel Guedj (2006). Si l'utilisation du concept de travail se généralise au détriment du concept de force et constitue une étape majeure vers la formulation du principe de la conservation de l'énergie, l'étape qui mène du travail vers l'énergie est négligée par les auteurs. Pág. 33. (Guedj, 2006)

del calor en el funcionamiento de la máquina térmica, cuya idea central, dice Émile Clapeyron (1799 -1864), está organizada sobre lo absurdo que sería admitir que se puede crear calor o fuerza motriz desde cero. Clapeyron ve en esta obra demostraciones fecundas y enunciados que llevarán a establecer un nuevo principio general en la teoría del calor, el enunciado de la primera ley de la termodinámica o principio de conservación, que expresado en sus palabras, es:

Il résulte de ce qui précède qu'une quantité d'action mécanique et une quantité de chaleur pouvant passer d'un corps chaud à un corps froid sont des quantités de même nature, et qu'il est possible de substituer l'une à l'autre; de la même manière qu'en mécanique, lorsqu'un corps peut tomber d'une certaine hauteur et qu'une masse se déplace avec une certaine vitesse, ce sont des quantités du même ordre, qui peuvent se transformer les unes dans les autres par des agents physiques. (Clapeyron, 1834, pág. 162)

Le calorique en passant d'un corps, à un autre entretenu à une température moindre, peut donner lieu à la production d'une certaine quantité d'action mécanique lorsqu'il. Il y a une perte de force viva à chaque fois qu'il y a contact entre des corps de températures différentes. (Clapeyron, 1834, pág. 163).

Sobre este aspecto Clapeyron se propone establecer en una ley matemática general que plantea en su obra: *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur* (1824), dando origen a la matematización del campo que hoy denominamos termodinámica: al enfocar la atención en la producción de fuerza motriz. En este apartado, hacemos un análisis de los enunciados que entretejen los dos textos, y que nos llevan a identificar el proceso de formulación de este principio tan fundamental en la física.

En primer lugar, Clapeyron señala como relevantes los siguientes enunciados:

Voici l'énoncé de plusieurs théorèmes auxquels conduit cette nouvelle méthode de raisonnement.

1. Lorsqu'un gaz passe, sans changer de température, d'un volume et d'une pression donnés à un autre volume et pression également déterminés, la quantité de calorique absorbée ou abandonnée est toujours la même, quelle que soit la nature du gaz choisi comme sujet d'expérience.
2. La différence entre la chaleur spécifique sous pression constante et la chaleur spécifique sous volume constant est, la même pour tous les gaz.
3. Lorsqu'un gaz varie de volume, sans changer la température, les quantités de chaleur absorbées ou dégagées par ce gaz sont en progression

arithmétique, si les accroissements ou réductions de volume sont en progression géométrique. (Clapeyron, 1834, págs. 154 - 155).

Estos enunciados fueron obtenidos del trabajo experimental sobre el comportamiento de los gases que diferentes científicos venían reportando, especialmente Petit y Dulong (1819)²⁹, y que ahora cobraban un papel central en el desarrollo de las teorías del calor. Del periodo anterior, siglo XVIII, se había caracterizado el comportamiento de sólidos y líquidos frente al calor. Ahora, con la máquina térmica, resultaba imprescindible identificar el comportamiento de los fluidos elásticos (gases y vapores), y Carnot dedica una parte especial de su obra a mostrar la importancia de estos resultados.

Respecto al primer enunciado, en castellano: cuando un gas pasa sin cambiar de temperatura desde un volumen dado y una presión, a otro volumen y a otra presión igualmente definida, la cantidad de calórico absorbido o liberado es siempre la misma; destaca que es posible la obtención de calor únicamente por los medios mecánicos, es decir por variaciones de presión y volumen sin que se necesiten variaciones de temperatura, y encierra la idea de que se obtiene calor exclusivamente por el trabajo mecánico involucrado en el proceso.

Recordemos que una de las preocupaciones centrales en el estudio de la máquina térmica es encontrar la medida del calor, y a través del cálculo de la fuerza motriz empleada para los cambios de volumen, en relación con los cambios de presión, se podría determinar la cantidad de calórico absorbido o liberado, que es la cantidad de trabajo invertido para las operaciones, sí y solo si no hay cambios en la temperatura. En este camino, todas las variaciones de calor son causadas únicamente por la fuerza motriz.

Sería fácil afirmar, que la cantidad de calor se mide entonces con la cantidad de trabajo. Sin embargo, la máquina no opera siempre en equilibrio térmico, y estos cambios de volumen y presión ocurren durante la etapa en la cual el vapor es enviado o hacia la fuente fría o hacia la fuente caliente, en otras palabras, en este proceso el vapor no está en contacto con ninguna de las fuentes, es lo que hoy día nombramos como proceso isotérmico, aspecto al que volveremos más adelante.

²⁹ Pierre Louis Dulong y Alexis Thérèse Petit, publican en 1819, *Recherches sur quelques points importants de la théorie de la Chaleur*, una obra en la cual muestran los avances que se tienen hasta este momento de las mediciones de los calores específicos de los gases en largos procesos de enfriamiento y calentamiento, que muestran el despliegue experimental de la época. (Dulong & Petit, 1819)

Por otra parte, debemos resaltar que la medida de los calores específicos de los gases aportaría a determinar qué tanta cantidad de calor se requiere usar sobre un fluido elástico, aquellos gases o vapores con menor calor específico serían más eficientes y consumirían menos carbón al variar más rápido su temperatura. De ahí la importancia del segundo enunciado: La diferencia entre el calor específico a presión constante, y el calor específico a volumen constante, es la misma para todos los gases.

El resultado de esta expresión es, que no importa la naturaleza del gas que se escoja para hacer estos experimentos, si es aire atmosférico, como se llamaba en esa época, o cualquier otra cantidad de aire distinto comprimido, como las variaciones de sus calores específicos son las mismas, se obtendría la misma cantidad de trabajo sin importar que las medidas de sus calores particulares sean distintas. Aunque si es relevante el proceso mediante el cual se realice esta operación, si a volumen constante o a presión constante, si bien las variaciones permaneces constantes, las condiciones inicial y final en los procesos en los que cambia la temperatura, determinará la cantidad de calor total y de trabajo resultante del sistema, esto es una de las cosas más importantes que logra definir Carnot³⁰, y que resaltan sus sucesores.

A continuación, se presentan la tabla de los calores específicos de ciertos gases o vapores obtenidos tanto a presión constante como a volumen constante, relatadas por Carnot³¹. Hidrógeno oxígeno, nitrógeno, ácido carbónico, protóxido de nitrógeno todos estos son los que se llamaron los gases permanentes, gases o vapores que durante toda esta época y hasta muy entrado el siglo XX, no se podían convertir en líquido. La tabla muestra que, para aumentar un grado la temperatura de esa cantidad de gas usado en la experimentación, cada gas va a requerir una cantidad diferente de calor para variar esa temperatura, según el proceso realizado.

³⁰ Durante la primera parte del siglo XIX, se trabajó con algunos vapores que no son gases simples, por ejemplo, el vapor de agua era aún considerado como un solo elemento. Sin embargo, aunque fueran compuestos, los fluidos elásticos mantienen la misma proporción entre las variaciones de volumen, o las variaciones de presión.

³¹ Hemos utilizado para la obtención de las imágenes la traducción inglesa de Reflections on the motive power of heat. Traducción de William Thomson (Lord Kelvin) de 1897, por la facilidad de uso de la fuente.

TABLE OF THE SPECIFIC HEAT OF GASES.

NAMES OF GASES.	Specific Heat under Const. Press.	Specific Heat at Const. Vol.
Atmospheric Air,	1.000	0.700
Hydrogen Gas,	0.903	0.603
Carbonic Acid,	1.258	0.958
Oxygen,	0.976	0.676
Nitrogen,	1.000	0.700
Protoxide of Nitrogen,	1.350	1.050
Olefiant Gas,	1.553	1.253
Oxide of Carbon,	1.034	0.734

Imagen 7. Tabla de calores específicos de los gases. (Carnot, edición inglesa de 1897, pág.76)

En otras palabras, se requiere una mayor cantidad de calor para hacer variar un grado la temperatura de un gas manteniendo su presión constante, si se mantiene su volumen constante se requiere menos cantidad de calor, en comparación.

En la tabla apreciamos, que la medida de los calores específicos obtenida manteniendo el proceso a presión constante, es diferente a la medida obtenida manteniendo el proceso a volumen constante, ambos procesos realizados sobre el mismo gas. Sin embargo, la diferencia entre el calor específico a presión constante y a volumen constante es el mismo valor para todos los gases.

Calor específico a Presión constante	Calor específico a volumen constante	Diferencia entre calores específicos [Resta]
1,0	0,7	0,3
0,903	0,603	0,3
1,258	0,958	0,3
0,976	0,676	0,3
1	0,7	0,3
1,35	1,05	0,3
1,553	1,253	0,3
1,034	0,734	0,3

Tabla 1. Diferencia entre calores específicos de los gases a presión y volumen constantes.

De modo que, la diferencia entre los calores específicos, si se resta la segunda columna a la primera, será el mismo valor, para cada uno de estos fluidos elásticos y destacará como el valor importante en la medición.

Lo que nos lleva al segundo enunciado expresado por Clapeyron: La diferencia entre el calor específico a presión constante, y el calor específico a volumen constante, es la misma para todos los gases. Y fortalece la idea del primer enunciado, que independiente de cuál sea la

naturaleza del gas escogido para el experimento, los calores absorbidos o liberados serán siempre los mismos, sin cambiar la temperatura.

En la siguiente tabla se presenta otro comportamiento importante de los gases, cuando los gases se comprimen pueden elevar su temperatura sin que exista una fuente externa de calor. En esta tabla Carnot señala tal aumento de temperatura para diferentes gases, nótese que la tabla se refiere al efecto causado por la reducción de volumen en 1/115 partes.

**TABLE OF THE ELEVATION OF TEMPERATURE
OF
Gases through the Effect of Compression.**

NAMES OF GASES.	Elevation of Temperature for a Reduction of Volume of $\frac{1}{115}$.
Atmospheric Air,	° 1.000
Hydrogen Gas,	1.160
Carbonic Acid,	0.730
Oxygen,	1.085
Nitrogen,	1.000
Protoxide of Nitrogen,	0.667
Olefiant Gas,	0.558
Carbonic Oxide,	0.955

Imagen 8. Tabla de elevación de temperaturas. (Carnot, edición inglesa de 1897, pág.78).

Se deduce entonces que el aumento de temperatura no se establece únicamente por contacto térmico, y no siempre se necesitará tener una fuente de calor para hacer variar la temperatura del gas.³² Resultado muy importante para describir el ciclo de Carnot, que ampliaremos en el siguiente apartado.

Entre tanto, en la siguiente tabla, se aprecian los cambios en el calor específico de uno solo de los gases: el aire atmosférico. Este proceso se realiza a temperatura constante. Por lo cual, cada vez que se reduce la presión aumenta el volumen del gas, y mientras se aumente la presión se reduce su volumen, siguiendo la ley de Boyle- Mariotte.

³² A propósito de este aspecto particular, he tenido la oportunidad de dirigir un trabajo de grado para optar al título de Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales, titulado: La idea de equilibrio-desequilibrio del Calórico en el ciclo de Carnot: un análisis para la enseñanza de los procesos térmicos (2022), que se enfoca en mostrar la dificultad que implica comprender esta característica de los procesos. (Palacios Hernández & Laguna Rivera, 2022), de la Universidad Pedagógica Nacional.
<http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/18650>

SPECIFIC HEAT OF AIR.

Pressure in Atmospheres.	Specific Heat, that of Air under Atmospheric Pressure being 1.	Pressure in Atmospheres.	Specific Heat, that of Air under Atmospheric Pressure being 1.
1024	1.840	1	1.000
512	1.756	2	0.916
256	1.672	4	0.832
128	1.588	8	0.748
64	1.504	16	0.664
32	1.420	32	0.580
16	1.336	64	0.496
8	1.252	128	0.412
4	1.168	256	0.328
2	1.084	512	0.244
1	1.000	1024	0.160

Imagen 9. Calor específico de aire. (Carnot, edición inglesa de 1897, pág.86).

En este caso se toma como referencia que el calor específico es 1 cuando la presión es de 1 atmósfera, que corresponde al último dato de la columna a la izquierda, primer dato de la columna a la derecha, respecto a los valores de presión atmosférica.

Veamos los datos de la columna a la izquierda correspondientes a los valores de presión, empezando por presión atmosférica 1, esta presión se reduce a la mitad en cada oportunidad, organizando la serie 1, 1/2, 1/4, etc, que recibe el nombre de progresión geométrica, en este caso por el número que se multiplica es 1/2 y este recibe el nombre de razón de la progresión.

De la misma forma, en la columna de presión, que se encuentra a mano derecha, podemos encontrar otra serie, que también es una progresión geométrica pero esta serie está creciendo al multiplicar por 2, así, 1,2,4,8, etc. las dos series nos están indicando como crece y decrece la presión por lo cual indican como crece o decrece el volumen.

Ahora veamos las columnas correspondientes a los datos de los calores específicos: en la columna de la izquierda notamos que esos calores específicos disminuyen hasta el valor de 1, y, en la columna de la derecha va disminuyendo para valores menores que 1. La siguiente tabla muestra que las variaciones entre los datos consecutivos mantienen el mismo valor 0.084. Sí se construye una serie en la cual a un cierto valor por ejemplo 1,840 se le resta 0.084 y se obtiene el valor consecutivo 1.756, al que también se le resta 0.084 y así sucesivamente obteniendo todos los valores de la serie. Este tipo de series recibe el nombre de progresión aritmética.

Valores consecutivos de los calores específicos en relación con la presión		Diferencia de los valores	Valores consecutivos de los calores específicos en relación con la presión		Diferencia de los valores
1,84	1,756	0,084	1	0,916	0,084
1,756	1,672	0,084	0,916	0,832	0,084
1,672	1,588	0,084	0,832	0,748	0,084
1,588	1,504	0,084	0,748	0,664	0,084
1,504	1,42	0,084	0,664	0,58	0,084
1,42	1,336	0,084	0,58	0,496	0,084
1,336	1,252	0,084	0,496	0,412	0,084
1,252	1,165	0,087	0,412	0,328	0,084
1,165	1,084	0,081	0,328	0,244	0,084
1,084	1	0,084	0,244	0,16	0,084

Tabla 2. Diferencia de los valores consecutivos entre las presiones.

En relación con estas observaciones, Carnot afirma:

When a gas varies in volume without change of temperature, the quantities of heat absorbed or liberated by this gas are in arithmetical progression, if the increments or the decrements of volume are found to be in geometrical progression. (Carnot, pág. 81).

Este es el tercer enunciado que Clapeyron ha resaltado como importante, y que citamos anteriormente.

Como notamos por los resultados, en todo este período que resume Carnot en su obra y que retoma Clapeyron para la suya, había una amplia caracterización de los procesos isovolumétricos e isobáricos, tanto como de los procesos isotérmicos, reunidas en leyes independientes bastante reconocidas. Sin embargo, Clapeyron expresa:

La loi de Mariotte et la loi de M. Gay-Lussac établissent les relations qui existent entre le volume, la pression et la température d'une même quantité de gaz ; toutes deux ont obtenu depuis longtemps l'assentiment des savants... mais ces résultats importants n'apprennent rien sur la quantité de chaleur que possèdent les gaz, et qu'en dégagent la pression ou abaissement de la température, ils ne donnent pas la loi de chaleurs spécifiques à pression et volume constants. (Clapeyron, 1834, pág. 153)

En otras palabras, los resultados son muy importantes, pero deberían expresar el funcionamiento de la máquina térmica, y, además, deberían permitir obtener una medida del calor absorbido o liberado en los cambios que ocurren en relación con la fuerza motriz. Es

aquí cuando las leyes empíricas que se presentan sobre los gases quedarán expresadas en una nueva ley más general, que Clapeyron obtiene a través de la representación geométrica de los procesos térmicos, dando paso a la obtención de la medida de calor.

5.1.3 La geometrización. Intercambio térmico y potencia motriz

☞ Clapeyron introduce representaciones gráficas que permiten obtener teóricamente medidas de calor desarrolladas durante el ciclo de una máquina térmica.

De los resultados de los experimentos con los fluidos elásticos quedaban claros algunos comportamientos imprescindibles en la descripción de una máquina térmica para que ésta lograra aprovechar al máximo la cantidad de trabajo realizado por las acciones de compresión y expansión del vapor al contacto con una fuente caliente y una fuente fría que se alternan:

1. No importa la naturaleza del gas que se utilice dentro de la máquina térmica, los calores absorbidos o liberados serán siempre los mismos.
2. El trabajo mecánico es proporcional a la cantidad de calor absorbido o liberado, siempre que el proceso se realice a temperatura constante.
3. La variación de temperatura no se establece únicamente por contacto térmico, se pueden tener variaciones de temperatura a causa de variaciones de presión o volumen.
4. Se pueden obtener variaciones de calor mientras la temperatura de un gas permanece constante.

Estas afirmaciones son para Clapeyron objeto de discusión. Y lo llevan a un primer análisis:

Il est toujours possible d'utiliser le passage de calorique d'un corps chaud à un corps froid pour la production d'une force mécanique: il suffit pour construire un appareil semblable à celui des machines à vapeur ordinaires, dans lequel le corps chaud serve à développer la vapeur, et le corps froid pour le condenser.

Il résulte de la qu'il y a perte de force vive, de force mécanique ou de quantité d'action, chaque fois qu'il y a contact immédiat entre deux corps de températures différentes, et que la chaleur passe d'un corps à l'autre sans intermédiaire; Ainsi, dans tout dispositif destiné à produire une force motrice génératrice de chaleur, il y a une perte de force chaque fois qu'il y

a communication directe de chaleur entre des corps de températures différentes, et par conséquent, l'effet maximum produit ne peut pas être obtenu par un dispositif en le contact ne s'établit qu'entre corps d'égale température. . (Clapeyron, 1834, págs. 155 - 156).

El funcionamiento de la máquina térmica requiere de la óptima transformación de calor en trabajo, que ocurre cuando la cantidad de calor sea proporcional a la cantidad de trabajo desarrollado, esto se consigue únicamente en igualdad de temperatura. Sin embargo, como ya habíamos resaltado antes, toda máquina térmica requiere para su funcionamiento la alternancia entre la fuente caliente y la fuente fría. Esto implica que haya pérdida de la relación: calor absorbido o liberado será proporcional al trabajo mecánico que lo produce. Ninguna máquina, entonces, será eficiente al cien por ciento, de ahí lo absurdo de admitir que se puede transformar todo el calor en movimiento sin pérdida de fuerza motriz.

Así que la medida del calor quedará supeditada a las relaciones que se establezcan para hacer que el vapor cambie de volumen, de presión y de temperatura. Es ahí cuando se representan las relaciones P , V , T en los que actualmente denominamos diagramas de fase. A continuación, presentamos un ejemplo de los razonamientos, inicialmente geométricos y posteriormente analíticos, a los que recurre Clapeyron para hacer una síntesis del trabajo de Carnot, en la cual describe los procesos del ciclo de la máquina, bajo la acción de la fuente caliente:

Cela posé, prenons un gaz quelconque à la température T , et mettons-le en contact avec la source de chaleur A ; représentons son volume V_0 en abscisse AB , et sa pression en ordonnée CB (fig. I).

Si le gaz est enfermé dans un récipient extensible et qu'on le laisse se dilater dans un espace vide, où il ne perd pas de chaleur par rayonnement ou contact, la source de chaleur A lui fournira à chaque instant la quantité de calorique que son augmentation en le volume redevient latente, et il maintiendra la même température T . Sa pression, au contraire, diminuera selon la loi de Mariotte. La loi de cette variation peut être représentée géométriquement par une courbe CE dont les volumes seront en abscisse, et les pressions correspondantes seront en ordonnée.

Supposons que la dilatation du gaz soit continuée jusqu'à ce que le volume primitif AB soit devenu AD; et soit DE la pression correspondant à ce nouveau volume; le gaz, pendant sa dilatation, aura développé une quantité d'action mécanique qui aura la valeur de l'intégrale du produit de la pression, par de la différentielle du volume, et sera représentée géométriquement par la surface comprise entre l'axe des abscisses, les coordonnées CB, DE et la portion de l'hyperbole CE.

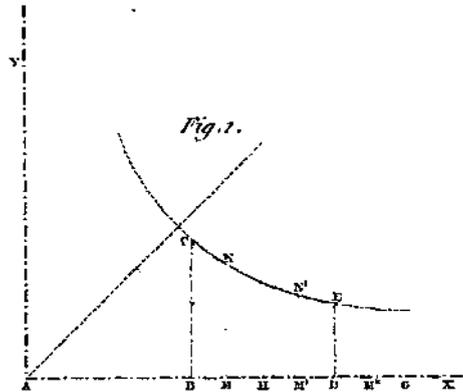


Imagen 10. Representación gráfica de curva isotérmica. (Clapeyron, 1834)

Supposons maintenant qu'on écarte le corps A, et que la dilatation du gaz se continue dans une enveloppe imperméable à la chaleur; alors, une partie de son calorique sensible devenant latente, sa température diminuera, et sa pression continuera de décroître d'une manière plus rapide et suivant une loi inconnue, qui pourra être représentée géométriquement par une courbe EF dont l'abscisse seraient les volumes du gaz, et ils ont ordonné les pressions correspondantes; Nous supposerons que la dilatation du gaz soit continuée jusqu'à ce que les réductions successives qu'éprouve le calorique sensible du gaz aient ramené de la température T du corps A à la température t du corps B. Son volume sera alors AG, et la pression correspondante sera être FG. De la même manière, on verra que le gaz lors de cette deuxième partie de sa détente va générer une quantité d'action mécanique représentée par la surface du trapèze mixtiligne DEFG. (Clapeyron, 1834, págs. 156 - 157).

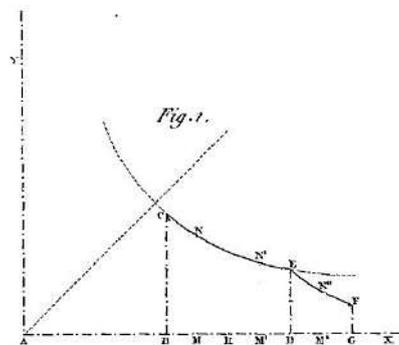
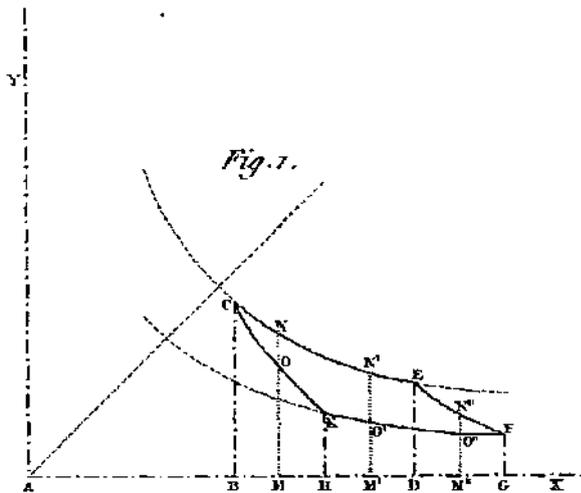


Imagen 11. Representación gráfica curva desconocida (adiabática). (Clapeyron, 1834).

Los dos procesos se repiten en orden inverso de idéntica manera, es decir, primero, se aumenta la presión a través de la disminución de volumen de gas por condensación, mientras la temperatura permanece constante al estar en contacto con la fuente fría, todo el calor es proporcional al trabajo realizado en esta operación. Posteriormente, el calor se hace sensible, y el gas experimenta aumentos de temperatura al haber abandonado su contacto con la fuente fría. Obteniéndose la gráfica



La representación aporta una idea importante en física: «une quantité d'action mécanique qui aura la valeur de l'intégrale du produit de la pression et du différentiel du volume, et sera représentée géométriquement par la surface comprise entre l'axe des abscisses.» . (Clapeyron, 1834, págs. 156).

Imagen 12. Representación gráfica del ciclo de

Carnot. (Clapeyron, 1834).

El cálculo de estas integrales permite, entonces, tener una medida del calor que se invierte en todas las operaciones del ciclo porque es posible determinar el valor de cada una. De modo que, el resultado matemático del nuevo cálculo del valor del calor o del valor del trabajo mecánico deriva de este proceso de representación. Si el calor deviene latente, es por la acción del trabajo mecánico, representado por las diferencias de volumen y presión, y si el calor deviene sensible es por el suministro de acción de la fuente, manifestando cambios de temperatura. La representación es igualmente válida para cada proceso. Y el valor total, ya sea de calor o de trabajo mecánico quedará expresado por el área encerrada.³³

Este procedimiento puede parecer de una gran obviedad hoy día, sin duda, en tiempos de Clapeyron fue una idea muy original: « Ce nouveau moyen de démonstration me paraît digne d'attirer l'attention des géomètres; Il me semble qu'il n'y a aucune contradiction et qu'il

³³ En relación con este aspecto, tuve la oportunidad de dirigir el trabajo de grado para optar a título de Licenciado en Física de Carlos Andrés Bonilla Montenegro, titulado: Reflexiones sobre la relación Física y Matemática en la enseñanza de la Física. Estudio de caso: termodinámica de Clapeyron, 2015. Universidad Pedagógica Nacional. (Bonilla Montenegro, 2015) <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/2117?show=full>

acquiert une importance nouvelle » (Clapeyron, 1834, pág. 155) Cuyo resultado demuestra que,

Cependant, toute la quantité de chaleur fournie par le corps A au gaz pendant qu'ils s'est dilaté en contact avec lui, s'est écoulé dans le corps B pendant la condensation du gaz qui s'est opéré en contact avec celui-ci.

Voilà donc la force mécanique développée par le passage du calorique chaleur d'un corps chaud à un corps froid, et ce passage s'effectué sans qu'il y ait eu contact entre des corps de températures différentes. (Clapeyron, 1834, pág. 159).

Como vemos, del trabajo de Clapeyron se concluyen dos nociones firmes:

1. Calor y trabajo mecánico, o fuerza viva, son magnitudes de la misma clase, por lo cual son equivalentes entre sí, y pueden extenderse a otros campos de la física.
2. En la descripción de la máquina térmica, es posible determinar estas cantidades a través del área de las superficies que quedan representadas en diagramas de las relaciones, P, V y T. Ese área está determinando las cantidades de calor sensible o latente, que intervienen en el proceso.

Estas ideas son tan importantes que se convertirán en el método para hacer diferentes tipos de cálculo cuando la fuerza motriz tiene lugar. Veremos a continuación, como Rudolf Clausius (1822-1888) en su obra: *The mechanical theory of heat* (1879)³⁴, se dedica a estudiar estas dos obras con el ánimo de presentar una perspectiva mecánica, que se distancie de las miradas sustancialistas y unifique los términos con los cuales se expresa el trabajo mecánico.

³⁴ Traducción del Alemán By Walter R. Browne.

5.2 Clausius. La medida del calor como suma del trabajos interno y externo

- ☞ Clausius utiliza los diagramas de Clapeyron y las ideas de trabajo de la mecánica para organizar una teoría formal cuya noción fundamental es trabajo. Clausius enuncia matemáticamente el principio de conservación de la energía.

5.2.1 Observaciones generales sobre *The Mechanical Theory Of Heat*

La primera parte del trabajo de Clausius consiste en definir las operaciones matemáticas que servirán de base para la comprensión de su obra. Presenta una introducción titulada: *Mathematical introduction. On mechanical work, on energy, and on the treatment of Non-integrable differential equations*. Veremos a continuación que estas expresiones, siguen el método de representación de Clapeyron, que hemos presentado en el apartado anterior.

it is allowable to express work done by a simple product, only when the distance traversed is indefinitely small... i.e. for an element of space. Let us be an element of space, and S the component in the

the direction of ds of the force acting on the point p. We have then the following equation to obtain d W, the work done during the movement through the indefinitely small space ds:

$$dW = S ds \text{ (Clausius, 1879, pág. 9).}$$

En el caso de un cuerpo moviéndose en un espacio de tres dimensiones el trabajo quedará representado por la acción de la medida de la fuerza actuando en cada una de las coordenadas del espacio, quedando representado como:

$$dW = Xdx + Ydy + Zdz \dots\dots\dots (10).$$

This is the differential equation for determining the work done...
(Clausius, 1879, pág. 10).

Clausius concluye que el trabajo realizado sobre masas puntuales y causado por fuerzas que actúan sobre ellas, es independiente de la trayectoria y para su cálculo se requieren conocer únicamente las posiciones inicial y final. Después de ello, introduce la idea de que este trabajo, causado por fuerzas que actúan sobre un sistema, es equivalente a las variaciones de vis viva, expresiones muy usadas en los estudios mecánicos de la época, estableciéndose así el principio de conservación del trabajo mecánico. Continúa afirmando que Rankine había introducido el nombre de energía potencial a estas expresiones que representaban funciones

de fuerza, donde el trabajo depende de solo de la posición en los puntos inicial y final. Afirma que él, particularmente, se aventura a proponer para ellas el nombre de Ergal. (Clausius, 1879, págs. 11 -12).

De modo que,

by writing the differential in the form $\sum(Xdx + Ydy + Zdz)$, and considering the coordinates therein as independent variables.

For this it is necessary that this expression should be a perfect differential of some function of the co-ordinates, or in other words the forces acting on the system must have an Ergal. This Ergal, which is the negative value of the above function, we will denote by a single letter. The letter U is generally chosen for this purpose in works on Mechanics:

but in the Mechanical Theory of Heat that letter is needed to express another quantity, which will enter as largely into the discussion; we will therefore denote the Ergal by J .

we will therefore denote the Ergal by J . Hence, we put:

$$\sum(Xdx + Ydy + Zdz) = - dJ,$$

whence if J_0 be the value of the Ergal at time t_0 , we have:

$$\int_{t_0}^t \sum(Xdx + Ydy + Zdz) = J_0 - J, \dots (30),$$

which expresses that the work done in any time is equal to the decrease in the Ergal.

If we substitute $J_0 - J$ for the integral in equation (28),

we have:

$$T - T_0 = J_0 - J \text{ or } T + J = T_0 + J_0 \dots\dots\dots (31);$$

whence we have the following principle: The sum of the Vis Viva and of the Ergal remains constant during the motion.

This sum, which we will denote by the letter U , so that

$$U = T + J. \dots\dots\dots (32),$$

is called the Energy of the system; so that the above principle may be more shortly expressed by saying: The Energy remains constant during the motion. This principle, which in recent times has received a much more extended application than formerly, and now forms one of the chief foundations of the whole structure of physical philosophy, is known by the name of The Principle of the Conservation of Energy. (Clausius, 1856, pág. 20).

Notemos cómo en estas primeras veinte páginas de su texto, queda definido no sólo el principio de conservación para la mecánica, también, queda definido el principio de conservación para la expresión del calor. Sin embargo, de ahí en adelante su trabajo tiene como propósito presentar una problemática sobre la teoría mecánica del calor, y en ella establecer que el equivalente mecánico consiste en admitir que cuando se produce calor se ha realizado trabajo y viceversa, pero si no se hace una redefinición de los términos calor libre o sensible, calor específico y calor latente, no todas las partes del calor se convierten siempre en la cantidad total de trabajo.

En el siguiente apartado, que constituye el primer capítulo, titulado: *First main principle of the mechanical theory of Heat, or principle of the equivalence of heat and work*. Clausius utiliza esa expresión $U = T + J$ para señalar que: al considerar el calor como el movimiento de las partículas de un cuerpo se puede expresar, para un sistema cerrado, que el Calor total del sistema corresponde a los trabajos internos y externos que actúan sobre el sistema. De este modo, se llega a establecer la primera ley de la termodinámica: $q = u + W$, como la conocemos actualmente.

5.2.2 La desigualdad de la relación calor – trabajo

Ahora bien, su análisis toma un giro interesante, Clausius comienza por reconocer que existen ya en su tiempo muchos avances para establecer teóricamente una medida fija entre la cantidad de trabajo mecánico y la cantidad de calor que se gasta en su producción. Por una parte, reconoce la importancia teórica que ha tenido el trabajo de Sadi Carnot al establecer que la cantidad de potencia motriz está en proporción con la cantidad de calor, hace notar, sin embargo, que para Carnot:

1. El trabajo es producido por el calor en la transmisión de calor del cuerpo caliente al cuerpo frío sin que haya, al mismo tiempo, una alteración permanente sobre cuerpo en el que actúa. (Clausius, 1856, pág. 102)
2. En esa transmisión de calor, en la que se produce trabajo, la cantidad de calor permanece inalterada en el proceso.

Clausius objeta que estas afirmaciones estén completamente establecidas a través de la experimentación. Argumenta que, si se acepta que la cantidad de calor permanece inalterada,

y que no disminuye durante la producción de trabajo, también debe aceptarse que, si el calor no puede disminuir tampoco puede aumentar, y sería imposible explicar que haya incremento de temperatura a causa de la fricción sin asumir que hay un incremento en la cantidad de calor. (Clausius, 1856, pág. 102) Destaca esta expresión de Carnot: el calor se transmite. Esta idea entra en contradicción con que el calor se pueda incrementar por la producción de trabajo, porque si el trabajo implica movimiento siendo el resultado de la acción de una fuerza en la dirección de un desplazamiento, entonces el trabajo no puede ser una sustancia que se transmite, y por eso señala:

In later days has arisen the other view that Heat is in reality a mode of motion. According to this view, the heat found in bodies and determining their temperature is treated as being a motion of their ponderable atoms, in which motion the ether existing within the bodies may also participate... apply to Heat the principle of the equivalence of Vis Viva and Work, which applies to motion of every kind; and thus establish a principle which may be called the first main Principle of the Mechanical Theory of Heat. (Clausius, 1879, pág. 22).

Si esto es así que se puede establecer una equivalencia entre calor y trabajo por ser magnitudes de la misma naturaleza, como lo expresara anteriormente Clapeyron, entonces, los principios generales de la mecánica pueden aplicarse al calor; este movimiento puede convertirse en trabajo, siendo la pérdida de vis viva, en cada caso particular, proporcional a la cantidad de trabajo producido, relaciones que había matematizado Thomson(1851) para introducir la perspectiva dinámica del Calor. (Guedj, 2006).

Clausius, sin embargo, considera que pese a la cantidad de trabajos experimentales que muestran una medida de esta relación, aún hay objeciones sobre las cuales habría que llamar la atención respecto a este tema. El discute los resultados de Joule, en los cuales la medida de trabajo es equivalente a la medida del calor desarrollado,

we are often in the position of having to sum up quantities, in which heat and work enter as terms to be added together. As, however, heat and work are measured in different ways, we cannot in such a case say simply that the quantity is the sum of the work and the heat, but either that it is the sum of the heat and of the heat-equivalent of the work, or the sum of the work and of the work-equivalent of the heat. (Clausius, 1879, pág. 26).

Es posible reconocer, en las diferentes teorías del calor, que uno de los grandes asuntos en relación con la naturaleza del calor se encuentra en tratar de comprender y explicar cómo es

posible que todo el trabajo se pueda convertir en calor mientras que no todo el calor se puede convertir en trabajo.

By 1850 the efforts of Rumford, Mayer, Joule and Helmholtz had finally succeeded to create an overwhelming feeling that something was wrong with the idea that heat passes from boiler to cooler unchanged in amount: Some of the heat, in the passage, ought to be converted to work. But how to implement that new knowledge? Kelvin despaired: If we abandon [Carnot's] principle we meet with innumerable other difficulties ... and an entire reconstruction of the theory of heat [is needed]. Clausius was less pessimistic: I believe we should not be daunted by these difficulties. ... [and] then, too, I do not think the difficulties are so serious as Thomson [Kelvin] does. (Müller, 2007, pág. 59).

En otras palabras, entre la cantidad de trabajo mecánico y la cantidad de calor que se gasta en su producción no parece haber una completa equivalencia. Si la medida del efecto ha de ser proporcional a su causa, entonces el comportamiento de la máquina térmica está presentando alguna contradicción al respecto. O, es necesario establecer un principio general que permita superar la desigualdad de la conversión de trabajo en calor y de calor en trabajo.

Quizá por esto, Clausius busca aclarar diferentes aspectos sobre la naturaleza del calor que permitan obtener una expresión muy general que represente también aquellas condiciones en las cuales el trabajo desarrollado no se convierta enteramente en calor y se sustenta sobre la afirmación de que es posible mantener la equivalencia entre todo trabajo que se desarrolla en un sistema y todo el calor que interviene para su producción, y viceversa. Señala, además, que Carnot era muy consciente de que la producción del trabajo no se debe únicamente a una alteración en la distribución de calor, sino a un consumo real del mismo; e inversamente, que por el consumo de trabajo se puede producir calor.

5.2.3 El trabajo interno de un sistema³⁵ y el principio de conservación

Del análisis que se viene presentando, podemos resumir algunos aspectos:

- 1) los procesos en los cuales el trabajo y calor son equivalentes son especiales porque ocurren cuando no hay variaciones de temperatura,
- 2) las condiciones en las cuales el calor no produce cambios de temperatura, son los cambios de fase, donde el calor actúa de forma latente, pero hay producción de trabajo,
- 3) es indiscutible que hay una relación entre la cantidad de trabajo desarrollado y el calor suministrado en su desarrollo,
- 4) es necesario analizar por qué no todo el calor se convierte en trabajo,

Clausius propone que es necesario modificar la forma en la que se entienden los conceptos calor sensible y calor latente, para poder argumentar que en todos los procesos se están llevando a cabo las equivalencias entre calor y trabajo, con ello quedaría resuelto el problema de la desigualdad aparente entre estas dos magnitudes y se podría expresar el principio general sustentado en razonamientos matemáticos.

Respecto al calor sensible, es incuestionable para él que resulta del proceso en el cual el calor realiza trabajo sobre la sustancia termométrica generando su dilatación, como en el caso de la dilatación de los gases, los incrementos o decrecimientos de volumen son acciones que desarrollan o requieren trabajo. A este calor sensible o libre le modifica el nombre por trabajo externo pues es evidente a sus ojos que las variaciones de volumen son causadas por la acción de una presión involucrada en los cambios. Ahora bien, en el proceso de expansión o

³⁵ Muriel Guedj, describe aspectos muy interesantes de los trabajos de Thomson, sobre quién no alcanzamos a detenemos en nuestro análisis. Nos parece importante resaltar estas reflexiones porque corresponden al mismo marco histórico, sabemos que Clausius es seguidor de los trabajos de Thomson como él mismo narra, y la influencia de sus resultados teóricos y experimentales es notoria en la perspectiva de Clausius: L'identification des grandeurs qui participent à ce principe et l'examen des relations entretenues entre ces grandeurs apporteront des éléments de réponse. L'analyse des propositions fondamentales qui sous-tendent l'ensemble de la théorie, les démonstrations présentées pour prouver la validité de ces propositions et l'importance accordée aux pertes lors des processus irréversibles permettront également de préciser le sens de ce principe. Notre argumentation repose notamment sur le fait que la transition du concept de travail vers celui d'énergie doit prendre en compte l'effet mécanique qui constitue un concept intermédiaire central dans l'établissement de la théorie de Thomson. Après une analyse permettant de souligner l'importance de l'effet mécanique, le rôle joué par les pertes et celui attribué aux grandeurs internes, c'est l'étape qui conduit Thomson vers le concept d'énergie qui sera détaillée. (Guedj, 2006, pág. 34)

compresión volumétrica han de actuar otras fuerzas al interior del cuerpo, fuerzas que modifican el grado de cohesión de las moléculas porque se reconoce que las densidades del gas varían conforme éste se dilata o se contrae: es así que el calor se manifiesta una parte como trabajo externo, otra como trabajo interno. Por eso él sustituye el nombre de calor latente por el nombre de calor-trabajo.

Señala que,

This work, into which the heat is converted, and which in the opposite class of changes produces heat, may be of two kinds, internal or external. If e. g. a liquid is vaporized, the cohesion of its molecules must be overcome, and, since the vapour occupies a larger space than the liquid, the external pressure must be overcome also. In accordance with these two divisions of the work we also may divide the total workheat, and call the divisions the internal and external workheat respectively. (Clausius, 1879, pág. 22).

Clausius argumenta que el calor puede repartirse entre calor interno y externo, y que al calor latente que actúa en los cambios de fase, le debe corresponder una parte de calor sensible, de igual manera que al calor sensible debe corresponderle también una parte de calor-trabajo, aquella que actúa en los cambios de la densidad de la sustancia que suceden a lo largo de las expansiones o compresiones y que permanecen después del cambio de fase.

For the heating of a body involves as a general rule a change in the arrangement of its molecules, which change produces in general an externally perceptible alteration of volume, but still may take place apart from such alteration. This change of arrangement requires a certain amount of work, which may be partly internal, partly external; and in doing this, work-heat is again consumed. The heat applied to the body thus serves in part only to increase the heat actually existing, the other part serving as work-heat.

On these principles the author attempted to explain (by way of example) the unusually great specific heat of water, which is much beyond that either of ice or of steam *: the assumption being that of the quantity of heat, which each receives from without in' the process of heating, a larger portion is consumed in the case of water in diminishing the cohesion of the particles, and thus serves as work-heat. (Clausius, 1879, pág. 22).

Se debe entonces redefinir los términos:

That quantity of heat which must be imparted to a body in order to heat it simply, without making any change in its density, was formerly known under the general name of *free* heat, or more properly, of heat *actually existing* in the body; a great part of this, however, falls into the same

category as that which was formerly called *latent* heat, and for which the term *work-heat* has been proposed. For the heating of a body involves as a general rule a change in the arrangement of its molecules, which change produces in general an externally perceptible alteration of volume, but still may take place apart from such alteration. This change of arrangement requires a certain amount of work, which may be partly internal, partly external; and in doing this, work-heat is again consumed. The heat applied to the body thus serves in part only to increase the heat actually existing, the other part serving as work-heat. (Clausius, 1879, pág. 22).

Con esta nueva forma de expresarse respecto a los calores, Clausius está estableciendo una coherencia entre el esquema conceptual mecánico y las diferentes manifestaciones del calor que ya han sido medidas y organizadas por sus antecesores; esquema conceptual en el que las moléculas son afectadas por fuerzas que actúan entre ellas desarrollando cantidades de trabajo³⁶. Sus argumentos eliminan las características sustancialistas del calor que habían sido utilizadas por Carnot y Clapeyron.

¿En qué se diferencia al esquema anterior? ¿Es solamente un cambio en el uso palabras?

No es únicamente un cambio de palabras, Clausius regresa a las nociones fundamentales, de fuerza, materia y movimiento, que señalamos en el capítulo precedente. En este caso, renombrar es adecuar las definiciones de calor a estas nociones. Sin embargo, nótese que no se trata de una simple sustitución de calor sensible por trabajo externo, o calor latente por trabajo interno, se explican efectos como el cambio constante en las densidades de las sustancias y el cambio de los calores específicos, a través del modelo de fuerzas moleculares.

De este modo la cantidad total de calor se puede convertir en cantidad total de trabajo. Siendo el calor la manifestación del trabajo interno y externo del sistema. De acuerdo con esto, el cambio de términos implica una modificación en la comprensión de las transformaciones que están teniendo lugar en el sistema.

In former times, when heat was considered to be a substance, and when it was assumed that this substance might exist in two different forms, which were distinguished by the *terms free* and *latent*, a conception was introduced which was often made use of in calculations, and which was

³⁶ Hoy día se usan métodos calorimétricos como la calorimetría diferencial de barrido (Differential Scanning Calorimeter) que mide los intercambios de calor en reacciones químicas y procesos físicos exotérmicos o endotérmicos. El flujo de calor registrado [Entalpía] está expresado como $\frac{dH}{dT} = C_p \frac{dT}{dt} + f(T, t)$ Así el flujo de calor $\frac{dH}{dT}$ queda descrito como una función que depende del tiempo y de la temperatura absoluta $f(T, t)$, siendo C_p la capacidad calorífica de la muestra y $\frac{dT}{dt}$ su tasa de calentamiento.

called the *total heat* of the body. By this was understood that quantity of heat which a body must have taken up in order to pass from a given initial condition into its present condition, and which is now contained in it, partly as free, partly as latent heat. It was supposed that this quantity of heat, if the initial condition of the body was known, could be completely determined from its present condition, without taking into account the way in which that condition had been reached.

Since, however, we have obtained in equation (4a) ³⁷an expression for the quantity of heat received by the body in passing from its initial to its final condition, which expression contains the external work W , we must conclude that this quantity of heat, like the external work, depends not only on: the initial and final conditions, but also on the way in which the body has passed from the one to the other. The conception of the total heat as a quantity depending only on the present condition of the body is therefore, under the new theory, no longer allowable. (Clausius, 1879, págs. 33-34).

Calores sensibles involucran cantidades de calores latentes, y viceversa, y actúan a lo largo de los procesos. Por otra parte, tenemos los calores específicos que son aquellos que indican qué tanta cantidad de calor se requiere para que cierta cantidad de sustancia aumente cierta cantidad de temperatura. En los términos antiguos, estos términos eran vinculados al comportamiento sustancial del calor, y en los términos de Clausius estos calores son trabajos que evidencian el movimiento de las partículas del cuerpo³⁸.

From the foregoing it is seen to be necessary that, in addition to the various specific heats, which shew how much heat must be imparted to one unit-weight of a body in order to warm it through one degree under

³⁷ Se refiere a la ecuación $Q = U_2 - U_1 + W$, que expresa que el cuerpo sufre una serie de cambios que solo dependen de la condición inicial y final, y que esto ocurre en un proceso cíclico. Páginas 32 -33.

³⁸ La mirada molecular de los calores específicos fue puesta en juego en los albores de la mecánica cuántica por Einstein y Nernst resaltando las implicaciones que para la calorimetría podía representar, pero sobre todo para mostrar las nuevas rutas explicativas sobre el comportamiento de las sustancias a muy bajas temperaturas: "For the specific heats of liquids or solids at the absolute zero, our hypothesis requires that every atom shall have a definite value for the atomic heat, independent of the form, crystallized or liquid (i.e. amorphous), and of whether it is in chemical combination with other atoms. Numerous measurements by different experimenters have shown, in full agreement with each other, that the atomic heats in the solid state decrease greatly at low temperatures, but at the present time it is impossible to calculate the limiting value toward which they tend. For want of a better assumption I believe we can set for the present the value of the atomic heats at absolute zero for all elements equal to 1.5. Of course it is somewhat unsatisfactory to calculate with such a doubtful value; but on the one hand we are obliged for the sake of the following calculations to make some assumption, and on the other hand it makes little difference for the following purposes what value the atomic heat has between the limits 0 and 2." En relación con esto Einstein sugiere que en el punto de fusión un cristal altera su estructura de forma tal que se puede expresar una frecuencia vibratoria del cristal en términos de su temperatura de fusión, peso molecular y densidad. Efectos que ocurren en nitrógeno líquido a bajas temperaturas donde los calores específicos tienen el mismo efecto: se puede medir el calor específico en los lugares extremos de temperaturas bajas a través de la frecuencia vibracional del sólido, que introdujo a principios del siglo pasado nuevos problemas de estudio de la termodinámica. (Klein, 1965)

different circumstances e.g. the specific heat of a solid or liquid body under ordinary

atmospheric pressure, and the specific heat of a gas at constant volume or at constant pressure), we must also take into consideration another quantity which shews by how much the heat actually existing in one unit-weight of a substance (i.e. the vis viva of the motion of its ultimate particles) is increased when the substance is heated through one degree of temperature.

This quantity we will name the body's true heat-capacity.

It would be advantageous to confine this term 'heat-capacity, (even if the word 'true' be not prefixed) strictly to the heat actually existing in the body; whereas for the total heat which must be imparted for the purpose of heating it under any given circumstances, and of which work-heat forms a part, the expression 'specific heat' might be always employed.

As however the term 'heat-capacity' has hitherto been usually taken to have the same signification as 'specific heat' it is still necessary, in order to affix to it the above simplified meaning, to add the epithet 'true.

En este uso de palabras, se expresa el calor en términos completamente mecánicos, entonces, el Calor total = Calor latente + Calor sensible, pero no en el sentido de los términos antiguos, en el sentido de Trabajo Total = Trabajo interno + Trabajo externo.

Si la cantidad total de Calor es proporcional a la cantidad total de trabajo, siendo la cantidad de trabajo interno aquella que corresponde a los cambios en la densidad y que está dada por los calores específicos de la sustancia, es posible expresar

$$dQ = dU + pdv \text{ (IV).}$$

This last equation, which forms the mathematical expression

most in use for the first main principle of the Mechanical Theory of Heat.
(Clausius, 1879, pág. 22)

Esta primera ley representa para Clausius, que el calor queda repartido en todos los momentos del proceso y en todos los elementos del sistema, siendo dU la cantidad de calor que muestra cambios de temperatura y cambios de densidad (encierra parte del calor sensible pues hay cambios de temperatura y el calor latente en los cambios de densidad del medio al estar multiplicadas por el calor específico), que no es la misma idea sobre la que se han basado Carnot y Clapeyron.

Notation and mode of reasoning of Clausius is nearly identical to that of Clapeyron with the one difference, – an essential difference indeed – that the total heat exchange of an infinitesimal Carnot cycle is not zero; rather it is equal to the work. Thus the heat Q is not a state function anymore, i.e. a function of t and V (say). To be sure, there is a state function, but it is not Q . Clausius denotes it by U , cf. Insert 3.3, and he calls U the sum of the free heat and of the heat consumed in doing internal work, meaning the sum of the kinetic energies of all molecules and of the potential energy of the intermolecular forces. ³⁰ Nowadays we say that U is the internal energy in order to distinguish it from the kinetic energy of the flow of a fluid and from the potential energy of the fluid in a gravitational field. (Müller, 2007, pág. 61).

Aunque la representación pueda llegar casi a resultados idénticos a los ya obtenidos por Clapeyron, los supuestos conceptuales sobre los que se sostienen han sido modificados y transformados. También muchas expresiones emergentes, si en el siglo anterior cambio de estado significaba dejar de ser en una forma específica y transformarse en otra distinta, (hielo y agua son estados distintos), ahora cambio de estado significa cambios sucesivos en la forma de estar, y no son exclusivamente cambios de fase, por esto es necesario identificar las condiciones inicial y final, y el proceso a través del cual se realizan todas las transformaciones.

Las ideas de condiciones inicial y final del sistema, estado, proceso y transformación serán estructurantes en esta forma de referirse a los fenómenos térmicos. Ya que, en el caso particular del trabajo mecánico, éste depende de las condiciones inicial y final del sistema. Sin embargo, en el caso del trabajo producido por la acción de los gases, éste también dependerá del tipo de proceso mediante el cual se desarrolle la transformación: el trabajo obtenido por expansión a volumen constante, es diferente al obtenido a presión constante, y es diferente al obtenido por el proceso adiabático en una condición de calor constante.

Ahora bien, estas adecuaciones se establecen en vínculo con los resultados de diversos trabajos experimentales que Clausius conoce, y resume en su trabajo, no son resultado de elucubraciones aleatorias. La extensión de este trabajo no alcanza a cubrir todos los rasgos de su obra. Ahora bien, podemos ejemplificarlo a través de sus palabras:

we can compare those obtained by Joule from direct observation. From the heat produced by magneto-electricity he found

$$1 \text{ \AA}^{39} = 460.$$

³⁹ Siendo $1/\text{A}$ el equivalente de trabajo por unidad de calor.

From the quantity of heat absorbed by atmospheric air during its expansion, $1/A = 438$;

and as mean of a great number of experiments in which the heat developed by the friction of water, of mercury, and of cast iron was observed,

$$1/A = 425$$

The coincidence of these three numbers with each other, notwithstanding the difficulty of the experiments, dispels all doubt as to the correctness of the principle which asserts the equivalence of heat and work; and the agreement of the same with the number 421 corroborates in like manner the truth of Carnot's principle in the form which it assumes when combined with our original maxim. (Clausius, 1856, pág. 116).

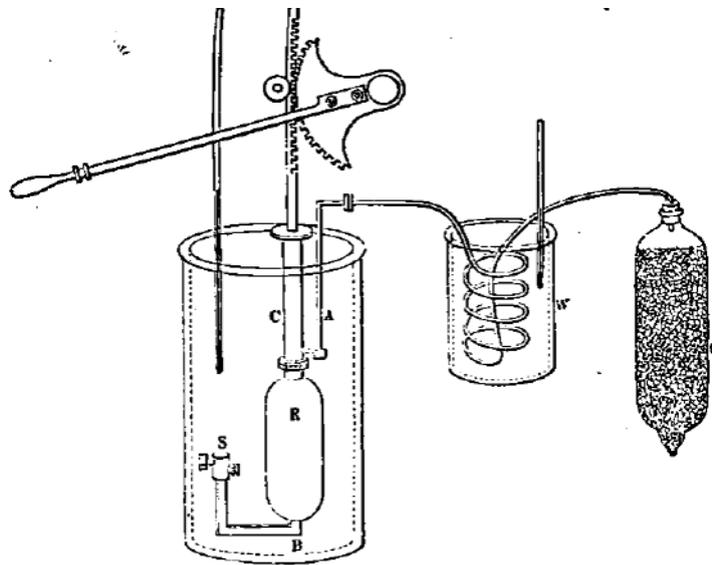


Imagen 13. Aparato referenciado por Clausius con el cual Joule obtiene el equivalente mecánico del calor actuando sobre gases. (Clausius, 1856. pág. 67).

Desde luego, posterior a estos resultados aparece el asunto de la clasificación de los procesos en reversibles e irreversibles, las condiciones térmicas para procesos abiertos. Que derivan en la introducción de la entropía de un sistema. Este es un aspecto que quedará abierto a posteriores estudios, y que sin duda es un camino para seguir comprendiendo el proceso de teorización en este campo.

6 Reflexiones para orientar la enseñanza: La termodinámica, un campo de estudio polémico y polisémico

☞ En este capítulo exponemos conclusiones derivadas de los estudios histórico - críticos de los capítulos cuatro y cinco que plantean ciertos problemas conceptuales con los que se enfrenta actualmente el campo de la termodinámica, señalamos en el capítulo que lejos de ser una disciplina con una orientación única se convierte en un reto para la enseñanza.

6.1 El siglo XVIII, una mirada sustancialista de los fenómenos térmicos

La primera etapa de formalización de los fenómenos térmicos, durante el siglo XVIII, deja una idea general muy significativa: la idea de equilibrio del calor que se basa en la transferencia de calor de cuerpos de mayor temperatura a menor temperatura.

El desarrollo de las teorías, en este siglo, muestra un proceso de organización en el cual la medición del calor va a depender del comportamiento de las sustancias. Los científicos se guiaron por la idea de fluidez y la transferencia de esa sustancia llamada calórico que lleva a afirmar que el calor se equilibra en la transferencia de un cuerpo a otro. A través de esta idea, se propone el método de las mezclas con el cual se obtiene la ecuación de equilibrio, y su objetivo es medir el calor: la causa de todos los procesos térmicos.

Inicialmente el calor se medía en relación con las dilataciones del termómetro por lo que se considera que la temperatura son los grados de calor. Sin embargo, gran cantidad de masa requiere más cantidad de calor pero eleva menos su temperatura. Y en los cambios de fase la temperatura permanece constante. Eso muestra que el calor y la temperatura no son la misma magnitud, y que no es fácil establecer esa diferencia. Por otra parte, las sustancias no se calientan de la misma forma, es por eso que se nombran las diferentes manifestaciones del calor con diferentes palabras: calor sensible, calor específico, calor latente,

En este periodo histórico varios científicos hacen esfuerzos para determinar los calores específicos de las sustancias, para identificar las reacciones de los cuerpos al calor, diseñan

instrumentos y estrategias de medida. La obtención de mediciones les implicó cualificar sustancias, identificar reacciones, estabilizar métodos, todos organizados bajo una mirada sustancial del calor.

Por lo cual, es posible identificar que en este periodo los procesos de formalización están sustentados a través de acercamiento siempre vinculado con lo que ocurre sobre los objetos, llamémosle una perspectiva objetual. En esta perspectiva, el enfoque está puesto en la forma de estar de las sustancias, no en los procesos mediante los que cambian, el calor específico y el calor latente, por ejemplo, son considerados propiedades de las sustancias; al enfocarse en las formas de estar de las sustancias podemos llamarla también una perspectiva estática, un ejemplo de esta mirada, es el nombre cambio de estado, hoy día nombrado cambio de fase, cambiar de estado significa dejar de ser en una forma específica de sustancia y transformarse en otra, hielo y agua son estados distintos y también objetos distintos, como los son el agua y vapor.

Las obras de Black, Lavoasier y Laplace, nos muestran la gran riqueza de razonamiento científico que se generó desde tal perspectiva sustancial o estática: las características de las sustancias, su reacción al calor, sus transformaciones, etc. son la base fenomenológica para el diseño teórico que ellos proponen, tiene su origen en lo concreto, en la coordinación de acciones sobre los objetos, como expresara Piaget, y desarrolla una lógica organizada desde lo sensible.

En contraste el siglo XIX aporta otra visión.

6.2 El siglo XIX, una mirada mecánica y dinámica

Del capítulo cinco, concluimos que el modelo molecular fue para Clausius una guía que lo condujo a redefinir las cantidades ya existentes en el esquema teórico que corresponde al siglo XVIII. Los fenómenos térmicos en el siglo XIX se fueron organizando a la luz de acciones sobre los gases y vapores, se hacen síntesis formales que están referidas al aprovechamiento de sus expansiones y compresiones que llevan a poner como problema la medida de la relación calor – efecto mecánico.

Los términos calor sensible, calor latente y calor específico adquieren un nuevo significado para poder ser incorporados como conceptos coherentes con la mecánica. Sin embargo, estos nombres no se pueden abolir totalmente por todo lo que representan los esquemas

conceptuales: 1) sus medidas son válidas, también los métodos y ecuaciones, 2) la lógica de los principios que los sintetiza está estructurada pues el equilibrio térmico, y equilibrio calórico, con todo y su mirada sustancialista, son principios que pueden ser matematizados. De ahí que el ciclo de Carnot sea tan representativo para Clapeyron y Clausius. Los dos comprenden el calor de forma diferente, el primero es sustancialista, el segundo es mecanicista, pero obtienen resultados formales matemáticamente parecidos.

Vemos en el siglo XIX procesos de formalización en los cuales hay transformaciones conceptuales paulatinas que implicaron la revisión y estudio concienzudo conducentes a nuevos esquemas de representación, hay profundos procesos de reconceptualización, de trabajo experimental, de organización de magnitudes, que junto con las organizaciones matemáticas, intervienen en un cambio epistemológico.

En ese contexto, parece que se abandona una perspectiva sustancialista y se incorpora una perspectiva dinámica de lo térmico, una mirada dinámica que se puede entender desde dos perspectivas:

1. Por una parte, la relación calor – movimiento estudiada mediante la idea de fuerzas que operan y producen trabajo y asociadas a un trabajo interno del sistema, implica hablar del calor como equivalente del trabajo mecánico, lo que posteriormente conduce a renombrar los dos términos a través de un solo concepto [energía], derivado del mismo principio que es aquel de la conservación de la energía.

En el proceso, magnitudes como calor sensible, calor latente y calor específico, cuyas formas de medida y valores numéricos ya están muy bien establecidos, toman nuevos significados: trabajo interno y trabajo externo del sistema, con el fin de que el modelo molecular pueda mantener su coherencia explicativa.

La energía entonces será el término común para hablar de la equivalencia de las acciones transformables entre sí. La energía es la medida de la transformación o de la convertibilidad de causa y efectos entre fenómenos. Expresiones como vis viva, desaparecen a la luz de la medida de la convertibilidad del movimiento en electricidad, calor, compresiones, deformaciones, estiramientos, etc. todos ellos se van a definir en los términos de energía potencial o cinética, calor también es energía, trabajo es energía, electricidad es energía.

2. Por otra parte, esta mirada dinámica involucra actuar sobre gases o vapores dentro de un conjunto de operaciones que implican el análisis del funcionamiento de la maquinaria donde se llevan a cabo las operaciones. Por esto las descripciones ya no hacen énfasis en los cuerpos o las sustancias, sino en el sistema. Las operaciones, se realizan mediante un tipo de proceso particular, isovolumétrico, isobárico, isotérmico, adiabático, y este vocabulario emerge por la necesidad de nombrar y saber cómo se realizan las acciones sobre el gas, se vuelve relevante no un cambio de estado global, como la transformación de agua en vapor, es necesario indicar los estados sucesivos de una transformación y reconocer las condiciones inicial y final, y los procesos mediante los cuales estas transformaciones ocurren.

La mirada dinámica implica introducir una forma distinta de razonar sobre los fenómenos físicos y de integrarlos a modelos de pensamiento, formas de representación y actos de habla, que estructuran el mundo que se observa desde el reconocimiento de un todo orgánico y transformable y la interrelación de sus partes.

In un sistema che funziona in un suo ambiente è possibile riconoscere parti, responsabili di attività particolari, necessariamente collegate tra loro da relazioni di vario genere. Anche a queste strutture di relazione, individuate e riconosciute, si possono dare dei nomi: giungendo a vederle, a operarvi, a considerarle cognitivamente come aspetti a loro volta necessari alla unità e al funzionamento del sistema. In altre parole, come si possono mettere confini, o separazioni, tra diversi sistemi e sottosistemi o parti di sistemi, ciascuno con il suo nome e il suo funzionamento, si possono anche mettere relazioni a connettere sistemi diversi o funzionamenti o parti di sistemi. Questa strategia di organizzazione permette di individuare via via strutture (sovrasisemi) abbastanza complesse, con precise fisionomie di insieme e di interpretare così fenomeni su scale sempre più vaste. (Arcà & Guidoni, 2008).

Al respecto, las formas de comprensión que surgen como nuevos patrones, van mostrando nuevas características fenoménicas, van ampliando y enriqueciendo los procesos de teorización, las articulaciones conceptuales donde lo que prevalece son grandes campos conceptuales.

6.3 Dos formas de pensar ¿en disputa?

La perspectiva o mirada dinámica o termodinámica contrasta con las ideas sustancialistas, pues si el calor es trabajo, no puede ser una sustancia. Los términos transmitir y fluir corresponden a sustancias y acciones. El término trabajo se asocia a fuerzas que son acciones, bajo la relación calor - trabajo el significado de calor se convierte en acción y las acciones también se transfieren.

El término energía como señalamos ya, ingresó para dar unidad a la relación calor- trabajo, vis viva y efecto mecánico que eran todas magnitudes asociadas a las acciones o causas de las transformaciones. Los términos quedaron entonces subsumidos en ideas de transferencia, de almacenamiento, de fluidez que se referían a la acción pero que se suelen confundir con el comportamiento de los fluidos.

Con este razonamiento queremos resaltar que no siempre que las persona usan la expresión fluidez y transferencia se están refiriendo a la transferencia de sustancias, aunque las sustancias transfieren calor. Destacar este aspecto es importante porque, al empezar el estudio de los fenómenos térmicos, muchos estudiantes se refieren al calor, a los cambios de estado, e incluso a la energía (Kipnis, 2014), en este mismo sentido que se puede reconocer en el trabajo de Lavoisier y Laplace o de Black, es decir en el sentido de un “algo” que se transfiere y que como hemos dicho no necesariamente se usa el sentido de transferencia de sustancia. Algunos textos escolares y de nivel universitario también muestran rasgos de esta misma perspectiva sustancialista u objetual, cuando definen los calores latentes y específicos como propiedades de las sustancias.

En didáctica de la física, se ha llamado a este tipo de razonamientos sustancialistas, razonamientos espontáneos de los estudiantes porque son razonamientos asociados al sentido común, a la experiencia directa; estos razonamientos son vistos como obstáculos epistemológicos que deben ser superados (Viennot, 2001). Decir que el calor se transfiere ha sido considerado un obstáculo epistemológico, pues se argumenta que el calor es energía, y la energía no transfiere sustancia. Los obstáculos epistemológicos son reflexiones que impiden el desarrollo del pensamiento científico porque tienen su apoyo en lo concreto, en lo fenomenológico, y no en lo abstracto, matemático (Bachelard, 2004).

No estamos de acuerdo en pensar que las ideas del razonamiento común son de menor riqueza conceptual, o que el conocimiento común pueda representar un obstáculo epistemológico. Nosotros consideramos que lo más valioso en la construcción de conocimiento son los procesos descriptivos alrededor de los fenómenos, pues los procesos son los que organizan la experiencia y la moldean. Tal es que la idea de fluidez no obstaculizó los desarrollos formales de la teoría del calor.

6.4 La mirada sustancialista también es conveniente en el estudio de los fenómenos térmicos

Hay muchos ejemplos del uso de la mirada sustancial del calor, por ejemplo:

The Karlsruhe Physics Cours (Herrmann, 2004) desarrolla su propuesta para la enseñanza de la física estableciendo una analogía con esta característica sustancial que puede ser usada como modelo para entender la energía, la idea de portadores de la energía da cuenta de ello.

La misma idea sustancialista se encuentra en la teoría que subyace al estudio de los fenómenos de transporte y que tiene gran eco en la física aplicada y en la formación ingenieril que se estudian actualmente.

Algunos autores, (Lienhard IV & Lienhard V, 2015) reconocen que habitualmente las personas tenemos una comprensión de lo térmico cuyo origen parte de la experiencia, que nos lleva a pensar en el flujo de calor como algo que se transfiere entre los cuerpos y hace que unos cuerpos se calienten y otros se enfríen cuando entran en contacto. Consideran que esta idea es un fuerte punto de vista en la comprensión de los procesos térmicos: rara vez será un error imaginar el calórico fluyendo de los cuerpos calientes a los cuerpos fríos.

People have always understood that something flows from hot objects to cold ones. We call that flow heat. In the eighteenth and early nineteenth centuries, scientists imagined that all bodies contained an invisible fluid which they called caloric. Caloric was assigned a variety of properties, some of which proved to be inconsistent with nature (e.g., it had weight and could not be created nor destroyed). But its most important feature was that it flowed from hot bodies into cold ones. It was a very useful way to think about heat. Later we shall explain the flow of heat in terms more satisfactory to the modern ear; however, it will seldom be wrong to imagine caloric flowing from a hot body to a cold one. (Lienhard IV & Lienhard V, 2015, pág. 3).

Çengel (2007), por ejemplo, indica que hay diferentes problemas térmicos que no se pueden resolver a través de las leyes de la termodinámica (Çengel, 2007). Uno de ellos es el flujo de calor, porque, dice él, la termodinámica estudia sistemas en equilibrio, mientras que los problemas de transferencia y transporte de calor son sistemas que ocurren donde no hay equilibrio. Requieren ser pensados desde una mirada sustancialista, problemas que aborda, Fusch (2010).

6.5 Otras miradas de la termodinámica

En el estado actual de la termodinámica, algunos investigadores en el campo reconocen que,

It is known that the second law of thermodynamics is not a unique statement defined by precise rules. On the contrary, there are various versions of the second law and, likewise, also various degrees of generality at which these are exploited. All these laws express some notion of irreversibility and the implications drawn from them necessarily differ from each other. Mathematicians interested in continuum thermodynamics are generally not aware of the differences in the various postulations of the second law of thermodynamics. Virtually the same is true for many continuum mechanics; in particular, it is surprising how uncritical and indiscriminating many continuum mechanics handle the second law. It appears that they have superficially learned how Coleman and Noll apply the Clausius-Duhem inequality and use it as a machine to generate inferences with little contemplation on whether the deduced results, let alone the form of the postulates used to reach them, make physical sense. (Kolumban & Yongqi, 2004, pág. 58).

Lo que muestra que ni las teorías científicas ni los dominios fenomenológicos en los que las teorías surgen son campos perfectamente estructurados, acabados y aproblemáticos. Por el contrario, la diversidad de perspectivas y problemas de estudio indica que las disciplinas son orgánicas y cambiantes, y el campo de la termodinámica no es una excepción:

To some extent, modern continuum thermodynamics amounts to a collection of 'thermodynamic theories' sharing common premises and a common methodology. There are theories of elastic materials, of viscous materials, of materials with memory, of mixtures, and so on. It is generally the case that, in the context of each theory, one considers all processes (compatible with classical conservation laws) that bodies composed of the prescribed material might admit. Moreover, there exist for the theory some universal physical principles that have been abstracted from experience. One can therefore reduce the generality of the constitutive relations of dependent material variables by relying upon these principles. The most important of these principles is the second law of thermodynamics. (Kolumban & Yongqi, 2004, pág. 57).

Andreas Greven (2004), entre otros, proponen líneas de trabajo para abordar la irreversibilidad de procesos distanciados de una perspectiva molecular. *Phenomenological Thermodynamics of Irreversible Processes* (2018).

(Lienhard IV & Lienhard V, 2015) presentan una serie de problemas térmicos para ejemplificar que en tales casos los principios de la termodinámica no son suficientes en su resolución y que se requiere hacer uso de otras leyes: como la ley de enfriamiento de Newton, la ley de Fourier, la ley de Stefan-Boltzmann, que no se contemplan como leyes de la termodinámica pero que hacen parte del estudio de los fenómenos térmicos.

Nosotros consideramos que es necesario que los docentes reconozcamos tal diversidad de problemas, que no hay una sola teoría, que hay múltiples razonamientos, que hay diferentes criterios para la solución de problemas, y además, muchos desacuerdos. Defendemos entonces que es importante identificarlos y no considerarlos obstáculos. Sin embargo, esta diversidad de perspectivas en el campo científico, nos conducen a tener que plantear una pregunta fundamental: ¿Qué enseñar?

6.6 Los problemas del estudio de los fenómenos térmicos en su enseñanza

Uno de los problemas en enseñanza de la física suele ser que los profesores consideramos que las teorías ya estructuradas en los campos de estudio de nuestra disciplina son inmodificables porque los problemas principales se han solucionado y las preguntas nacientes corresponden a nuevas áreas de la ciencia.

Algunas investigaciones en el campo de la enseñanza de la termodinámica muestran una fuerte preferencia porque los estudiantes adopten una mirada exclusivamente molecular y usen términos como energía para hacer explicaciones, señalan la necesidad de un cambio conceptual alrededor de los conceptos de calor y temperatura que, según los investigadores, debe desarrollarse para eliminar la confusión que sobre estos conceptos tienen los estudiantes, esta confusión es evidenciada por medio de test donde el estudiante debe responder qué es calor y qué es temperatura; en este mismo camino, la evaluación de ideas previas de los estudiantes, señalan que los estudiantes tienen graves dificultades en usar las expresiones consideradas importantes de acuerdo a algún modelo teórico específico que los profesores consideran que es la mejor explicación teórica, en otras palabras, las investigaciones reflejan un sesgo interesado en que los estudiantes ajusten su vocabulario a

las palabras que “si hacen parte” del vocabulario científico suponiendo que un vocabulario adecuado ofrece una mejor comprensión de los fenómenos [véanse por ejemplo, los trabajos de (Cárdenas & Ragout de Lozano, 1997)(Lewis, 2005)(Dumrauf & Cordero, 2005)(Kesidou & Duit, 2007) (Mahmud & Gutierrez, 2010), (Méndez Coca, 2012) (Barniol & Zavala, 2017) (Brookes & Etkina, 2021)].

Se puede apreciar en estas investigaciones en enseñanza que sobre los contenidos de la disciplina no se interviene, ni se analiza, ni se discute, son investigaciones en las cuales los conceptos están establecidos, ya están dados con anterioridad por la ciencia, así que las acciones de investigación para la enseñanza están referidas preferentemente hacia el mejoramiento de la instrucción.

Lejos de despreciar estas investigaciones, éstas nos revelan la importancia de mostrar a los profesores en formación que los campos teóricos siguen siendo lugares abiertos para el estudio y que las estructuras canónicas no representan una estructura definitiva y acabada. En ese sentido, parte de los retos de la enseñanza de la física a profesores en formación debe contemplar cómo introducir a los docentes en identificar estos lugares problemáticos o no resueltos de un campo de estudio.

Por otra parte, en enseñanza de la termodinámica, se presentan además otros problemas. Al respecto Ugo Besson (2014), cita:

Chiou and Anderson (2010) characterise four patterns of students' interpretative frameworks of heat: first, heat is treated as an intrinsic property of a substance (Wood is hot, ice is cold); second, hotness and coldness are related as material substances which can move from one object to another; third, heat is treated as a nonmaterial entity, caloric flow, which propagates from objects at higher temperatures to objects at lower temperatures; and fourth, a scientifically acceptable view, in which heat refers to a transfer of energy due to a temperature difference. According to the authors, "The sequence of these four frameworks also represents the developmental stages of peoples' conceptions of heat, developing from a naive view toward a more scientific one". (Besson, 2014).

En acuerdo con esta observación, señalamos que uno de los lugares de análisis central en el estudio de los fenómenos térmicos, debe poder ayudar a profundizar en los significados y referentes frente a las leyes canónicas estructuradas.

Vicentini (2009), señala, que “las correlaciones entre estos procesos cognitivos y los contenidos disciplinares constituyen la dimensión principal del proceso de aprendizaje que un docente debe tomar en cuenta en su práctica al enseñar Física”. (Vicentini, 2009, pág. 10).

De estos episodios históricos presentados en los capítulos cuatro y cinco, nosotros resaltamos, que algunos derroteros importantes en cuanto a la enseñanza de la termodinámica clásica, a nivel introductorio, son:

- Los problemas de medida y equilibrio térmico
- La caracterización de las sustancias
- La diferenciación de acciones térmicas
- La importancia de introducir a los docentes en los problemas de expansión y compresión de los gases, en relación con sus propiedades térmicas.
- Identificar la relación calor – trabajo como una relación problemática.
- Significar y utilizar ciertas representaciones geométricas, como los diagramas de fase, que han resultado de tanto valor para hacer cálculos. En nuestro caso, el énfasis se pone en el significar.
- Y, posibilitar que se comprenda que los cambios de calor no están asociados únicamente a los cambios de temperatura, como las variaciones de temperatura no siempre producen calor (procesos adiabáticos).

Estos aspectos, nos parecen elementos fundamentales dentro del estudio de lo térmico. Y reconocemos que es el análisis histórico aquello que nos ha dado la posibilidad de destacar estos puntos importantes, una amplia gama de asuntos para abordar desde la enseñanza de la física.

Besson (2014), también resalta ese valor que aportan los marcos históricos, y uno de ellos como él señala es aquel que nos ofrecen los fenómenos térmicos y la termodinámica.

Moreover, many problems, models and explanatory frameworks used in the early historical development of a scientific topic are more in resonance with the preference of students and of common reasoning, which is often centred on dynamical, causal, qualitative and analogical reasoning. There is sympathy between the beginner and the pioneer.

In this way, the topic of thermal phenomena and thermodynamics is fertile because it relates to various epistemological and philosophical

themes. Its history is strongly linked to the themes of relationships between science, technology and socio-economic problems; residues of ancient abandoned theories are still present in current scientific language and in textbooks; and many students' conceptions are similar to ideas and reasoning of ancient theories. (Besson, 2014).

Como ya se ha dicho, resaltamos la importancia de reconocer estos marcos interpretativos que pueden convertirse en un foco de análisis para hacer posible una organización coherente en el aula de clase y para diferenciar comprensiones de los fenómenos, tal como también ocurre en los procesos científicos. El reconocimiento de estas transformaciones epistemológicas, también son insumos en el campo de la comprensión y enseñanza de la termodinámica en el contexto de la formación de profesores.

Así pues, el siguiente capítulo muestra cómo hemos articulado los estudios históricos a la propuesta de enseñanza, cómo se han establecido criterios tanto pedagógicos como didácticos en los cuales los aspectos históricos y filosóficos han jugado un papel estructurante.

Etapa 2. Diseño de la secuencia didáctica: Criterios pedagógicos y didácticos

7 Estudios para el diseño de la secuencia e intervención didáctica:

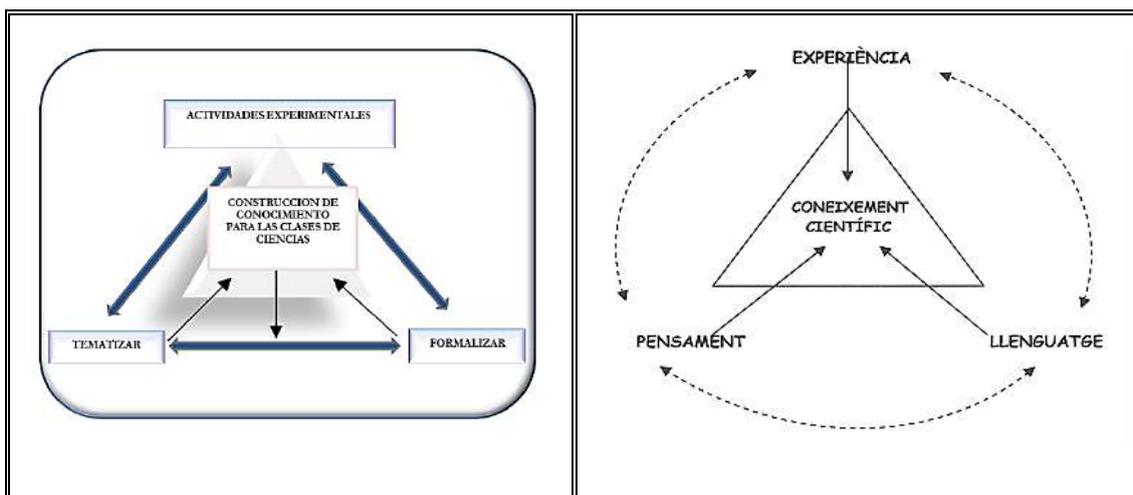
∞ En este apartado presentamos los criterios pedagógicos y didácticos que orientan el diseño de la secuencia de enseñanza y aprendizaje que involucra la selección de fragmentos de los episodios históricos de las teorías del calor, situaciones de análisis, actividades experimentales en la organización del trabajo en el aula. Señalamos cuáles fueron los objetivos desarrollados en las clases y qué tipo de actividades realizaron los docentes.

7.1 Criterios pedagógicos y didácticos para la formación de docentes considerados en esta propuesta de aula.

∞ En esta sección se plantean tres elementos o aspectos fundamentales que determinaron los criterios pedagógicos y didácticos para la enseñanza de las ciencias que consideramos son valiosos en el contexto de la formación de docentes de física.

En relación con el acercamiento fenomenológico, reorganizamos el esquema de la relación experiencia – lenguaje – pensamiento, propuesta por Paolo Guidoni, que representa elementos básicos en la construcción del conocimiento científico y científico escolar. Y convertimos el esquema en: tematizar, experimentar y formalizar⁴⁰, extrapolando estos elementos a criterios orientadores de acciones pedagógicas y didácticas.

⁴⁰ Estos aspectos se han tocado en los artículos El efecto Volta, (Garzón, Tarazona et al. 2020) y, Estabilización de un dominio fenomenológico, Tarazona, Garzón et al, 2023, este último próximo a publicar en el marco de las memorias XII Encuentro de Filosofía e Historia de las Ciencias del cono sur. Realizado en Santiago de Cali, Colombia 2022.



Cuadro 8. Esquema Tematizar - Experimentar – Formalizar (Izquierda), inspirado en el esquema de Paolo Guidoni (Derecha).

Los hemos llamado criterios pedagógicos porque bien podrían ser considerados elementos para enseñar y aprender desarrollables en otros campos fenomenológicos, en otras disciplinas de las ciencias naturales o bien en otras ramas del conocimiento en general, es decir, pueden servir de guía dentro de procesos educativos.

7.1.1 Tematizar: Primer criterio pedagógico para la formación de docentes

Introducir a los docentes en problemáticas propias de una profundización disciplinar en ciencias, o como otros llaman, en el conocimiento del contenido en ciencias, requiere hacer cuestionamientos sobre cómo se ha construido una disciplina, identificar qué asuntos estaban resolviendo los científicos cuando desarrollaron ciertos campos de estudio, cuáles eran sus preguntas importantes, cómo las abordaban y cómo las resolvían. A este conjunto de cuestionamientos le hemos denominado: Tematizar (Garzón, et al., 2020).

Al respecto Matthews (1990), indicaba ya:

Defensar la incorporació de la HPS a l'ensenyament de les ciències i a la formació dels professors s'argumenta en part per l'acostament de `contextualitzar` l'educació científica. És a dir, una educació científica que ensenya ciències ensenyant-la en el seus contextos social, històric, filosòfic, ètic, i tecnològic. En part és un re-treballar el vell argument que l'educació científica hauria de ser una educació *sobre* ciències així com *en* ciències. (Matthews, 1990).

Consideramos que estos aspectos y los problemas disciplinares de la ciencia inciden considerablemente en la formación de profesores, porque al tematizar se configura el campo

de estudio desde los dominios que las personas van adquiriendo a través de sus indagaciones y reflexiones.

En la formación de profesores de ciencias, al tematizar se identifican los problemas que se estudian en el contenido de las ciencias, y se ofrece a profesoras y profesores la opción de estructurar sus propuestas de enseñanza en función de la forma en que ellas y ellos comprenden los fenómenos, propuestas que pueden resultar una alternativa a la estructura curricular ligada a programas estándar o a los libros de texto. Tematizar implica que el maestro adquiera un conocimiento profundo del contenido sobre el cual va a enseñar y de las relaciones de ese contenido con la actividad del posible niño a quien se va a enseñar, como afirmaba (Vergnaud G. , 1991, pág. 9). Por otra parte, Mäntylä señala que es necesario que los profesores organicen el conocimiento porque esta organización es parte de adquirir experticia y proficiencia en su propia disciplina:

Expert knowledge, without doubt, is a desired outcome of the organized, well-structured and usable body of knowledge. However, to reach this outcome, an analysis and understanding of expert knowledge is just a starting point. In addition, understanding the processes in learning and teaching is needed to design effective and productive didactical solutions to develop expert knowledge. (Mäntylä, 2011, pág. 14).

En este camino, el conocimiento disciplinar en física, o en ciencias, se articula con la posibilidad de realizar acciones pedagógicas a través de la reflexión sobre los contenidos. En otras palabras, una parte del conocimiento pedagógico sobre una disciplina se conforma conjuntamente con el conocimiento del contenido disciplinar porque es el contenido disciplinar el que orienta la toma de decisiones para las intervenciones en el aula, considerando lo pedagógico como el conjunto de concepciones directrices de aquellas selecciones que el docente realiza para enfocar su praxis desde una mirada amplia de la educación en la cual pone en juego su mirada trascendente del ejercicio docente, indagando aspectos sobre el para qué enseñar qué clase de contenido.

De ahí que tematizar o problematizar sobre los aspectos de una disciplina o campo de estudio se convierte en un aspecto focal para la formación de los docentes. En nuestro caso, consideramos que, para la construcción de conocimiento durante los procesos de enseñanza de esta investigación, era necesario generar situaciones de indagación que se volvieran significativas para las personas participantes.

7.1.1.1 La tematización en relación con los fenómenos térmicos

Este punto (generar situaciones de indagación que se volvieran significativas para las personas participantes) fue quizá uno de los aspectos más difíciles del trabajo, dada la multiplicidad de fenómenos térmicos que se podrían abordar en el aula en un contexto que tiene una base curricular estandarizada que consisten en: enunciar y definir las tres leyes de la termodinámica y a partir de las leyes deducir las explicaciones a ciertos fenómenos.

Se necesitaba decidir ¿qué tematizar en relación con los fenómenos térmicos? ¿qué privilegiar para ser abordado mediante modalidad remota, en un aula cuyos docentes participantes tenían un recorrido e historia académica que les hace entender la ciencia a través de una estructura deductiva y canónica?

Dada su gran experiencia en la enseñanza de la termodinámica, Vicentini (2000), en *Il contesto dei contenuti: Il caso della Termodinamica*, enfatiza que uno de los problemas en termodinámica y su enseñanza es el significado lingüístico de conceptos centrales, la variedad de expresiones que se usan sobre el calor, las palabras como entropía, entalpía que no tienen un referente especial pueden causar dificultad de comprensión (Vicentini & Mayer, 2000, pág. 72) a su vez, Vicentini (1999), identifica:

Concerning the temperature of material objects (question 1) the zero law of thermodynamics, while known by the majority of teachers (but not all!) is unknown by the majority of students. This fact suggests that students make reference to the real-life phenomenology where the law is seldom applied. Objects are, largely, subdivided into “cold” and “neutral” as they are felt when touched.

Friction, heat, work and molecules were mentioned as reasons for the increase. In many cases, the logic of the explanation involved the sequence: work produces heat which leads to the temperature increase

The intuitive schemes then, seem to be a reasonable starting point for understanding the thermodynamics process once it may act as cognitive obstacles for accepting a thermostatic framework. In the following years I was able to systematically confirm the results shown above in my teaching activity (a course on thermodynamics for four-year university physics students, in service courses for teachers). I have often used at the beginning of the didactical activities, the building of conceptual maps as a diagnostic test. The results practically obtained in all maps were: a) Thermodynamics was restricted to systems described by the variables P, V, T; b) The phenomenology of processes, besides heat transfer, was ignored; c) The concept of “equilibrium” was missing; d) Entropy was

related to an undefined “disorder”. (Vicentini M. , Thermodynamics, not just thermal physics, 1999).

De estas problemáticas y en correlación con el estudio histórico que realizamos: la ley de equilibrio térmico y la conservación de la energía serían los principios a los cuales pensábamos que podíamos aportar en significación, que los docentes pudieran identificar sus formas de hablar sobre lo térmico, y poner en juego sus aprendizajes ya adquiridos, donde estas temáticas fueran presentadas dentro de un panorama de discusión y análisis.

Por lo cual, la intencionalidad básica en esta primera parte del trabajo en el aula consistió en proponer a los docentes el análisis de situaciones térmicas cuyo eje de indagación fueron los efectos que produce el calor que propiciaran su abordaje del campo fenomenológico, en lugar de proponer estos principios desde sus enunciados formales como ocurre habitualmente en los contenidos curriculares canónicos.

El análisis de situaciones consistió en destacar diversos efectos que causa el calor y que permiten observar cualidades térmicas, identificar formas de medida de esas cualidades, y establecer relaciones entre ellas, se pondrían en juego los conceptos calorimétricos: calor sensible, latente, específico; y posteriormente calor, trabajo. De este modo, las situaciones de análisis llevarían a tematizar de manera específica. Efectos y cualidades proporcionaron la base para plantear problemáticas de estudio en la clase.

7.1.1.2 El compendio de los textos en la secuencia didáctica

Se consideró necesario, como punto de partida, establecer una base empírica desde la cual poder abordar el estudio de los fenómenos térmicos. Nótese que se utiliza la expresión fenómenos térmicos, y no se utilizan las expresiones: termodinámica, teoría del calor, calorimetría o termometría.

La elección de esta expresión es intencional porque, como hemos argumentado ya, en el estudio de las teorías sobre los fenómenos térmicos se han identificado la existencia de diferentes perspectivas epistemológicas o conceptuales que parecen o se presentan como perspectivas muchas veces antagónicas: sustancialista [estática], en contraposición a dinámica; microscópica- macroscópica; discreta-continua; de equilibrio, en contraposición a no equilibrio [de transferencia]. Estas diferentes perspectivas coexisten simultáneamente en los materiales de enseñanza, en los discursos académicos y en los argumentos explicativos de

los estudiantes, en diferentes niveles de profundidad y en diferentes niveles de análisis y coherencia.

Nosotros quisimos poner énfasis en lo que derivara del análisis hecho por los sujetos sobre los fenómenos. Los textos históricos serían el apoyo para la discusión y ampliación de la comprensión, no para establecer respuestas únicas o definitivas, porque vemos que las respuestas a las organización individual o colectiva de los sujetos no están compendiadas ni en las ciencias, ni en los manuales. Cada sujeto o colectivo ha de organizar sus propias respuestas en relación con el grado de comprensión y acercamiento a la resolución de problemáticas que son de su incumbencia y de su contexto.

La propuesta para el aula, entonces, estuvo guiada por la pregunta ¿Cómo establecer un proceso conceptual coherente entre estos diferentes cuerpos teóricos y conceptuales sobre lo térmico, proceso que enriquezca la comprensión de los docentes en formación? Esta pregunta no es para que la respondan los docentes participantes, es para guiar nuestra intencionalidad del proceso de intervención didáctica.

Su propósito central fue reconocer que hay un tránsito desde una perspectiva sustancialista hacia una perspectiva dinámica de lo térmico. Propuesta en la que se recuperan preguntas sobre la cual han sido estructurados principios teóricos de esta clase de fenómenos. Algunos aspectos de esta base empírica sobre la que se edifican y modifican los conceptos térmicos son compartidos por aquello que se suele denominar conocimiento común, o razonamientos espontáneos.

Así la ruta de trabajo se pensó desde la termometría y la calorimetría hacia el estudio de procesos térmicos o termodinámica clásica, que aunque parece tener operaciones abstractas más sofisticadas que la termometría también tienen una base empírica desde la cual adquieren significado muchas de las magnitudes, como estudiamos en los capítulos anteriores. Resaltamos, entonces, que la propuesta se desarrolla desde una perspectiva fenoménica macroscópica que contempla el papel que juega la actividad experimental en la organización y construcción de magnitudes que conducen a establecer variables, relaciones entre variables, modelos teóricos, representaciones simbólicas de aquello que se estudia.

Vimos en los estudios históricos, que ciertos progresos notables en la comprensión de lo térmico se hicieron cuando los científicos optaron por enfocarse en los efectos que podían

generar y operar, más que discurrir en la naturaleza misma de entidades como el calor. Por esto, en la secuencia didáctica hicimos énfasis en que los docentes participantes de la investigación identificaran las cualidades, magnitudes, efectos y sus relaciones, pues consideramos que constituyen la base fenomenológica: cualidades observables, medibles, operables sobre las cuales desarrollar campos conceptuales, sin pretender dar cuenta de la naturaleza misma del calor. Posteriormente, y con base en estas cualidades, detallamos la organización de las variables y procesos que estructuran las descripciones sobre las máquinas térmicas y el ciclo de Carnot, recogemos en esta sección algunos de las discusiones propias de los desarrollos térmicos en el siglo XIX.⁴¹

Identificada la forma de actuar frente a las problemáticas en la enseñanza aprendizaje de los fenómenos térmicos, una parte importante del diseño para el trabajo en el aula consistió en la selección y traducción de ciertos fragmentos de los escritos que analizamos en los capítulos anteriores.

De estas fuentes primarias se esperaba que al ser leídas por docentes llevaran hacia discusiones cuyos ejes articuladores eran los procedimientos, los argumentos y las conclusiones a las que conducían los autores de estos fragmentos. Queríamos que se identificaran a través de los textos premisas fundamentales y, entre ellas:

- a) Bajo la idea de calor se unifican cualidades diversas de las sensaciones calor-frío.
- b) El calor es una acción responsable de diversas transformaciones en las sustancias (expansiones, compresiones, cambios de fase, entre otros).
- c) El calor y la temperatura son magnitudes distintas. La medición de la temperatura se hace inicialmente a través de los cambios en la dilatación de las sustancias. La igualdad

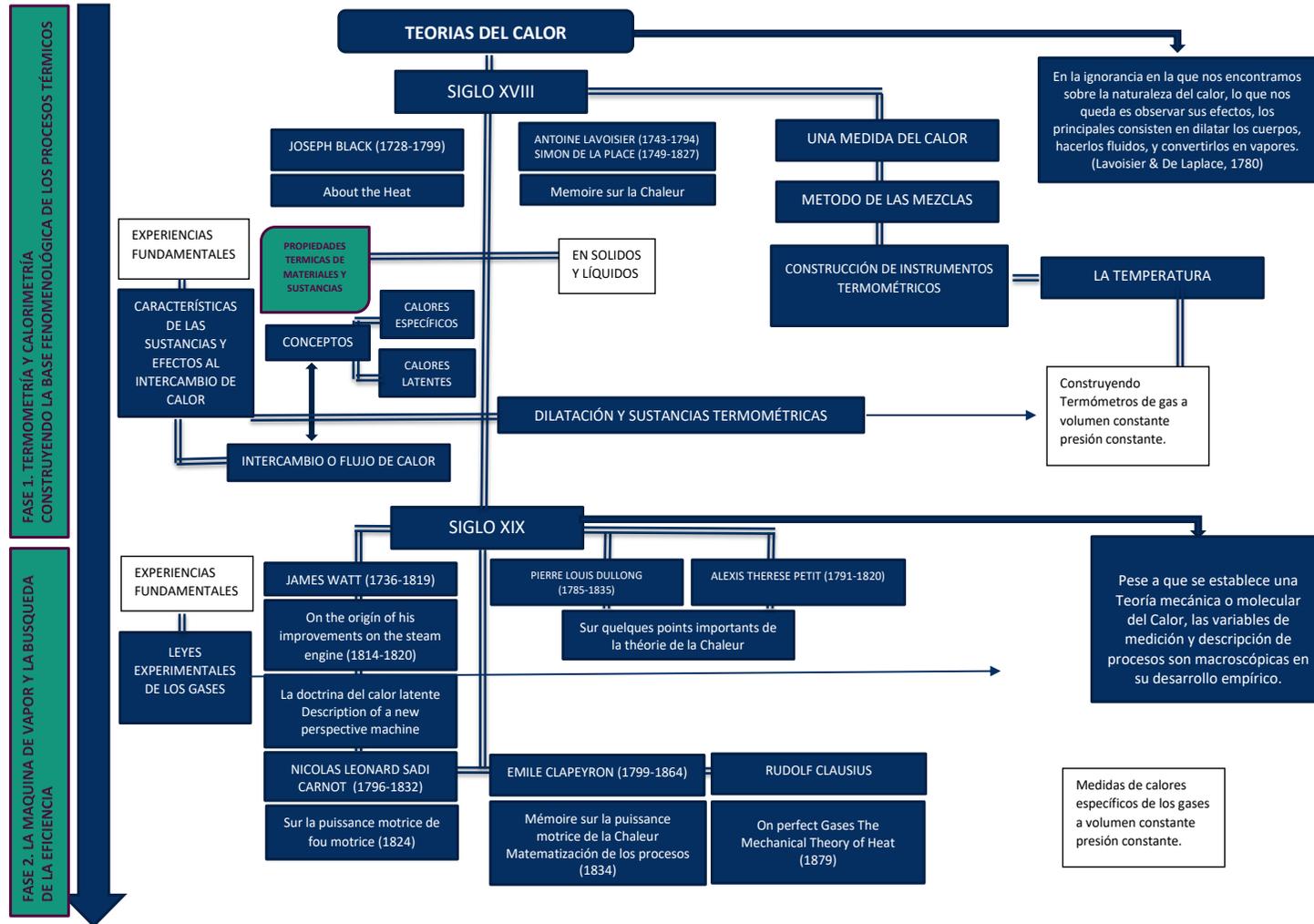
⁴¹ En este caso, la estructura final del planteamiento para el aula parece presentar un desarrollo histórico lineal. Sin embargo, es importante resaltar que esa no fue la intención inicial. En algunos momentos se pusieron en discusión pequeños episodios históricos que no se corresponden con el periodo estrictamente descrito. Por ejemplos: 1) el trabajo de James Clerk Maxwell, siglo XIX, nos ayudó a profundizar en relación con las ideas de temperatura, aunque las problemáticas de estudio se enfocan en el período de Lavoisier y Laplace, (que corresponde al siglo XVIII. 2) El trabajo de Clausius, segunda parte del siglo XIX, nos ayuda a profundizar las ideas en relación con los ciclos de Carnot, aunque las problemáticas de estudio se enfocan en el período de Clapeyron, primera parte del siglo XIX. En otras palabras, reconocemos que la enseñanza de la física no tiene la obligatoriedad de abordar los episodios históricos de una forma lineal conforme han ocurrido en la historia de la física, aunque en nuestro caso particular haya servido de guía para la organización de las problemáticas a tratar en el aula.

de temperatura durante cambios de fase para una misma sustancia, ocurren con cantidades distintas de potencia de calor.

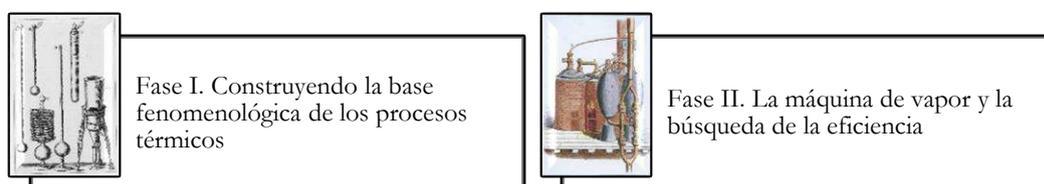
- d) El calor puede ser medido y definido por la magnitud de las transformaciones que causa.
- e) La forma de medida ayuda a distinguir: calores sensibles, calores específicos y calores latentes.
- f) La relación calor - trabajo introduce la medida del calor como consecuencia de las transformaciones de expansión y compresión sobre los gases.
- g) Los gases tienen características térmicas que permiten construir una escala absoluta de temperatura.
- h) En procesos isotérmicos se produce calor en ausencia de cambios de temperatura.
- i) En procesos adiabáticos se producen variaciones de temperatura sin que se produzca calor, etc.

Cuadro 9. Propuesta de enseñanza sobre los fenómenos térmicos a través de episodios históricos de las teorías del Calor.

Propuesta de Enseñanza sobre el estudio de los fenómenos térmicos a través de episodios históricos de las teorías del Calor.



En relación con lo expuesto, la secuencia organizada (Anexo 1) se dividió en tres fases, cada una enfocada en objetivos particulares asociadas a las problemáticas de cierto período histórico del desarrollo de las teorías.⁴²



Cuadro 10. Estructura de las fases de la secuencia didáctica Organización de los fenómenos térmicos.

7.1.1.3 La organización y objetivos de las fases de trabajo en el aula

Presentaremos ahora el diseño de cada una de estas fases. Se consideraron los aspectos sobresalientes de los capítulos 4 y 5. Los problemas importantes de estos periodos históricos inspiraron los objetivos para la intervención didáctica.

7.1.1.3.1 Fase I. Construyendo la base fenomenológica de los procesos térmicos

Esta fase fue pensada como introducción al proceso de enseñanza, que podría ser implementada en cualquier nivel de estudio, su finalidad central para la secuencia didáctica consistía en que los docentes pudieran poner en juego sus comprensiones, su experiencia académica, e identificar sus formas de organizar las magnitudes que permiten describir procesos de calentamiento y enfriamiento, y reconocer características de los cambios de las sustancias frente a la presencia de calor (fuentes a mayor temperatura), como las dilataciones o cambios de fase, que se suponía son abordadas de manera común cuando se estudia lo térmico.

Además, se pretendía que los docentes tuvieran la posibilidad de dar significado a la magnitud por medio de procesos de medición. Medición de temperatura construyendo termómetros y estableciendo criterios para definir una escala, sus máximos y sus mínimos. Hicieran representaciones gráficas de procesos de calentamiento y enfriamiento. Identificaran características térmicas de las sustancias al medir calores específicos, latentes, en sólidos y

⁴² La fase III. Titulada Bombas de Calor. Procesos Irreversibles. Se encuentra ubicada en la secuencia didáctica, se abordó la lectura con los docentes. Sin embargo, no la hemos tomado como objeto de estudio para este documento.

líquidos. Como se puede apreciar, son los aspectos que resultaron del análisis que se presentó en el capítulo 4.

Por lo tanto, en esta fase, las lecturas acompañantes como episodios históricos fueron Del calor en general, de Joseph Black, y Memoria sobre el calor de Lavoisier y De Laplace⁴³. Se esperaban organizaciones conceptuales sobre las relaciones entre calor y temperatura, para superar esa dificultad frecuentemente señalada de diferenciar las dos magnitudes y alcanzar un nivel de conceptualización al respecto. De la misma manera, se esperaba generar argumentos respecto a los aspectos de equilibrio térmico y direccionalidad del flujo de calor desde lugares de mayor a menor temperatura. Esta fase queda estructurada en la siguiente tabla.

FASE I. LA BASE FENOMENOLÓGICA DE LO TÉRMICO	
TEMÁTICAS	OBJETIVOS DE TRABAJO EN EL AULA
Sobre el calor, el frío y la comunicación del calor. Sobre las fuentes de calor y el frío, y como se genera el calor.	1. Analizar las expresiones caliente y frío como cualidades diferenciadas en la ordenación de una misma magnitud: el calor.
	2. Argumentar respecto a la direccionalidad del flujo o transferencia de calor
	3. Proponer situaciones para el análisis de fenómenos térmicos.
Cualidades de las sustancias que varían cuando se someten a la acción del calor	1. Identificar las cualidades y propiedades de las sustancias sometidas a la acción del calor que permiten obtener ordenaciones y mediciones de los cambios térmicos.
La medida de la dilatación como medida de la temperatura	2. Establecer criterios para la organización de medidas térmicas (temperatura, calor) a través de cualidades térmicas de la sustancia: dilatación térmica, conductividad térmica, cambios de fase.
	3. Conceptualizar sobre el equilibrio térmico y su vínculo con el equilibrio calórico, que se constituyen en la llamada ley cero de la termodinámica.
Sobre la naturaleza del calor	1. Identificar diferentes perspectivas sobre la naturaleza del calor, y cuáles son sus aportes en la organización de una teoría de lo térmico.
	2. Identificar otras características de las sustancias bajo la acción del calor: Calores específicos y Calores Latentes.
La medida de la acción del calor. La invención del calorímetro y el método de las mezclas.	1. Establecer criterios para la medida de la acción del calor en relación con la mezcla de sustancias.
	2. Formalizar la medida de la acción del calor a través del método calorimétrico.

⁴³ Vale la pena señalar que a los docentes se les presentó en castellano todo el material seleccionado para estudiar estos episodios históricos, con el fin de evitar dificultades que son comunes en nuestro sistema educativo con el uso de lenguas extranjeras, en este caso los niveles de inglés y francés, así que resultado de este trabajo son las traducciones hechas de las obras analizadas.

7.1.1.3.2 Fase II: La máquina de vapor y la búsqueda de la eficiencia

A esta etapa la titulamos: La máquina de vapor y la búsqueda de la eficiencia, pues se tuvo la intención de contextualizar las condiciones en las cuales se realizaron nuevas mediciones alrededor del calor. El comportamiento de expansiones y compresiones de gases y vapores que fue el contexto para estudiar por procesos y desarrollar nuevos planteamientos teóricos y formas de representación, nos llevó a idear cómo realizar el estudio de la dilatación en gases para estructurar las leyes empíricas de los gases que se destacan en los trabajos de descritos de Carnot, Clapeyron, y Clausius.

Planteamos experimentos exploratorios para examinar el comportamiento de los gases frente a los cambios de temperatura: Expansión – compresión, calentamiento y enfriamiento, y sus efectos mecánicos. Se utilizaron jeringas selladas que se sometían a cambios de temperatura, de presión y de volumen. Si bien estos experimentos constituyen ejemplos cualitativos, servían para ilustrar los cambios, y que los docentes, establecerían relaciones entre las magnitudes ya estudiadas (P, V, T) para llegar a la medida de la cantidad de calor a través del efecto mecánico medible en trabajo, magnitud emergente en las representaciones de Clapeyron como el área debajo de la curva trabajo, discutida en el capítulo anterior.

Se trabajaron diferentes fragmentos: 1) Descripción de la máquina de vapor [Watt] Identificación del funcionamiento de la máquina. -2) Sistematización de la máquina [Carnot]. Y se estudiaron las representaciones de los procesos térmicos y del ciclo de Carnot – Clapeyron. Se extrajeron de los textos de Carnot, las tablas de datos que representan los calores específicos a volumen constante y a presión constante, para contrastarlo con la medición de calores específicos que aparece como método en el texto de Clausius, y que consideramos ayudaba a mostrar el poder de generalización que genera tener una escala de temperatura que dependiendo de las propiedades de los gases, se vuelve independiente de las propiedades termométricas de las sustancias cuando se establece como medida el cero absoluto. Como se puede apreciar, son los aspectos que resultaron del análisis que se presentó en el capítulo 5.

FASE II. LA MÁQUINA DE VAPOR Y LA BÚSQUEDA DE LA EFICIENCIA	
TEMÁTICAS	OBJETIVOS DE TRABAJO EN EL AULA
La presión y el volumen como variables térmicas.	1. Identificar que los cambios térmicos de las sustancias pueden depender de la presión.
	2. Identificar relaciones entre presión y cambios de temperatura o presión y cambios de volumen.
El calor y el movimiento	1. Establecer relaciones geométricas y cuantitativas entre las variables Presión, Volumen y Temperatura.
	1. Caracterizar la relación entre movimiento y calor.
La acción mecánica y la medida del calor durante procesos de expansión y compresión de gases	1. Establecer relaciones geométricas y cuantitativas entre los procesos que tienen lugar en la máquina de vapor.
	2. Identificar el trabajo interno
La equivalencia de magnitudes calor y trabajo	1. Relacionar la equivalencia entre calor y trabajo con el enunciado de la primera ley
	2. Analizar sobre la preponderancia del principio de conservación de la energía

Cuadro 12. FASE 2. Organización de temáticas y objetivos.

7.1.2 Criterios didácticos al tematizar

La tematización, como podemos ver a partir de lo desarrollado en este apartado, implica poner en consonancia diferentes aspectos:

- La población y contexto hacia la cual va dirigida la propuesta de enseñanza
- El contenido temático que se aborda
- La selección de materiales, recursos
- La coherencia entre los contenidos, los objetivos que se pretenden desarrollar, la selección de actividades centrales y de apoyo.
- La secuenciación de niveles de complejidad en las diferentes partes del proceso

Es a estos aspectos, de gran importancia, a los cuáles hemos denominado criterios didácticos, pues son los que orientan acciones mucho más específicas, en el desarrollo de actividades de aula. De ahí que consideremos el estrecho vínculo entre criterios pedagógicos y criterios didácticos.

Ahora bien, este apartado nos lleva a estar de acuerdo con que: los procesos de diseño didáctico pueden caracterizarse como una construcción que no es lineal, homogénea o absoluta. Hablamos más bien de la emergencia de una dinámica fluctuante y compleja de reflexión (Astudillo Tomatis, Rivarosa Somavilla, & Ortiz, 2014, pág. 141) que hacen parte de una tarea compleja, de reflexión, toma de decisiones y necesidad de apertura a los eventos espontáneos.

Dentro del proceso, y a sabiendas de que la secuencia didáctica es en estricto sentido de la palabra un compendio orientador o un módulo de trabajo, nosotros en la propuesta asumimos la necesidad de intervenir en el aula desde una mirada que contempla situarse en: a) evaluación formativa y continua como fuente de información y retroalimentación del proceso, b) perspectiva dialógica de la enseñanza, c) énfasis en la problematización de concepciones y recuperación del bagaje cultural de los estudiantes, d) enfoque multirreferencial (estrategias múltiples de mediación), y e) modelo de orientación docente para la autonomía del alumno y la autorregulación de los aprendizajes. (Astudillo Tomatis, Rivarosa Somavilla, & Ortiz, 2014, pág. 137).

Estamos en consonancia con la idea de Guidoni que señala:

Competenza di programmazione e strutturazione dell'intervento didattico e dell'attività di classe: sulla base di quanto detto nei punti precedenti, i percorsi di crescita di conoscenza attra-verso l'interazione (adulto - ragazzo - mondo dei fatti - mondo delle spiegazioni) devono materializzarsi in strutture e sequenze di cose da dire, da far succedere, da vedere ... da ricordare. Anche in questo caso, se vengono suggeriti vari modi possibili di organizzare l'iter didattico, resta ineliminabile la responsabilità dell'insegnante nel progettare, sulla base delle condizioni oggettive in cui si trova, cosa e come fare per realizzare il percorso suggerito; nell'aggiustare continua-mente il progetto sulla base di quello che, di fatto, in classe succede. (Arcà & Guidoni, 2008, pág. 11).

Para poder generar esas interacciones, que en este caso son entre adultos, es necesario situarse en el contexto, en el fenómeno de estudio, en las intenciones de los docentes cuando deciden cursar sus estudios de especialización y maestría, en este caso. Desde allí procurar incorporar actitudes para establecer los vínculos y las interacciones, entre docentes, docente – conocimiento, conocimiento – mundo. Así pensamos en dos tipos de situaciones desencadenantes de la conversación en el aula.

7.1.2.1 Tipos de situaciones recurrentes para el análisis de los fenómenos

Las situaciones propuestas fueron de dos tipos:

1. Situaciones sencillas vinculadas a la experiencia de los sujetos en su entorno cotidiano.

Situaciones comunes o cotidianas nos permitían discutir poner en juego la relación experiencia – lenguaje – conocimiento, para reconocer ciertas concepciones de los docentes con respecto los fenómenos y para ponernos en un contexto común, en el sentido dialógico expresado anteriormente. Por ejemplo, como sugiere Black, es frecuente en nuestra experiencia común poner la piel en contacto con objetos calientes o fríos, siendo este nuestro órgano perceptivo de la sensación térmica.

Se suele afirmar, en un caso particular como este, que nuestros sentidos nos engañan, que si se pone la mano en agua fría y después en agua caliente no es posible percibir “la verdadera temperatura” del agua. Así que esta situación sencilla, replicable como experiencia física o como experiencia mental permitiría a) discutir sobre qué es la sensación que se percibe, b) nombrar la sensación y c) poner en discusión.

2. Situaciones modeladas desde las experiencias científicas.

En este punto vale la pena hacer una distinción entre experiencia y experimento. Estamos considerando experiencia a aquella situación de análisis que no requiere de una sistematización de datos numéricos como aquella que se propicia a través de los datos experimentales porque ya ha extraído del mundo sensible lo necesario para ser una estructura conceptual sólida, ya ha sido experimentado, vivido, reflexionado. La experiencia es más amplia que el experimento, cuyos instrumentos requieren de elaboraciones más específicas en función del tipo de experimento que se desarrolle.

En nuestras actividades, los experimentos ayudan a ampliar más la experiencia de las personas, al mismo tiempo que aportan en detalles, las cuantificaciones hacen parte de esos detalles, la experiencia generaliza de tal forma que después de hacer un experimento no es esencial volver a los datos específicos que este ha proveído. Desde este punto de vista, la experiencia es la síntesis tanto del experimento como de la actividad experimental.

En este sentido, las situaciones modeladas desde las experiencias científicas toman como modelo los casos de estudio que aparecen en las fuentes primarias, son experiencias propiciadas a través de las lecturas de los episodios históricos:

A partir de las discusiones surgieron actividades experimentales propuestas por los docentes participantes, lo cual nos lleva a señalar la importancia que adquiere para ellos el uso de experimentos en sus exploraciones.

7.1.3 Experimentar: Un segundo criterio pedagógico para la formación de docentes

La experimentación se establece como elemento organizador: aquel que permite percibir el efecto mediante una serie de experiencias en las que se modifican acciones, se eligen materiales, se establecen condiciones, se proponen instrumentos, etc., experiencias que permiten identificar magnitudes, relaciones, nuevos efectos, etc. en otras palabras, la caracterización de un efecto no es caracterizar un objeto, implica diversos aspectos de la experimentación más haya de magnitud o medida o instrumento, es necesario correlacionarlo todo, la producción del efecto, los dispositivos para producirlo, detectarlo, cualificarlo, la selección de criterios para medirlo, los procedimientos que se usan para formalizarlo, múltiples experimentos pueden estar involucrados con la caracterización de un solo efecto, por esto, a toda esta disposición de acciones la denominamos Actividad Experimental.

Consideramos que las actividades experimentales conducen a generar nuevas experiencias para los sujetos por el fuerte nexo entre el hacer y el conocer que se deriva de la experimentación. Los experimentos hacen consiente y reflexivo lo vivido, observado y operado en el mundo físico, implica que durante estas actividades los sujetos eligen, discriminan, diseñan para producir situaciones, la experimentación fue imprescindible en la organización de magnitudes en ciencias (Garzón, et al., 2020), y a través del trabajo en enseñanza notamos como también es imprescindible en los procesos de aprendizaje, de la misma manera que señala (Mäntylä, 2011) .

In contemporary science education and research, the formation of quantities through quantitative experiments or measurements is not often seen as an essential part of the concept formation, or at least it is treated as a non-problematic part of it. However, there are good reasons to believe that we should also pay attention to quantitative measurements and their use in practical teaching in different levels, as will be discussed in this dissertation. In the didactical reconstructions, the experiments have

a central role in producing and organizing knowledge without forgetting the crucial role of models in intermediating between experiments and theory. (Mäntylä, 2011, pág. 9).

En nuestra clase, se buscó avanzar colectivamente en la construcción y formalización en torno a los fenómenos térmicos, por lo cual nos parecía importante desplegar diversas actividades experimentales, a través de preguntas y problemáticas de estudio en diferentes formas de aproximación. Nuestra estrategia metodológica de aula consistió en dar prioridad a que los docentes: formularan sus propias preguntas e hipótesis en el desarrollo de su actividad experimental, que identificaran acciones y eventos en un sistema, que se pusieran en diálogo con sus compañeros, con la información de textos, de videos, que comunicaran sus ideas a partir de conjeturas, gráficas y conceptualizaciones, derivadas de las actividades propuestas.

Todo ello, para que los docentes vivenciaran las implicaciones de la experimentación en ciencias: A su vez, que pudieran elaborar descripciones y explicaciones, persiguiendo la construcción de contenido más específico, que apoyara los procesos de conceptualización durante el estudio de cualidades y fenómenos térmicos.

7.1.4 Criterios didácticos para el planteamiento de situaciones experimentales.

En el contexto de enseñanza, procuramos que la actividad experimental sea abierta, exploratoria, que permita la discusión de problemas, que promueva la interacción de grupo, la construcción de conocimiento colectivo en el aula. Le llamamos situación experimental, porque es contextual y, a su vez, una situación comunicativa donde el docente ha de propiciar esa comunicación (Santamaria, 1994). La palabra situación alude a situarse en un contexto, y por lo tanto, la situación experimental no es un experimento que se replica en diversos lugares sin modificación alguna y del que se obtienen siempre los mismos resultados. El contexto, como veremos, guía y modifica la situación experimental. Son las preguntas, intereses y reflexiones de los participantes quienes estructuran lo que se ha de hacer y reflexionar el ejercicio de experimentación.

¿Cómo se estructuraron las situaciones experimentales?

Para estructurar una situación identificamos inicialmente cuáles fueron nuestras intenciones u objetivos a ser desarrollados a través de la actividad, que siempre estuvieron involucrados con el desarrollo conceptual que se pudiera desarrollar en el proceso.

En estos casos tomamos en consideración la mirada gestáltica que proponen (Koponen, Kurki-Suonio, Jauhiainen, Hämäläinen, & Lavonen, 2001) dentro de la formación conceptual, que nos pareció ejemplificante y oportuna dentro de nuestras consideraciones, si y solo si consideramos un permanente entrelazo entre fenómenos y modelos teóricos, sin establecer entre ellos una relación jerárquica.

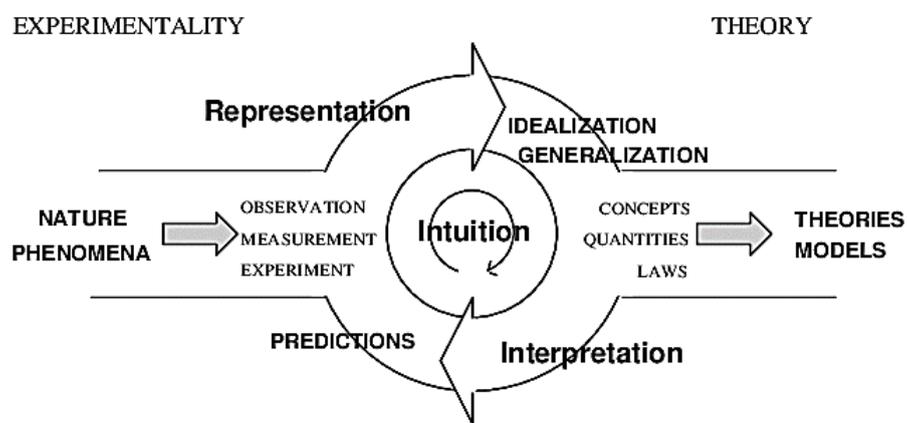


Imagen 14. Cycle of concept formation. The process is directed from phenomena to theory. (Koponen, Kurki-Suonio, Jauhiainen et al. 2001).

Una de las premisas centrales a lo largo de la propuesta era que la actividad experimental sería un eje articulador de una idea fundamental para la formación de docentes: pensar el fenómeno para enseñarlo. Sin embargo, pensar el fenómeno es una expresión ambiciosa. Pensar, se entiende aquí como la necesidad de aumentar nuestra comprensión sobre los fenómenos que estudiamos y que serán objeto de nuestra enseñanza pues al aumentar la comprensión podremos diseñar propuestas diversas y plantear situaciones para la enseñanza, en las que los docentes indagan sobre el cómo, sobre la forma de hacer en el aula (contenidos didácticos) y también sobre el qué y para qué de lo que se enseña (contenido disciplinar en física). Bajo esa mirada, juntos, el docente y el estudiante-docente tendríamos la oportunidad de profundizar sobre aquello que se estudia, hacer preguntas y generar posibilidades de respuesta.

7.1.4.1 Las actividades experimentales en el estudio de lo térmico

De acuerdo con los estudios históricos, seleccionamos algunos experimentos fundamentales que manifiestan las características de las sustancias y los efectos del intercambio de calor: su dilatación, cambios de fase, aumentos y disminuciones de temperatura, en acuerdo con que en la lógica de las acciones de los sujetos sobre los objetos emergen aquellas cualidades que se organizan y se formalizan en conceptos que describen los fenómenos. Lo cual nos introdujo a identificar las propiedades térmicas de algunos materiales y sustancias, convirtiéndose estas propiedades en las magnitudes fundamentales para la medición de las acciones térmicas, como: los calores específicos y calores latentes de las sustancias.

Se llevaron a cabo las siguientes actividades experimentales:

- Construcción de termómetros líquidos para comparar dilatación de sustancias, establecer puntos fijos y desarrollar criterios de medida.
- Construcción de representaciones gráficas de procesos de calentamiento y enfriamiento.
- Construcción de calorímetros para la medición de calores específicos, latentes, en algunos sólidos y líquidos.
- Experimentos con jeringas para identificar los procesos de expansión y compresión donde entraron en juego las variables presión, volumen, temperatura. Procesos en los cuáles los cambios de fase se produjeron por acción de la presión y no una fuente de calentamiento.
- Construcción de termómetros de aire a presión constante para identificar la complejidad y diferencia con los termómetros líquidos.
- Construcción de máquinas térmicas

En resumen, los docentes discutían alrededor de unas preguntas orientadoras, y después de su discusión se introducían en la lectura de los textos originales, (ver Anexo 1), y en el

desarrollo de actividades experimentales de tipo casero, con materiales de bajo costo⁴⁴. Todas estas actividades fueron recursos exploratorios de los docentes en la ampliación de sus comprensiones. No se hizo énfasis en la toma de datos, o en los valores numéricos de las magnitudes, aunque los profesores, como veremos, establecieron relaciones y aproximaciones para cuantificar.

7.1.5 Formalizar. Un tercer criterio pedagógico para la formación de docentes

El hilo conductor de este trabajo han sido los procesos de formalización en física, partiendo de la premisa de que formalizar implica ordenar, estructurar y concretar las acciones de tematizar y experimentar. Formalizar es dar estructura a las conceptualizaciones y modelaciones resultantes de todo el proceso de conocimiento que se desenvuelve en las intervenciones didácticas. En el aula de clase formalizan los docentes y los estudiantes, cada quien, de acuerdo a su nivel de organización conceptual sobre los objetos de estudio y de acuerdo con sus experiencias particulares. Durante la formalización todos los sujetos son activos frente al conocimiento porque ponen en juego sus comprensiones y sus argumentaciones.

Durante el proceso de formalizar se produce un nivel de organización que emerge de la experiencia sensible, pero que lleva a identificar casos y expresiones generales, a unificar aspectos diferentes a través de elementos comunes, a proponer modelos, a conceptualizar o teorizar. Y esto se consigue a través de 1) identificar y caracterizar las magnitudes con las cuales se describen los fenómenos, 2) establecer relaciones entre estas magnitudes, y 3) ampliar las relaciones para hacer comparaciones con otros efectos o con otros fenómenos.

El formalizar implica contrastar esquemas conceptuales a la luz de las nuevas experiencias que aparecen conforme se avanza en la comprensión de los fenómenos de estudio. Implica también el ejercicio propio de la metacognición, que ocurre cuando las personas logran estabilizar ciertas acciones para proceder experimentalmente, por ejemplo, cuando se selecciona un efecto y se reproduce para obtener un dato y estandarizarlo, o cuando se establece la cuantificación de una medida a través de una ecuación, o cuando se hace una representación gráfica de un proceso. En todos estos casos, interviene el ejercicio de agrupar

⁴⁴ Recordemos que las condiciones de trabajo fueron en tiempos de Pandemia. Los profesores realizaban las prácticas durante las sesiones, abrían sus cámaras, mostraban sus procedimientos.

inferencias en sistemas, sean estos sistemas físicos (experimentos) o mentales (representaciones).

Hacer representaciones, usar sistemas simbólicos, y hacer uso de elaboraciones matemáticas, nos parecen aspectos centrales en la formalización al considerar que:

La matematica è un modo di ragionare con una consistenza interna. Ma il rigore, i criteri di coerenza, la consistenza interna e l'eleganza che possono caratterizzare risultati formali non possono essere costruiti a priori, insegnanti prima in modo esemplare. Piuttosto sono legate allo sviluppo di competenze logico-linguistiche che occorre costruire con metodo con strategie metacognitive. La matematica è un linguaggio che usa in modo appropriato, parole, simboli, strumenti. Gli aspetti linguistici e non solo i risultati numerici sono cruciali per cogliere il senso del ragionamento. Le parole del linguaggio naturale sono metafore che danno significato alle parole della matematica e della fisica. E le parole acquistano significato con esperienze condivise. (Balzano, 2007, pág. 1).

7.1.6 Criterios didácticos para formalizar

Nuestra mirada de la formalización se sustenta en el entrelazo de la relación sujeto mundo, por lo cual no pretendemos aplicar per se modelos matemáticos a conceptos físicos, se trata de propiciar una relación constitutiva en la forma de razonar un fenómeno, de darle forma.

Nelle proposte didattiche diventa determinante riflettere sul lavoro di mediazione dell'insegnante e sulla progettazione di ambienti di apprendimento che permettano lo scambio e la condivisione di esperienze e significati.

Nella nostra esperienza è fondamentale includere nella costruzione/condivisione di concetti, esperienze fisiche, artistiche...di interesse quotidiano. L'uso di vari registri (verbale, visivo, motorio, interpersonale, ecc.) consente di attivare potenzialità diverse con maggiori probabilità di coinvolgere chi apprende e di favorire una memorizzazione stabile. piano percettivo-motorio e su quello emotivo creando le condizioni per attivare diverse potenzialità valorizzando stili e approcci attraverso la multirappresentazione. . (Balzano, 2007, págs. 3 - 4).

Por eso se decidió que los docentes pudieran desarrollar las lecturas, y las actividades experimentales bajo indicaciones mínimas, para que en sus exploraciones particulares ellos hicieran partícipes sus propias motivaciones.

7.1.6.1 Formalizar en relación con los fenómenos térmicos

Cuando hablamos de tematizar los fenómenos térmicos y de identificar las problemáticas que fueron consideradas como elementos sobre los cuales se haría el desarrollo temático, identificamos que uno de los aspectos centrales de la formalización tenía que estar vinculado con mostrar que el calor podía tener diferentes manifestaciones y por lo tanto diferentes expresiones, formas de medida y representaciones:

- Fluido, entidad, o magnitud que parece transferirse entre los cuerpos como en los casos de contacto, mezclas o convección, o bien ocupar el vacío como en el caso de la radiación térmica.
- Cantidad de acción que es posible determinar a través de cambios mecánicos o eléctricos donde actúa lo térmico, como en el caso de la cantidad necesaria para producir cierta cantidad de trabajo mecánico.

Llegar a estas consideraciones lejos de ser un proceso inmediato, requirió de abordar el desarrollo histórico en la ciencia, estudiar y comprender procesos particulares que quedaron detallados en los cuadros de temáticas y objetivos de cada una de las fases.

En este sentido, lo que se formaliza en relación con lo térmico está completamente relacionado con tales procesos particulares, en los cuales no hay una definición única y estándar de calor como aquella que se suele encontrar en los libros de texto: el calor es una forma de energía.

La propuesta temática que se ha presentado, buscaba principalmente abordar diversas manifestaciones del calor y en relación con ellas poder describir o medir el calor dentro del proceso, y esto sólo es posible a través de las magnitudes que cambian y de las transformaciones que ocurren bajo su presencia. Por lo tanto, la medida del calor podría ser considerada una medida de los cambios térmicos o una medida de las transformaciones.

Por eso consideramos que la ruta sigue una dirección que va desde una mirada calorimétrica hacia la construcción de una mirada dinámica de lo térmico pues si bien inicialmente se abordan las medidas calorimétricas, posteriormente se amplía hacia el análisis de los procesos térmicos.

De este modo, una vez presentadas las consideraciones sobre cómo se diseñó la intervención fenomenológica, y explicitados los criterios que se tienen en consideración para abordar procesos de formación de profesores. Veremos en el siguiente apartado el potencial de la tematización elaborada a través de los estudios históricos en el desarrollo de las actividades experimentales que realizaron los docentes y los procesos de conceptualización, que ellos construyen a lo largo de sus intervenciones.

Etapa 3. La investigación fenomenológica en el aula

8 La Documentación fenomenológica

- ☞ Describimos desde la perspectiva fenomenológica la experiencia de formación con profesores de ciencias de la especialización y maestría en Docencia de las Ciencias Naturales de la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, en el curso llamado Organización de los Físicos: Fenómenos Térmicos.⁴⁵

Presentamos la descripción fenomenológica que habíamos expuesto en nuestro diseño metodológico, que busca exteriorizar lo que aparece conforme aparece en la experiencia de aula. En otras palabras, nos centramos en la descripción de los resultados de las actividades de enseñanza desarrollados con los docentes, y hacemos énfasis en aquellos fenómenos térmicos que se tomaron como objetos de estudio.

Para ayudar a la comprensión lectora de nuestra descripción, sintetizamos que la perspectiva fenomenológica en esta investigación se ha venido exponiendo desde dos ámbitos:

- 1) Se asume el mundo, y los fenómenos, como manifestación frente a una conciencia que se conforma en el estrecho lazo que anuda las acciones del sujeto con sus comprensiones del mundo al conocerlo, y en la cual, lo que es externo no se puede diferenciar de lo que es construido por esa conciencia. De modo que el esquema conceptual de la ciencia, de los fenómenos, es una interpretación cambiante. Lo que es externo adquiere significado por la conciencia misma.
- 2) Se elige la fenomenología como ruta o método reflexivo para conocer los fenómenos naturales o sociales que se comprenden sólo al hacerlos notorios a nuestra conciencia investigante, y que nos lleva a describir lo acontecido para ver en la descripción: patrones, características invariantes, acciones comunes.

⁴⁵ Como ya mencionamos en el contexto y en el diseño metodológico, el curso fue impartido durante el primer semestre de 2021. Las clases fueron desarrolladas de manera secuencial, completando 16 sesiones de trabajo con una duración aproximada de 4 horas de clase, compuestas por un tiempo de clase magistral y de trabajo grupal, a partir de los objetivos propuestos para cada una de las sesiones. Todo el trabajo se realizó mediante actividad remota a través de la plataforma Teams.

Ahora bien, consideramos que de este tipo de investigación es posible reunir elementos comunes de procesos que son compartidos en el aula. De acuerdo con lo anterior, el análisis de las producciones de los docentes lo hicimos vinculando los siguientes factores principales:

- La temática y objetivos propuestos para el desarrollo de las clases.
- Las intervenciones de los profesores frente a las actividades y problemas planteados en torno a los fenómenos térmicos.
- La organización de la información y la explicación de los fenómenos durante las sesiones de clase y el registro las páginas web como producto grupal.

En relación con lo expuesto, seccionamos este capítulo en dos grandes apartados que nos permitieran hacer una presentación extensa de los mismos:

En la primera sección, mostramos las dimensiones consideradas para el análisis:

1) Interpretación textual, 2) Asignaciones semánticas y 3) Organización perceptual; análisis de aquello que organizan los docentes.

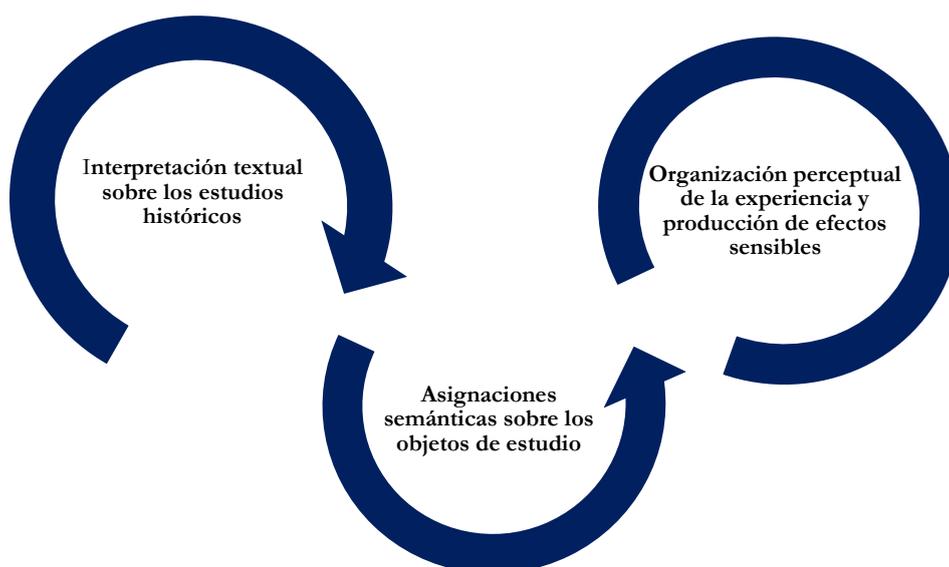
En la segunda sección, presentamos lo ocurrido en el aula de clase, a través de las intervenciones de los docentes. Hacemos énfasis en la descripción de: los procesos de conceptualización y modelación que percibimos a través de sus intervenciones y elaboraciones.

8.1 Descripción fenomenológica. Lo que aparece conforme aparece

☞ En este apartado se presentan 1) las dimensiones de análisis: Interpretación textual, asignaciones semánticas y organización perceptual, y 2) la intervención didáctica que hace referencia a las actividades desarrolladas en la clase Organización de fenómenos térmicos; con las cuáles pretendimos dar cuenta de los procesos de organización conceptual en relación con las fuentes primarias y los experimentos exploratorios que desarrollaron docentes de ciencias naturales.

8.1.1 Dimensiones para el análisis de la intervención didáctica

Para tener un marco sobre qué aspectos considerar pertinentes en relación con el tipo de vivencias que se desarrollan en las clases, definimos tres dimensiones para el análisis de los procesos de formalización, mostrados en el siguiente esquema:



Cuadro 13. Esquema de las dimensiones de interpretación.

Consideramos que estas tres dimensiones eran pertinentes para orientar la descripción del proceso desarrollado en el aula.

1. Dimensión 1. Interpretación situacional y textual.

Tiene que ver con la interpretación de los textos históricos y el análisis de situaciones cotidianas que hicieron los docentes.

2. Dimensión 2. Organización perceptual de la experiencia y la producción de efectos sensibles.

Tiene que ver con describir la comprensión sobre la comprensión que desarrollan los docentes sobre los fenómenos estudiados y las actividades experimentales que ellos proponen y diseñan durante estos procesos de comprensión.

3. Dimensión 3. Asignación semántica sobre los objetos de estudio.

Tiene que ver con los sentidos que fueron asignado a términos durante el desarrollo de la actividad, y las modificaciones a sus comprensiones.

En relación con estas dimensiones describimos entonces las distintas intervenciones del grupo de docentes participantes.

8.1.2 Los docentes participantes

Al inicio, para tener una idea de las características del grupo, le preguntamos a los participantes por su acercamiento a los estudios de termodinámica en sus carreras de base: Licenciaturas en Física, Química y Biología, qué temáticas abordaron o recordaban al estudiar fenómenos térmicos en el interior de sus disciplinas.

Los docentes manifestaron que era un campo de estudio poco explorado a través de su formación, consideraron que estas problemáticas eran particulares del currículo en física, e incluso enfatizaron su distancia, alejamiento o ignorancia respecto a los fenómenos térmicos.

A continuación, se reproducen algunos comentarios:

N: Profe, considero que soy un poco alejada de la física, tanto en la licenciatura como a lo largo de mi formación como licenciada en biología, la aproximación lo más cercano es el seminario de transformación donde hicimos trabajos con combustión de velas, eso nos demandó lecturas y pensar en el proceso. Pero, me considero ignorante en ese campo de conocimiento, pero con la disposición de aprender.

Ed: Soy licenciado en Biología, mis acercamientos a la física en cuanto a nivel de formación como licenciado, vi física 1 y 2 en los primeros semestres, luego vimos biofísica y luego físico química pero relacionado a la transformación de la energía: Actualmente trabajo en un colegio privado donde este año asumí la carga académica de las ciencias naturales, doy biología que es mi campo de estudio, química y física de la cual estoy aprendiendo y recordando cosas. Ese ha sido mi acercamiento, se me dificulta un poco porque no es de mi formación y ahí vamos intentando aprender.

X: Soy licenciada en Química, actualmente trabajo únicamente dando biología en un colegio público de Soacha, de Física sé muy poco, mis años de pregrado y casi hacía los primeros semestres que uno veía teorías, y lo más próximo han sido los seminarios anteriores de esta maestría.

Ni: Yo también soy licenciado en Química, a nivel de pregrado estuvimos trabajando en lo que tiene que ver con materiales, la física nunca ha sido lo mío y desde hace unos años para acá he intentado llevarme bien con este campo de acción, sin embargo, trabajo en un colegio privado donde doy

química, biología y me ha tocado dictar lo que tiene que ver con termodinámica, pero lo toco muy por encima.

Car: Soy licenciado en física, cuando estuve en la pedagógica homologué el curso de termodinámica, sin embargo, estoy muy interesado en la parte de los procesos, de comprender un poco esa parte que nosotros asumimos como interacciones que a la vez nos cuesta dar explicaciones, por ejemplo, la parte de cinética de los gases, de mecánica estadística. Hay un dominio frente a las leyes, distinción de temperatura y calor, frente a las máquinas térmicas, frente a la entropía que es bien importante.

Cuadro 14. Expresiones de los docentes respecto a sus conocimientos en el campo de estudio.

Presentar este contexto es importante pues inicialmente los docentes tenían hacer intervenciones, al consideran que era posible que sus respuestas no fueran las “correctas” porque la termodinámica no era un campo de estudio de su dominio o familiaridad.

Según avanzan las sesiones, notamos que intervienen con mayor naturalidad poniendo en juego: 1) la amplia experiencia que tenemos con los calentamientos y enfriamientos obtenida de acciones cotidianas, y 2) la experiencia en otros campos disciplinares.

Hemos reconocido que esta timidez suele ocurrir al iniciar procesos de enseñanza en física, donde las personas habitualmente consideran que se debe responder siempre acertadamente, a través de los corpus teóricos canónicos, principalmente acudiendo a formulaciones matemáticas definidas, por este motivo habíamos propuesto preguntas que llevaran a un análisis que partiera de su conocimiento común, de modo que nos permitiera identificar algunas de concepciones anteriores al desarrollo de las temáticas en la clase.

8.2 La intervención didáctica

- ☞ Los fragmentos del discurso que utilizamos como unidades de análisis se seleccionaron de las intervenciones de los docentes en las diferentes sesiones de trabajo, que consideramos relevantes para identificar si podíamos cuenta de los procesos de formalización o conceptualización.

Dar cuenta de procesos individuales estaba lejos de nuestra intención investigativa, y además, era imposible en las condiciones de trabajo en las cuáles estábamos, las sesiones eran a distancia, y el trabajo se desarrollaba en las discusiones grupales y socializaciones. Definimos que presentaríamos las intervenciones de acuerdo siempre con los grupos de trabajo, las nombramos para la presentación como G1, G2, G3, G4 y G5, sin importar quien fuera el individuo.

A continuación, presentamos las intervenciones y experiencias que se desarrollan en las sesiones de clase. Enfatizamos en los aspectos que consideramos nos permiten caracterizar los procesos de conceptualización y modelación a través de la intervención, que es uno de nuestros objetivos importantes.

8.2.1 Concepciones iniciales de los docentes sobre lo térmico

Como punto de partida buscábamos identificar elementos de las concepciones de los docentes sobre lo térmico que fueran reflejados durante el análisis de la situación. Por ejemplo, que tipo de ideas tenían sobre el calor, sobre su transferencia, qué términos utilizaban.

La primera situación planteada fue la siguiente⁴⁶: (Anexo 1. Pág. 295)

<p>Suponga que hay una varilla o barra de metal cerca de una estufa, pero usted no sabe si la varilla está caliente o fría. Pone su mano derecha entre una olla con hielo, mientras mantiene su otra mano en el bolsillo, o la sumerge en agua tibia por un par de minutos. Luego, toca un extremo de la varilla con la mano izquierda y el otro con la mano derecha. ¿Se puede determinar a partir de estas sensaciones si la varilla está caliente o fría? Describa de qué forma se ha afectado la varilla al estar en contacto con las manos, es decir: identifique quién calienta a quién o quién enfría a quién, en esta situación y argumente esos procesos de intercambio. Pueden presentar ejemplos o evidencias de sus afirmaciones, y después la presentaremos al grupo de estudiantes.</p>

Cuadro 15. Ejemplo de situaciones discutidas para identificar las ideas de los docentes.

⁴⁶ Este es el estilo de diversas situaciones cotidianas propuestas para la discusión.

Esta situación incluía los términos que queríamos explorar y nos propusimos como objetivo: Analizar las expresiones caliente y frío como cualidades diferenciadas en la ordenación de una misma magnitud: el calor. Establecería un vínculo con la lectura de Black por su semejanza con las situaciones con las cuales Black argumenta sobre el calor.

A través del análisis de la situación, los docentes se referían al calor como: sensación térmica, temperatura y energía.

8.2.1.1 Sensación térmica

Sensación térmica fue la expresión utilizada con mayor frecuencia, y a través de ella señalaban aspectos como:

<p>G1: Analizamos un poco esas situaciones reconociendo que la sensación térmica que cada uno de nosotros tiene. Hablaría más de la sensación de caliente, como lograr identificar esa sensación en relación a construir primero en donde se parte de lo que es caliente y frío, es decir dónde podría tener un punto de equilibrio entre caliente y frío.</p> <p>G2: La varilla puede estar caliente si estamos tocando con la mano que estuvo en contacto con el hielo, pero con la mano que estuvo en el bolsillo no vamos a tener una sensación significativa cuando tocamos el material. Ahí aparece un parámetro de comparación frente a qué estoy haciendo referencia. Y el término que nos pareció es llamado la sensación térmica. Esa sensación de frío y de calor que se percibe cuando las condiciones ambientales han cambiado depende de unas condiciones necesariamente biológicas que nos permiten responder de cierta manera a ciertos estímulos. Asumimos, que hay frío cuando temblamos o tenemos sensación en las manos y pies de ese frío o al contrario, cuando respondemos a ese estímulo como la sudoración</p> <p>G3. [El calor es] Eso es lo que entendemos como sensación térmica, la diferencia de temperatura que hay entre la varilla y las manos. Y podemos ver que, en el caso del hielo, esa diferencia de temperatura va a ser más grande.</p> <p>G4. En Biología nos referimos a termorregulación y era la capacidad que tenía el cuerpo para mantenerse en equilibrio, y estábamos diciendo que esa sensación de calor no sólo depende del medio interno sino del medio externo que en este caso sería el ambiente.</p> <p>G5. Cuando hablamos de calor si lo tomamos como una sensación térmica nos referimos a que un objeto está más caliente que el otro, pero tratamos de definir la palabra de manera más teórica y la diferencia con la temperatura, pero no logramos descifrar el enigma, el calor decíamos que tenía que ver con la energía y la parte molecular como la vibración de la molécula van aumentando por diferentes condiciones.</p>

Cuadro 16. Expresiones de los docentes. El calor como sensación térmica.

Nos parecía interesante que los docentes vincularan el calor con la sensación térmica y que a su vez señalaran que es una sensación comparativa, que depende de los objetos con los que se establece el contacto. Pues vemos en ello una confirmación de lo perceptual como eje de las organizaciones conceptuales aun en la vida adulta.

Ahora bien, vemos como G3 introduce en su discurso la diferencia de temperatura como causa de la sensación, y el grupo G5 manifiesta su intención de “tratar de definir de manera más teórica” y diferenciar calor de temperatura pero no logran resolver el enigma.

Notamos que las concepciones de los docentes están permeadas también por su formación, las definiciones interiorizadas emergen aun cuando hay conciencia de la falta de comprensión que manifiestan al no lograr diferenciar calor de temperatura. Esto nos lleva a la otra forma de referirse al calor como temperatura.

8.2.1.2 Temperatura

En estricto sentido los docentes no manifestaron que el calor fuera sinónimo de temperatura, más bien, manifestaron su dificultad para diferenciar una magnitud de otra.

G1. También decíamos que la distinción de temperatura se realiza a partir de lo caliente o frío, entonces no podemos decir que es la misma temperatura. La noción de calor y temperatura implica que se hagan relaciones con otras propiedades como la dilatación que podrían permitir realizar un análisis relacionado con el problema de estudio.

G2. Si pensamos el calor como una transferencia si se quiere decir de energía, estaríamos de pronto pensando también en que esa energía sólo se transfiere y nos surgen preguntas ¿si en [algún] caso los sistemas están en contacto? La diferencia entre un cuerpo y otro es mayor entonces estaríamos hablando en que esa ¿energía fluye como gradiente calórico o gradiente térmico?

G3. Frente a eso decimos que la sensación de calor puede presentarse al tacto cuando el objeto que estoy tocando está a una mayor temperatura que la nuestra; mientras que para entender esa sensación de frío el objeto que estoy tocando tiene una menor temperatura que la nuestra. Esa podría ser una forma de entender el significado que le asignados al calor y al frío.

G4. La discusión que teníamos al llevarlo a la biología de la fiebre. Nosotros como grupo y yo personalmente, en algún momento confundía temperatura y calor, pero ahorita llegábamos a la conclusión de calor como la energía y la temperatura, algo por ahora que nos permite medir la cantidad de calor. No sé si se pueda hablar de cantidades de calor. Definimos la temperatura como una magnitud con la que se puede medir la cantidad de calor.

Cuadro 17. Expresiones de los docentes. El calor como temperatura.

Se puede apreciar que reconocen que hay una distinción de magnitudes, los docentes ponen en juego sus saberes G1 dice, por ejemplo, “implica que se hagan relaciones con otras propiedades como la dilatación” sin embargo, no mencionan cuál es la diferencia, es para ellos como manifestó G5 un enigma. G2, por su parte se pregunta cómo expresarse “¿gradiente calórico o gradiente térmico?”. En este punto, vemos como G4 considera que la diferencia está al tener una expresión calor es energía y temperatura mide la cantidad de calor.

Nosotros reconocemos de la bibliografía referida a los problemas de estudio de lo térmico que una de las dificultades frecuente que señalan los docentes dentro de este campo de estudio, es la dificultad para diferenciar calor y temperatura. Una de las razones de las dificultades, como se puede apreciar en el capítulo cuatro, tiene que ver con que, en el desarrollo histórico de estos conceptos, grado de calor y grado de temperatura entrañan el mismo significado, y son efectos como el de los cambios de fase que pondrán en cuestión esta semejanza calor - temperatura.

8.2.1.3 Calor como energía y energía como transferencia

<p>G1. Calor yo lo asigno como transferencia de energía, si lo hablo como transferencia de calor estaría redundando.</p> <p>G2. En este sentido frente a significados de frío o caliente empezamos a darle cualidad a que cuando nos referimos a si está caliente es porque quizá ese cuerpo tiene una mayor energía que otro y ¿estaríamos relacionando esos términos de caliente o frío a una mayor o menor cantidad de energía o de transferencia de energía?</p> <p>G5. Frente a la pregunta que quién se calienta y quién se enfría decíamos que, por el conocimiento previo, el calor se cede, y siempre va a ser de lo más caliente a lo más frío y nunca va a ser viceversa el flujo de calor. El calor decíamos que tenía que ver con la energía y la parte molecular como la vibración de la molécula van aumentando por diferentes condiciones.</p>
--

Cuadro 18. Expresiones de los docentes. El calor como energía.

En esta fase exploratoria de las concepciones de los docentes es evidente que calor está asociado al término energía, o a la transferencia de energía, que sólo fue motivo de cuestionamiento para algunos. Afirmaciones como el calor fluye de lo más caliente a lo más frío coexisten con la vibración de la molécula, pues es la información más frecuente que circula en los libros de texto, en páginas web, en las aulas escolares.

8.2.2 Las sensaciones de calor y frío

Frente a las preguntas formuladas ¿Se puede determinar a partir de estas sensaciones si la varilla está caliente o fría? Respondieron que los sentidos nos engañan y que es necesario buscar otro elemento con el cual relacionar el objeto para poder medir. Se afirmó también que el cuerpo más caliente calienta al más frío, y el argumento principal es que hay transferencia de energía cuando hay diferencia de temperaturas. Respuestas que entraba en contradicción al hacer la pregunta ¿Si los sentidos nos engañan, cómo sabemos quién calienta a quién?

Como se puede apreciar en las concepciones de los docentes hay un reconocimiento general de los términos, de la dirección de la transferencia, se reconocen fragmentos de explicaciones teóricas: Hay diferencia entre calor y temperatura, la energía está relacionada con el calor, con la vibración de las moléculas, aparece la idea de equilibrio, se pregunta por gradientes calóricos o térmicos, se ponen en juego otros contextos de explicación como la termorregulación, o la descripción de la fiebre. Se manifiesta el rasgo sustancialista de la transferencia, en coexistencia con esos otros lugares de explicación.

Así se llegó a establecer una conclusión importante: es necesario tener varios sistemas para poder hablar de lo térmico, la comparación entre dos cuerpos o sistemas hacen posible identificar que ocurren cambios, si no se vinculan dos cuerpos diferentes con diferentes características térmicas es imposible diferenciar los cambios.

G3. Me parece importante la necesidad de comparar, no podemos hablar de la temperatura o de la sensación por la presencia del cuerpo, es necesario que nos permita hablar de su grado de calor por decirlo en esos términos al compararlos.

Cuadro 19. Identidad entre calor y temperatura expresado por un grupo de docentes.

Desde luego, este es un primer acercamiento de los docentes al análisis de las situaciones térmicas en nuestra clase, y evidenciamos dificultades para presentar argumentos. Se hace notorio que uno de los grandes problemas en la enseñanza-aprendizaje de las ciencias es que las personas aprendimos los conceptos teóricos de forma memorística, a veces solo mediante expresiones formales y sin proponer significado a las palabras usadas, sin comprender el origen del concepto o teoría asumida para argumentos.

Notábamos los esfuerzos por hacer definiciones de los términos que los llevaban a tautologías. Se define sobre la misma palabra. Se redundaba en las mismas expresiones para dar forma al concepto sobre el que se expresaban y se aprecia la dificultad para llegar a concretar una idea completa. Inicialmente se hace una afirmación para significar, sin embargo, se encuentra que hay duda en la afirmación.

En este momento inicial no esperábamos explicaciones elaboradas, solo estábamos identificando algún marco interpretativo inicial por ser un grupo de docentes en ejercicio: Expresiones usuales, uso de conceptos, ideas iniciales, formas de abordar una situación. Vimos que los docentes usaban las palabras calor y energía sin que pudieran explicitar qué

entendían por ellas. La palabra energía fue el centro de las expresiones para significar la palabra calor, sin que los docentes notaran que solo reemplazaban una palabra por otra sin ahondar en qué significaba para ellos, o mejor, suponiendo que cuando usamos la palabra energía parece que todos hablamos de lo mismo.

A través de este reconocimiento inicial de los rasgos de las concepciones de los estudiantes. Iniciamos entonces con la lectura de los fragmentos de Joseph Black.

Nuestras intervenciones en la sesión consistieron en dar las indicaciones, establecer los contextos de trabajo, moderar las intervenciones de los docentes, resaltar y resumir las ideas emergentes de los diálogos, hacer algunas preguntas para motivar la conversación.

Joseph Black nos pone inicialmente como unos objetivos, inicialmente determinar lo que quiere decir con la palabra calor en estas lecturas, explicar el significado del término frío y determinar la diferencia entre calor y frío. Mencionar algunos de los intentos que han sido hechos para descubrir la naturaleza del calor o para formarse una idea de cuál puede ser la causa inmediata de este y finalmente describir los efectos sensibles producidos sobre el calor sobre los cuerpos en que esto es comunicado o transmitido.

Como ustedes se dan cuenta por esta parte introductoria, esta discusión que tenemos la sesión de hoy está dirigida y organizada también por unas preocupaciones sobre el uso en nuestro lenguaje común utilizamos expresiones que se comparten en el lenguaje de la ciencia, como estas que estamos utilizando, calor, frío y temperatura, y vamos a mirar si esos significados que aparecen en lo cotidiano están también vinculados aquí y que nos permitan avanzar en la discusión.

Cuadro 20. Ejemplo de intervención docente moderadora del seminario.

La lectura de este documento generó en los docentes una actitud muy positiva, les pareció en general una lectura llamativa, llevó a que manifestaran que no habían leído anteriormente a ningún científico, aunque sí reconocen sus nombres, también imaginaban que leer a los científicos era entrar en la lectura de textos llenos de ecuaciones que les podrían resultar incomprensibles. Su sorpresa los lleva a pensar que hasta el momento no habían pensado que su aprendizaje de la ciencia podía hacerse leyendo a las y los científicos, porque hasta el momento, este aprendizaje se apoyó principalmente a través de libros de texto y actualmente a través de los videos que se obtienen por YouTube.

Después de estas primeras impresiones, se compartieron las comprensiones generales del texto. Resultó muy grato apreciar cuán rápidamente los docentes establecieron otra relación con respecto a los fenómenos, y sus propios conocimientos, comenzaron a formular sus propias preguntas y a explicitar que muchos de sus aprendizajes podían ser memorísticos, como veremos en el ejemplo:

G5. Bien interesante la lectura, nosotros hicimos una bitácora, decíamos sobre las preguntas con respecto a la lectura, decíamos que, para Black, el calor era el estado condición o propiedad de la materia que provoca una sensación, en ese sentido los cuerpos calientes transmiten calor y los cuerpos fríos reciben calor.

Pero, entramos a una discusión, unos pensamos que el calor no depende de la materia y otros pensamos que el calor depende de la materia, nos hicimos unas preguntas claves:

- ¿qué relación tiene el calor con la materia? ¿son cosas iguales o cosas diferentes?
- ¿todos los materiales tienen el mismo calor?
- ¿Cómo se transmite el calor?

Porque nos hicimos esa última pregunta, porque a veces caemos lo que dice el libro el texto, o sea el calor se trasmite por radiación, conducción y convección que es lo que uno se aprende de memoria. Pero cuando nos presenta en la lectura si hay una bomba de vacío y tenemos un cuerpo caliente, observamos que a pesar de que se tarda un poco más de tiempo que tuviéramos cede calor al aire, lo que más me impresionaba de la lectura, es que dicen que llega a un equilibrio al lugar donde se encuentra la bomba o sea toda la habitación, en ese sentido nos dejaba hartos interrogantes.

G4. Me parece muy extraño leer cómo en un momento se pensaba en el calor y el frío en términos de átomos, asumí siempre, que el calor era transferencia de energía y que así se construía el conocimiento y que era a partir de lo sensible. Para mí fue novedoso.

En cuanto al calor, Black hablaba sobre cómo se origina el calor, llámese en términos de vibración de partículas o de materia, mencionaba el sol como fuente principal desde donde todos los cuerpos después de recibir esa cualidad de calor, empieza a transmitirse a los otros cuerpos porque no es algo espontáneo ni propio de los cuerpos, sino que es necesario como ganarlo o atraerlo.

G3. Teníamos varias semejanzas a lo que decía Black en términos de que él hablaba de la propiedad que provocaba una sensación con respecto a algo y era lo que hablábamos al principio que hay que usar un tipo de comparación entre dos objetos y la forma en cómo se transmite, él decía claro en su texto que los cuerpos calientes transmiten calor y los cuerpos fríos reciben calor.

Cuadro 21. Primer acercamiento de los docentes con una fuente primaria.

A su vez, hubo más número de intervenciones, pues algunos consideraban que sus ideas tenían semejanza con las de Black. Principalmente señalaron la transferencia de calor desde los lugares de mayor temperatura a los lugares de menor temperatura. La lectura estuvo acompañada de nuevas situaciones que llevaron a los docentes a presentar frases más extensas y detalladas con mayor coherencia, como se aprecia en los ejemplos:

G1. Vemos que la transmisión de calor depende de cómo es el tipo de materia, no es la misma transferencia en un metal y un pedazo de madera. Y hay unos efectos que evidenciamos a partir del calor, como es la expansión, la fluidez el calor, la incandescencia etc. Y la dirección [de la transferencia] que sería de los cuerpos más calientes a los menos calientes, entonces eso explica como las corrientes de aire y el funcionamiento de los iglú, hay una parte que se calienta y se hace menos denso empiezan a subir y a medida que se suben vuelven y bajan y permiten que en el interior del iglú haya una circulación de aire que permite que haya una temperatura adecuada, y la nieve hace como aislante entonces eso permite que dentro tenga determinada temperatura para poder vivir

Cuadro 22. Descripción más detallada de razonamientos propios.

Ahora, los docentes afirmaban con certeza que era evidente que el calor fluye de los lugares de mayor temperatura a los de menor temperatura.

Se presentó una situación que podría servirnos como un contraejemplo (Anexo1. Pág. 299):

El iglú, se buscaba discutir por qué el iglú había sido construido como vivienda, siendo de hielo presta abrigo a sus habitantes, y expuesto a los rayos del sol o al calor interno no se derrite.

La pregunta tenía la intención de llevar a razonar sobre la cantidad de sustancia que está involucrada en los cambios. Notamos que los docentes podían señalar que el proceso de transferencia ocurría de los lugares de mayor a menor temperatura, pero no podían dar explicación de las causas por las cuales se mantenía a menor temperatura, entraron en varias ideas contradictorias.

Las respuestas frecuentes se presentaron de la siguiente manera:

<p>G1. Lo que permite que el iglú no se derrita es un adecuado flujo de las corrientes convectivas debido a que el calor empieza a fluir de la parte interior hacia la parte exterior, que es de donde se da el intercambio de energía. Sino se da adecuadamente el iglú se cae, o se derrite o no funciona.</p> <p>G3. Las corrientes convectivas irían hacia arriba, una vez se hace la transferencia de energía con los bloques de hielo se calienta la parte superior, sucede que el suelo que es el que tiene la menor temperatura en esos momentos genera un flujo a través del mismo iglú, y por eso la importancia del grosor, la transferencia va a suceder hacia el suelo por las paredes y ese flujo se va a ir hacia afuera.</p>
--

Cuadro 23. Contradicción en la dirección del flujo de calor.

Después de discurrir con diferentes uno de los participantes propuso una respuesta:

<p>G2. Hay que considerar no solamente el iglú sino también lo que está pasando fuera del iglú; significa en ese caso, que a pesar de que ese flujo de calor que lleva al derretimiento del iglú, pero la temperatura de afuera sigue siendo tan baja que contrarresta lo que sucede dentro del iglú. Esa pérdida de calor es tal que vuelve a congelarse, entonces por eso el iglú no termina por derretirse.</p>
--

Y finalmente los docentes, en ese momento, no lograron identificar la cantidad de sustancia, masa, involucrada en el sistema como importante en la transformación. Estas situaciones derivaron sí, en preguntas propias que se convirtieron para ellos en focos de atención.

Los docentes se interesaron por saber ¿Desde qué momento se puede afirmar que un cuerpo es más frío o más caliente?

Lo que expresaban era: Si tengo un vaso frío y otro a temperatura ambiente, sabemos que el que está a temperatura ambiente está más caliente que el que está frío, pero ese vaso está frío sólo si lo comparamos con uno que tenga café caliente, para el cual los otros dos están fríos, pero no sabemos cuánto.

- Alguien responde, pero para eso están los termómetros.

- Otra persona pregunta, profesora ¿Uno puede encontrar hielo más frío? O sea, uno sabe que el hielo tiene cero grados de temperatura, pero ¿cómo se sabe si hay hielo más frío que el hielo?

Todas estas fueron conversaciones que necesitaban ser resueltas. Por ejemplo, al identificar que la sensación térmica está determinada por los materiales, algunos propusieron desarrollar actividades que pudieran mostrar cómo se comportaban esos materiales al calor, otros señalaron que era necesario identificar los puntos de congelación o solidificación de las sustancias.

En este punto, se les pregunta si han construido o han identificado cómo se construye un termómetro y cómo funciona o cómo se calibra un termómetro. Ninguno de ellos ha construido termómetros. Así que se les proponen estas preguntas como parte de su actividad. (Anexo 1. Pág. 309)

8.2.3 El problema de los termómetros y medida de la temperatura

La construcción de termómetros resultó para los docentes una actividad llamativa, pues los llevaba a observar algunas cualidades de las sustancias como la dilatación y contracción en relación con la temperatura, en materiales diferentes al termómetro de mercurio. Por otra parte, empezaron a analizar los puntos de fusión y ebullición estableciendo comparaciones para las sustancias utilizadas, eje central de este despliegue experimental.

Recordemos que no había condiciones de laboratorio, y ellos realizan las actividades en sus casas, con los materiales que tienen al alcance. Se les indicó que utilizaran 4 sustancias diferentes: agua, agua con sal, alcohol, agua 75% y alcohol al 25%.(Anexo 1. Pág.310 -311)

A través de las fotografías presentadas por los docentes se intenta hacer evidente que esta actividad tuvo diferentes etapas: Identificar que la dilatación en los líquidos es diferente, observar que unos se rebosaban rápidamente en contacto con agua hirviendo, que en otros (alcohol) la sustancia se dilataba y evaporaba, que a pesar de iniciar con la misma cantidad de sustancia y en el mismo nivel los lugares de referencia se modificaban. Observaciones que involucraban identificar puntos de evaporación, congelación, y el calentamiento de la sustancia termométrica.

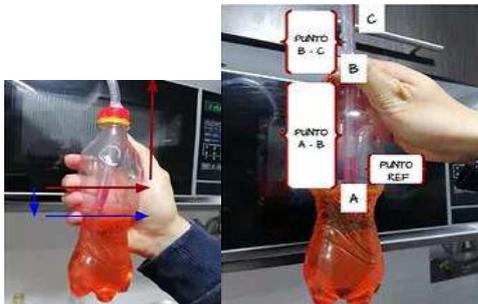
 <p>Nota: Primeras organizaciones de los termómetros en las que los docentes hacen comparaciones entre las sustancias.</p>	<p>G1. El alcohol apenas se ponía en agua se rebosaba rápidamente, en el del 25% no alcanzaba a rebotarse, la columna era de 45 cm que alcanzamos a hacer con los dos pitillos. Alcanzó a llegar a los 38 cm en un tiempo de 1,37 min. En ese observé que se llenaba de vapor. Después de pasado un tiempo empezaba a llenarse de vapor y pese a que después lo pusimos en el hielo, el vapor quedo atrapado en lo hermético que estaba. Con agua fría entonces, alcanzó a disminuir a los 2.49 segundos hasta donde estaba el alcohol.</p>
<p>Nota: Primeras organizaciones de los docentes donde introducen una escala predeterminada dividida en partes iguales. No se han hecho hasta el momento cuestionamientos sobre cómo seleccionar los puntos inferior y superior de la escala.</p>	<p>G2. Nuestro grupo realizó la organización de las situaciones en el experimento de los termómetros, realizamos una breve descripción. Nos encontramos con varias dificultades en la construcción del termómetro, cuando estaba hirviendo el agua y poníamos el alcohol era muy volátil y reacciona en forma más rápida en comparación con las otras sustancias. El alcohol sobrepasaba muy rápido la medida del largo del termómetro, nos detuvimos en intentar determinan la cantidad de sustancias para que no se expandiera demasiado. Allí entendíamos que el calor expandía este líquido, e intentamos generar otras condiciones para ajustar un nivel inicial al interior del tubo del termómetro. A temperatura ambiente, el nivel del alcohol dentro del tubo interno del termómetro se encuentra al mismo nivel de toda la sustancia que se encuentra afuera.</p>



Nota: Dos montajes sobre el termómetro, en el primero perciben la influencia de la dilatación del aire y modifican el modelo.

G3. Mi termómetro era con agua y sal, cuando lo sumergí en agua caliente subió bastante, con las recomendaciones de aumentar el pitillo no alcanzó a rebozarse tan rápido y hubo un punto que alcanzó la altura del pitillo, y en temperatura ambiente se demora mucho en descender el líquido, porque el líquido que está en el interior de la botella está aún caliente. En agua con hielo, lo que vi fue que, bajo rápido, pero se mantuvo en un momento y ya no bajó más.

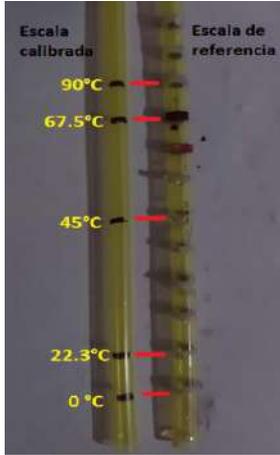
En el primer video que subí, subía mucho más lento, el agua que está caliente casi en punto de ebullición está en un nivel bajo al nivel que hace contacto con el agua azul, se dilata el agua; en el otro video que asciende más rápido el área de contacto está en contacto con el agua y con el aire, el nivel está mucho más alto, eso quiere decir que hay una dilatación del aire, el aire se empieza a expandir.



Nota: Esta imagen representa el proceso de organización de los puntos fijos. No se han percatado que en el termómetro aire y agua se dilatan de modo que los puntos se van modificando en cada ensayo.

G.4 Nosotros también observamos en la parte del alcohol que cuando le añadimos al agua externa sal, disminuía la velocidad con que descendía el agua. Lo mismo sucedía con agua fría, al agua con hielo, disminuía la velocidad de descenso.

Podemos considerar, al menos, para el fenómeno a observar, que el termómetro constituye un sistema cerrado; no hay intercambio de materiales con el medio. El cuerpo o sustancia a mayor temperatura cede calor al cuerpo o sustancia de menor temperatura. Este incremento tiene efecto modificando sus propiedades (longitud, área, volumen). "Dilatación". Si consideramos al termómetro como sistema cerrado, y la variación en el volumen, entonces el calor también tiene influencia sobre la densidad de las sustancias.

 <p>Nota: Esta imagen representa el final del proceso cuándo ya se ha construido una escala termométrica. Para esta escala los docentes usaron el método de las mezclas, combinando cantidades iguales de sustancia a diferentes temperaturas, que se presentará más adelante.</p>	<p>G5. En estos días, tuvimos una discusión muy ardua, al final de acuerdo más que con la teoría sino con nuestros resultados y condiciones en que se realizó el experimento, consideramos es que el mejor termómetro es el del agua, descartamos el del alcohol, porque al igual que los compañeros esa sustancia se rebotaba y lo asociábamos con el coeficiente de dilatación del alcohol que es muy alto.</p> <p>Leíamos la historia de los termómetros y como fueron construidos, y mirábamos que antes que fuera el termómetro de mercurio se utilizaba el alcohol. Pero, para nuestro experimento no fue funcional. Revisamos primero la temperatura externa que utilizamos en el caso del agua de ebullición es 92 grados en la altura de Bogotá, decíamos también que la dilatación del alcohol era causa o tenía una relación con el punto de ebullición del alcohol que era muy bajito.</p> <p>De acuerdo a la experiencia realizada de la calibración del termómetro en donde la escala de temperatura obtenida en el agua pura no es simétrica (imagen 1), se pudo asegurar que el agua pura tiene un comportamiento de dilatación anómalo siendo menos lineal que el agua con sal, entonces parece tener ciertas ventajas utilizar este último termómetro al tener una dilatación más uniforme.</p>
---	---

Cuadro 24. Construcción de termómetros líquidos.

Al principio, la mayoría de los docentes prestaron atención a la velocidad de movimiento del líquido dentro de la botella, si la elevación de nivel era rápida o lenta, mostrando que su análisis de los fenómenos está enfocado a involucrar el tiempo como la variable más importante, para ellos era muy importante determinar en cuánto el tiempo la sustancia subía o bajaba dentro de los termómetros.

Sin embargo, omitieron las observaciones correspondientes a la estabilización de los niveles del punto máximo y mínimo de la dilatación en relación con la fuente caliente y con la fuente fría. Fue necesario inducirlos a estas relaciones, pues no identificaban que estos puntos son parámetros importantes para el establecimiento de una medida. Algunos en reemplazo, utilizaban un termómetro externo y es en relación con este termómetro que definieron que el termómetro marcara una medida mínima [aunque no era cero], una medida máxima en la ebullición y las medidas intermedias de la escala a través de la cual hacen las comparaciones.

Como se aprecia en el cuadro, los docentes del grupo G3 identificaron que la expansión del aire dentro de los recipientes también afectaba la expansión del líquido dentro de los tubos. A través de esta observación, el grupo en general readaptó sus termómetros para eliminar aire dentro de ellos y obtener medidas únicamente de la dilatación de los líquidos.

Pensar en punto máximo y mínimo se convierte en un momento importante de la actividad. No se hace desde el principio, pues su observación está dirigida a otras características, como que no se rebose el líquido, o que se mueva rápido o lento. Es después de varias repeticiones, empiezan a darse cuenta de la necesidad de establecer puntos fijos. Por otra parte, empiezan a ver otros efectos, como los cambios en esos puntos a través de mezclas con sales o a causa de la altura o presión. Su vocabulario va expresando que los puntos de ebullición dependen de estos factores, que la sal modifica los puntos de fusión y ebullición de las sustancias. Este vocabulario que ahora se pone en juego, es resultado de sus consultas y reflexiones que no se dieron durante la sesión sino en la reorganización de los experimentos, y en sus indagaciones sobre cómo hacer termómetros.

8.2.4 La búsqueda de una escala de medida

Los docentes señalan la posibilidad de medir a través del termómetro hecho con agua que ha sido para ellos más estable que los otros, sin embargo, no confían en que ese termómetro sea un indicador de las variaciones térmicas al no ser una medida estandarizada como aquella del termómetro externo que han venido utilizando. En otras palabras, sólo dan crédito al resultado final de la ciencia y no al proceso de construcción de la magnitud. Empiezan a buscar otras fuentes bibliográficas que amplíen su conocimiento en relación con los aspectos históricos, y con las variables involucradas en el proceso.

Este ejercicio de construcción de la medida, sabemos que no es simple, requiere de mucha paciencia, y ya los docentes preguntaban si no era más fácil que diéramos indicaciones precisas en lugar de actuar bajo prueba y error. Les señalamos, que considerábamos mucho más importante que ellos cualificaran el proceso a que tuvieran un valor determinado.

Ahora bien, después de haber adquirido cierta práctica y familiaridad con la actividad en las repeticiones y modificaciones, la forma de intervenir de los docentes empezó a ser cada vez más confiada. Sus intervenciones empezaban a involucrar razonamientos que se habían discutido, como la direccionalidad del flujo de calor, intentando hacer coherencia con sus

modelos explicativos anteriores. El siguiente ejemplo, muestra cómo se procede a dar una explicación del comportamiento de la sustancia, en términos de la teoría conocida, la cinética molecular, con las nuevas observaciones.

G5. El ascenso y descenso de las diferentes sustancias por el pitillo dan cuenta del fenómeno de dilatación, el cual ocurre por las transferencias de calor que se dan entre las sustancias del exterior e interior. De este modo cuando la sustancia del exterior está a mayor temperatura que la del interior de la botella se da una transferencia de calor desde afuera hacia adentro, esto sucede porque las moléculas que conforman las sustancias se mueven a una mayor velocidad provocando que ésta se expanda y ascienda por el pitillo, además en algunas moléculas el movimiento es tanto que pasan de estado líquido a gaseoso (Imagen izquierda). En caso contrario, cuando la sustancia del exterior está a menor temperatura que la del interior el calor es transferido desde la sustancia dentro de la botella hacia afuera, ocasionado que el movimiento de las moléculas disminuya y se observe un descenso de la sustancia al interior del pitillo (Imagen derecha)



Cuadro 25. G5. Interpretación del flujo de calor en los procesos de dilatación y compresión de sustancias termométricas.

Nos apoyamos en un fragmento de James Clerk Maxwell. Theory of the Heat (1899), para centrar la discusión en la medida de la dilatación como medida del grado de calor en los primeros estudios termométricos. Ilustramos otro tipo de medidas de la dilatación presentando el dilatómetro de Musschenbroek (1731), para mostrar aspectos de las variaciones de la longitud como medida de la acción de calor.

Aquí empezaron a aparecer como formalizaciones las proporciones que los estudiantes hacían entre cuánto se dilató su termómetro y el rango de temperatura que esto significaba. Reconocemos que se indujo a los estudiantes a que pensarán en la linealidad de la dilatación. Esto se evidencia en el (Anexo 1. Pág 313) por lo cual inicialmente llamaron: establecer la escala, a identificar los puntos máximo y mínimo y después dividir en partes iguales. De acuerdo a las ideas que les presentamos sobre dilatación lineal.

Estas expresiones revelaban que la idea de equilibrio, estaba latente, mientras su preocupación seguía siendo cómo hacer la escala del termómetro. Veamos la intervención del grupo G3:

G3. El termómetro se dilata cuando entra en equilibrio. Elaboramos dos montajes experimentales teniendo en cuenta la guía, pero realizamos otros dos montajes que nos permitieran tener mejores resultados y establecer una escala que vamos a mostrar más adelante, tenemos en cuenta las mismas soluciones del grupo anterior: Agua, agua y sal, alcohol, y agua y alcohol.

Escala con termómetros montaje alternativo

Imagen 15. Determinación de los puntos máximo y mínimo G4.

Se resalta que este grupo no hace uso de la diferencia de temperatura frente a la transferencia: El termómetro se dilata cuando entra en equilibrio (Esta significando quizá que se dilata cuando entra en contacto). Sin embargo, en medio del desarrollo de estas actividades, algunos de los conceptos comentados comienzan a ser resignificados por las preguntas emergentes de los docentes. Las hemos ubicado en la secuencia didáctica (Anexo 1. Pág. 317) como parte de las actividades, pero fue propuesta por uno de los equipos de trabajo, que en sus consultas, le llamó la atención la siguiente gráfica que representa las variaciones de temperatura en relación con el calor suministrado por una fuente constante.

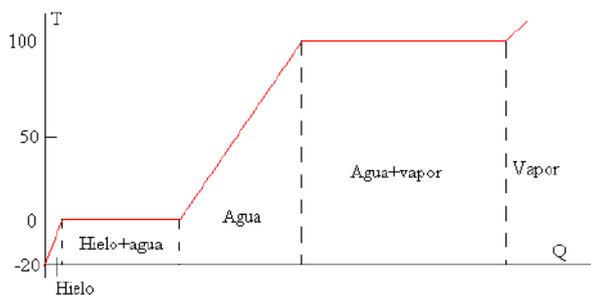


Imagen 16. Gráfica de cambios de temperatura del agua en función del Calor
(<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/fusion/fusion.htm>).

G3. Nosotros hicimos la discusión y definir evaporar y bullir no fue tan sencillo. Frente a la gráfica que nos muestra la temperatura, vemos los cambios de estado y nos damos cuenta que cuando el calor está aumentando la temperatura no lo hace. Ahí hay unas condiciones que tenemos que pensar si la temperatura es una medición de calor. Y ¿Cuáles son las diferencias o similitudes del calor?, nos nacen otras preguntas ¿Cuáles son esas condiciones para que se de ese cambio de estado? ¿A qué temperatura o calor se evapora el agua?

Teniendo en cuenta como esas preguntas, la gráfica, toda la situación que presentamos podemos generar algunas consideraciones frente a lo que se nos preguntaba en la última parte del ejercicio. Pusimos una discusión frente a una situación experimental ¿Qué sucede cuando tengo una olla que está hirviendo? Según lo que nos dice la gráfica si hay un sistema de líquido gas, deberíamos estar a una temperatura a 100 grados centígrados. Aun cuando han pasado 20 minutos y no se ha dejado de suministrar calor entonces ¿es mayor el calor? ¿la temperatura sigue siendo lo mismo? ¿Qué paso con ese calor?

Cuadro 26. Reflexión sobre la diferencia entre calor y temperatura a través de la gráfica T vs Q.

Los docentes en general, manifiestan que les ha ayudado a diferenciar calor de temperatura, el hecho de identificar que en los cambios de estado (fase), la temperatura permanezca constante aun cuando hay presencia de la acción del calor. Es interesante que ya no aparece, para este caso la afirmación “el calor es energía y la temperatura es las moléculas moviéndose al interior del cuerpo” como se referían a esto al principio de las sesiones.

G2. A nosotros la construcción de termómetros nos ha hecho pensar que no todo el calor puede ser temperatura porque en contacto con agua hirviendo la sustancia no aumenta más su volumen y en contacto con hielo no baja más su volumen. Entonces de ahí la pregunta ¿Qué es lo que ocurre en los cambios?

Cuadro 27. Diferencia entre Calor y Temperatura a través de la construcción del termómetro.

Es ahí, a partir de estas conclusiones tan significativas, los docentes empiezan a valorar más esta actividad experimental que les ha demandado reflexionar sobre muchos aspectos. Y es notorio para nosotros que pese a que los docentes, en algún momento de su proceso educativo han abordado problemáticas sobre lo térmico, hasta ahora establecen conclusiones que les ayudan a resignificar las expresiones calor y temperatura. Observando en su proceso que la observación detallada y no la definición establecida o estándar es la que les conduce a una diferenciación entre magnitudes, una práctica situada en los cambios que ayuda a superar una de las problemáticas frecuentes que habíamos encontrado en la literatura, y que los docentes habían manifestado al inicio de las sesiones.

Empezamos a hablar del termómetro, de las sustancias que se expanden o contraen por acción del calor, de la acción de la sal para disminuir el punto de fusión y aumentar el punto

de ebullición, desde los procedimientos, etc. Y se señala que algunas de estas observaciones son recogidas y analizadas en la teoría del calor de Lavoisier y De Laplace, se comenta que con lo que hemos hecho podemos abordar la lectura.

Razón por la cual nos parece oportuno introducir el fragmento de Lavoisier y Laplace (Anexo 1. Pág. 319). Lavoisier es muy reconocido en el campo de la química, por lo que genera predilección en este grupo de estudiantes de química.

A través de la lectura los docentes identifican que los autores se hacen el mismo cuestionamiento que había aparecido tiempo atrás en la clase: “¿Se puede encontrar hielo más frío? O sea, uno sabe que el hielo tiene cero grados de temperatura, pero ¿cómo se sabe si hay hielo más frío que el hielo?”. Identifican que en la construcción de los termómetros que hicieron Lavoisier y Laplace, ellos tuvieron que preguntarse cómo sería la escala por debajo del punto de fusión y por encima del punto de ebullición, y observaron cómo esos puntos bajaron cuando experimentaban agregando sales. Los docentes reconocen en la lectura que muchas de sus acciones también las hicieron los científicos. Y detallan que ya tienen una idea para graduar la temperatura de sus termómetros. Además, de alguna manera queda resuelta una parte de la pregunta, si, si es posible encontrar grados más fríos por debajo del hielo a temperatura cero.

G4. En términos generales, hicimos el uso del método de las mezclas para la calibración de los termómetros que habíamos diseñado hace unas cuantas semanas, y también utilizamos el método de mezclas en la elaboración del calorímetro que nos permitió elaborar una comparación. Las mezclas de las sustancias las hicimos con diferentes proporciones de agua y utilizamos unas mezclas para calorímetro y unas mezclas para termómetros que en este caso fueron los caseros, realizamos cuatro experiencias con ambos montajes.

Para la construcción del calorímetro, le hicimos algunas modificaciones pensando en la sesión de hoy y teniendo en cuenta una serie de variables, que interactuaran sólo los dos cuerpos que estaban al interior del calorímetro. Utilizamos dos latas de cerveza, una para contener el líquido otras para contener los cuerpos de hielo, algo parecido a lo que sugería el texto de Lavoisier. De inicio lo tratamos de medir con un pirómetro, pero no fue tan eficiente.

La base exterior era plástica y tuvimos en cuenta las propiedades de los materiales, pensando en que tuvieran conducción térmica para que pudieran interactuar y que existiera esa transferencia de energía. Lo que buscamos era realizar una comparación en términos de la cantidad de hielo derretido y una relación entre la masa, la temperatura y el calor; y el tiempo que también lo tomamos como constante.

Cuadro 28. Criterios de calibración de termómetros y construcción de calorímetros propuestos por los docentes.

Sesiones anteriores habíamos comentado, que hasta ese momento, los docentes no habían notado la importancia de la cantidad de sustancia, caliente o fría, en los procesos de

transferencia de calor (Recordemos la situación del Iglú). Ahora, casi todos los grupos tomaban en consideración, esto que llamaron relación entre la masa, la temperatura y el calor.

Reconocemos que no fue una relación propuesta de forma completamente espontánea, como el caso de la idea de dilatación lineal tampoco lo fue, la relación emerge de la comprensión de los textos y los ejemplos cotidianos que se proponen. Ahora bien, no consideramos que el objetivo de enseñanza, por ser constructivista, consista en que todo el vocabulario científico que se trabaja en el aula emerja espontáneamente de los sujetos. Lo que nos parece importante, es que esas formas de elaboración, ya desarrolladas en la historia, sean significativas al ponerlas en discusión a propósito de los problemas térmicos que se desarrollan. Nos parece muy positivo que se ponga en juego la relación porque con ella se está haciendo una formalización, aquella que vincula variables.

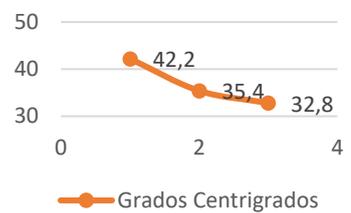
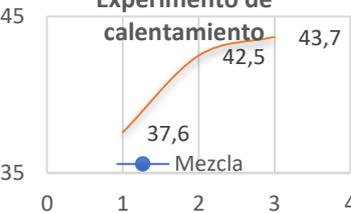
A mayor masa menor temperatura, para una misma cantidad de calor, son expresiones que aparecen y que muestran ese establecimiento de las relaciones entre las variables.

8.2.5 El método de las mezclas y las medidas calorimétricas

Nuestros docentes han identificado en las fuentes primarias que, a partir del método de la mezclas, pueden aislar térmicamente, mezclar iguales cantidades de sustancias y obtener datos intermedios, solo si se mezcla la misma cantidad de sustancia a temperaturas diferentes. Y cada grupo de trabajo empieza a organizar sus propias actividades calorimétricas. En general, presentaron ejercicios experimentales normales, o sea habituales en los ejemplos de medición de calores específicos.

Tres de los grupos se interesaron por proponer acciones distintas: 1) Aquellos que estaban muy comprometidos en construir su escala del termómetro, 2) aquellos que querían saber si cuando se pone un trozo de hielo sobre un material, el hielo se descongela más rápido o más lento que cuando se pone sobre otro, y 3) aquellos que querían saber qué ocurría si se mezclaba cada vez, partes iguales de agua caliente o agua fría. A continuación se presentan en el cuadro algunos de los instrumentos usados y calorímetros elaborados por los docentes para sus experimentos exploratorios:

Grupo	Instrumentos usados y/o contruidos	Actividad propuesta y desarrollada por el equipo										
G1		<p>Este equipo decide hacer las medidas calorimétricas estandarizadas, es decir, determinan la cantidad de masa de un sólido, en este caso, un alimento y clavos metálicos, y los depositan en agua hirviendo dentro del calorímetro para determinar con el termómetro la temperatura final de la mezcla.</p> <p>Reconociendo por tablas que el calor específico del agua en calorías es $1 \text{ cal /g}^\circ\text{C}$, proceden a estimar los calores específicos de los objetos seleccionados.</p> <div data-bbox="957 819 1337 1012" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">Resultados</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$m_A = 200 \text{ g}$</td> <td style="padding: 2px;">$T_1 - T_e = 83^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C} = 62,7^\circ\text{C}$</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$m_{Fe} = 67 \text{ g}$</td> <td style="padding: 2px;">$T_e - T_2 = 23^\circ\text{C} - 20,3^\circ\text{C} = 2,7^\circ\text{C}$</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$T_{AV} = 20,3^\circ\text{C}$</td> <td style="padding: 2px;">$c_{eFe} = 0,148 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$T_{AC} = 83^\circ\text{C}$</td> <td style="padding: 2px;">$c_{TFe} = 0,107 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$T_e = 23^\circ\text{C}$</td> <td></td> </tr> </table> </div>	$m_A = 200 \text{ g}$	$T_1 - T_e = 83^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C} = 62,7^\circ\text{C}$	$m_{Fe} = 67 \text{ g}$	$T_e - T_2 = 23^\circ\text{C} - 20,3^\circ\text{C} = 2,7^\circ\text{C}$	$T_{AV} = 20,3^\circ\text{C}$	$c_{eFe} = 0,148 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$	$T_{AC} = 83^\circ\text{C}$	$c_{TFe} = 0,107 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$	$T_e = 23^\circ\text{C}$	
$m_A = 200 \text{ g}$	$T_1 - T_e = 83^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C} = 62,7^\circ\text{C}$											
$m_{Fe} = 67 \text{ g}$	$T_e - T_2 = 23^\circ\text{C} - 20,3^\circ\text{C} = 2,7^\circ\text{C}$											
$T_{AV} = 20,3^\circ\text{C}$	$c_{eFe} = 0,148 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$											
$T_{AC} = 83^\circ\text{C}$	$c_{TFe} = 0,107 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$											
$T_e = 23^\circ\text{C}$												
G2		<p>Deciden identificar que tanto tiempo tarda en derretirse una cantidad determinada de masa de hielo, que se pone sobre dos superficies diferentes. “Se propone poner dos placas de materiales diferentes (metal y vidrio) del mismo volumen a calentar hasta una misma temperatura, posteriormente colocar un cubo de hielo en cada una y registrar el tiempo de fusión. “Este grupo también construyó su calorímetro con la intención de organizar las escala del termómetro a través del método de las mezclas.</p>										
G3		<p>Diseñan el calorímetro como se aprecia en las fotografías, es mucho más elaborado que el del primer equipo. Consideran que deben hacer un aislamiento del entorno lo suficientemente eficiente para tomar las medidas de las temperaturas de las mezclas que les servirán para graduar la escala del termómetro.</p>										

G4	 <p>MATERIALES</p> <p>Termómetro</p> <p>Aluminio</p> <p>Lata de aluminio</p> <p>Pedacitos de poliestireno (recubiertos o papel aluminio)</p>	<p>Se empeñan en construir un muy buen aparato calorimétrico, y su objetivo es medir calores específicos.</p> <p>Aquí su nueva organización del calor. “La manifestación del calor es observable en tanto hay variaciones de temperatura de los cuerpos que interactúan. El calor, aunque posiblemente cuantificable, no resulta de una medición directa, sino más bien de la relación de diferentes magnitudes que varían como efecto del calor en los cuerpos que interactúan.”</p>																
G5	 <div data-bbox="558 712 925 974"> <p>Experimento de enfriamiento</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Trial</th> <th>Temperature (Grados Centigrados)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>42,2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>35,4</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>32,8</td> </tr> </tbody> </table> </div> <div data-bbox="558 996 925 1254"> <p>Experimento de calentamiento</p>  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Trial</th> <th>Temperature (Mezcla)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>37,6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>42,5</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>43,7</td> </tr> </tbody> </table> </div>	Trial	Temperature (Grados Centigrados)	1	42,2	2	35,4	3	32,8	Trial	Temperature (Mezcla)	1	37,6	2	42,5	3	43,7	<p>El grupo hace procesos de calentamiento y enfriamiento por adición de cantidad de sustancia a diferente temperatura. Así: “Hemos tomado 6 partes de agua de la misma cantidad, y pusimos a hervir una de las partes, después agregamos la misma cantidad a temperatura ambiente, y después lo mismo agregamos otra cantidad, y así, pero a la siguiente mezcla, la cuarta ya el termómetro no funcionó. Entonces hicimos el mismo procedimiento con agua fría, le empezamos a agregar agua caliente en la misma cantidad, a la cuarta vez tampoco el termómetro funcionó. Eso nos mostró que se parecen aunque no son exactos los mismos grados de calentamiento, no son los que hay para el enfriamiento. Y nos dieron las siguientes tablas.”</p>
Trial	Temperature (Grados Centigrados)																	
1	42,2																	
2	35,4																	
3	32,8																	
Trial	Temperature (Mezcla)																	
1	37,6																	
2	42,5																	
3	43,7																	

Cuadro 29. Actividades experimentales propuestas por los docentes.

Consideramos que, al ser ejercicios exploratorios estaba bien que ellos mismos decidieran en qué aspecto de su preferencia querían desarrollar las experiencias. Es notorio en esta fase de las actividades que los docentes no tienen todos los mismos intereses, eso supone reflexiones encaminadas en diferentes aspectos.



Imagen 17. La escala termométrica construida a través del método de las mezclas.

El G2 por ejemplo empieza a indagar sobre la conductividad térmica de las sustancias, pues para ellos el tiempo que tardan los procesos en desarrollarse indica cuán intensos son los cambios, si se tarda poco tiempo en ocurrir la transferencia de calor es porque la cantidad de calor es muy grande, y viceversa, si se tarda mucho es porque la intensidad de la acción es poco. Nos parece una estrategia cognitiva interesante que los otros grupos no han manifestado, que no propusimos dentro del análisis pero que es significativa en la organización de la intensidad del calor, o del cambio en general

El G3, se finalmente organiza su escala de temperatura. Este grupo realmente dedicó muchísimo tiempo a hacer comparaciones entre los termómetros. Y buscaron graduar su escala usando cantidades iguales en masa de agua y hielo durante la mezcla.

El G5. Después de presentar sus curvas de calentamiento y enfriamiento solo señalaron que había sido muy interesante para ellos ver que en el aumento de temperaturas no hubiera tanta variación como en el caso de su disminución, tenían un termómetro de rango muy pequeño, que les permitiera explorar más. Pero, al igual que otros grupos, ahora eran muy conscientes de la que la cantidad de masa está implicada en los resultados de temperatura, durante las mezclas.

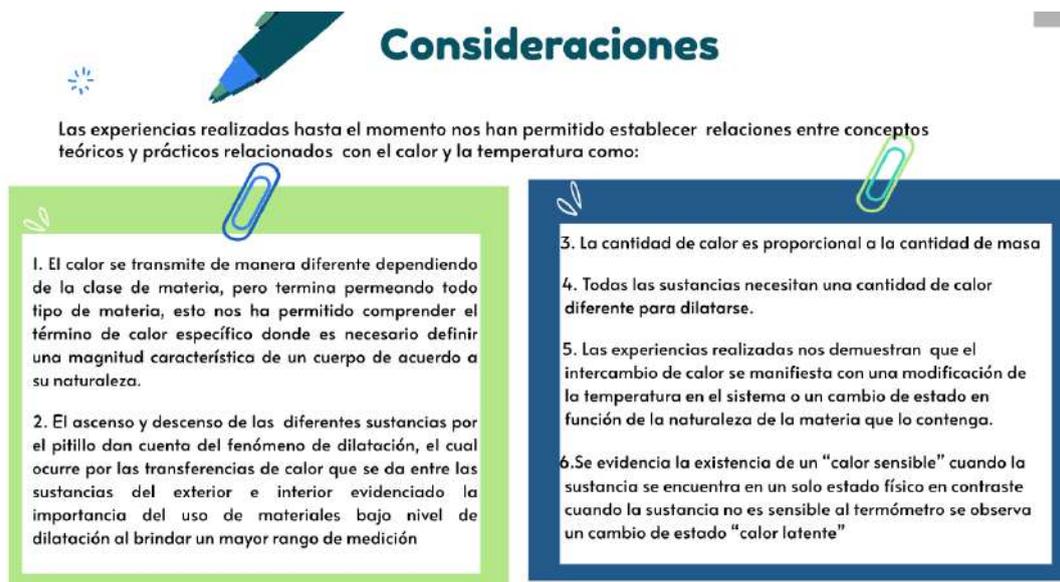


Imagen 18. Conclusiones de un grupo de docentes que refleja rasgos de miradas sustancialistas.

En este ejemplo de conclusiones se puede observar que el equipo se expresa asignando características de fluidez al calor, como “el calor permea todo tipo de materia”⁴⁷. Ésta es una observación que resalta Besson (2014):

Sometimes heat and cold are both considered as substances that can be transferred from one body to another. Students mainly reason in terms of object properties instead of processes and may attribute to the materials the quality of being or keeping warm or cold. (Besson, 2014)

Frecuentemente veíamos que el grupo de docentes alternaba vocabulario, algunas veces como si estuvieran pensando en los procesos (este es el mismo grupo que ingresa el tiempo como variable para expresar la intensidad de los cambios), y otras veces como en este ejemplo, que enunciaban usando características sustancialistas. Al respecto, Árcia y Guidoni

⁴⁷ También señalar que un bajo nivel de dilatación implicaba un buen rango de medición, afirmación que pudo ser simplemente una equivocación en el lenguaje pues en sus expresiones verbales fueron consistentes.

(2008) indican que, en las estrategias para formalizar, podemos cambiar o sobreponer estrategias cognitivas que nos conducen a tener diferentes miradas:

Per esempio, si può guardare ai fatti per organizzazione formale (grammatica e sintassi). In particolare, si può guardare ai fatti per organizzazione formale discreta: ci si serve, allora, dei nomi e dei numeri, degli attributi e delle caratteristiche, delle immagini e dei gesti, delle classi e dei campioni. Si può guardare ai fatti per organizzazione formale continua: ci si serve, allora, delle graduazioni e delle modulazioni, delle sfumature e delle trasformazioni progressive, delle mescolanze e delle sovrapposizioni, dei cambiamenti di attributi e variabili, dei movimenti e delle prospettive. Si può, ancora, guardare ai fatti per organizzazione dei significati (semantica), per regole o regolarità che legano tra loro frammenti diversi dell'accadere (in forma discreta e/o continua) fino a caratterizzare quello di cui ci importa.

Ma sempre c'è sovrapposizione e confronto dei diversi modi di guardare: anche se la scelta schematica di uno è dominante momento per momento. allo star pari per peso...» è profondamente intrecciata, senza esserne presupposto né conseguenza, alle constatazioni formali che organizzano le stesse osservazioni. (Arcà & Guidoni, 2008, pág. 118)

Para nosotros este fue un muy buen ejemplo de superposición de estrategias para describir acciones que representan cambios, en algunos momentos podemos enfocar la atención cuando los cambios ocurren en el tiempo, y en otros momentos los cambios no son pensados a través de procesos, como expreso Besson, sino que están centrados en aquello que ocurre específicamente a las sustancias. Efectivamente, los procesos de conductividad como la conductividad térmica o eléctrica implican identificar el cambio de una cantidad en función de la variación del tiempo, situación que no ocurre en esta mirada específica de los cambios en las mezclas. En este sentido, podríamos señalar que también en la física se usan diversas estrategias cognitivas.

8.2.6 La presión, el volumen y la temperatura, variables térmicas

Después de haber trabajado con los calorímetros, queríamos introducir a los docentes en una problemática que la literatura resalta como un frecuente problema de comprensión que dificulta describir los cambios en la máquina térmica:

Work is generally not connected to temperature changes. The prevalent idea is that only heat exchanges can cause an increase or decrease in the temperature of an object. This idea also survives among university students and can also be found among science teachers. (Besson, 2014)

Propusimos, entonces, una serie de actividades con jeringas (Anexo 1, pág. 338), algunas de las cuales circulan en videos de YouTube, pero que vinculamos con preguntas para que los docentes pudieran describir y representar los cambios. Uno importante era el calentamiento en la jeringa a causa del aumento de presión y de la disminución en el volumen de aire. Dentro de la jeringa se alcanza a hacer evidente que las paredes retienen alguna pequeña cantidad de condensación de vapor. También se hace sensible la disminución de la temperatura con la expansión.

A continuación, presentaremos ejemplos de la organización secuencial de las actividades realizadas por el grupo G3.

Actividades Experimentales

Primera Experiencia

Jeringa

Agua

El percibe una contracción o una succión

Durante el contacto con el agua fría el agua se contrae debido a que el agua caliente en un inicio se encuentra más dilatada, al enfriar podríamos decir que tiende a contraerse y generar una succión.

Se observa que durante el proceso de enfriamiento se forma una burbuja de "aire", al finalizar la experiencia es un poco más grande. Podríamos decir que el "aire" de la burbuja responde diferente que el agua a la variación de la temperatura. Este "aire" es vapor de agua.

Actividades Experimentales

Primera Experiencia segundo momento

En la jeringa se da la formación de una burbuja, al someterla al agua fría y al mover el émbolo.

Al repetir la experiencia y agregando agua fría se evidencia un cambio interno en el agua de la jeringa, con la formación de la burbuja y el movimiento del émbolo observamos cómo varía su tamaño producto de la presión que está ejerciendo el agua sobre el gas.

Burbuja de aire

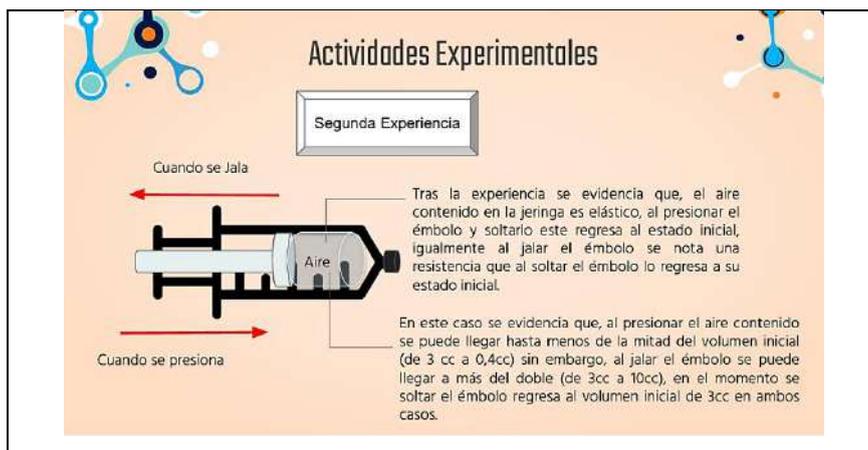


Imagen 19. Ejemplos de Actividades con jeringas para identificar características del comportamiento del aire.

A través de esta serie de actividades, se discutió sobre las relaciones entre las variables, la proporcionalidad entre ellas, nos propusimos que los docentes hicieran diagramas que posteriormente nos conducirían a los diagramas de fase propuestos por Clapeyron.

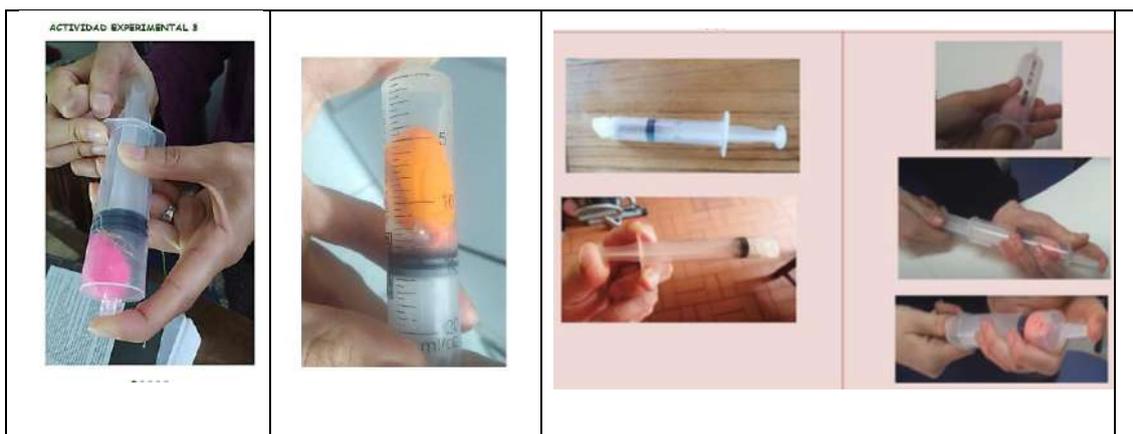


Imagen 20. Ejemplos de actividades con jeringas para establecer relaciones entre variables P, V y T

En este momento de las actividades, el vocabulario de los docentes involucraba las comprensiones adquiridas en el proceso de identificar cualidades de las sustancias. Ahora el calor específico se convierte en centro del análisis. Los dos siguientes fragmentos corresponden a la siguiente situación: si la jeringa se llena de agua y se deja una burbuja de aire en su interior, cuando hay compresiones y expansiones contraintuitivas, el aire aumenta su tamaño en la compresión y disminuye su tamaño en la expansión.

Se logra sentir, al momento que se va contrayendo el agua pareciese que se está dilatando el aire, hay una burbuja de aire que crece, lo que está asociado al calor específico, como el del agua es más grande y el del aire es más pequeño, la cantidad de calor que necesita el aire para mantener su temperatura no es tanto y por eso se mantiene dilatado. En cambio, el agua como tiene un calor específico tan alto empieza a perder temperatura y se empieza a contraer.

Cuadro 30. Ejemplo de descripción que involucra la incorporación de los nuevos conceptos en el discurso.

También sus descripciones se enfocan en lo que ocurre a las sustancias, y no en las relaciones entre variables involucradas en los cambios, por el momento. Aun así, el tipo de afirmaciones muestran un razonamiento que se ha movilizó hacia la comprensión de los términos que se utilizan, muestra focos de análisis que se desarrollan aun cuando no sea lo que se esperaría en relación con los objetivos docentes propuestos para la actividad.

Tengo en la cabeza una afirmación, pero me gustaría hacerlo como pregunta, ¿quiere decir que las sustancias que tienen menor calor específico son aquellas que son mejores conductoras de calor?

Cuadro 31. Ejemplo de correlación que emerge en la discusión y análisis.

Ciertamente, es posible encontrar una correlación entre la conductividad térmica de las sustancias y el calor específico de las mismas. Un razonamiento, que emerge del contexto de análisis y del cual la persona tiene más certeza que duda. Nótese como señala “Tengo en la cabeza una afirmación”, hace presuponer que si la respuesta fuera, no, la persona entraría en contradicción con aquello que le ha hecho sentido en la discusión.

Las actividades con las jeringas permitieron encontrar otros comportamientos de las sustancias, como aquellos en relación con que es posible hacer bullir agua a través de los cambios de presión. O que se pueden apreciar calentamientos en ausencia de fuentes de calos, a través de acciones mecánicas. Nótese como ahora, la descripción de los cambios está relacionada con las variables P, V, T. Las observaciones que van estableciendo los docentes, no quedan descritas a través de un sistema simbólico, sin embargo el valor semántico que entrañan sus apreciaciones, no se puede desarrollar únicamente a través del sistema formal $PV=nRT$, que es el que estos docentes tenían muy interiorizado por sus áreas de estudio.



1.2. En una jeringa de 500 mL se tomó una muestra de agua 450mL en su punto de ebullición, posteriormente se obstruyó completamente el orificio de la jeringa y se halo el embolo, cuando se realizó esto el agua empezó a ebulir y a empañar las paredes de la jeringa (imagen3).

Esto ocurre porque al halar el embolo la presión al interior de la jeringa disminuye provocando que el agua hierva a una temperatura más baja, por el contrario cuanto más alta es la presión, el agua ebulle a una temperatura más alta, por lo tanto no se puede asegurar que a una temperatura de 100 °C el agua este en su punto en punto de ebullición sin tener en cuenta la presión al que se somete el fluido.

En este segundo experimento se tuvo en cuenta variables como la presión y el volumen, porque la temperatura fue constante a diferencia del primer experimento donde se aplico agua con hielo para disminuirla.

Imagen 21. Conclusión de la influencia de presión en los puntos de fusión y ebullición de las sustancias.

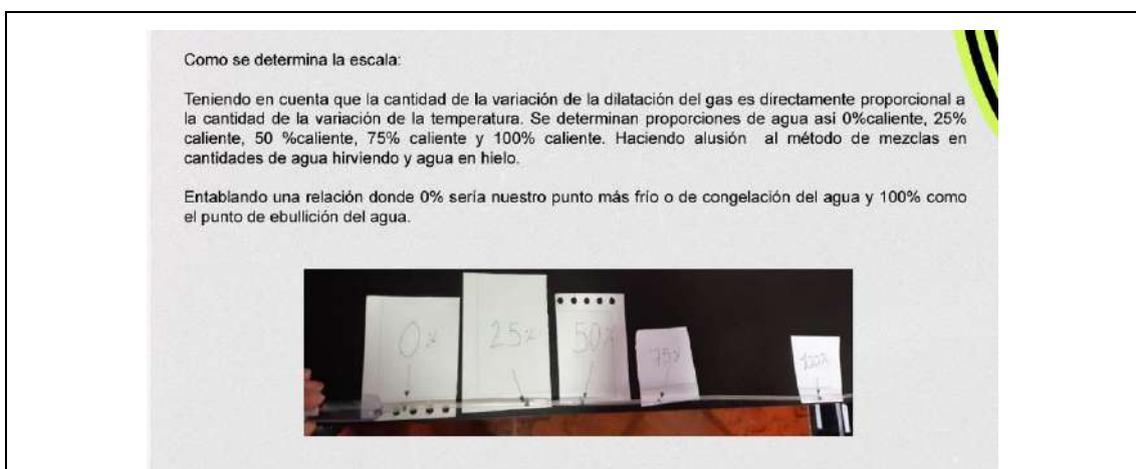
Estos efectos particulares se propusieron porque el ejercicio siguiente en nuestra clase, consistía en poder vincular esta serie de hechos experimentales con las organizaciones elaboradas por Watt, Clapeyron y Clausius, en las descripciones sobre la máquina térmica que presentamos en el capítulo cinco. Lo que nos conecta con otro problema importante en la comprensión de los térmico.

8.2.7 El comportamiento de los gases respecto al calor

Describimos en el capítulo cinco la importancia que tuvo el análisis del comportamiento de los gases respecto al calor, y las variaciones de volumen y temperatura como medida de calor, en la conceptualización de lo térmico.

Y que uno de los ejes centrales de la obra de Carnot, fue prestar mucha atención a las tablas de medida de calores específicos que se desplegaron en su tiempo. Necesitábamos un contexto sobre el cual poder discutir respecto al calor específico de los gases. Así que propusimos a los estudiantes el diseño de termómetro de aire a presión constante (Ver Anexo. Pág.351).

A continuación, en las imágenes apreciamos las escalas construidas por los docentes, que fueron llevadas a cabo a través de los cálculos que realizaban siguiendo el método de las mezclas. Fue fácil para ellos, en la construcción de estos nuevos termómetros tener los criterios para establecer la medida. No tuvieron problemas con señalar los puntos mínimo y máximo de la escala porque ya lo tenían determinado por su experiencia con los termómetros de líquidos. Su discusión en este momento se enfocó en cuestionar cuál era la diferencia entre un termómetro a volumen constante y otro a presión constante.



escora INICIO UNIDAD 1 UNIDAD 2 UNIDAD 3

1. Ubicación de indicador con agua salina 2. Calibración de punto de fusión del agua (0°C) 3. Calibración de punto de ebullición del agua

CÁLCULOS MATEMÁTICOS

La mezcla de 75% de Agua a 90°C y 25 de agua a 0°C

$$+m_h(T_f - T_{ih}) = -m_a(T_f - T_{ia})$$

$$(T_f - T_{ih}) = -\frac{m_a}{m_h} (T_f - T_{ia})$$

$$T_f - T_{ih} = -\frac{75}{25} (T_f - T_{ia})$$

$$T_f - T_{ih} = -3T_f + 3T_{ia}$$

$$T_f + 3T_f = 3 \times 90 - 0$$

$$4T_f = 270$$

$$T_f = \frac{270}{4}$$

$$T_f = 67.5$$

La mezcla de 25 gr de Agua a 90°C y 75 gr de agua a 0°C

$$T_f - T_{ih} = -\frac{25}{75} (T_f - T_{ia})$$

$$T_f - T_{ih} = -0,33 T_f + 0,33 T_{ia}$$

$$T_f + 0,33 T_f = 0,33 \times 90 - 0$$

$$1,33 T_f = 29,7$$

$$T_f = \frac{29,7}{1,33}$$

$$T_f = 22,3$$

Cuadro 32. Termómetros de aire a presión constante contruidos por los docentes.

La construcción de estos termómetros mostró dos cosas:

1) Criterios para la selección de un punto mínimo, de un punto máximo y del método de las mezclas como recurso para la ideación de la escala de medida, ya estaban interiorizados en la organización que hicieron los docentes. Pusieron a su disposición los resultados del primer termómetro de líquidos y notaron que el aire era bastante más regular en la disposición de la escala, como se aprecia en las imágenes, sus cálculos mostraban las condiciones de equilibrio para la obtención de la temperatura que fijaría el punto en la escala y que se operaba con destreza superando las dificultades.

2) Consultas referidas al desarrollo de termómetros a volumen constante, pues para todos resultaba muy extraño pensar, que sin dilatación del aire, pudieran obtenerse medidas de temperatura.

Esto nos muestra que, cuando hemos logrado adquirir experiencia en la serie de operaciones requeridas en un dominio de conocimiento, en ciertas particularidades que al principio pudieron resultar muy difíciles, la mirada sobre el fenómeno se enfoca ahora en nuevos aspectos. Aparecen otro tipo preguntas y se establecen nuevas observaciones.⁴⁸

Con esta serie de actividades experimentales anteriormente expuesta, se cerraba un ciclo que comprendía lo que nosotros denominamos la base fenoménica.

8.2.8 Calor y movimiento

Dimos inicio al estudio de las mejoras introducidas por Watt a la máquina de vapor (Anexo, Pág. 353) Watt expresa los resultados de las actividades experimentales de su tiempo que condujeron a mejorar la máquina de Newcomen. Algunos de estos resultados estaban en consonancia con las actividades experimentales desarrolladas hasta entonces, y a los aspectos que hemos señalado ya en el capítulo cinco. Y los docentes identifican rápidamente el aporte que tiene incluir una fuente caliente y una fuente fría para la expansión y contracción del vapor dentro de un cilindro.

Entraríamos a identificar los procesos que ocurren en la máquina térmica, y en adelante, los fragmentos implicaban prestar atención sobre razonamientos que resultaron algo complejos para los docentes, expresado por ellos.

G5. ... este tema ha causado dificultades puesto que ha sido complejo la comprensión del texto, es importante resaltar que ha permitido de igual manera construir y reconstruir conceptos alrededor de los fenómenos térmicos...

G1. Nos fue regular, porque hay cosas que no entendemos...

Cuadro 33. Docentes expresan dificultad para comprender algunos fragmentos.

⁴⁸ En los fragmentos históricos notamos también esta característica, el siglo XVIII, fijaba su mirada en las sustancias porque era necesario caracterizarlas, centrarse en los objetos y las operaciones sobre ellos, en el caso de lo térmico, pero también de lo eléctrico. En el siglo XVII, lo hizo la mecánica.

¿A qué texto se refieren los docentes? Encontraron dificultades al interpretar Sobre la Potencia Motriz de Calor, de Clapeyron⁴⁹, (Anexo 1, Pág. 342) cuáles eran esas dificultades, ciertamente Clapeyron inicia su presentación haciendo un resumen importante de los trabajos que sientan las bases a la mirada dinámica de lo térmico:

La ley de Mariotte y la de M. Gay-Lussac establecen las relaciones que existen entre el volumen, la presión y la temperatura de una misma cantidad de gas; las dos leyes han obtenido después de largo tiempo el consentimiento de los científicos. Las nuevas experiencias hechas por MM. Arago y Dulong no dejan ninguna duda sobre la exactitud de la primera entre los límites muy extendidos de la presión; sin embargo, estos importantes resultados no enseñan nada sobre la cantidad de calor que poseen los gases, cuando aumentan la presión o disminuyen la temperatura, tampoco aportan a la ley de los calores específicos a presión constante y a volumen constante. No obstante, esta parte de la teoría del calor ha sido objeto de investigaciones profundas, entre las cuales se destaca el trabajo de MM. Laroche y Bérard sobre el calor específico de los gases. Por último, M. Dulong, en una tesis que publicó bajo el título de “Investigaciones sobre el calor específico de los fluidos elásticos”, estableció con las experiencias -sin poder contradecirle- que *los volúmenes iguales de todos los fluidos elásticos encerrados a una misma temperatura y con una misma presión, al ser comprimidos o dilatados súbitamente en una misma fracción de su volumen, liberan o absorben la misma cantidad absoluta de calor.* (Anexo. Pág. 342).

Con el ejercicio de las jeringas habíamos logrado que los docentes, desde la actividad práctica relacionaran las variables P, V, T, que identificaran comportamientos y que recordaran las leyes que conocen desde su formación y que se presentan en el texto. También habían identificado, a través de la construcción del termómetro de aire, que se pueden desarrollar acciones sobre el gas, manteniendo el volumen constante o la presión constante. Este era el contexto de inicio, sin embargo, el texto anunciaba algo nuevo “estos importantes resultados no enseñan nada sobre la cantidad de calor que poseen los gases, cuando aumentan la presión o disminuyen la temperatura, tampoco aportan a la ley de los calores específicos a presión constante y a volumen constante.” De modo que la lectura misma implica introducirse en el análisis de lo que ocurre con los cálculos de los calores específicos de los gases, que discutimos en el capítulo cinco, y que resulta tan necesario para comprender la nueva organización de los procesos.

⁴⁹ El título se presenta aquí en castellano, pues a los docentes se les presentaron las traducciones organizadas para esta secuencia didáctica.

G4. Había varias cosas que nosotros comprendíamos, por ejemplo, que se habían hecho estudios en los cuales se tenía en cuenta la presión constante o el volumen constante, en esos estudios se daba cuenta que los calores específicos dependen de esas variables, no son los mismos calores específicos si tenemos sistemas a presión constante o a volumen constante. Nosotros nos hacíamos una pregunta y era ¿cómo hacer un montaje que me permita dar cuenta, en esas condiciones, del calor específico? Porque cuando leíamos las tablas de las progresiones geométricas nos dábamos cuenta que ellos mostraban en las columnas, presiones y calores específicos. Entonces, ¿Cómo hacían o cuál era el procedimiento para calcular esos calores específicos en esas condiciones?

Cuadro 34. La importancia que dan los docentes a identificar los experimentos que conducen a los resultados de las tablas.

Notamos que no era únicamente la interpretación del texto lo que generaba dificultad, de hecho, pareciera que interpretaban tan bien el texto, que los resultados tenían que imaginarlos a través de preguntarse cómo se obtenían esos valores. La reflexión aquí giraba en dos aspectos:

1) Los métodos experimentales y 2) La interpretación de los calores específicos

G1. Profe, ¿Cómo así? Acaso no es solo un calor específico por material, o acaso cuántos son..

Cuadro 35. El docente se pregunta por el calor específico en los gases.

Hasta el momento, ellos habían identificado el calor específico en vínculo con la sustancia, de hecho, en la literatura que circula se presenta como propiedad de la sustancia:

Se llama calor específico a la cantidad de calor que hay que suministrar a 1 kg de una sustancia para elevar su temperatura en 1 K. Se trata, por tanto, de una magnitud física que caracteriza una propiedad específica de la materia. Su unidad en el SI es $J/(kg \cdot K)$. (Calor específico Cuarto ESO, 2022)

Por lo cual es sorprendente que una sola sustancia como el gas tenga dos calores específicos dependiendo del proceso, y que además esos calores varíen con la temperatura.⁵⁰ Respecto

⁵⁰ En otras palabras que sea una variable de estado. Es Clausius, como vimos en el capítulo cinco quien resignifica el significado de estos calores.

a los métodos, identificamos los calorímetros de flujo (Mejía Rebolledo, 2008), para comprender qué tipo de experimentos llevaban a su cálculo⁵¹.

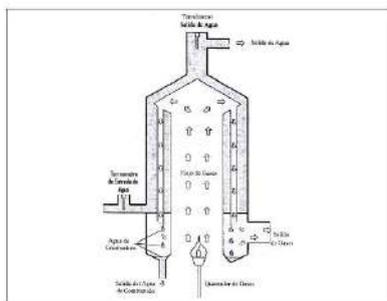


Imagen 22. Calorímetro de Flujo. Imagen tomada de (Mejía, 2008).

En esta parte del seminario, fue importante leer en conjunto. Y aparecían diferentes preguntas:

¿Profe cuando se habla de calor específico, son los cálculos que hicimos, ese es el calor específico? ¿Cómo sabemos cuál es la magnitud para hallar calor específico? Mi tema era que no lograba hacer esa relación entre la lectura y el ejercicio que estábamos haciendo porque acá hablaban de liberar o absorber calor, y en un punto dice que la cantidad de calor es proporcional a la cantidad absorbida o liberada, entonces ¿cómo entender como determinar ese calor específico?

Cuadro 36. Pregunta que muestra la importancia que adquiere la experimentación en el aula para la comprensión.

La persona se refiere a los cálculos que se habían realizado anteriormente con el método de las mezclas. Llama la atención que la actividad experimental ahora sea un foco de atención de los docentes, ya no se trata de entender únicamente los resultados, se vuelve importante entender cómo se obtienen.

8.2.9 Los diagramas de fase

Vimos la necesidad de profundizar en las representaciones gráfica de las leyes de los gases, que ellos habían identificado junto al trabajo con las jeringas.

⁵¹ Identificamos diferentes métodos como el uso del calorímetro de flujo: sumergido en agua de la cual se conoce su temperatura inicial, el calor que libera un gas encerrado al ser sometido a cambios de temperatura (a volumen o a presión constante) aumenta la temperatura del agua, para cada grado de temperatura se determina el calor específico del gas, cual si fuera una mezcla entre sustancias. También el método de Clausius para la medida de las capacidades caloríficas a través de la velocidad del sonido. Sin embargo, no profundizamos en estos aspectos, que vale la pena rescatar para organizar actividades experimentales al respecto.

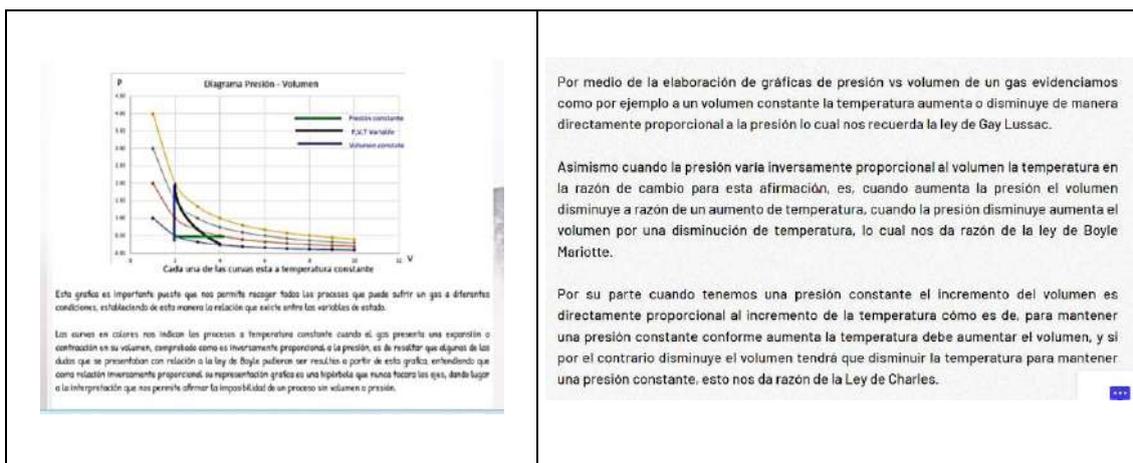


Imagen 23. Ejemplo de representaciones P, V, T en diagramas de fase y conclusiones.

Esta etapa de representación resultó ser difícil, se veía que los docentes están mucho más familiarizados con representaciones donde los cambios son temporales. La curva como representación significaba para ellos que había variaciones, mientras que las rectas significaban que la magnitud permanecía constante, luego ¿por qué no podía ser una recta una temperatura constante? Esto nos lleva a pensar, que es importante hacer mayores ejercicios de representaciones gráficas en otros niveles de la formación.

En el ejemplo de la imagen 22. Se muestran algunas conclusiones sobre el proceso de graficación. Después de todo, los docentes pudieron comprender que la representación de la isoterma se deriva de graficar los cambios que son causados únicamente por la presión y el volumen, sin intervención de la temperatura que permanece constante.

A continuación, la interpretación sobre el apartado de la lectura que algunos docentes generaron como conclusión.

* Conclusiones

Si bien este tema ha causado dificultades puesto que ha sido complejo la comprensión del texto, es importante resaltar que ha permitido de igual manera construir y reconstruir conceptos alrededor de los fenómenos térmicos:

- El calor específico es una medida del calor necesario para variar un grado la temperatura de una determinada cantidad de sustancia (ya sea este en gr o Kgr)
- El calor específico es diferente para cada proceso (isobárico y/o isocórico) en los gases, aunque este patrón puede verse en menor medida en los estados sólido y líquido.
- La diferencia entre datos consecutivos de la presión, el volumen o el calor específico es el mismo para todos los gases, sin importar su naturaleza. Su variación es constante, sin importar el proceso.
- Las máquinas térmicas varían su volumen de la misma manera sin importar el gas que contengan.
- No siempre es necesaria una fuente de calor para variar la temperatura.
- No se necesita que aumente o disminuya la temperatura para que se libere o absorba calor, esto puede darse por medio del cambio de presión o volumen.
- Las representaciones gráficas dan cuenta de los procesos que ocurren cuando se pone en juego las variables de estado, estas permiten interpretar de mejor manera los procesos que se dan en los gases.

Imagen 24. Comprensiones sobre la generación de calor por cambios de presión o volumen.

La conclusiones que grupo ha señalado: “No siempre es necesaria una fuente de calor para variar su temperatura” “No se necesita que aumente o disminuya la temperatura para que se libere o absorba calor” nos permitía observar que las dificultades para reconocer que es posible la producción de calor sin aumento de temperatura y que es posible variar temperaturas sin tener fuentes de calor, que había señalado Ugo Besson (2014) como problemas frecuentes en estudiantes universitarios y docentes, podían ser superados a través de las lecturas de las fuentes primarias.

Por otra parte, nos llevaba a reafirmar que la profundización en las problemáticas de estudio, la profundización del contenido enfocado en comprender problemas, no abarcar temas sin profundidad, es la actividad que conlleva a que las personas logren captar diversas características sobre los fenómenos estudiados, que no es un proceso lineal, y que requiere de diferentes formas de acercamiento, en este caso, era importante insistir en las representaciones gráficas, porque sabíamos que el ejercicio posterior quizá sería más difícil, ya que el siguiente fragmento de Clapeyron, detalla el ciclo de Carnot a través de esas representaciones.

Cuando abordamos este punto de la lectura (Anexo 1. Pág. 356) los docentes ya no tuvieron problema con la comprensión de la representación del ciclo. Ahora la dificultad consistió en

interpretar por qué era posible afirmar como hizo Clapeyron, que el área encerrada podía interpretarse como la medida de la cantidad de calor ejercida o suministrada durante un ciclo termodinámico.

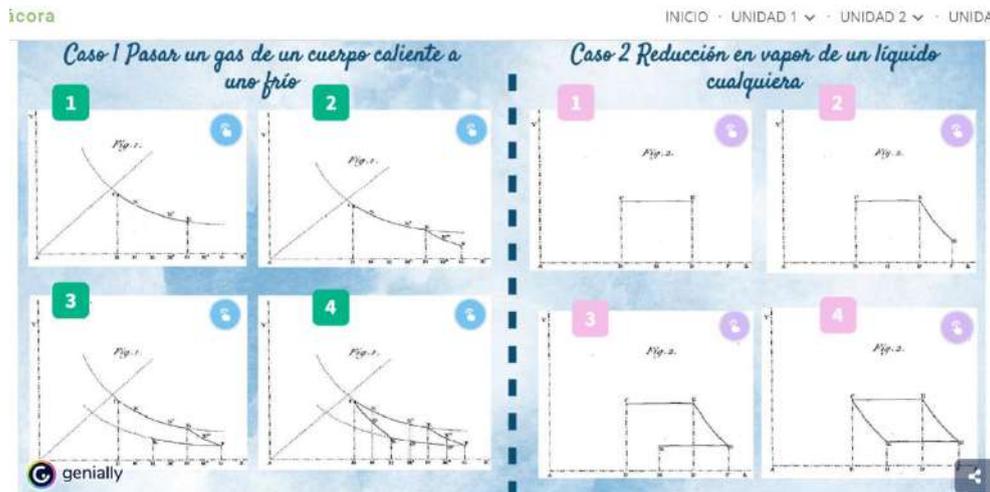


Imagen 25. Los docentes describen el ciclo de Carnot con las representaciones gráficas de Clapeyron.

8.2.10 El problema de la interpretación Calor – Trabajo

Un aspecto que no contemplamos al plantear la lectura, fue que los docentes de ciencias en las ramas de biología y química no profundizan en áreas como el cálculo. Desarrollar la idea de la integral que propone Clapeyron implica el desarrollo de una forma de ver y comprender que no se consigue en una o dos sesiones de clase.

En este punto, acudimos a representaciones que nos sirvieran de puente. Estas representaciones fueron diversas animaciones, applets, y laboratorios virtuales que nos ayudaron en el ejercicio de posibilitar dar algún sentido a las relaciones que Clapeyron nos estaba comunicando: “Una cantidad de acción mecánica, y una cantidad de calor que puede pasar de un cuerpo caliente a un cuerpo frío, son cantidades de la misma naturaleza, y es posible sustituir unas por otras, de la misma manera que en mecánica, cuando un cuerpo cae desde una cierta altura y una masa se mueve con cierta velocidad son cantidades del mismo orden, que pueden transformarse las unas en las otras por acciones físicas” (Anexo, pág. 363)

Para nosotros éste es el enunciado extenso del principio de conservación, que hoy día denominamos el principio de conservación de la energía.

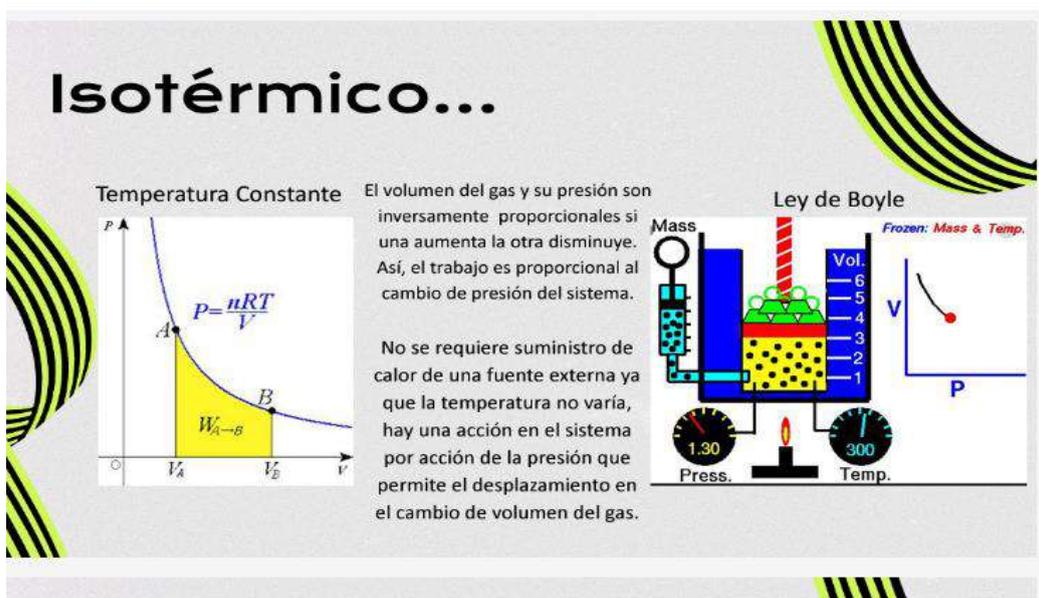


Imagen 26. Tipo de animaciones usadas por los docentes para establecer la relación Calor – Trabajo.

Los docentes interpretaron el funcionamiento de la máquina térmica, y ya no ahondamos más en los problemas que nos seguía proporcionando esta lectura.

A continuación, algunas conclusiones obtenidas de esta fase de trabajo:

Relacionando los procesos isotérmicos, isobáricos, isocóricos y adiabáticos podemos evidenciar como el calor suministrado al sistema se traduce o se transforma o es utilizado en el cambio de algunas magnitudes, ejemplo, al ser suministrado en un proceso isotérmico, como no varía la temperatura, se traduce en trabajo, en un proceso isobárico, en donde no varía la presión, es utilizado en la variación del volumen, lo cual supone que el trabajo generado permitirá ese aumento de volumen, en un proceso isocórico, en donde no hay una variación del volumen, el calor suministrado al sistema se traduce en los cambios de presión y de temperatura, finalmente en el caso adiabático el calor suministrado al sistema se utiliza en la producción de trabajo y en la variación del volumen del gas variando así presiones y temperaturas.

Cuadro 37. Conclusiones de los docentes sobre la relación calor – trabajo.

En este punto, consideramos que se puede apreciar una grata evolución en las descripciones de las situaciones que realizan los docentes, al comparar sus intervenciones iniciales y finales se ve el proceso de transformación de sus discursos, de sus lenguajes, y la relación con los problemas de conocimiento.

Compartimos tres de los vínculos a las bitácoras de trabajo que llevaron los docentes, y que autorizaron compartir para este documento.

<https://sciencetic.wixsite.com/fenomenostermicos> ;

<https://sites.google.com/view/fenomenos-termicos/inicio>

<https://mysoracipam.wixsite.com/my-site>

8.3 Reflexiones finales del ejercicio de documentación

Uno de los intereses puestos en esta intervención didáctica fue identificar ¿Cómo se relacionan los profesores con los objetos de estudio que se les proponen? Encontramos que, para la descripción de las situaciones y aún para la interpretación de textos, los docentes, en general, buscamos fundamentos en lo que nos ha sido familiar, en otras palabras, describimos los objetos de estudio a través de analogías con campos de fenómenos que ya conocemos, que nos hacen sentir seguridad en nuestras afirmaciones.

En este caso, es posible apreciar que los docentes se relacionan con los objetos de estudio desde la cercanía con su campo disciplinar, vinculando estos objetos a las descripciones que se realizan en su área. Los docentes del área de biología, por ejemplo, comenzaron interpretando las sensaciones de calor y frío, a través de las condiciones ambientales que ellos llamaron condiciones biológicas, o bien, señalaron que los conceptos los relacionaron con la biología de la fiebre, o destacaron de los textos, lo que hacía sentido desde su área disciplinar.

Los docentes de química llevaron sus analogías a las reacciones químicas, a las transformaciones químicas de las sustancias, etc.

Y esta forma de relacionarnos con lo “desconocido” a través de lo ya “conocido” nos revela una forma mediante la cual se llevan a cabo procesos de formalización. Los conceptos nuevos, sus significados y estructuraciones los vinculamos con explicaciones que tienen origen en los dominios sobre los cuáles las personas previamente ya hemos ganado algunas riquezas conceptuales, de este modo, los análisis que ya hemos realizado en otras áreas del conocimiento, servirán de base a las nuevas construcciones intelectuales.

Como señaló Vergnaud, hay algunos aspectos implícitos en la conceptualización que tienen diversos orígenes lógicos, y que hacen parte de una estructura no visible que emerge en el momento mismo del conceptualizar, son los conceptos – acto, estos hacen parte de nuestros invariantes operatorios con los cuales resolvemos situaciones variadas. (Vergnaud G. , 1990)

A su vez, este escenario nos recuerda las zonas de desarrollo próximo señaladas por Vygotsky, quien estima que es imposible “transferir mecánicamente el significado de la palabra de una cabeza a otra con ayuda de otras palabras” (p. 185), porque el problema no es el sentido de la palabra (Venet & Molina, 2014) sino el mecanismo mediante el cual se generan los significados, de acuerdo con lo cual: “la apropiación de un sistema simbólico

requiere la existencia o al menos la posibilidad de utilizar sistemas previos más "primitivos" que sirven de base o complemento al dominio del sistema en formación." (Ruso, 2001)

Cuando las personas no encontramos formas de expresión para comunicar significados, por ejemplo: definiendo que "el calor es energía", o explicando "es porque hay transferencia de energía", o "la temperatura es la medida del movimiento de las partículas" y no logramos avanzar mucho más, hemos entrado en un bucle en el cual definimos términos haciendo tautologías. La única forma de permitirnos salir de estos bucles, es profundizando en las problemáticas, es identificando nuevos sistemas de relaciones que nos permitan expresarnos desde nuevos ángulos. De ahí, la importancia y el sentido de ampliar la experiencia de los sujetos.

Destacamos, que el acercamiento a los textos, y cuestionamientos propios, nos permitieron el despliegue de formas de expresión, vimos a lo largo de este proceso de descripción cómo los docentes participantes ampliaban el dominio de su comprensión a través de los experimentos, la indagación, la lectura detallada y con estos elementos construyeron formas discursivas para presentar sus conceptualizaciones.

Este ejercicio de documentación nos deja una clara evidencia de que las personas amplían sus expresiones lingüísticas sobre los fenómenos cuando las actividades experimentales se les proponen como ejercicios abiertos para explorar e indagar.

Terminamos señalando que el esquema: Tematizar, Experimentar, Formalizar que se desplegó en esta intervención didáctica, aunque requiere de mucha preparación, ofrece resultados positivos para el trabajo con docentes, quienes al terminar este seminario manifestaron su agradecimiento no solo por lo desarrollado en las temáticas, sino porque las actividades en sus hogares involucraron, hijos, hermanos, padres haciendo tareas de experimentación, y buscando sentido a lo esencial, el mundo de la vida, el mundo del conocer.

Etapa 4. Exposición de resultados y conclusiones.

CAPÍTULO 9

9 Resultados y discusión respecto a la documentación

- ☞ En este capítulo exponemos los que consideramos es el resultado de la investigación, presentamos estrategias de la organización conceptual que identificamos durante el desarrollo del estudio de las teorías del calor que nos permiten señalar algunos rasgos comparativos entre el proceso de formalización en la ciencia y en los docentes.

El estudio en torno a los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en el ámbito de las teorías del calor, nos llevó a hacer explícito que la conceptualización, la teorización y la representación o modelación son aspectos indisolubles y constitutivos de la manera de pensar e indagar sobre los fenómenos físicos. Si bien se suele diferenciar: 1) concepto matemático – concepto físico, 2) teoría – experimento, 3) concepto – teoría, en nuestros análisis estas distinciones se contemplan como un marco desfavorable para generar comprensiones de los procesos mediante los cuales se organiza la física pues llevan a establecer una jerarquización entre procedimientos que son incluyentes y necesarios dentro de la dinámica científica, y necesarios para la enseñanza de las ciencias, es desfavorable, por ejemplo, suponer que en las clases de ciencias es mejor centrarse en los resultados teóricos y no en los procesos experimentales, que son mejores los enunciados matemáticos que otros tipos de enunciados, que conceptualizar no implica formalizar matemáticamente.

Hemos estado en consonancia con aquellos acercamientos que ven en la formalización un carácter dinámico con diferentes caminos o rutas para cristalizarse y que, a su vez, es moldeable una vez que se cristalizan estructuras teóricas.

Así, hemos podido abstraer algunos aspectos del proceso en el desarrollo histórico de las teorías del calor que son de hecho estrategias para conceptualizar.

- La percepción y el vínculo con el comportamiento de las sustancias,

- la idea de equilibrio y su establecimiento como invariante operatorio,
- la equivalencia de magnitudes,
- la representación y modelación geométrica,
- el cambio en el tiempo,

Por otra parte, también hemos podido identificar algunos rasgos de este proceso de desarrollo conceptual mediante los que opera un grupo de docentes de ciencias en su clase: Organización de los fenómenos térmicos. Desde luego, reconocemos que las ideas de los docentes no surgen de forma naturalmente espontánea porque sus intervenciones están guiadas por sus saberes disciplinares, los episodios históricos abordados en el estudio y las fuentes de información múltiples de las que disponen; sin embargo, tampoco es cierto que las ideas en el dominio científico emerjan de manera espontánea.

En los siguientes apartados presentamos los resultados obtenidos a través de generalizaciones realizadas durante el análisis que conforman el proceso de reducción fenomenológica, sobre el cual se hizo mención en el diseño metodológico.

9.1 El dominio perceptual de lo térmico

La percepción y lo percibido, núcleo de toda fenomenología, es el primer eje de organización conceptual. En el caso de lo térmico son sin lugar a dudas las sensaciones de calor y frío las que dirigen la conceptualización. Ahora bien, estas sensaciones no son por si solas las que posibilitan conceptualizar, sino que son las acciones en las cuales el calor y el frío se manifiestan como causa o resultado de los cambios las que determinan cuál es el dominio perceptual de lo térmico.

Hemos mostrado cómo Black unificó el calor y el frío al indicar que eran grados de una misma cualidad lo cual condujo a que el calor fuera una magnitud organizada y noción fundamental de los procesos químicos. La inexistencia real de fuentes de frío, le ayudó a describir el paso de calor de los lugares de mayor a los de menor temperatura. Ahora bien, en el estudio de las máquinas térmicas, para Watt fue conveniente la separación de la fuente caliente y la fuente fría, toda vez que ubicadas en lugares distintos pudiera aprovecharse esta

transferencia. Nuestro lenguaje común, pero también el lenguaje de la ciencia mantienen la noción de calor entretrejida en esa relación caliente-frío.

La percepción de la dilatación de sustancias a causa del calor conduce a la semejanza entre la longitud de la dilatación y el aumento del valor de la temperatura. En lo profundo de estas ordenaciones aparece de forma orgánica un supuesto fundamental de nuestro pensamiento y base de diferentes mediciones: “los efectos son proporcionales a las causas”. Cuánto más caliente o más frío es un cuerpo, se determina en comparación con una sustancia de fácil dilatación que permite la ordenación en grados de calor estableciendo una primera identidad calor – temperatura, identidad que resulta inconveniente cuando se percibe que los cambios de temperatura cesan si las sustancias bullen o se solidifican manteniendo el contacto con fuentes de calor o frío, este hecho obliga a diferenciar calor de temperatura.

A su vez, el comportamiento de las sustancias para iguales grados de calor (temperatura de las fuentes), lleva a notar grados diferentes de calentamiento (temperatura de las sustancias) según la diferencia entre materiales. Lo que produce nociones distintas de calor originadas por manifestaciones distintas del calor sobre las sustancias: calores sensibles, específicos y latentes se convierten en términos especializados del lenguaje de los científicos, para diferenciar tales percepciones térmicas.

El calor es uno, pero múltiple. Desde la misma causa (fuente caliente o fría) ahora tenemos diferentes expresiones o significados, también diferentes formas de medida y diferentes métodos. Estas primeras organizaciones no son inmediatas, tardan en la historia de la ciencia por lo menos un siglo del trabajo de las comunidades científicas. Se invierte en esto, el desarrollo de instrumentos, se estandarizan métodos y técnicas de investigación, que una vez organizadas llevan a nuevas percepciones, como aquellas que ocurren en los gases cuando se señala que los calores específicos obtenidos por un proceso en el que el volumen permanece constante son diferentes a aquellos donde es la presión la que permanece constante.

De procesos distintos, se establecen relaciones comunes. Se dice entonces que la diferencia entre los calores específicos de los diferentes gases es la misma para todos los gases. Y con ello lo que es diferenciable en el comportamiento de las sustancias, se vuelve a unificar bajo una misma medida, ello lleva a considerar que es la medida de la variación la que será importante para cualificar el proceso. Vemos que en este proceso de conceptualización

aparecen frecuentemente diferenciaciones y unificaciones, acciones mentales que nos orientan, y que no están separadas del fenómeno que se estudia.

La medida de la diferencia entre los calores específicos de los gases, lleva a nuevas consideraciones, como aquella que hace posible tener una escala de temperatura que ahora es independiente de cualquier sustancia termométrica. Entonces, la medida de la temperatura inicialmente ubicada en los materiales y sus comportamientos, se presentan ahora como desligadas de ese origen sustancial, pero sin ese origen no serían posibles.

A su vez, la percepción de lo térmico vinculado a otros aspectos: la manifestación del calor en el movimiento, en las reacciones químicas, en las corrientes eléctricas ayuda a establecer nuevas relaciones. Aquellas que indican que el calor puede manifestarse como trabajo y viceversa. Nuevamente, estas conclusiones involucran arduos trabajos de reflexión, relaciones entre campos disciplinares distintos que se vinculan a través de las magnitudes comunes, y nuevas expresiones aparecen para unificar lo distinto: como la expresión energía.

Nosotros, que estamos implicados en los procesos de enseñanza, notamos que es imprescindible reconocer este dominio perceptual de lo térmico, y cómo se ha desarrollado históricamente. Decíamos anteriormente que los docentes manifestaron al leer las fuentes primarias, como algunos de los pensamientos que leían habían sido también considerados por ellos.

Aquí las percepciones vinculantes son: que los cuerpos llegan a estados de equilibrio térmico después de un tiempo de estar en contacto, que las sustancias se calientan de manera distinta cuanto se ponen en contacto con la misma fuente. La idea de la temperatura como medida del grado de calor al principio fue utilizada, pero después fue modificada por los mismos docentes cuando realizaron sus propios termómetros y tuvieron que identificar los puntos de ebullición y congelación y notaron las consideraciones distintas involucradas en la organización de una escala.

Otros hallazgos perceptuales son más difíciles en el aula de clase, por lo menos requerirían más tiempo e instrumentos más sofisticados para su desarrollo, son aquellos que tienen que ver con las medidas de los calores específicos de los gases. Fácilmente se llegó a considerar que pueden ocurrir cambios de presión en relación cambios de volumen a través experiencias sencillas, se vincularon estas variables con la temperatura, también que se pueden obtener

expansiones y compresiones en relación con fuentes térmicas. Sin embargo, obtener representaciones gráficas y explicitarlas para llegar de allí a las mismas consideraciones de los científicos requiere otro tipo de intervenciones. Los docentes por su parte, mostraban su percepción ubicada en otros aspectos que no venían de las fuentes primarias, por ejemplo, la necesidad de hacer comparaciones a través de cuánto tardan las sustancias en calentarse o enfriarse.

En todo caso, los procesos de conceptualización estudiados en este documento, como hemos visto, nunca estuvieron separados de la estructura perceptual, ni aun en los momentos de mayor grado de especialización de la organización de la teoría del calor como es el caso de la teoría mecánica del calor de Clausius. En relación con ello es que podemos argumentar que la historia nos muestra que las teorías no son únicamente estructuras matemáticas. Ya lo señalaba Jean Marc Levi-Leblond (1998):

“el concepto matemático no es ni un esqueleto al que la física le presta la carne, ni una forma abstracta que la física se encarga de llenar de contenido concreto. Es esencial que las relaciones de las matemáticas y la física se expresen en términos dinámicos” (Levy -Leblond, 1998).

9.2 La idea de equilibrio, un invariante operatorio necesario para conceptualizar

La relación causa - efecto ha sido considerada por muchos como un principio operacional sobre el cual organizamos el mundo físico: Principio de Causalidad. Notábamos desde los episodios históricos estudiados, cómo las relaciones causa - efecto fueron directrices de la organización de magnitudes de medida, en el apartado anterior hicimos referencia a la relación longitud de dilatación, medida de temperatura y grado de calor y al caso de establecer una igualdad entre calor y trabajo mecánico.

Ahora queremos resaltar que las ideas de equilibrio se hayan en estrecho vínculo con este principio de la causalidad. En el caso de los fenómenos térmicos, cae en la obviedad afirmar que cuerpos de diferente temperatura llegarán a la misma temperatura después de un tiempo de contacto, el llamado principio de equilibrio térmico. Este principio estrechamente relacionado con que el calor fluye de los cuerpos de mayor temperatura hacia los cuerpos de menor temperatura. En otras palabras, porque ocurre que cuerpos se encuentren a diferentes

temperaturas, podemos decir que al estar en contacto llegarán a la igualación de sus temperaturas.

Vimos en el texto de Lavoisier y Laplace, que llegar a estos enunciados entraña pensamientos como: el calor que se cede un cuerpo es igual al que el otro recibe. Y esto asegura procedimientos matemáticos a través de esta igualación, calor recibido por un cuerpo o sustancia sea igual a la cantidad de calor cedido por otra, $mc_1[T_{fh} - T_{ih}] = -mc_2[T_{fa} - T_{ia}]$, desde allí se llega a la igualdad de temperaturas de los cuerpos en contacto. Esta premisa fundamental no se modifica a lo largo del desarrollo histórico en las expresiones de Clausius cuando señala que el calor se iguala con la energía interna del sistema y el trabajo desarrollado.

Se puede argumentar que esto resulta por una necesidad práctica: que la medida solo puede establecerse en sistemas en equilibrio, caracteriza solo el estado local de un sistema cuando, o bien no hay transferencias de calor, como ocurre en los procesos adiabáticos, o bien cuando no ocurren cambios de temperatura, como ocurre en los procesos isotérmicos. Es a su vez, una necesidad de razonamiento: Nada asegura que cuando hay equilibrio de calor las temperaturas de las partes del sistema sea iguales, y viceversa, nada asegura que cuando dos cuerpos están en equilibrio térmico estén en igualdad de calor. Pese a ser procesos distintos, a la base de ellos está o el equilibrio de calor, tan importante para Carnot, o el equilibrio de temperaturas.

Entonces, los equilibrios que nos indican que haya algo estable sobre lo cual operar son idealizaciones. En la máquina térmica intercambios de calor ocurren cuando se está en contacto con fuentes de calor a temperatura invariable, en cuyo caso hay que señalar que el vapor incrementa su volumen en diferenciales tan pequeños de la temperatura que tienden a ser cero, esto para poder indicar que todo el trabajo desarrollado en el sistema se puede medir con los cambios observables en presión y temperatura. Se está estableciendo un invariante operatorio necesario como explicación y como posibilidad de medida del calor, esto encierra el argumento de que las acciones sobre el sistema deben ser lo suficientemente lentas, cuasi-equilibrios, para que el razonamiento pueda ser aceptable.

Por otra parte, cuando suceden los cambios de temperatura, estos ocurren alejados de la fuente fría o caliente, y deben ocurrir de manera suficientemente rápida para que no haya intercambios de calor, y poder decir que el proceso es adiabático, sabemos por experiencia

que el aislamiento térmico perfecto es una idealización. Sin embargo, establecer esta condición de equilibrio de calor, es la que permite medir la cantidad de trabajo desarrollado durante este proceso.

En síntesis, el equilibrio como tal, es el proceso mental que nos permite organizar los invariantes operacionales de los que hablaban Piaget o Vergnaud, en función de poder distinguir lo que cambia a partir de lo que permanece constante. Lo que produce un razonamiento válido, dice Duval (1995), no es la verdad sino la necesidad de la conclusión. (Panizza, 2005, pág. 90).

9.3 La equivalencia de magnitudes, soporte de las representaciones térmicas y del principio de conservación

Otro principio en relación con la construcción de magnitudes es el principio de equivalencia resultado de la idea de que las causas son proporcionales a los efectos, o del principio de causalidad, el establecimiento de equivalencias está en la base de las organizaciones conceptuales en física. Ahora bien, vimos en el proceso de organización de la relación: calor que se cede = calor que se recibe, una equivalencia entre magnitudes de la misma clase.

Sin embargo, en la relación calor trabajo es necesario argumentar, como lo hizo Clapeyron, que dos magnitudes en principio disímiles se pueden organizar como si fueran de la misma clase, Clapeyron se refería a que con cierta cantidad de calor es posible la producción de trabajo mecánico y viceversa, con la salvedad de que, no todo el calor se convierte en trabajo, se debe admitir lo absurdo que sería pensar que se puede generar calor de la nada. Como se discutió en el capítulo cinco, es Clausius, quien sostiene que, si son magnitudes de la misma clase, esto ocurre solo porque los calores internos y externos son proporcionales con los trabajos interno y externo, respectivamente, y esto es consecuencia de las fuerzas internas y externas a las que se ven sometidas las sustancias en su transformación, aspecto desarrollado en el mismo capítulo. Al ser una relación de equivalencia un poco problemática se unifican las expresiones con el nombre de Energía.

Ahora bien, esta unificación o equivalencia definitiva llamada energía, se establece como ha señalado Kuhn, por una disponibilidad de convertibilidad de fenómenos:

El movimiento ya había producido cargas electrostáticas, y las atracciones y repulsiones resultantes habían producido movimiento. Los generadores electrostáticos habían desencadenado ocasionalmente reacciones

químicas, entre ellas disociaciones, y las reacciones químicas habían producido tanto luz como calor. Aprovechado por la máquina de vapor, el calor podía producir movimiento, y éste, a su vez, generaba calor por fricción y percusión. Sin embargo, en el siglo XVIII éstos fueron fenómenos aislados; pocos de ellos parecieron de importancia capital para la investigación científica; y esos pocos fueron estudiados por grupos diferentes. Apenas en la década de 1830, cuando tales fenómenos fueron considerados de la misma categoría que los muchos otros ejemplos descubiertos en rápida sucesión por los científicos del siglo XIX, aquéllos comenzaron a ser conceptuados como procesos de conversión. Por esa época, en el laboratorio, los científicos estaban pasando inevitablemente de toda una variedad de fenómenos químicos, térmicos, eléctricos, magnéticos o dinámicos a fenómenos de cualquiera de los demás tipos, y así también a fenómenos ópticos. Problemas tradicionalmente distintos fueron ganando interrelaciones múltiples, y eso es lo que Mary Sommerville tenía en mente cuando, en 1834, le dio a su famosa obra de popularización de la ciencia el título de *On the Connexion of the Physical Sciences*. (Kuhn, 1982, pág. 99).

También hubo en la organización de la equivalencia o convertibilidad de fenómenos, el ejercicio técnico y riguroso para obtener medidas de los equivalentes mecánico y eléctrico del calor. Bajo los cuales, como vimos, fue posible expresar calores en términos de trabajos. En este sentido, el calor y el trabajo pueden considerarse equivalentes.

Kuhn, continúa señalando,

El comentario de Mary Sommerville aísla la “nueva visión” que la ciencia física había adquirido entre 1800 y 1835. Esa nueva visión, junto con los descubrimientos que produjo, resultó ser el requisito principal para el surgimiento de la conservación de la energía. Pero, precisamente porque produjo una “visión” en lugar de un determinado fenómeno de laboratorio, definido claramente, la existencia de los procesos de conversión hace que el desarrollo de la conservación de la energía tome toda una variedad de rumbos (Kuhn, 1982, pág. 100).

La expresión energía por su parte, si se quiere expresar así, adquiere el significado de la medida de transformación que ocurre entre fenómenos. Llegando de esta manera a cobijar todos los equivalentes dentro de la misma expresión. En otras palabras, llegando a convertirse en el principio general de las transformaciones, en el nuevo invariante.

Los docentes inicialmente usaron con frecuencia el término energía como comodín y respuesta a diferentes causas y problemas disimiles, creemos sin embargo, que lo importante de este principio unificador, es el proceso mediante el cual se constituye como magnitud, no en vano su contexto de origen está relacionado con la conversión calor-trabajo. Ahondar en

que los docentes trataran de expresar qué entendían como energía fue uno de los aspectos que llevó a que en el estudio de la máquina térmica pudieran establecer o reconocer la equivalencia de magnitudes, antes que la identidad calor – energía.

Distinguimos en todas estas problemáticas el campo perceptual de lo térmico, y creemos que es posible involucrar a los docentes de ciencias en éstas porque hacen parte de los contenidos de la ciencia y de la técnica.

9.4 La representación y modelación geométrica de las variables termodinámicas

Los momentos emblemáticos en el desarrollo de las teorías del calor son aquellos en los que la medida sintetiza las percepciones ya organizadas. El modelo matemático de calor es una representación que surge como esquema estable de las múltiples mediciones que realizan Lavoisier y Laplace, y la comunidad científica de su tiempo.

Al ser simbólicos, estos momentos son considerados con mayor frecuencia modelaciones, sin embargo, no son más o menos importantes que la definición de una escala termométrica, el establecimiento de comportamientos de las sustancias, la ideación de las formas de medida, la construcción de instrumentos para la medición, que desde nuestra perspectiva también son momentos de modelación y están plenos de significados contruidos para comprender el fenómeno térmico.

Ya señalábamos en el apartado anterior que la medida de las causas es posible cuando ya se tienen bastante caracterizados ciertos efectos. Así que el uso de símbolos para hacer explícito el comportamiento habitual de las sustancias no se establece de manera arbitraria, por ejemplo, en el calor específico, definido como el grado de calor que requiere una sustancia para aumentar un grado su temperatura y representado como $c = \frac{Q}{m\Delta T}$, es la expresión sintética de la serie de comparaciones, mediciones de los procesos observacionales de calentamiento y enfriamiento con diferentes sustancias, su construcción fue relacional; para llegar a ella se necesitó, como ya vimos en el capítulo cuatro, de diversas comparaciones y del establecimiento de un referente unitario (La medida del calor específico del agua como $1 \frac{cal}{g^{\circ}C}$) para desarrollar las mediciones que aparecen en la tablas de calores, arduo trabajo de los experimentadores.

El símbolo resume, estabiliza la serie de relaciones que permiten su construcción, sin embargo se mantiene dinámico, pues cuando se entra a estudiar los calores específicos de los gases que esta variable empieza a adquirir nuevos significados. Clausius necesitó mostrar que los calores específicos son una propiedad del sistema más que de los gases mismos, propiedad del sistema porque el calor específico cambia de valor según si se está actuando sobre el gas a presión constante o si se actúa sobre éste a volumen constante, manteniendo el mismo valor de temperatura. Ello le lleva a redefinir este concepto para organizar un razonamiento que haga coherente su mirada molecular con aquello que él supone que pasa al interior del gas, los calores específicos son los calores de intercambio en cada parte del proceso, ya no son constantes, y van a representar por lo tanto una función de estado que indica una forma de estar bajo ciertas condiciones de presión, volumen, temperatura, calor, trabajo, que son las diferentes variables involucradas en ese proceso de intercambio térmico.

Comprendemos entonces, que las representaciones son esquemas mentales, simbólicos que sin ser arbitrarios son cambiantes y están cargados de significados que es necesario hacer explícitos. Al estudiar las magnitudes no es suficiente expresar su definición, para correlacionarlas con significados es necesario hacer acciones conscientes. De ahí la importancia de la experiencia que genera la actividad experimental.

Por eso en los problemas de enseñanza rara vez saber operar con los símbolos significa la comprensión de los mismos. Se requiere trabajar desde lo experimental para llegar a muchas expresiones simbólicas significativas, por lo menos en la base estructurante de los razonamientos fundamentales. Para nuestros estudiantes, por ejemplo, fue un reto la representación de los procesos con tres variables, P, V y T , porque habitualmente, según lo expresaban, la relación se establece con la enunciación de la ecuación de estado, de la cual conocen los símbolos y un significado aprendido memorísticamente sobre nRT , pero no han establecido correlaciones entre símbolos y significados del origen o razón de ser de estas expresiones, desconociendo las condiciones de por las cuales nRT ha de ser proporcional a P, V . En otras palabras, el significado de la expresión es superficial y poco fecundo para poder sustentar la igualdad entre variables macroscópicas con cantidades moleculares. En este sentido, consideramos que las representaciones simbólicas deben ser correlatos de los significados asociados en cada parte del proceso de enseñanza a: 1) los mecanismos, 2) intenciones, 3) razonamientos, 4) argumentos, entre otros, a través de los cuales esos significados son construidos.

Notamos cómo las representaciones de Clapeyron marcaron un antes y un después en el estudio de los fenómenos térmicos, pues la estrategia de representación: el diagrama P,V, condujo a la solución de la medida de calor: el área debajo de la curva. No es fácil que los docentes dimensionen el potencial de esta representación a menos que se induzca a trabajar en su significación, y se muestre el proceso del razonamiento del autor. En este sentido para nosotros fue muy útil el uso de las fuentes primarias, pues fue a través de la lectura y su análisis que los docentes llegaron a operar a través de esta estrategia.

Desde nuestro punto de vista, esta representación gráfica es una de las estrategias más ingeniosas para operar con magnitudes físicas. En ellas Clapeyron deja expresadas todas las variables que describen los procesos de las máquinas térmicas, y las variaciones se pueden entender como variaciones espaciales sin recurrir al tiempo. Los diagramas de fase dan cuenta del estado y de los cambios de estado indicando la magnitud de las causas del proceso. Seleccionar un punto del diagrama es identificar los valores de todas las variables que lo describen. Seleccionar un área del diagrama es seleccionar la cantidad de trabajo o calor que se ve involucrada en los cambios entre los puntos que encierran esa área.

Advertir que esto encierra un principio de continuidad en las variables implicadas en el proceso, y que este principio es también un recurso mental muy interesante de analizar, es parte de los resultados a los que lleva la representación y geometrización de las variables térmicas. Considero que es algo que hemos de reorganizar con mayor profundidad, para lograr significar los cambios epistemológicos que representa en física hablar de variables de estado y variables de proceso, sin duda es necesario, generar en el aula más ejercicios de representación de las magnitudes termodinámicas.

Hasta aquí es importante expresar que hemos hecho una reflexión sobre un panorama general a través de teorías presentadas ya acabadas, ya estructuradas, dijimos atrás que la construcción de las teorías científicas son procesos. Por lo cual, describir los procesos de conceptualización consiste en señalar las estrategias cognitivas, modos de operar que se reconocen como patrones de organización de tales teorías sin considerar que haya que obligar a nadie a transitar por estos mismos caminos. Percibimos en el reconocimiento de estas estrategias de organización un potencial importante para el desarrollo de actividades de aula, y que si en el aula aparecen otras estrategias han de identificarse por los docentes como parte de los procesos propios de quienes construyen su conocimiento.

9.5 El tiempo, representante del cambio en los fenómenos térmicos

En dos de las actividades desarrolladas por los docentes: La construcción de termómetros y la medida de calores específicos de las sustancias, los docentes consideraron que era importante identificar cuánto tiempo tardaba la sustancia en dilatarse y contraerse. Esta fue de las primeras aproximaciones que hicieron. Su medida de las transformaciones es principalmente temporal, nos parece interesante este tipo de razonamientos porque puede llevar a consideraciones importantes como las de conductividad térmica, la ley de enfriamiento, o la caudal de flujo térmico, por ejemplo, que son magnitudes construídas observando los cambios a través del tiempo.

Esto nos lleva a resaltar que, efectivamente, combinamos estrategias para conocer, algunas veces vemos las transformaciones a través de tiempo, otras a través del espacio (como Clapeyron). Esto ocurre en la ciencia y también ocurre en el aula. Son aspectos que los docentes debemos considerar para concebir a través de qué estrategia de pensamiento están desarrollando nuestros estudiantes las conceptualizaciones, reconocer diversas estrategias nos ayudaría a pensar que tal vez, muchas veces, lo que consideramos un error conceptual es más bien una ruta distinta del conocimiento y nos daría oportunidades para explorarlas.

9.6 Reflexiones finales de este apartado

Hemos identificado en este campo, que los fenómenos térmicos se formalizan a través de dos conjuntos de razonamientos entrelazados que se establecen casi simultáneamente:

Los principios, que corresponden a efectos que ocurren o permanecen sin cambio. Las cualidades que permiten la percepción y caracterización de los fenómenos. Principios y percepciones no son, sin embargo, de la misma clase.

Los principios se manifiestan sin que necesariamente medie en ellos el establecimiento de una medida específica o una cualidad. Vamos a presentar al respecto cada una de las formulaciones consideradas principios de la termodinámica:

La ley cero: Dos cuerpos que se encuentran a diferente temperatura después de un tiempo de permanecer en contacto se encontrarán a la misma temperatura. Veíamos en el desarrollo de las teorías del calor, y también en el aula, que las personas podían enunciar este principio desde el acontecimiento común, frecuente desde las interacciones más simples a través del

tacto. No se requiere de análisis sofisticados para llegar a esta conclusión que es plenamente experiencial.

La primera Ley o principio de conservación: Sabemos que la primera ley tiene diferentes formas de enunciarse, desde el “nada nace de la nada” de los antiguos griegos, “los efectos son proporcionales a las causas” hasta formas más recientes como “la energía no puede crearse ni destruirse, solamente transformarse”. Estos enunciados en sí mismo no encierran una necesidad operatoria, son principios porque actúan de acuerdo a una lógica causal, indemostrable, que no necesita medida. Caso contrario es el enunciado formal de Clausius, él como ya hemos dicho tiene que argumentar que “el calor es la suma del trabajo interno y el trabajo externo del sistema” y usa como ya hemos señalado las medidas de convertibilidad como argumento.

Ley tercera: El calor fluye de los lugares de mayor temperatura a los de menor temperatura, recordemos a Black nuevamente y su argumentación mostrando que no existen fuentes frías sino a causa de la ausencia de calor.

Tras desarrollar estos procesos cognitivos -que consisten en: comparar, diferenciar, clasificar, analizar, etc. se establece la generalización sobre diferentes casos de estudio que permitan establecer el enunciado como una regularidad que obtenga el estatus de principio. Así en el proceso de construcción de conceptualizaciones se establece un vínculo entre lo perceptual y lo enunciativo [semántico]. Donde la realización de cualquier experiencia implica la adhesión a un conjunto de presuposiciones teóricas.

Estos principios son análogos a la expresión todo cuerpo tiene masa. Ocurren, son descripciones del acontecimiento, desde antes de llegar a la ciencia, son leyes de la experiencia.

Por otra parte, están las cualidades, que permiten la percepción y caracterización de materiales, de relaciones, de ordenaciones, y devienen medidas. Con estas es posible justificar los principios.

10 Conclusiones generales

∞ A continuación, recapitulamos sobre esta propuesta de investigación, señalamos hasta qué punto cumplimos con los objetivos y cómo respondimos a nuestras preguntas, concluyendo sobre los conocimientos obtenidos a lo largo de su desarrollo.

Esta propuesta estuvo encaminada a abordar los estudios históricos de la ciencia, de tal modo que fuera posible identificar en la evolución histórica ciertas lógicas y perspectivas en las que se constituyó la termodinámica como teoría que ha aportado a la física, y a las ciencias, una mirada dinámica y holística sobre los fenómenos naturales. Todo esto con el fin de allegar criterios pedagógicos y didácticos para la enseñanza, dirigida hacia la formación de profesores de ciencias.

Esta intención contempló el reto y compromiso que implica, para los educadores formadores de educadores, desarrollar investigaciones y propuestas de enseñanza que articulen escenarios de significación sobre los campos disciplinares que son objetos de nuestro estudio. Ese compromiso implicaba hacer reflexiones sobre los contenidos disciplinares, pedagógicos y didácticos.

De ahí que la historia de las ciencias, especialmente la historia de los contenidos científicos, fuera vista como un territorio potencial para identificar los procesos de construcción de conocimiento que aportaran a la construcción de conocimiento escolar. En este camino, la epistemología y la filosofía de las ciencias se fueron convirtiendo en lugares imprescindibles para reconocer que los conocimientos científicos siempre están situados en formas de ver, pensar y operar en el mundo.

El enfoque estaba puesto en identificar rutas de trabajo que contribuyeran a la formación de docentes a través de la comprensión de estos procesos de formación conceptual. Este campo de la formación de conceptos ha sido objeto de estudio de múltiples disciplinas: la física, la filosofía, la lingüística y también psicología, la matemática o biología, entre otras disciplinas, cooperaron en la consolidación de ese gran movimiento intelectual que ha sido el

constructivismo. Hemos mostrado estos aspectos en aquello que llamamos el campo temático.

Presentamos a continuación las conclusiones, según los objetivos propuestos para este trabajo:

10.1 Sobre la constitución de los procesos de conceptualización como campo de estudio

Los físicos han aportado sus reflexiones sobre cómo se construyen conceptos y teorías, qué significan, cómo se estructuran, fortaleciendo la mirada histórica y filosófica de la ciencia.

En este trabajo identificamos diferentes escuelas de pensamiento que han contribuido a la comprensión de la problemática, desde las preocupaciones teóricas de Duhem, Mach, Poincaré, pasando por el círculo de Viena, y hasta al nuevo experimentalismo o nueva filosofía de la ciencia, vimos cómo estas escuelas propiciaron discusiones que abrían el camino hacia la indagación sobre la formalización conceptual para la enseñanza aprendizaje de las ciencias.

De ahí concluimos que existe una gran diversidad de enfoques e intenciones en relación con el análisis de la formación de conceptos y organización teórica de la física, que cruza desde un enfoque principalmente sintáctico, en el cual conceptos y teorías se describieron desde el análisis lógico operacional de la producción de enunciados y las reglas y principios de esa lógica operacional, hasta el enfoque de modelos conjuntísticos para el cual los modelos se definen como campos semánticos o conjuntos representacionales poniendo su atención sobre la interpretación y el sentido dentro del corpus estructurado de una teoría matemática, y estableciendo las reglas de operación sobre los conjuntos de enunciados y no sobre la sintaxis de los mismos.

Desde nuestra perspectiva, que hemos argumentado en el capítulo tres, las dos miradas hacen sus aportaciones a la discusión suponiendo que la matemática, el esquema formal, se constituye como verdadero en cuanto matemático y lógicamente estructurado. Al establecer una separación entre significado y representación dejan sin cuestionar la constitución del concepto matemático.

Esto nos llevó a fijarnos en aquellas corrientes que enfocaran la formación de conceptos valorando el papel del proceso perceptivo a lo largo de la estructuración de esquemas teóricos, el empirismo y el nuevo experimentalismo llamaron la atención hacia este aspecto. Concluíamos del análisis de estas corrientes que se basan en la concepción de que la teoría por simbólica y la experimentación por práctica son dos lugares independientes aunque correlacionados.

Así los enfoques hasta el momento interpretados se mostraban constituidos bajo las dicotomías teoría – experimento, sentido – representación, símbolos – significados. Por otra parte, la perspectiva fenomenológica de las ciencias aparecía mostrando la disolución de estas dicotomías y poniendo el énfasis de la formación de conceptos y estructuración de teorías, en un sistema de relaciones y haciendo énfasis en el proceso de organización de esas relaciones.

Concluimos que en la comprensión de cómo las personas construimos y organizamos nuestros conocimientos, y para actuar en la enseñanza de las ciencias, este acercamiento brindaba formas más orgánicas tanto en la comprensión de la relación sujeto – mundo, como en el dinamismo de los esquemas de comprensión, pues antes de establecerse una lógica proposicional en la que se basan el enfoque sintáctico o semántico, la lógica aquí se ubica en la coordinación de acciones de los sujetos sobre los objetos, que ya nos había sido mostrado por la filosofía natural. El énfasis se hace desde la organización corpórea de nosotros mismos vistos como un proceso cambiante en la comprensión, y no únicamente un mundo intelectual cuya lógica se ubica netamente en el raciocinio.

Bajo esa comprensión señalamos que entendemos la formalización como un proceso, y la estructura teórica no como la estructura final y organizada, sino como una estructura de sentido que se organiza, cambiante, en la cual el sujeto es siempre activo.

10.2 Sobre los análisis históricos

En ese contexto de comprensión de la formalización, nos propusimos identificar y describir los procesos de conceptualización y modelación en el desarrollo histórico de las teorías del calor que aportan a estructurar el campo de la termodinámica. Seleccionamos para ellos dos periodos históricos fundamentales, el siglo XVIII, y siglo XIX, que estudiamos a través de las teorías organizadas por científicos representativos. Asumimos una postura de análisis

histórico, que fue análisis de contenido a través de estudios histórico críticos. En los capítulos cuatro y cinco de este documento describimos estos procesos, nos enfocamos en identificar cómo se conforman las acciones y conceptualizaciones que llevan al científico a sus estructura, cuáles son sus argumentos y cuáles sus acciones. En este sentido consideramos que hemos conseguido resolver ese propósito de investigación. (Ver pág.76).

En estos capítulos pudimos apreciar distintos aspectos de la formalización:

Concluimos que los enunciados teóricos o principios fundamentales de la termodinámica se constituyen mucho antes de tener establecido un corpus teórico como tal, es el caso del enunciado del segundo principio de la termodinámica que Black identifica a través de la unificación de las sensaciones caliente – frío.

También concluimos que, para que los científicos pudieran avanzar en sus estudios sobre el calor y comprender las nociones de lo térmico, fue necesario que hicieran énfasis en los efectos que produce el calor en contacto con sustancias, de ahí emergen varios conceptos de calor que están ligados al comportamiento de las sustancias: Expansiones y compresiones, cambios de fase, calentamientos y enfriamientos, etc.

Estos comportamientos son ordenables, reproducibles, medibles por lo cual se convierten en magnitudes importantes para hablar de lo térmico. El periodo de análisis de estos comportamientos fue productivo en el establecimiento de métodos experimentales que son fundamentales para la organización de tablas de medidas.

A través de los datos y las tablas, siempre vinculados a los comportamientos de las sustancias, se establecen generalidades que se representan simbólicamente, gráficamente y cuya representación no se puede separar del fenómeno estudiado, emergen de éste y establecen estructuras de comprensión más robustas y sofisticadas.

Todo esto nos presenta las características de la organización teórica establecida en el campo de la termodinámica. Por lo cual, consideramos que hemos dado respuesta a nuestra primera pregunta planteada en el diseño metodológico. ¿Cómo se desarrollan los procesos de conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos, en la termodinámica clásica? (Ver pág. 72).

La descripción de este desarrollo histórico de las teorías del calor, nos permitió seleccionar, fragmentos que consideramos podían ser ejes de discusión de la secuencia didáctica de trabajo que se presentó a un grupo de docentes. El planteamiento de la secuencia, nos llevó a identificar y explicitar cuáles serían las acciones que consideraríamos ejes estructurantes de la intervención en el contexto de formación de profesores. Ejercicio que nos llevó a describir algunos los criterios pedagógicos y didácticos que se surgen del estudio de caso y qué aporten a la formación de docentes de ciencias.

10.3 Sobre los criterios pedagógicos y didácticos

Uno de las preguntas planteadas fue ¿Cuáles son los criterios pedagógicos y didácticos que surgen de este estudio de caso y qué aportan a la formación de docentes de ciencias? Al respecto tuvimos que señalar que en la formación de docentes de física los criterios pedagógicos son aquellos que guían las acciones sobre qué enseñar, con qué finalidad en un marco epistémico global de nuestra comprensión de la enseñanza de la física. Los criterios didácticos están más involucrados con el contenido disciplinar y las acciones específicas para la intervención didáctica, cómo se organizan las actividades, cuáles son pertinentes y cuáles necesitan ser modificadas etc.

En el capítulo siete, presentamos nuestras reflexiones sobre estos criterios, que organizamos bajo el esquema experiencia – lenguaje – conocimiento, que extrapolamos a tematizar, experimentar y formalizar, y los asemejamos con el campo de acciones que es necesario considerar cuando se piensa la formación de docentes y la posibilidad de que a través de estas acciones los docentes puedan desarrollar sus propias prácticas.

Estos criterios están sujetos también a los contenidos disciplinares, por lo cual involucran a los docentes en la comprensión de campos de estudio. Y a su vez, están orientados por la convergencia de la historia, la fenomenología y la epistemología de la física. Esto nos lleva a afirmar que, pese a la complejidad que implica abordar investigaciones que entrelazan diferentes disciplinas con métodos particulares, hemos dado respuesta a otro de nuestros grandes objetivos, describir los criterios pedagógicos y didácticos que se surgen del estudio de caso y describir sus aportaciones a la formación de docentes de ciencias con lo cual, dimos respuesta a la pregunta que nos habíamos planteado. ¿Cuáles son esos aportes en la formación de docentes? El análisis de los materiales y discursos desarrollados por el grupo de docentes muestra la transformación en la comprensión del campo de estudio, pero

además, el despliegue de habilidades para el desarrollo de experiencias prácticas, y lecto escriturales que quedó consignado en las bitácoras muestra diferencias entre el tipo de explicaciones que se hicieron cada vez más elaboradas.

10.4 Sobre los procesos de formalización en el aula

Por otra parte, otro de los aspectos que habíamos señalado en el diseño metodológico, tenía que ver con interpretar los procesos de formalización: conceptualización, modelación y teorización en la construcción de conocimiento sobre los fenómenos térmicos que desarrollan los docentes de ciencias al hacer uso del análisis de estos episodios históricos.

En el capítulo ocho, hemos presentado la ruta que desarrollamos para hacer esa interpretación, queríamos identificar las aportaciones que los episodios históricos brindan en el trabajo de aula. Y consideramos que hay aportaciones de diferente tipo:

Veíamos a los docentes comparar sus apreciaciones y encontrar en la ideas de los científicos resonancia con sus propias ideas. También inspiración para el desarrollo de sus actividades experimentales, algunos estudiantes apreciaron la pertinencia de estos estudios y diseñaron para sus aulas material de trabajo. Esta sería otra posible ruta de investigación, indagar cómo estos estudios impactan las aulas escolares, eje que no fue contemplado en la propuesta aunque muestra una posibilidad de ampliación de investigaciones en este campo.

Los veíamos desplegar su creatividad para el desarrollo de los experimentos. Las lecturas no fueron fáciles para algunos docentes, las más difíciles aquellas que implican la interpretación de la representación y modelación formal. Y esto es un resultado que nos invita a tener que potencializar este aspecto dentro de nuestra comunidad educativa. Es necesario seguir identificando estrategias para que los docentes podamos tener herramientas comunicativas y representacionales sólidas.

No todos los grupos de trabajo tuvieron el mismo compromiso y nivel de implicación en las actividades. Sin embargo, a pesar de ser una propuesta desarrollada en condiciones difíciles como fue el periodo de pandemia, las personas se mostraron interesadas y entusiasmadas con los experimentos exploratorios, que además, nos dejó la lección de que no siempre se requiere de laboratorios sofisticados para el trabajo en el aula.

No sabremos señalar cuánto será el impacto del trabajo que desarrollamos, sin embargo a través de las descripciones que hicimos vemos que se generaron posibilidades de análisis sobre los fenómenos, que en nuestra clase, movilizaron sus saberes y estructuraron preguntas, en este sentido pensamos que la intervención pudo ser un aporte a su formación.

10.5 Sobre los objetivos didácticos desarrollados a través de la secuencia didáctica

La descripción de las conceptualizaciones alcanzadas por los docentes, junto a la deducción de estrategias cognitivas en la construcción de conocimiento de los profesores de ciencias, muestra que los objetivos específicos propuestos en la secuencia didáctica para las dos unidades desarrolladas: Construyendo la base fenomenológica de lo térmico, La máquina de Vapor y la búsqueda de la eficiencia, se cumplieron. El hilo conductor fue la conceptualización sobre el calor que llevó a pensar en los efectos sobre las sustancias, y en la producción de trabajo mecánico a través del cual se caracterizó y reconceptualizó según sus manifestaciones, generando una ruta de análisis cuyo punto de partida fueron los efectos sobre las sustancias y su lugar de destino el análisis de los procesos.

Uno de los aspectos importantes en la comprensión de la termodinámica que se quiso estudiar en relación con la conceptualización de los docentes fue la magnitud entropía, eje del análisis de la tercera parte de la secuencia didáctica que, aunque se trabajó con los docentes causó bastante dificultad para ellos. Los profesores esperaban de esta sección una propuesta experimental que dirigiera la lectura como en los otros momentos estudiados. Por lo cual la lectura del documento guía: Reversibilidad e Irreversibilidad de Max Planck (1915), aunque a los docentes les pareció interesante fue poco significativa para ellos. Esta debilidad genera una ruta de trabajo sobre el concepto de entropía y la reversibilidad e irreversibilidad de los procesos, que posibilita la búsqueda de un abordaje de la termodinámica desde este eje de estudio.

10.6 Rutas de continuidad y ampliación de esta investigación

Uno de los aparentes limitantes en el desarrollo de la investigación tuvo que ver con que la secuencia didáctica fue presentada a través de herramientas tecnológicas de forma remota. Sin embargo, pese a esa limitación, en la cual no sólo hizo falta la comunicación presencial y el trabajo más formal de laboratorio, se pudo evidenciar el campo de posibilidad de la experimentación exploratoria casera pues los docentes estuvieron verdaderamente

comprometidos con el despliegue de las actividades, de ellas derivaron preguntas pertinentes, mostraron su capacidad creativa y resiliente en medio de esta circunstancia. Por nuestra parte, pese a lo agotador del trabajo remoto, realmente estuvimos complacidos por la recursividad de los docentes, que nos llevó a utilizar material audiovisual de internet que se percibe en las bitácoras y la documentación. Durante las actividades presenciales estos recursos habitualmente se usan menos. Así que nos ha llevado a pensar en que es posible como campo de oportunidad para trabajos futuros, usar las plataformas digitales para hacer propuestas de enseñanza de la física que se acompañen de laboratorios virtuales y caseros.

En general, la investigación deja diferentes rutas de trabajo abiertas porque las preguntas pueden reformularse para otros campos temáticos de la física, la construcción de una mirada dinámica en física es uno de los aspectos a seguir desarrollando. De igual forma, como experiencia es posible encontrar otros caminos donde la perspectiva del análisis histórico no dé la impresión de que nuestra postura respecto a la historia es reproducir una reconstrucción lineal de la disciplina para la enseñanza.

Sin duda, la tesis permitió ampliar la perspectiva en torno a los fenómenos posibles de profundizar con docentes en formación y en ejercicio, de hecho, se tuvo la posibilidad de dirigir tres trabajos de grado de profesores de la Licenciatura en física que abordan problemas térmicos para la secundaria pero que están enfocados en la comprensión fenoménica por parte de jóvenes escolares. Estos trabajos se titulan:

- Radiación térmica: construyendo la identidad entre luz y calor. (Moreno Arias, 2017).
- Enseñanza de los procesos de convección en relación con el movimiento de placas tectónicas y el fenómeno de subducción en la Tierra, una propuesta de aula desde la asignatura de física. (Robles Méndez, 2021)
- El fenómeno de la circulación termohalina y su influencia en los cambios de temperatura en el planeta: propuesta experimental sobre una de las causas naturales del cambio climático. (Pulido Jiménez , 2021)

Cuyos títulos reflejan el campo de posibilidades para trabajo escolar que brinda la comprensión disciplinar. Estos trabajos tuvieron un enfoque experimental y un componente histórico soporte de la comprensión temática de los docentes, y sobre todo, permitieron

involucrar a los estudiantes de escuela básica secundaria en comprensiones científicas de problemas vigentes que les llamaron la atención y les condujo en la significación de los fenómenos físicos desde una tematización poco convencional, vinculada a una perspectiva global de la ciencia.

El problema de la formalización matemática también es una ruta abierta, pues fue evidente la dificultad que causa la significación de las representaciones como los diagramas de fase, en especial para los docentes de química y biología. Elemento que dificulta formalizaciones y razonamientos desde un cálculo más estandarizado y que es un asunto importante de tratar, si se quieren comprender las nuevas aportaciones que estas representaciones conllevan al estudio de los térmico en la termodinámica actual.

10.7 Nuestra reflexión final

Centrar los procesos de enseñanza de las ciencias en las consideraciones fenomenológicas nos reubica en la necesidad de comprender el mundo físico. El fenómeno se establece como un centro de convergencia para ser – pensar y actuar en el aula, envuelve la experiencia adquirida a través de acciones, de decisiones, de saberes, y en este sentido incluye la diversidad epistemológica que sugieren los estudios sociales de la ciencia.

La experiencia es práctica, es acción. La construcción de fenomenologías de estudio en física es imposible sin el despliegue de la actividad experimental, la relación de los sujetos con los efectos, artefactos, con instrumentos para organizar medidas y magnitudes, nos ubica como sujetos de conocimiento, nos pone como sujetos activos, nos induce a una percepción reflexiva que involucra el cuerpo, la mente, y hace consciente el conceptualizar, formalizar y modelar que hay en nuestra práctica y la de los jóvenes que formamos como docentes.

Comprender lo que significa la fenomenología como marco de acción para el aula, donde los sujetos organicen desde su conciencia perceptiva y hagan explícitas sus experiencias, las representen, las hablen, las sustenten, nos parece que tiene un potencial educativo importante para que continúe siendo reflexionado a profundidad en la enseñanza de las ciencias.

A su vez, la fenomenología como método de organización de la experiencia tiene una gran potencialidad de desarrollo en investigación educativa en ciencias. Los docentes no tenemos siempre la posibilidad de documentar cada experiencia, y las acciones investigativas se hacen cada vez más técnicas y menos reflexivas, salir de ese lugar, y ubicarse en la reflexión del

fenómeno-aula-intervención, fue uno de los ejercicios más difíciles durante este trabajo de investigación. Abordar la intervención didáctica desde la descripción, para posteriormente, resignificar las acciones, los contenidos, los aspectos de mejora y desarrollo como docente formadora, ha sido verdaderamente enriquecedor, porque ha hecho explícitas formas de proceder y de argumentar de todos los participantes, incluidas aquellas que me son propias, y con ello me ha permitido fortalecer la visión sobre las relaciones intersubjetivas en la construcción de conocimiento y formalización en física.

Por otra parte, este estudio me ha permitido ampliar el panorama sobre el campo de posibilidades de investigación en relación con estudios de caso más particulares sobre ciertas clases de fenómenos que por sí solos constituyen grandes cuerpos teóricos: como los fenómenos de transporte, por ejemplo.

Así, el recorrido que hemos hecho a lo largo de la investigación, nos deja grandes oportunidades para llevar la investigación fenomenológica no sólo al estudio de los procesos de conceptualización en relación con otros campos de la física, también a estructurar rutas metodológicas en investigaciones que comprendan la historia y la fenomenología para la enseñanza de las ciencias sus diversos campos fenoménicos.

Enseñar a pensar desde la fenomenología,

“Optamos por ella porque hace de la existencia, la experiencia vivida y el cuerpo el núcleo de sus planteamientos; este es nuestro suelo (*Boden*), el mundo de la vida (*Lebenswelt*) pre-predicativo en el que estamos inmersos siempre; ese es el mundo que Husserl condujo a la subjetividad, el lugar de la intersubjetividad inmediata, el horizonte originario. La fenomenología describe las vivencias y aclara el sentido que nos envuelve en nuestra vida cotidiana, el significado del ser humano, en suma, la experiencia que somos. ... Ahora bien, Husserl y Merleau-Ponty consideran que la percepción no basta, puesto que no es suficiente habitar el mundo para comprenderlo, porque el mundo de la vida no es una unidad fáctica, sino la unidad del sentido que teje todo lo que hay. Los dos se sirven de la fenomenología para recuperar la *Lebenswelt* [El mundo de la vida]; ambos entienden la filosofía como pregunta planteada a la vida silenciosa que está ahí antes del *Logos*, porque es el ser que precede a todo pensamiento del ser. El objetivo de la fenomenología es describir la íntima relación existente entre ambos; de modo que, si queremos enseñar a ser (no a tener), tenemos que enseñar a pensar y el pensamiento no es nada si no es crítico de lo dado; no es la reproducción de lo que hay, una simple justificación de las condiciones de existencia actuales, sino que ha de descubrir las insuficiencias de las mismas y superarlas...

Todo concepto de "educación" y todo modelo educativo descansan en determinada concepción del conocimiento. Generalmente, éste se concibe estáticamente, como algo ya dado y la educación se entiende correlativamente como transmisión de un producto acabado. Si consideramos el conocimiento, como lo ha hecho siempre la fenomenología, dinámicamente, como un proceso y nos interesamos por el contenido sustantivo del pensamiento y por la elaboración de las bases necesarias para la adquisición de todo conocimiento, se transforma nuestra concepción de la educación. Esa transformación se sustenta en el diálogo verdadero. Éste es, ante todo, búsqueda de la verdad y de la verdadera forma de vida humana. La verdad no ha de entenderse como posesión de un objeto o como adecuación del sujeto con el objeto, sino como un acontecimiento en el que ambos se implican. Entendida así hermenéuticamente, la verdad acontece en el diálogo y el alumno participa en ella tanto como el enseñante.”

Carmen López Sáenz, 1998

11 Bibliografía

- ALLEA Science Education Working Group. (s.f). Obtenido de ALLEA Science Education Working Group: <https://allea.org/science-education/>
- Adúriz-Bravo, A. (1999). *Elementos de Teoría y de Campo para la Construcción de un Análisis Epistemológico de la Didáctica de las Ciencias*. Barcelona: Master's Dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Adúriz-Bravo, A. (2001). *Integración de la epistemología en la formación del profesorado de ciencias*. Bellaterra (Barcelona): Tesis de Doctorado, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Adúriz-Bravo, A. (2017). Pensar la enseñanza de la física en términos de “competencias”. *Revista de Enseñanza de la Física*, 21-31.
- Arcá, M., Guidoni, P., & Mazzoli, P. (1990). *Enseñar Ciencia. Cómo empezar: reflexiones para una educación científica de base*. Barcelona: Ediciones Paidós Iberica, S.A.
- Arcá, M., Guidoni, P., & Mazzoli, P. (1990). *Insegnare Scienza. Come cominciare: riflessione scientifica di basi*. Milano: Fanco Angelo Libri (4a edizione). [Traducción: (1990) *Enseñar Ciencia. Cómo empezar: reflexiones para una educación científica de base*. Barcelona: Ediciones Paidós Iberica, S.A .
- Arcá, M., Guidoni, P. (1987). *Guardare per sistemi, Guardare per Variabili. Un approccio alla fisica e alla biologia per la Scuola dell'obbligo*. Strumenti guida per la cultura scientifica di base. Torino: Emme Edizione
- Arcà, M., & Guidoni, P. (2008). *Guardare per sistemi, guardare per variabili*. Cremona: Monotipia Cremonese s.n.c.
- Ariza, Y. (2021). Aproximaciones entre filosofía de la ciencia y didáctica de las ciencias: filosofía de la ciencia escolar y enseñanza en el nivel científico. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, 43(e58445), 1 -10.
- Ariza, Y. (2022). La noción de “modelo teórico” en la enseñanza de la química: representación y función del sistema periódico. *Educación Química*, 97 -110.`
- Arons, A.B. (1965) *Development of the Concepts of Physics*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company [Traducción (1970) Arons, A.B. *Evolución de los conceptos de la física*. México: Editorial Trillas,s. A
- Astudillo Tomatis, C., Rivarosa Somavilla, A., & Ortiz, F. (2014). Reflexión docente y diseño de secuencias didácticas. *Perspectiva Educativa. Formación de Profesores*, 130 - 144.
- Austin, J. L. (1970). *Philosophical Papers*. Oxford: Oxford University Press.

- Ayala Manrique, M. M. (2016). Los análisis histórico críticos y la recontextualización de saberes científicos. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades. *Pro-Posições*, 17(1), 19-37.
- Ayala Manrique, M. M. (2017). La enseñanza de la física para la formación de profesores de física. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*. doi: <https://doi.org/10.17227/ted.num6-5663>
- Ayala Manrique, M. M., Garzón Barrios, M., & Francisco, M. S. (2007). Consideraciones sobre la formalización y matematización de los fenómenos físicos. *Praxis Filosófica*.
- Ayala Manrique, M. M., Romero Chacón, Á. E., Aguilar Mosquera, Y., Malagón Sánchez, J. F., Rodríguez Rodríguez, O. L., & Garzón Barrios, M. (2008). *Los procesos de formalización y el papel de la experiencia en la construcción del conocimiento sobre los fenómenos físicos*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Ayala, M. M., Malagón Sanchez, J. F., & Sandoval Osorio, S. (2013). La historia en la enseñanza de las ciencias: una relación polémica. En *Cosntrucción de fenomenologías y procesos de formación. Un sentido para la enseñanza de las ciencias*. (págs. 21-36). Bogotá: Fondo editorial. Universidad Pedagógica Nacional.
- Bachelard, G. (2004). *La formation de l'épistémologie. Contribution à une psychanalyse de la connaissance*. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin.
- Balzano, E. (2007). *Concetti e competenze matematiche nella modellizzazione di fenomeni fisici. La multi-rappresentazione nello studio del moto*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/237598703>
- Bernardini, C., Tarsitani, C., & Vicentini, M. (1995). *Thinking Physics for Teaching*. New York: Springer Science.
- Besson, U.; Borghi, L.; De Ambrosis, A.; Mascheretti, P. (2007) How to teach friction: Experiments and models. *American Journal of Physics*. December 2007. DOI: 10.1119/1.2779881
- Besson, U. (2014). Teaching About Thermal Phenomena and Termodinamics: The contribution of the Historu of Science. En M. R. Matthews, *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (págs. 245 -280). Springer Science.
- Besson, U. (2015). *Didattica della Física*. Pavía: Carocci.
- Black, J. (1807). *Lectures on the Elements of Chemistry* (Firts American from the last London Edition ed., Vol. 1). (J. Robinson, Ed.) Philadelphia.

- Bonilla Montenegro, C. A. (2015). *Reflexiones sobre la relación Física y Matemática en la enseñanza de la Física. Estudio de caso: termodinámica de Clapeyron*. Obtenido de Universidad Pedagógica Nacional. <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20>.
- Bruner, J. (1990). *Actos de Significado*. (J. C. Gómez Crespo, & J. L. Linaza, Trad.) Madrid: Alianza Editorial.
- Bruner, J. (2002). *Acción, pensamiento y lenguaje*. (J. Linaza, Trad.) Madrid: Alianza.
- Calor específico Cuarto ESO*. (2022). Obtenido de https://www.edistribucion.es/anayaeducacion/8450043/recursos/u_07/ep7/p_calor_especifico_vs_latente.pdf.
- Canedo Ibarra, S. P. (2009). Contribución al estudio del aprendizaje de las ciencias experimentales en la educación infantil: Cambio conceptual y construcción de modelos científicos precursores. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Cárdenas, M., & Ragout de Lozano, S. (1997). Análisis de una experiencia didáctica para construir conceptos de termodinámica. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 170-178.
- Cardwell, D. S. (1971). *From Watt to Clausius. The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*. Ithaca, N.Y.: Cornell University Press.
- Carnap, (1985). *Fundamentación lógica de la Física*. Buenos Aires: Orbis S.A.
- Carnap, R. (1966). *Philosophical Foundations of Physics*. New York: Basics Books. Obtenido de <https://www.marxists.org/reference/subject/philosophy/works/ge/carnap.htm>
- Carnot, S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (1897 ed.). (W. L. Thomson, Trad.) Paris: Bachelier.
- Carstanjen, F. (octubre de 1897). Richard Avenarius and his General Theory of Knowledge, Empiriocriticism. *Mind*, 6(24), 449 - 475. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/2247695>
- Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y de Masa. Un enfoque práctico*. Reno: The McGraw-Hill Companies.
- Cini, M. (2002). *Caso, Necessità, Libertà*. Napoli: Ancora.
- Clapeyron, É. (1834). Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur. *Journal de l'Ecole Royale Polytechnique*, 153 - 189.

- Clausius, R. (1856). On a modified Form of the second Fundamental Theorem in the Mechanical Theory of Heat. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 81 - 98.
- Clausius, R. (1879). *The mechanical theory of heat*. (M. Walter R. Browne, Trad.) Cambridge: C.J. Clay M.A. At the University Press.
- Driver, R. (1983) *The Pupil as a Scientist*. Open University Press.
- Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A. (1985) *Children's Ideas in Science*. Open University Press
- Driver, R., Millar, R. (1986) *Energy Matters. Proceedings of an invited conference: Teaching about energy within the secondary science curriculum*. Centre for Studies in Science and Mathematics Education. University of Leeds
- Duhem, P. (1984). La teoría física y el experimento. En P. Duhem, *Teorema. Capítulo IV. Traducción de La théorie physique: son objet et sa structure* (A. Pérez Fustegueras, Trad., Vols. XIV / 3-4, págs. 543 - 582). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Duhem, P. (1992). *L'evolution de la mécanique*. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin.
- Duhem, P. (2003). *La teoría física, su objeto y su estructura*. (M. Pons Irazazábal, Trad.) Barcelona: Herder.
- Duit, R. (2009) *Bibliography – STCSE, Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. Kiel: IPN. Update up09.rtf / March 23, 2009
- Dulong, P. L., & Petit, A. T. (1819). Recherches sus quelques points importants de la théorie de la chaleur. *Annales de chimie et de physique. Tome X*, 396 - 444.
- Duschl, R. (1990). *Reestructuring Science Education* (Traducción: (1997). Madrid: Narcea Ed. ed.). New York: Teachers College Press.
- Ellis, B. (1966). *Basic Concepts of Measurement*. Cambridge: Cambridge University.
- Espinet, M., Izquierdo, M., Bonil, J., Ramos, L. (2012). The role of language in modeling the natural world: perspectives in science education, In B.J Fraser et al (eds). *Second International Handbook of Science Education*, Springer international Handbooks of Education 245, 1385-1403. DOI 10.1007/978-1-4020-9041-7_89
- Estany, A. (1990). *Modelos de cambio científico*. Barcelona:: Crítica.
- Fagúndez Zambrano, Th. (2006) *Análisis del Discurso en Clases de Física Universitaria. Implicaciones para la mejora de la práctica docente*. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona
- Filippi, S. (2021). El método histórico-crítico en filosofía. *Escritos* 29, 29(62), 6 - 16.

- Flores Macías, G. (2018). Metodología para la Investigación Cualitativa. *Revista Latinoamericana de Psicoterapia Existencial UN ENFOQUE COMPRENSIVO DEL SER*,(17), 17 - 23.
- Forato, T. C., Martins, R. d., & Pietrocola, M. (2012). History and Nature of Science in High School: Building Up Parameters to Guide Educational Materials and Strategies. *Science & Education*, 657-682.
- Franklin, A. (16 de Octubre de 2019). *Experiment in Physics*. Recuperado el 2022, de Stanford Encyclopedia of Philosophy: <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/physics-experiment>
- García Arteaga, E. G. (2011). *Las prácticas experimentales en los textos y su influencia en el aprendizaje. Aporte Histórico y filosófico en la física de campos*. Barcelona: Tesis Universidad Autónoma de Barcelona.
- García Arteaga, E. G. (2018). *Historia de las ciencias en textos para la enseñanza - Neumática e hidrostática*. Cali: Universidad del Valle.
- García, R. (1997). *La epistemología genética y la ciencia contemporánea. Homenaje a Jean Piaget en su centenario*. Barcelona: Gedisa. S.A.
- García, R. (2006). *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona: Gedisa.
- Garzón Barrios, M. (Diciembre de 2015). Memoria sobre el calor por MM. Lavoisier y De Laplace. (M. Garzón Barrios, Trad.) *Física y Cultura. Cuadernos sobre Historia y Enseñanza de las Ciencias*, 141 - 158.
- Garzón Barrios, M., Tarazona Vargas, L., Sandoval Osorio, S., Malagón Sánchez, J. F., & Ayala Manrique, M. M. (2020). El efecto Volta. Un caso de estudio sobre la producción de efectos sensibles y los procesos de teorización en ciencias. *Ensaio Pesquisa em Educacao em ciências*, 22, 1-22. doi:10.1590/1983-21172020210113
- Giere, R. N. (2004). How models are used to represent reality. *Philosophy of Science*, 742 - 752.
- Giorgi, A., Giorgi, B., & Morley, J. (2017). The Descriptive Phenomenological Psychological Method. En S. Brown, & A. Locke , *The SAGE Handbook of Qualitative Research in Psychology* (págs. 176 -192). 55 City Road: SAGE Publications Ltd .
- Guedj, M. (2006). Du concept de travail vers celui d'energie: L'apport de Thomson. *Revue d'histoire des sciences*, 29 -50.

- Guerlac, H. (Junio de 1957). Joseph Black and Fixed Air a Bicentenary Retrospective, with Some New or Little Known Material. *Isis*, 124-151.
- Guerrero Pino, G. (2007). Van Fraassen y la concepción estructuralista de las teorías. *Práxis Filosófica*, 21 - 38.
- Guerrero Pino, G. (2012). Datos, fenómenos y teorías. *Estudios de Filosofía*(45), 9 - 32.
- Guidoni, P. (1985) On Natural Thinking. *European Journal of Science Education*, 7(2), 133-140
- Guidoni, P. (1986). A phenomenological approach to the development and differentiation of energy ideas. En R. Driver, & R. Millar, *Energy Matters*. Centre for Studies in Science and Mathematics Education. (pág. 100-132)
- Guidoni, P. (2001) Explaining and Understanding in Physics, SeCiF: a project for correlated teachers' formation and curriculum innovation. *Proceedings of the Physics Teacher Education Beyond 2000*. Barcelona: PHYBET pp: 245-248
- Harré, R. (1986). *Grandes Experimentos científicos*. Barcelona: Labor S.A.
- Hempel, C. G. (1971). *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science. International Encyclopedia of Unified Science*. (Vol. II). Chicago: The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- Herrmann, F. (2004). *Karlsruhe Physics Cours*. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology.
- Holton, G. (2003). What Historians of Science and Science Educators Can Do for One Another. *Science & Education*, 603-616.
- Hosson, C. d., & Schneeberger, P. (2011). Orientations récentes du dialogue entre recherche en didactique et histoire des sciences. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 9 -20.
- Husserl, E. (1925. Traducción 1990). Fenomenología. En H. y. Heidegger, *Enciclopedia Británica. Cuaderno 52*. (A. Ziri6n, Trad., págs. 238 - 302). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Izquierdo Aymerich, M., García Martínez, Á., Quintanilla Gatica, M., & Adúriz-Bravo, A. (2016). *Historia, filosofía y didáctica de las ciencias : aportes para la formación del profesorado de ciencias*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Izquierdo-Aymerich, M., & Adúriz-Bravo, A. (2003). Epistemological Foundations of School Science. *Science & Education*, 2, 27-4.

- Jou, D. (1985). *Introducció a la termodinàmica de los processos biològics*. Barcelona: Institut d'estudis Catalans.
- Jou, D. (1999). *Escrits fonamentals sobre el segon principi de la termodinàmica*. Barcelona.
- Kafle, N. P. (2011). Hermeneutic phenomenological research method simplified. *Bodhi: An Interdisciplinary Journal*, 5, 181 -200.
- Kallunki, V. (2001). *From Electrostatics to the circuits of the pile: Experimentality and models in concept formation*. Helsinki: University of Helsinki.
- Kipnis, N. (1 de Mayo de 2014). Thermodynamics and Mechanical Equivalent of Heat. *Science and Education*, 2007-2044.
- Klein, M. J. (1965). Einstein, Specific Heats, and the Early Quantum Theory: Einstein's quantum theory of specific heat firsts showed the power of the new concept of energy quanta. *Science*, 173-180.
- Klimovsky, G. (1997). *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*. Buenos Aires: A-Z Editora S.A.
- Kolumban , H., & Yongqi, W. (2004). Phenomenological Thermodynamics and Entropy Principles. En G. K. Andreas Greven, *Entropy* (pág. 384). Princeton: Princeton University Press.
- Koponen, I. T., Kurki-Suonio, K., Jauhiainen, J., Hämäläinen, A., & Lavonen, J. (2001). *The role of experimentality in concept formation in physics: quantifying experiments and invariances*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/278672439>: <https://www.researchgate.net/publication/278672439>
- Korzybski, A. (1951). El papel del lenguaje en los procesos perceptivos. En R. R. Blake, & G. V. Ramsey, *El papel del lenguaje en los procesos perceptivos* (pág. 27). Nueva York: The Ronald Press Company.
- Kuhn, T. S. (1982). *La tensión esencial*. Impreso en España: Fondo de Cultura Económica.
- Lavoisier, A., & De Laplace, P. (1780). Mémoire sur la Chaleur. *Mémoires de l'Académie des sciences*, 355 - 408.
- Lavoisier, A., & De Laplace, S. (1780). *Mémoire sur La chaleur*. Paris: Mémoires de l'Académie des sciences.
- Levi, I. (1961). Concepts, Theories, and the Mind-Body Problem. *The Journal of Philosophy*, 58(9), 241 - 249.

- Levy -Leblond, J. M. (1998). Física y Matemáticas. En R. Apéry, *Pensar la matemática*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Lewis, E. (2005). Conceptual change among middle school students studying elementary thermodynamics. *Journal of Science Education and Technology*, 3 -31.
- Lienhard IV, J. H., & Lienhard V, J. H. (2015). *A Heat Transfer Textbook* (4th ed.). Cambridge, MA.: Phlogiston Press.
- Lijnse, P. (2010). Lessons I have learned. En K. Kortland, & K. Klaassen, *Designing Theory-Based Teaching-Learning. Proceedings of the symposium in honour of Piet Lijnse* (págs. 79 - 88). Utrecht: Utrecht University– FIsme series on Research in Science Education.
- López Sáenz, C. (15 de Agosto de 1998). *Enseñar a pensar desde la fenomenología*. (T. W. Philosophy, Ed.) Recuperado el Octubre de 2022, de Paideia Project On-Line: <https://www.bu.edu/wcp/index.html>
- Mach, E. (1919). *The science of mechanics. A critical and historical account of it's development*. (T. J. McCormack, Trad.) Chicago: The open court publishing co.
- Mach, Ernst (1886) *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*, Jena. [Traducción: *El análisis de las sensaciones*, Alta Fulla Editorial, 1987, (basada en una traducción del 1925)]
- Mahmud, M. C., & Gutierrez, O. A. (2010). *Estrategia de enseñanza basada en el cambio conceptual para la transformación de ideas previas en el aprendizaje de las ciencias*. Formación Universitaria, 3(1), 10
- Mäntylä, T. (2011). *Didactical reconstructions for organizing knowledge in physics teacher education*. Helsinki .
- Matthews, M. R. (1990). History, Filosofía and Science Teaching. En *Studies in Science Education* (págs. 25 - 51). Centre for Studies in Science and Mathematics Education. University of Leeds.
- Matthews, M.R. (2014). Introduction in *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* . Springer Science.
- Matthews, M. R. (2017). *La enseñanza de la ciencia. Un enfoque desde la historia y la filosofía de la ciencia*. Mexico: Fondo de Cultura Economica.
- Mejía Rebolledo, P. A. (2008). *Elaboración de un calorímetro de Flujo Junkers*. Bogotá: Universidad de los Andes.

- Méndez Coca, D. (2012). *Didáctica y aprendizaje de los conceptos básicos de termodinámica*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Merleau Ponty, M. (1993). *La fenomenología de la percepción*. Barcelona: Planeta - De Agostini.
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). (Noviembre de 2001). *mineducacion.gov.co*.
Obtenido de *mineducacion.gov.co*:
<https://www.mineduacion.gov.co/1621/article-87727.html>
- Ministerio de Educación Nacional (MEN). (2002). *Lineamientos curriculares en Ciencias Naturales y Educación Ambiental*. Bogotá.
- Moreira, M. A. (octubre de 2008). Conceptos en la educación científica: Ignorados y subestimados. *Revista Curriculum*, 21, 9 - 26.
- Moreno Arias, C. C. (2017). *Radiación Térmica: Construyendo la Identidad entre Luz y Calor*. Bogotá. : <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/9925>.
- Moulines, C. U. (1982). *Exploraciones Metacientíficas. Estructura, desarrollo y contenido de la ciencia*. Madrid: Alianza Editorial. Textos.
- Müller, I. (2007). *A History of Thermodynamics. The doctrine of Energy and Entropy*. Berlin: Springer - Verlag Berlin Heidelberg.
- Nardi, R. (2009). *Ensino de ciências e matemática, I: temas sobre a formação de professores*. São Paulo: Editora UNESP.
- Nardi, R., & De Almeida, M. J. (2008). Educación en Ciencias: lo que caracteriza el área de enseñanza. *Revista Electrónica de Investigación*, 24-35.
- Olivé, L., Boaventura de Sousa, S., Salazar, C., Antezana, L. H., Navia Romero, W., Tapia, L., & Valencia García, G. (2009). *Pluralismo Epistemológico*. La Paz: Muela del Diablo Editores.
- Østergaard, E., Dahlin, B., & Hugo, A. (2008). Doing phenomenology in science education: a research review. *Studies in Science Education*, 93 - 121.
- Palacios Hernández, A. A., & Laguna Rivera, C. A. (2022). *La idea de equilibrio-desequilibrio del Calórico en el ciclo de Carnot : un análisis para la enseñanza de los procesos térmicos*. Obtenido de <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/18650>
- Panizza, M. (2005). *Razonar y Conocer. Aportes a la comprensión de la racionalidad matemática de los alumnos*. Buenos Aires: Libros del Zorzal.

- Paty, M. (2003). The idea of quantity at the origin of the legitimacy of mathematization in physics. *Constructivism and Practice: Towards a Social and Historical Epistemology*, 109 -135.
- Peduzzi, L. O., Martins, A. F., & Ferreira, J. M. (2012). *Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino*. Natal/RN | Brasil: Editora da UFRN -Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte.
- Peirce, C. S. (1986). *La ciencia de la semiótica*. Buenos Aires: Ediciones Nueva Visión.
- Pérez, J. R. (2013). *Perspectivas didácticas de una aproximación histórica a la medición del concepto de temperatura*. *Latinoamerican Journal of Physic Education*, 456-467.
- Perruchoud González, S. (2017). La fenomenología según Merleau-Ponty: un camino de descenso hacia las cosas. *Revista de Filosofía*, 59 -76.
- Piaget, J. (1975). *Introducción a la epistemología genética. El pensamiento matemático*. Buenos Aires: Paidós.
- Piaget, J. (1975). *Introducción a la epistemología genética. Pensamiento Físico*. Buenos Aires: Paidós.
- Piaget, J., & García, R. (2008). *Psicogénesis e Historia de la Ciencia*. México: Siglo XXI Editores, s.a.
- Poincaré, H. (1893). Mécanisme et Expérience. *Revue de Métaphysique et de Morale*.
- Poincaré, H. (1902). *La Science et l'hypothèse*. Paris: Flammarion.
- Prestes, M. E., & Silva, C. C. (2018). *Teaching Science with Context. Historical, Philosophical, and sociological approaches*. (M. E. Prestes, & C. C. Silva, Edits.) Sao Paulo, Brasil: Springer.
- Pulido Jiménez, M. L. (2021). *El fenómeno de la circulación termohalina y su influencia en los cambios de temperatura en el planeta: Propuesta experimental sobre una de las causas naturales del cambio climático*. Bogotá: <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/13455>.
- Ramirez, M. T. (2013). *La filosofía del quiasmo. Introducción al pensamiento de Maurice Merleau-Ponty*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Reyes Roncancio, J. D. (s.f). Conocimiento didáctico del contenido y formación de profesores de física: elementos para la investigación. En *Pedagogía, Didáctica y Conocimiento del profesor* (págs. 55-71). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Robles Méndez, C. A. (2021). *Enseñanza de los procesos de convección en relación con el movimiento de placas tectónicas y el fenómeno de subducción en la Tierra, una propuesta de aula desde la asignatura de física*. Bogotá: <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/16796>.
- Roller, D. (1956) The Early development of the Concepts of Temperature and Heat (Roller). In: Bryant, J.; Nash, L. editors. *Harvard case histories in experimental science*, vol. 1, Cambridge: Harvard University Press (117-214)
- Romero Chacón, Á. E., & Rodríguez Rodríguez, O. L. (2003). La formalización de los conceptos físicos. El caso de la velocidad. *Educación y Pedagogía*, XV(35), 53 - 67.
- Ruso, R. C. (2001). El concepto de zona de desarrollo próximo. *Revista Cubana de psicología*, 72 - 76.
- Salgado Lévano, A. C. (2007). Investigación Cualitativa: Diseños y Evaluación del Rigor metodológico y retos. *Liberabit*, 71 -78.
- Salgado Levano, A. C. (2007). Investigación cualitativa: Diseños, evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit*, 71 -78.
- Sandoval Osorio, S., Malagón Sánchez, J. F., Garzón Barrios, M., Ayala Manrique, M. M., & Tarazona Vargas, L. (2018). *Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias*. Bogotá: CIUP - Universidad Pedagógica Nacional.
- Sandoval Osorio, S., Malagón Sánchez, J. F., Garzón Barrios, M., Ayala Manrique, M. M., & Tarazona Vargas, L. (2018). *Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional, CIUP.
- Santamaria, A. (1994). The experimental situation as a communicative situation. A sociocultural analysis of its intersubjective nature. En N. Mercer, & C. Coll, *Explorations in Socio-Cultural Studies. Teaching, Learning and Interaction* (págs. 65-69). España: Aprendizaje S.L.
- Seroglou, F. & Koumaras, P. (2001). The contribution of the history of physics in physics education: A review. *Science & Education*, 10(1), 153–172.
- Sistema Nacional de Información para la Educación Superior en Colombia (SNIESC). (Agosto de 2022). *Sistema Nacional de Información para la Educación Superior en Colombia*. Ministerio de Educación Nacional. Obtenido de Sistema Nacional de Información para la Educación Superior en Colombia. Ministerio de Educación Nacional.: <https://hecaa.mineducacion.gov.co/consultaspublicas/programas>

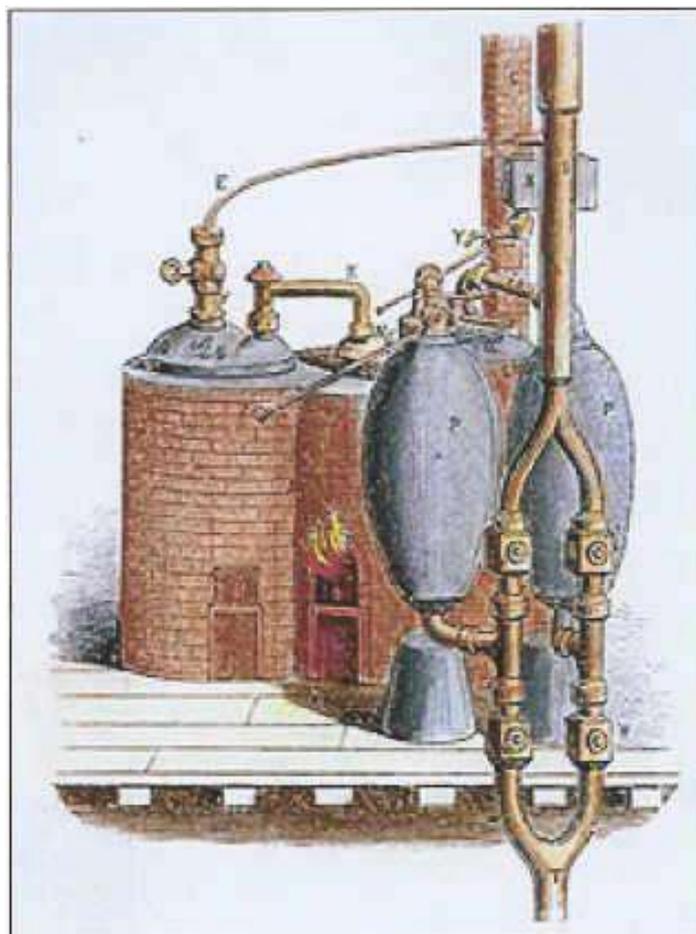
- Stadler, F. (2010). *El círculo de Viena. Empirismo lógico, ciencia, cultura y política*. México. D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Staley, R. (2008). The Fin de Siècle Thesis. *Ber. Wissenschaftsgesch*, 31, 311 -330.
- Suppe, F. (1979). *La estructura de las teorías científicas*. (P. Castrillo, & E. Rada, Trans.) Madrid: Editora Nacional.
- Teoría de la Gestalt. Tercera Parte*. (s.f.). Recuperado el 2022, de Teoría de la Gestalt. Tercera Parte:
http://chamilo.cut.edu.mx:8080/chamilo/courses/MODELOSPSICOLOGICOS HUMANISMOYGESTA/document/209_Psicologia_de_la_gestalt_-1-.pdf
- Tzanakis, C. (2002). On the relation between mathematics and physics in undergraduate teaching.
- Tzanakis, C., & Coutsomitros, C. (2000). A genetic approach to the presentation of physics: The case of quantum theory. *European Journal of Physics*. *European Journal of Physics*, 276.
- Vaquer, J. M. (2018). Una descripción fenomenológica del objeto arqueológico. *Chungara Revista de Antropología Chilena*, 623 - 632.
- Venet, M., & Molina, E. C. (Enero-Diciembre de 2014). El concepto de zona de desarrollo próximo: un instrumento psicológico para mejorar su propia práctica pedagógica. *Pensando Psicología*, 10(17), 7 - 15.
- Vergnaud, G. (1990). La Teoría de los Campos Conceptuales. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 133 - 170.
- Vergnaud, G. (1991). *El niño, las matemáticas y la realidad: Problemas de la enseñanza de las matemáticas en la escuela primaria*. Mexico: Trillas.
- Vicentini, M. (1999). Thermodynamics, not just thermal physics. *Acta Scientiarum*, 795 - 803.
- Vicentini, M. (2009). Problemas en la formación de los profesores. *Revista de Enseñanza de la Física*, 7 - 3.
- Vicentini, M., & Mayer, M. (2000). *Didattica de la Física*. Milano: R.C.S. Libri S.p.A. Ristampa La Nuova Italia.
- Viennot, L. (1996) *Raisonnement in Physique. La part du sens commun*. Pratiques Pédagogiques. Paris: De Boeck and Larcier. [Traducción en inglés: (2001). *Reasoning in Physics. The part of common sense*. Springer.

- Viennot, L. (2010). Physics education research and inquiry-based teaching: A question of didactical consistency. En K. Kortland, & K. Klaassen, *Designing Theory-Based Teaching-Learning Sequences for Science Education: Proceedings of the symposium in honour of Piet Lijnse* (págs. 37-51). Utrecht: Utrecht University– FIsme series on Research in Science Education.
- Von Bertalanffy, L. (1986). *Teoría General de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones.* (J. Almela, Trad.) México: Fondo de Cultura Económica.
- Watt, J. (1820). *History of the Origin of Mr Watt's Improvements on the steam-engine. The Edinburg Philosophical Journal.* © National Library of Scotland. Recuperado el 2019 , de History of the Origin of Mr Watt's Improvements on the steam-engine. The Edinburg Philosophical Journal. © National Library of Scotlan: <https://digital.nls.uk/scientists/archive/74916167>
- Zalamea Traba, F. (2009). *Filosofía sintética de las matemáticas contemporáneas.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Zambrano Leal, A. (2019). Naturaleza y diferenciación del saber pedagógico y didáctico. *Pedagogía y Saberes*, 75-84.

12 Anexo 1. Secuencia: Organización de los Fenómenos Térmicos

ORGANIZACIÓN DE LOS FENÓMENOS TÉRMICOS

COMPONENTE DE CIENCIAS



ESPECIALIZACIÓN EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS PARA EL NIVEL
BÁSICO

MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

2021

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LEONARDO FABIO MARTÍNEZ PÉREZ
RECTOR

JOHN HAROLD CÓRDOBA ALDANA
VICERRECTOR ACADÉMICO

HUGO DANIEL MARÍN SANABRIA
DECANO FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

STEINER VALENCIA VARGAS
DIRECTOR DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ D.C. 2021

La compilación, edición y traducción de fuentes primarias ha sido realizada por:
Marina Garzón Barrios, en el marco de los estudios doctorales en Didàctica de les Ciències, les Llengües, les Arts i les Humanitats. Línea de investigación: Didàctica de les Matemàtiques i de les Ciències Experimentals. Facultat d'Educació. Universidad de Barcelona.

Nohora Alejandra Hernández Cepeda, Armando Antonio Palacios Hernández participaron en la discusión y diseño de algunas actividades propuestas dentro de la presente secuencia didáctica.

Imagen portada: Fig. I Primera Máquina de Vapor comercialmente útil.
Construida por Thomas Savery, 1698.
En: De Institute of Human Thermodynamics and IoHT Publishing Ltd. - Image from
<http://www.humanthermodynamics.com/HT-history.html>. Dominio público.



12.1 Introducción

12.1.1 El estudio de los fenómenos térmicos

El estudio de fenómenos térmicos que es uno de los campos disciplinares interesantes en la ciencia del siglo XIX, pues a partir de su análisis y comprensión se hacen inferencias importantes sobre las transformaciones que sufren los sistemas (físicos, químicos y/o biológicos) cuando son afectados por acciones térmicas.

El análisis de este campo de fenómenos fortalece las ideas sobre dos términos fundamentales en la ciencia del siglo XX, y en lo que llevamos del siglo XXI: **Sistemas y Procesos**, estos términos indican el análisis de los fenómenos físicos desde una perspectiva que implica que una acción genera una serie de acontecimientos o cambios que se verá reflejada en un todo, en un conjunto ensamblado, y no en un objeto particular sobre el cual directamente puede recaer la acción. Estos términos, implican entonces, analizar las relaciones entre:

- Un conjunto de objetos o sistema y las magnitudes que lo caracterizan, en física las llamamos: variables de estado; y
- Las acciones bajo las cuales se producen diversos tipos de transformaciones, estas acciones son las causas, o aquellas magnitudes que dan cuenta de los cambios, en física las llamamos variables de proceso.

De modo que, hay por lo menos dos ideas subyacentes en la organización de esta clase de fenómenos:

La idea de transformación que implica reconocer que un sistema químico, físico o biológico tiene la posibilidad de pasar *de un estado a otro* y que hay unas magnitudes que cualifican dichos estados,

La idea de proceso que implica identificar cuáles son las acciones y las magnitudes asociadas a esas acciones que actúan para la transformación, o que provocan los cambios.

12.1.2 Sobre la propuesta y su problemática

Esta propuesta en particular, pretende aportar en la formación de docentes de ciencias, porque se reconoce que el material existente para el aprendizaje de la física, en Colombia, tiene algunas características notables:

Suele tratarse de libros de texto que en su mayoría se encuentran dirigidos a estudiantes de física y de ingeniería, y son procedentes de las editoriales norteamericanas. Estos libros están

pensados dentro del sistema escolar norteamericano, y, por lo tanto, se distancian de nuestras necesidades locales en términos de educación.

El material para el aprendizaje de la física nunca -o casi nunca- se encuentra dirigido a docentes en ejercicio, mucho menos dirigido a la formación del profesorado; con excepción de algunos manuales adjuntos para el profesor que las editoriales entregan con los textos de física y que no pretenden ser herramientas de aprendizaje para el profesorado.

En el caso de los estudios sobre los fenómenos térmicos, en los textos introductorios de Física o de Química, que habitualmente se usan a nivel universitario en Colombia, se presentan simultáneamente una teoría energetista y una teoría corpuscular, como si estuvieran “naturalmente” ligadas. (Serway R, y Jewett John, 2010) (Halliday D, Resnick R, y Walker J, 1993) (Tipler P, y Mosca G, 2005) (Sears, Zemansky, Young, y Freedman, 2005). Sin embargo, desde la historia de las ciencias es posible distinguir que existen diferentes perspectivas para organizar los conceptos en torno al fenómeno térmico.

12.1.3 Perspectivas

Es de resaltar que habitualmente en estos textos se hace un corto desarrollo termométrico mediante el cual se presentan definiciones entre calor y temperatura, y se establece una relación de las magnitudes a partir de la ecuación $Q = mc\Delta T$. Esto admite la diferencia entre calor y temperatura, que es señalada por muchos investigadores como una de las mayores dificultades en la comprensión de los fenómenos térmicos.

Ahora bien, las definiciones o explicaciones que estos textos presentan son principalmente moleculares, de tal forma, la línea argumentativa para la comprensión de los fenómenos térmicos se distancia de la observación y experiencia que habitualmente tenemos sobre los fenómenos térmicos. Esto supone dos dificultades:

Establecer coherencia de sentido entre la descripción de procesos, que se hacen a través de variables macroscópicas, y las explicaciones moleculares y estadísticas, sobre las cuales no se elabora un proceso consciente de organización.

Se asume la teoría como punto de partida en los procesos de enseñanza, y cuando esto ocurre, el proceso constructivo de conocimiento y la elaboración de rutas de análisis propias por parte del estudiante queda en un segundo plano.

Ya Pierre Duhem, hacia el año de 1906, analiza la gran dificultad para hacer compatibles teorías que se estructuran desde visiones incomparables, y crítica la prevalencia del modelo mecanicista por no responder al análisis de la experiencia práctica que si brinda para sus estudiantes el modelo energético. (Duhem, 2005)

12.1.4 Los estudios históricos-críticos

En esta propuesta el eje central se ubica en reconocer un hilo conductor que ha guiado el desarrollo de las problemáticas que han conducido a establecer formalizaciones sobre los fenómenos térmicos. Así pues, una parte importante de la propuesta consiste en hacer uso de fuentes primarias, esto es, leer los trabajos de los científicos y, en relación con estos trabajos, recontextualizar problemáticas que se consideran importantes para la comprensión del campo de estudio a tratar.

Así, se leerán diferentes autores, para propiciar un acercamiento a los estudios histórico-críticos para la enseñanza de las ciencias. Identificando el aporte que genera la historia de las ciencias a las dinámicas de enseñanza. Como señala María Mercedes Ayala:

Los estudios histórico-críticos son en sí mismos procesos de recontextualización de los saberes científicos. Desde nuestra perspectiva, se trata más bien de establecer un diálogo con los autores a través de los escritos analizados, con miras a construir una estructuración particular de la clase de fenómenos abordados y una nueva mirada que permita ver viejos problemas con nuevos ojos. AYALA, M.M. 2005

Por otro lado, en este caso los estudios históricos sobre el calor, aportan otro aspecto importante en la formación: la unificación de diversos campos de fenómenos naturales a través de las ideas de trabajo y energía, estos vínculos se consolidan en aquello que hoy conocemos como los principios de la termodinámica, que, a su vez, nos llevan a las ideas dinámicas de sistemas y procesos.

12.1.5 Objetivos Generales

Así pues, esta propuesta tiene como objetivos más generales:

1. Suscitar la organización de procesos de conceptualización alrededor de lo térmico, que permitan comprender el campo de fenómenos asociados a la termodinámica.
2. Identificar de las problemáticas de estudio y problemáticas conceptuales que llevan a su organización teórica.
3. Reconocer el alcance que tienen los principios de la termodinámica en la organización de esquemas teóricos y conceptuales en las ciencias naturales.

12.1.6 Sobre las actividades en el seminario

En este seminario se busca que colectivamente se avance en la construcción y formalización en torno a fenómenos térmicos, para lo cual se tienen diversas experiencias, preguntas y problemáticas de estudio en diferentes niveles de aproximación al asunto físico. En el desarrollo de las actividades se privilegia que los estudiantes vivencien la actividad de elaborar explicaciones, esto es: formular preguntas e hipótesis que orienten la actividad experimental, identificar sucesos en un sistema, ponerse en diálogo con la información, comunicar sus ideas a partir de conjeturas, gráficas y conceptualizaciones derivadas de las actividades propuestas. En esta actividad el trabajo en equipo y la socialización es fundamental, es una manera de profundizar en la fundamentación conceptual, con especial énfasis en el análisis y construcción de explicaciones de los fenómenos abordados.

Un aspecto importante que se promueve es el *trabajo preliminar*, el cual comprende las actividades que deben ser desarrolladas por los estudiantes y maestros, previas a los encuentros. Consistirán en lecturas, consultas, cuestionamientos a los fenómenos abordados, diseño y realización de prácticas experimentales, elaboración de estrategias de comunicación, entre otras.

Para lograr esto, el seminario se estructura en dos ejes que se desarrollan simultáneamente, en uno se propone *la organización de los fenómenos térmicos* desde las actividades propuestas en las tres unidades de la secuencia didáctica. Desde el otro eje se propone *la configuración de un problema de estudio* en el que intervengan elementos desarrollados en el seminario, de manera que se elabore un modelo explicativo.

Durante las sesiones de trabajo se tienen momentos de socialización en plenaria para identificar los elementos teóricos y experienciales que soportan la organización de los fenómenos térmicos y su conceptualización. Al mismo tiempo se exhibe y procede fenomenológicamente en cada actividad, ampliando y enriqueciendo la mirada de los estudiantes en cuanto al discurso disciplinar, pedagógico-didáctico y epistemológico. Aspectos que aportan en la comprensión de la enseñanza de la física, particularmente de los fenómenos térmicos.

12.1.7 Criterios de evaluación

La evaluación se realizará como un proceso cualitativo, continuo y, sobre todo auto reflexivo. *Cualitativo* en la medida en que busca valorar los procesos de construcción discursiva de los estudiantes desde sus propias posibilidades, intereses y contextos de acción; *continuo*, a lo largo de cada sesión del seminario, lo cual permite reconocer los desarrollos individuales y colectivos; y *auto reflexivo*, en la medida en que el maestro se reconoce desde la acción intersubjetiva y desde sus propias posibilidades.

Participación. Se pretende que en el seminario se cuente con los aportes de cada uno de los participantes, por lo que la asistencia es esencial, así como las intervenciones en cada una de las sesiones. Esta participación será reflexiva y documentada:

Reflexiva que aporte en el desarrollo de las elaboraciones que sean objeto del trabajo en equipos, así como en los momentos de socialización en plenaria. Esto es, involucrarse en la problematización de los objetos de estudio, explicitar puntos de vistas y propuestas de acción que conlleven a la elaboración de explicaciones.

Documentada que enriquezca el proceso de constitución de los fenómenos térmico. Acudir a las fuentes bibliográficas de orden histórico, disciplinar y epistemológico que se ofrecen en el seminario, así como a las consultadas por los participantes, se constituye en aporte cuando es abordada desde las intenciones explicativas que tienen los equipos de trabajo o de manera individual. A partir de esta documentación se construyen argumentos, se interroga la experiencia y se orienta la actividad experimental. Esta participación se espera tanto en los momentos de trabajo en equipo, en los momentos de plenaria y en la construcción de material escrito.

Documentación del proceso que permita la comunicación de las inquietudes, descripción de las acciones realizadas y los criterios que orientaron la actuación, las explicaciones elaboradas, alcances y limitaciones. Esto implica un reconocimiento consciente e intencionado del desarrollo realizado en los equipos o de manera individual, con el propósito de “estabilizar” las ideas que se desarrollan en cada uno de los momentos del seminario. Se propone la elaboración de dos tipos de documentos:

Bitácora del equipo (formato electrónico: página web, blog, documento en drive): En este documento se comunicarán los aspectos conceptuales abordados en cada una de las sesiones del seminario, así como los interrogantes que emergieron y las explicaciones que se elaboraron. En este documento se debe dar lugar a la síntesis de los momentos de trabajo

grupal y de plenaria. De esta manera la bitácora será el medio para hacer memoria de la vivencia en el seminario y para expresar las comprensiones de los participantes.

Escrito final individual: En este documento se espera que se haga síntesis de las elaboraciones alcanzadas al cierre del seminario. El propósito de este documento es que cada participante explicita sus ideas sobre la organización de los fenómenos térmicos, argumentando desde el trabajo realizado en los equipos y en las plenarios. También se espera que en este documento se expongan las implicaciones de estas ideas en los procesos de enseñanza de las ciencias en la educación básica. Al inicio de cada sesión, se acudirá a la bitácora a manera de relatoría de la sesión anterior, a partir de la presentación que haga uno de los participantes de uno de los equipos. De esta manera se realizará un seguimiento permanente a este documento, asimismo una retroalimentación y valoración de cada bitácora al finalizar cada unidad.

La evaluación de los aprendizajes implica la calificación, de tal manera que cada uno de los criterios será valorado cualitativamente y cuantitativamente, en relación con los objetivos propuestos para cada sección de la secuencia didáctica. Particularmente, la participación se valorará tanto por autoevaluación como por heteroevaluación. Mientras que la documentación del proceso será evaluada por la docente a cargo del seminario.

12.2 Construyendo la base fenomenológica de los procesos térmicos

La presente sección tiene como propósitos particulares:

- Analizar las expresiones caliente y frío como cualidades diferenciadas en la orden de una misma magnitud: el calor.
- Argumentar respecto a la direccionalidad del flujo o transferencia de calor.
- Proponer situaciones para el análisis de fenómenos térmicos.

12.2.1 Sobre el calor, el frío y la comunicación del calor

A continuación se presentan situaciones habituales que nos introducen en asuntos relacionados con la percepción de fenómenos térmicos. Con su equipo de trabajo, discuta estas situaciones y responda a las preguntas sugeridas. Si en el análisis de la situación, surgen situaciones alternativas y preguntas nuevas, siéntase en la libertad de plantearlas.

Situación 1.

Suponga que hay una varilla o barra de metal cerca de una estufa, pero usted no sabe si la varilla está caliente o fría. Pone su mano derecha entre una olla con hielo, mientras mantiene su otra mano en el bolsillo, o la sumerge en agua tibia, por un par de minutos. Luego, toca un extremo de la varilla con la mano izquierda, y el otro con la mano derecha.

¿Por qué no es posible determinar a partir de estas sensaciones si la varilla está caliente o fría? Explique su respuesta.

Describa de qué forma se ha afectado la varilla al estar en contacto con las manos, es decir: - Identifique quién calienta a quién o quién enfría a quién, en esta situación y argumente esos procesos de intercambio. (La descripción puede hacerla con palabras, dibujos, esquemas, etc.) y presente otros ejemplos o evidencias de sus afirmaciones como si las fuera a presentar a un grupo de sus estudiantes.

¿Qué significados asignan a las palabras calor y frío, cuando identifica estas sensaciones? Y,

¿Cuál es la razón de la asignación de esos significados?

Situación 2.

Suele suceder que una persona proveniente de un clima en extremo cálido, cuando llega a una ciudad X cuya temperatura es mucho menor, suele abrigarse demasiado,

incluso en los días más calurosos de esa ciudad. Y viceversa, una persona que viene de un lugar en extremo frío, cuando llega a la misma ciudad X cuya temperatura es mucho mayor, suele experimentar sensación de calor. En resumen, si las personas provienen de lugares con diferentes temperaturas y llegan al mismo entorno, estas personas experimentan diferentes sensaciones de frío o calor.

En relación con lo anterior: ¿De qué dependen nuestras sensaciones de calor o frío? ¿De dónde provienen el frío y el calor? Es decir, ¿Cuáles son sus fuentes o sus causas? ¿De qué manera establecer una relación entre la sensación térmica y un patrón de medida de esa sensación?

Después de discutir sobre estas situaciones se socializarán los resultados, ampliarán la discusión con las reflexiones de los compañeros.

LECTURA Sobre El Calor⁵² Joseph Black (1728-1799)

PARTE 1.

Para que este extenso tema pueda ser tratado en una forma más provechosa, propongo:

Determinar lo que quiero decir con la palabra calor en estas lecturas.

Explicar el significado del término frío y determinar la diferencia real entre calor y frío.

Mencionar algunos de los intentos que han sido hechos para descubrir la naturaleza del calor, o para formarse una idea de cuál puede ser la causa inmediata de este.

Finalmente, empezaré a describir los efectos sensibles producidos por el calor sobre los cuerpos en los que este es comunicado (transmitido).

Toda persona que reflexione sobre las ideas que asociamos a la palabra calor percibirá que esta palabra es usada con dos significados o para expresar dos cosas diferentes: significa una sensación excitada en nuestros órganos; o una cierta cualidad, afición o condición de los cuerpos a nuestro alrededor que provoca en nosotros esa sensación.

La palabra se usa en el primer sentido cuando decimos que sentimos calor; en el segundo, cuando decimos que hay calor en el fuego, o en una piedra caliente. No puede haber una sensación de calor en el fuego o en la piedra; estos están en un estado o condición que provoca (causa) en nosotros la sensación de calor.

Para tratar el calor y sus efectos, propongo usar la palabra únicamente en este segundo sentido, es decir, expresando ese estado, condición o cualidad de la materia que provoca en nosotros la sensación de calor. Esta idea de calor se modificará un poco y se extenderá a medida que avancemos y la razón de la modificación será fácilmente percibida.

⁵² Traducción bajo el título de: Del calor en general, por Ángel E. Romero Chacón y María Mercedes Ayala. Revista Física y Cultura: Cuadernos sobre Historia y enseñanza de las ciencias - No. 8, 2014 / ISSN 1313-2143. Análisis Histórico-Críticos. 1. Tomado de “Energy: Historical Development of the Concept”, editado por B. Lindsay. Este texto conforma la sección introductoria de “Lectures on the Elements of Chemistry, dada en la universidad de Edimburgo, 1766-1797”, de J. Black.

No obstante, el sentido base que hemos dado a la palabra calor continuará siendo el mismo en el fondo.

Toda la experiencia que hemos relacionado a esta cualidad o afección de la materia muestra que esta cualidad más transmisible de un cuerpo a otro que cualquier otra cualidad que conocemos. Los cuerpos calientes en contacto o en la vecindad de cuerpos fríos no pueden estar sin transmitir a estos una parte de su calor.

Cuando un terrón de hierro caliente es sacado del fuego, ¿cómo podemos impedir transmitir su calor a la materia circundante? Sobre el suelo o sobre una piedra, muy rápidamente les comunica una parte de su calor; colocado sobre madera u otro material vegetal o animal, les comunica su calor en muy poco tiempo y a tal grado que se inflaman; suspendido en el aire por un alambre, un poco de atención pronto nos convencerá de que este transmite calor muy rápido al aire en contacto con él.

Así, el calor es perpetuamente transmisible de cuerpos calientes a los cuerpos fríos que los rodean, y además pasa de uno a otro y penetra toda clase de materia sin excepción: la densidad y solidez no son obstáculo para su progreso en la mayoría de los casos, este parece pasar más rápido en cuerpos densos que en los raros, pero tanto los raros como los densos son afectados por el calor y este es transmitido de unos a otros, aun el vacío formado por la bomba de aire es penetrado por este. Sir Isaac Newton fue quien primero descubrió esto por un experimento: él suspendió un instrumento para medición de calor en un recipiente de vidrio grande y le sacó el aire; al mismo tiempo, suspendió otro instrumento similar en otro recipiente de vidrio, igual al primero, pero sin evacuarlo, Newton percibió que tanto el primero como el segundo eran afectados por las variaciones del calor (La Óptica de Newton, cuestión 18).

Mucho más tarde, algunos experimentos sobre el mismo tema fueron hechos por el célebre Dr. Franklin y algunos de sus amigos en París. Ellos suspendieron un cuerpo caliente bajo recipiente evacuado de una bomba de aire, y otro cuerpo similar igualmente caliente en el aire del cuarto cerca de la bomba de aire, donde los cuerpos en cuestión eran tales que mostraban exactamente las variaciones de calor que ocurrían en ellos; se percibió que ambos cuerpos perdieron gradualmente una parte de su calor hasta que fueron reducidos a la temperatura del cuarto en el cual el experimento fue hecho, pero el que colgaba en el aire perdía su calor más rápido que el que estaba suspendido en el vacío.

Los termómetros disminuyeron desde los 60 grados (Réaumur).

	En vacío	En el aire
a 50 grados	en 17 minutos	en 7 minutos
a 37 grados	en 54 minutos	en 22 minutos
a 30 grados	en 85 minutos	en 29 minutos
a 20 grados	en 167 minutos	en 63 minutos

Los tiempos de enfriado están aproximadamente en la proporción de 5 a 2, esto es confirmado además por una

serie de experimentos similares hechos por Benjamín Thompson.

Isaac Newton pensó que tales experimentos daban una prueba de que el vacío de una bomba de aire no es perfecto sino que hay en este alguna materia sutil por la cual el calor es transmitido, probablemente esta opinión se debió a una asociación muy general en nuestras mentes entre las ideas de calor y la materia; pero cuando pensamos en el calor siempre lo concebimos como residente en alguna clase de materia; o posiblemente esta noción de Isaac Newton pueda encontrarse basada en alguna opinión que él haya formado conscientemente acerca de la naturaleza del calor.

Sin embargo, existe una muy buena razón, independientemente de este experimento, para creer que el vacío de la bomba de aire no es un vacío perfecto y para pensar que siempre existe una materia sutil o vapor presente en este; pero ya puedo imaginar fácilmente, y nosotros después miraremos abundantes razones para creer que el calor puede ser comunicado, o pasar a través del vacío, o un espacio vacío de toda materia.

Por eso, de esta manera y sobre todas las razones sin excepción, el calor se comunica de cuerpos calientes a fríos, cuando estos entran en contacto o están en la cercanía; y la comunicación continúa hasta que los cuerpos se reducen a una temperatura igual, indicando un equilibrio de calor con otro.

ACTIVIDAD

Identifiquen las ideas principales del texto de Black hasta este punto.

¿Qué cualidades asigna Black a los términos Calor y Frio? Comparen estas cualidades con aquellas asignadas por ustedes en la actividad anterior. ¿Cuáles son las similitudes o diferencias?

SITUACIONES PARA EL CONTEXTO Y ANÁLISIS: **La vivienda en los lugares de temperaturas extremas**

Como sabemos, nuestro planeta está distribuido de tal manera que en algunas zonas las personas viven en condiciones realmente extremas, y soportan las inclemencias de las altas y bajas temperaturas. A continuación, veremos cómo se vive bajo esas circunstancias y cuáles son las adaptaciones que las personas hacen a sus viviendas.

¿Cómo es un Iglú?

Los nanook - Los Inuit

https://www.youtube.com/watch?v=LFswUeom96A&ab_channel=cosmoduende

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-38920075>

Lectura complementaria: Los ingeniosos secretos de los iglús.

¿Cómo es vivir en el desierto? Busque información al respecto, e identifique las características principales de estas viviendas.

En la lectura, Black señala que: "...sobre todas las razones sin excepción, el calor se comunica de cuerpos calientes a fríos, cuando estos entran en contacto o están en la cercanía; y la comunicación continúa hasta que los cuerpos se reducen a una temperatura igual, indicando un equilibrio de calor con otro"

Entonces, ¿Por qué si toda la vecindad del iglú está construida en hielo, este se convierte en un lugar habitable? ¿Por qué en estas zonas desérticas muchas viviendas no tienen techo para aislarse de los rayos solares?

Haga una representación de los mecanismos de calentamiento o enfriamiento de estos hogares, ¿se establece alguna circulación, transferencia de calor? ¿Entre qué objetos o zonas?

¿Cómo actúa esa transferencia o circulación?

¿Qué conclusiones se pueden establecer a partir de la lectura y las situaciones presentadas, respecto a la comunicación del calor?

12.2.2 Sobre las fuentes de calor y el frío, y como se genera el calor

Sobre El Calor. Joseph Black (1728-1799) PARTE 2.

Cuando consideramos esta comunicación de calor de cuerpos calientes a fríos, la primera pregunta que puede acudir a nuestra mente es: ¿En qué forma han actuado estos cuerpos, el uno sobre el otro, cuando esto ocurre?, ¿ha perdido uno de ellos algo, que el otro ha ganado?, y ¿cuál de ellos ha perdido o cuál ha recibido?

La opinión común es que el cuerpo caliente ha perdido algo que ha sido añadido al otro. Y aquellos quienes han intentado razonar más profundamente sobre la naturaleza del calor han estado de acuerdo con la mayoría en este punto y han supuesto que el calor es una cualidad positiva, que depende ya sea en una materia sutil y activa introducida en los poros de los cuerpos, o en un temblor o vibración provocado entre las partículas de estos o quizás entre las partículas de una sustancia peculiar presente en todos los cuerpos. Tal materia sutil o movimiento trémulo (tembloroso), se supone, es comunicado del cuerpo caliente al frío de acuerdo a nuestra experiencia general de la comunicación de la materia o del movimiento.

Pero, aunque muchos filósofos han estado de acuerdo con la noción indistinta de calor como una cualidad positiva o una fuerza activa residente en el cuerpo caliente por la cual actúa sobre el frío, algunos otros no han estado completamente de acuerdo en esta opinión. Con respecto a la variedad de casos en los que los cuerpos de temperaturas diferentes actúan uno sobre el otro, han supuesto que en algunos casos el cuerpo frío es la masa activa y que el cuerpo caliente es el sujeto pasivo sobre el que se actúa o en el cual algo es introducido. Cuando una masa de hielo, por ejemplo, o un terrón de hierro muy frío es colocado sobre una mano caliente, en lugar de considerar que el calor se comunica de la mano caliente al hielo o al hierro frío, ellos han supuesto que hay en el hielo o el hierro frío una multitud de partículas diminutas, a las que han llamado partículas de escarcha o partículas frigoríficas, que tienen una tendencia a pasar de los cuerpos muy fríos a otros que son menos fríos; y que muchos de los efectos o consecuencias del frío, particularmente el congelamiento de fluidos, depende de la acción de estas partículas frigoríficas; ellos las llaman espículas o pequeños dardos, imaginando que esto puede explicar la aguda sensación y algunos otros efectos del frío intenso. Este, sin embargo, es el infundado trabajo de la imaginación.

Para formar un buen juicio de este tema debemos empezar por dejar a un lado todos los prejuicios y suposiciones concernientes a la naturaleza del calor y del frío y después preguntarnos

de dónde proceden originalmente estas dos cualidades aparentemente distintas de los cuerpos, cuál es el origen del calor y el frío. Se ocurrirá inmediatamente que el calor tiene un origen evidente, o causa, en el sol y en el fuego. El sol es evidentemente el principal, y puede que el único, origen del calor difuso a través de este globo. Cuando el sol brilla, sentimos que este nos calienta, y no podemos equivocarnos al observar que además todo está caliente a nuestro alrededor. Además, es evidente que aquellas estaciones en las que el sol brilla más son las más calientes, lo mismo que lo son aquellos climas en los cuales se está más directamente expuesto a su luz. Cuando el sol desaparece, el calor disminuye, y se reduce tanto cuanto su influencia es interceptada.

Por consiguiente, debemos reconocer el sol como una causa manifiesta que actúa sobre toda la materia a nuestro alrededor, introduciendo algo en ella, o causando en esta una condición que no está en su estado más espontáneo. Por lo tanto, no podemos evitar considerar esta nueva condición o calor, así inducida en la materia a nuestro alrededor, como una cualidad positiva o afeción real de la cual el sol es la causa primaria y que es posteriormente comunicado desde los primeros cuerpos afectados a otros.

Pero después de haber formado esta conclusión con respecto al calor, ¿dónde encontramos una causa primaria o fuente de frío?, desconozco alguna causa general del frío, excepto la ausencia o acción disminuida del sol, o vientos que soplan desde aquellas regiones en las que su luz tiene el poder más débil. Por consiguiente, no veo razón para considerar el frío como una cosa sino una disminución del calor. Los átomos frigoríficos y las partículas de escarcha, que se han supuesto como llevados por los vientos fríos, son completamente imaginarios. No tenemos la más pequeña evidencia de su existencia y ninguno de los fenómenos, respecto a los cuales han supuesto su existencia, requieren una ficción tal para poder ser explicados.

Sin embargo, algunas personas quizás puedan aún encontrar difícil despojarse totalmente del prejuicio de que en ciertos casos el frío puede actuar en una forma positiva. Tales personas, quizás, puedan recurrir a nuestras sensaciones para dar una prueba contundente tanto de la realidad del frío como del calor. Cuando tocamos un terrón de hielo sentimos claramente que este tiene una cualidad de frialdad, al igual que una brasa tiene la cualidad de calor.

Pero examinemos lo que queremos decir por esta cualidad de frialdad. Para nosotros significa

una cualidad, o condición por la que el hielo produce una sensación desagradable en la mano que lo toca; a dicha sensación le damos el nombre de frío y la consideramos como contraria al calor y tanto como una realidad. Hasta ahora estamos en lo cierto. La sensación de frío en nuestros órganos no está en duda como una sensación real, como tampoco lo está la sensación de calor. Pero si por esa razón concluimos que este puede ser producido por una causa activa o positiva, una emanación del hielo en nuestros órganos, o en alguna otra manera diferente de una disminución de calor, nos formamos un juicio apresurado. De esto podemos estar convencidos por muchos experimentos. Podemos, por ejemplo, tomar una cantidad de agua y reducirla a tal estado que parece caliente a una persona y fría a otra y ni caliente ni frío a una tercera; la primera persona debe estar preparada para el experimento bañándose inmediatamente antes de este su mano en agua fría; la segunda, bañándose su mano en agua caliente... y la mano de la tercera persona debe estar en su estado natural, mientras que el agua con la que estos experimentos se hacen debe estar a una temperatura templada. Aun a la misma persona, el agua le puede parecer caliente cuando toque con una mano y fría cuando toque con la otra.

De este modo estamos bajo la necesidad de concluir de estos actos que nuestras sensaciones de calor y frío no dependen de dos causas activas diferentes, o cualidades positivas en esos cuerpos que provocan estas sensaciones, sino de ciertas diferencias de calor entre esos cuerpos y nuestros órganos. Y en general, todo cuerpo parece caliente al ser tocado si está más caliente que la mano y le comunica calor, y todo cuerpo que esté menos caliente que la mano y le saque calor de la mano que lo toca parece frío, o se dice que está frío. La sensación en algunos casos es agradable y en otros desagradable, de acuerdo a su intensidad y el estado de nuestros órganos; pero esta procede siempre de la misma causa, la comunicación de calor desde otros cuerpos a nuestros órganos, o desde nuestros órganos a ellos.

¿Qué puede ser esperado más razonablemente que la sensación producida por la sensibilidad hacia adentro a la causa del calor, cualquiera que pueda ser, sea diferente de la sensación que acompaña su emisión desde nuestros cuerpos? Las sensaciones de hambre y saciedad son igualmente distintas.

Fuera de la inquietud producida por el tacto de cuerpos muy fríos, el congelamiento de agua ha inducido a muchos a creer en la existencia de partículas frigoríficas.

El agua, imaginaban ellos, que era natural o esencialmente fluida, fluidez que era debida a la

figura redonda y el brillo fino de sus partículas; y pensaban que para darle solidez debe emplearse algún agente poderoso que la pervirtiera de su estado natural. Por eso han supuesto la existencia de átomos frigoríficos, de formas angulares o puntiagudas, que siendo introducidos en los átomos del agua los enredaran y los fijaran entre sí.

Pero todo esto también es imaginación y ficción. No tenemos la más mínima prueba de que las partículas de agua sean redondas, o alguna buena razón para imaginar que ellas tengan esa forma. Más aún, una reunión de pequeños cuerpos, redondos, lisos o pulidos no tendrán las propiedades que son bien conocidas en el agua, y el supuesto de que la fluidez es una cualidad natural o esencial del agua es un gran error, debido a que la vemos más a menudo en estas partes del mundo en estado fluido que en estado sólido. En algunas otras partes del mundo, su estado más común o natural es un estado de solidez; hay partes del globo en las que raramente o nunca es vista como un fluido; que se encuentre la sustancia en uno u otro estado depende, como es el caso de todos los otros cuerpos, del grado de calor al que esté expuesta. El hielo puro nunca derrite a menos que intentemos calentarlo por encima de un cierto grado, y si enfriamos agua pura al mismo grado o por debajo de este, estamos seguros que más temprano o más tarde lo veremos completamente congelado.

Sin embargo, sobre estos dos hechos solamente, la sensación de frío y el congelamiento del agua, se ha basado comúnmente la creencia en la existencia de átomos frigoríficos, de aquellos que han creído conveniente adoptar dicha opinión.

Pero algunos de ellos han sido influenciados también por el efecto de algunas sales sobre hielo o nieve. Muchos experimentos han mostrado que ciertas sales o licores fuertemente salinos, al ser añadidas al hielo o la nieve, hacen que se derritan muy rápidamente y al mismo tiempo se enfrién más; debido a esto, esta mezcla de hielo y sales se emplea ocasionalmente para congelar muchos líquidos que no pueden ser congelados por los fríos ordinarios. El líquido que va a ser congelado se pone en un recipiente y este recipiente es sumergido en la mezcla de hielo y sal.

Estos y algunos otros pocos hechos que después consideraremos, son enumerados por el profesor Muschenbroek entre las razones que él da para su creencia en la existencia de partículas frigoríficas o congelantes; pero no son un buen fundamento para dicha opinión; tendremos la oportunidad de explicar estos hechos sin recurrir a dicha suposición.

Por consiguiente, tenemos razón para concluir que cuando cuerpos desigualmente calentados se aproximan el uno al otro, siempre actuará el más caliente o el menos frío sobre el otro, y le transmitirá una cosa real que llamamos calor. La frialdad es solamente la ausencia o deficiencia de calor. Este es el estado más común de la materia, el estado que asumen cuando son dejados a sí mismos y no son afectados por ninguna causa externa. El calor es evidentemente una cosa ajena a ella, es una cosa sobregregada a la materia común o alguna alteración de esta de su estado más espontáneo.

Habiendo llegado a esta conclusión, quizás se me pida enseguida expresar más claramente este asunto: dar una completa descripción o definición de lo que entiendo por la palabra calor en la materia.

Esta es, sin embargo, una exigencia que no puedo satisfacer completamente. No obstante, mencionaré la suposición relacionada con este tema que me parece la más probable. Nuestro conocimiento del calor no está en un estado de perfección que permita proponer con confianza una teoría del calor o asignar una causa inmediata para este. Algunos intentos ingeniosos han sido hechos en esta parte de nuestro tema, pero ninguno de ellos ha sido suficiente para explicarlo en su totalidad. Sin embargo, esto no debe inquietarnos. No es la forma inmediata de acción, que depende de la naturaleza última de esta peculiar sustancia, o de la condición particular de la materia común, en lo que estamos más interesados; estamos lejos aún de ese grado de conocimiento químico, lo que hace necesario este paso para lograr avanzar. Aún tenemos ante nosotros un abundante campo de investigación en varios hechos generales o leyes de acción, que constituyen los objetos reales de la pura ciencia química, es decir, los caracteres distintivos de los cuerpos en la medida en que son afectados por el calor y la mezcla.

Y yo considero que solo cuando hayamos completado aproximadamente este catálogo tendremos un número suficiente de hechos que nos conduzcan a un conocimiento claro de la forma de acción peculiar de esta sustancia o de esta modificación de la materia; y cuando al fin lo hayamos logrado, presumo que el descubrimiento no será químico sino mecánico. Sin embargo, sería imperdonable pasar sin destacar algunos de los más ingeniosos intentos que circulan entre los químicos filosóficos.

Pienso que el primer intento fue hecho por Lord Verulam; después de él, Mr. Boyle dio muchas disertaciones sobre el calor; y el Dr. Boerhaave, en sus conferencias sobre química, se esfuerza en ir más lejos en el tema y desarrollarlo sobre los planteamientos de dos autores anteriores.

El intento de Lord Verulam puede verse en su tratado De forma calidi [Sobre la forma caliente], que él ofrece al público como un modelo de la forma conveniente de llevar adelante investigaciones en filosofía natural. En este tratado enumera todos los hechos principales y después los conocimientos relacionados con el calor o con la producción de calor y se esfuerza, después de una consideración cautelosa y madura de estos, en formar alguna opinión bien fundamentada de su causa. Sin embargo, la única conclusión que él es capaz de sacar de la totalidad de los hechos es una muy general: que el calor es movimiento.

Esta conclusión está fundamentada principalmente en la consideración de varios medios de producir el calor o de hacerlo aparecer en los cuerpos, como la percusión de hierro, la fricción de cuerpos sólidos, la colisión de pedernal y acero.

El primero de estos ejemplos es una práctica a la cual los herreros algunas veces recurren para encender un fuego: ellos toman una vara de hierro blando (dulce), de un grosor de media pulgada o menos; colocando el extremo de esta sobre el yunque, giran y golpean ese extremo muy rápidamente sobre lados diferentes con fuertes golpes de un martillo. Muy pronto se pone al rojo vivo y puede ser empleado para encender virutas de madera u otra materia muy combustible.

El calor producido por la fuerte fricción de cuerpos sólidos ocurre a menudo en algunas partes de maquinaria pesada cuando no se tiene un cuidado adecuado para disminuir esa fricción tanto como sea posible por la interposición de sustancias lubricantes; como, por ejemplo, en los ejes de las ruedas que son pesados en sí mismos o cargados pesadamente.

Se dice que bosques espesos se han encendido algunas veces por la fricción de las ramas de los árboles entre sí en épocas de tormentas. Y los salvajes, en diferentes partes del mundo han recurrido a la fricción de pedazos de madera para encender sus fuegos. En una oportunidad más adecuada consideraré después con alguna atención esta manera de producir el calor. El tercer ejemplo arriba presentado en la colisión de pedernal y acero, es universalmente conocido.

En todos estos ejemplos, el calor es producido o hecho aparecer repentinamente en cuerpos que no lo han recibido en la forma usual de comunicación de otros, y la única causa de su producción es una fuerza o impulso mecánico o violencia mecánica.

Por eso fue muy natural para Lord Verulam sacar esta conclusión como la más usual, es más, quizás el único efecto de la fuerza o impulso mecánico aplicado a un cuerpo sea producir algún tipo de movimiento de ese cuerpo. Este eminente filósofo ha tenido un gran número de seguidores en este tema. Pero su opinión ha sido adoptada con dos modificaciones diferentes.

El gran número de filósofos ingleses supusieron que este movimiento estaba en las partículas pequeñas de los cuerpos calientes e imaginaban que este es un rápido temblor o vibración de estas partículas. Además mr. Macquer y mons. Fourcroy se inclinaron hacia esta opinión. Yo reconozco que no puedo formarme una concepción de este temblor interno, que tiene cualquier tendencia para explicar aun los efectos más simples del calor o esos fenómenos que indican su presencia en un cuerpo; y pienso que Lord Verulam y sus seguidores han estado satisfechos con semejanzas muy débiles entre los efectos más simples del calor y las consecuencias legítimas de un movimiento trémulo. Además, veo muchos casos en los que el calor intenso se produce en esta forma, en donde estoy seguro que el temblor interno es incomparablemente menor que en otros casos de percusión, similar en todos los otros respectos. Así, los golpes que hacen una pieza de hierro intensamente caliente, no producen calor en una pieza similar de acero muy elástico.

Pero, el gran número de filósofos franceses y alemanes, y el Dr. Boerhaave, han supuesto que el movimiento en el cual consiste el calor no es un temblor o vibración de las partículas de un cuerpo caliente en sí mismo, sino de las partículas de una materia sutil, altamente elástica, fluida y penetrante, la cual está contenida en los poros de los cuerpos calientes o interpuestas entre sus partículas: una materia que, ellos imaginan, esta difusa a través de todo el universo, que penetra con facilidad en los cuerpos densos; según algunos, una materia que modificada en formas diferentes produce luz y los fenómenos de electricidad. Pero ninguna de estas suposiciones fue completamente considerada por sus actores o aplicadas para explicar la totalidad de los hechos y fenómenos relativos al calor. Por eso, ellos no nos suministraron una teoría o explicación adecuada de la naturaleza del calor.

Un intento más ingenioso ha sido hecho últimamente; los primeros esbozos de este, hasta donde

yo sé, fueron dados por el Dr. Clerghorn en su disertación inaugural, publicada aquí, sobre el tema del calor. El supone que el calor depende de la abundancia de esa materia sutil, fluida y elástica, que había sido imaginada antes por otros filósofos como presente en cada parte del universo y como causa del calor. Pero estos otros filósofos habían asumido o supuesto una propiedad solo perteneciente a esta materia sutil, su gran elasticidad o la fuerte repulsión entre sus partículas; Dr. Cleghorn supuso que poseía también otra propiedad, una fuerte atracción por las partículas de otras clases de materia en la naturaleza, que tienen en general una atracción entre ellas.

Él supuso que las clases comunes de materia consisten en partículas atractivas o que tienen una gran atracción entre ellas y por la materia del calor; mientras que la sutil y elástica materia del calor es una materia auto repelente, las partículas de esta tienen una fuerte repulsión entre ellas, mientras que son atraídas por las otras clases de materia, y ello con grados diferentes de fuerza.

Esta opinión o suposición puede aplicarse para explicar muchos de los hechos notables relacionados con el calor, y es compatible con esos experimentos del Dr. Franklin y de sir Benjamín Thompson, citados anteriormente...

Por consiguiente, un cuerpo frío puesto en un vacío se abastece más lentamente de calor, o de la materia del calor, que cuando es puesto en contacto con una materia común en un estado más denso, que por su atraer la materia del calor condensa una mayor cantidad de esta en el mismo espacio. Y un cuerpo caliente colocado en un vacío, retendrá su calor más tiempo que en circunstancias ordinarias, debido a la escasez de materia común en contacto con ella; porque la atracción de esta, extraería más rápidamente el calor que cuando no hubiera otra materia presente fuera de la materia del calor.

Tal idea del calor es, por lo tanto, la más plausible entre las que conozco, y el intento más ingenioso para hacer uso de esta ha sido publicado por el Dr. Higgins en su libro sobre ácido vegetal y otros temas. Sin embargo, esta es una suposición y no puedo ahora hacerles entender la aplicación de esta teoría, o la forma en que se ha formado; el gran número de ustedes aún no están familiarizados con los efectos del calor y los diferentes fenómenos que esta teoría busca explicar, ni con algunos descubrimientos que precedieron esta teoría y le dieron origen.

Por consiguiente, nuestro primer asunto debe ser, necesariamente, estudiar los hechos pertenecientes a nuestro tema, y prestar atención a la forma en que el calor entra en distintos

cuerpos, o se transmite de unos a otros, ambos con las consecuencias de su entrada, que son los efectos que produce en los cuerpos.

Cuando consideramos estos detalles con atención, nos conducirán a un conocimiento más adecuado y a una información sobre el tema, lo que posibilitará examinar y entender los intentos que han sido hechos para explicarlos y ponerlos, así, en el camino de formar un juicio de su validez.

Cuando prestamos atención a los efectos producidos por el calor que es comunicado en los cuerpos, vemos que son diferentes en las diferentes clases de materia. Pero hay algunos efectos que se producen en una forma similar, o con unas variaciones que se pueden despreciar, en todas las clases o en una gran variedad de cuerpos, de modo que la similitud de su acción es suficientemente evidente. Esto es cierto, en especial con respecto a las clases más simples de materia, tales como: agua, sales, piedras, metales, aire y muchas otras.

Estos efectos similares, producidos por el calor sobre los cuerpos de la clase más simple, pueden ser considerados como los efectos generales del calor, y así distinguirlos de muchos otros que se producen solamente sobre ciertos cuerpos particulares.

Estos efectos generales del calor son: expansión, fluidez, vapor, ignición o incandescencia e inflamación o combustión.

ACTIVIDAD

Black ha identificado algunos ejemplos en cuanto a la producción del calor, con estos ejemplos: ¿Qué problema o problemas aparecen frente a Black en su forma de entender el calor?

Realice una organización de la lectura, tipo infograma, mapa o esquema conceptual, ubicando en éste, los argumentos mediante los cuales Joseph Black:

Determina lo que quieres decir con la palabra calor.

Explica el significado del término frío y determina la diferencia real entre calor y frío.

Menciona algunos de los intentos que fueron hechos para descubrir la naturaleza del calor, o para formarse una idea de cuál puede ser la causa inmediata de este.

Describe los efectos sensibles producidos por el calor sobre los cuerpos en los que este es comunicado (transmitido).

¿Qué ha aportado esta lectura en sus comprensiones sobre el calor? Establezcan ejemplos o situaciones nuevas que permitan organizar estas ideas.

12.2.3 Cualidades de las sustancias que varían cuando se someten a la acción del calor

La presente sección tiene como propósito:

- Identificar las cualidades y propiedades de las sustancias sometidas a la acción del calor que permiten obtener ordenaciones y mediciones de los cambios térmicos.
- Establecer criterios para la organización de medidas térmicas (temperatura, calor) a través de cualidades térmicas de la sustancia: dilatación térmica, conductividad térmica, cambios de fase.
- Conceptualizar sobre el equilibrio térmico y su vínculo con el equilibrio calórico, que se constituyen en la llamada ley cero de la termodinámica.

ACTIVIDAD

Los objetivos de la actividad son:

- Comparar el comportamiento de la sustancia termométrica [Se llama sustancia termométrica a aquella sustancia que se utiliza para hacer el termómetro]
- Identificar los puntos máximo y mínimo de una escala termométrica [Punto de ebullición y punto de congelamiento]
- Establecer la escala de medición y sugerir criterios para hacer la división de la escala.

A continuación, ustedes encontrarán dos vínculos de YouTube que les proporcionarán algunas ideas para la realización de un termómetro casero:

https://www.youtube.com/watch?v=1_sagbhNtWs

<https://www.youtube.com/watch?v=I2TY1ueT-ms>

Antes de realizar la práctica lean atentamente esta guía de trabajo para que tengan claridad sobre cómo va a proceder.

12.2.3.1 Puntos de ebullición y congelamiento en sustancias termométricas

Necesitarán los siguientes materiales: 4 Botellas de plástico de gaseosa con tapa, 4 pitillo o tubillo plástico, dos ollas de un tamaño mayor al de la botella [que serán de ahora en adelante sus recipientes para la experimentación], tinta de color o color de cocina, sal, agua hirviendo, hielo, regla, cinta de enmascarar o tira de papel para hacer la escala del termómetro, alcohol.

Por los materiales, ustedes deducen que haremos 4 termómetros: uno de alcohol, otro de alcohol 25% agua 75%, otro de agua 100%, otro de agua con sal.

Los termómetros que se presentan en estos vínculos están diseñados para medir temperaturas menores al punto de ebullición del agua, el punto de ebullición es el máximo valor que alcanza la temperatura del agua en ebullición. Nosotros necesitamos un termómetro que nos sirva para un amplio rango de temperatura; por este motivo, al final de este ejercicio ustedes habrán identificado:

¿Qué características debe tener el termómetro que se utiliza para mayores rangos de medida?

Registren sus observaciones a medida que va desarrollando la experiencia. E identifique dificultades, comportamientos de las sustancias, de los materiales, etc.

Una vez hecho los termómetros, con cada uno de ellos haga lo siguiente: en un recipiente con agua en ebullición introducir el termómetro y señalar, sobre la cinta que servirá de escala, el punto máximo de temperatura alcanzada. Posterior a esto, introducir el termómetro en un recipiente con hielo, señalar sobre la cinta que servirá de escala, el punto mínimo de temperatura alcanzado.

Se repite esta experiencia con cada termómetro.

Ahora, agregue sal al agua hirviendo, y sal al hielo. Se repite la experiencia anterior con cada termómetro, y se marca el punto máximo y mínimo.

Registren sus comparaciones y observaciones.

Termómetro	Alcohol 100%	Alcohol 25% - Agua 75%	Agua + sal	Comparaciones [Identificar semejanzas y diferencias]
Observaciones:				

¿Qué características de las sustancias permanecen y cuáles cambian? ¿Hay un mejor termómetro de estos? ¿Qué lo hace mejor?

Ahora, es necesario establecer criterios que les permitan asignar una escala mediante la cual sea posible medir. ¿Cuáles son los criterios que el grupo ha determinado? ¿Qué otras cualidades de estas sustancias pueden cambiar cuando son sometidas al calor? ¿Servirían estos cambios para establecer algún tipo de medida de la acción?

¿Qué conclusiones generales pueden obtener de esta actividad? Por ejemplo: ¿Cuál es la característica de la sustancia que bajo la acción del calor permite hacer una medición? ¿Qué se está midiendo con este instrumento? ¿Cómo se hace para medir? ¿Cuáles son los criterios para establecer la medida?

Socialización de la Actividad

12.2.4 La medida de la dilatación como medida de la temperatura

El ejercicio de la construcción de termómetros permite comprender que las sustancias al ser sometidas a la acción de una fuente fría o una fuente caliente experimentan diferentes cambios, uno de los más notables, y que en ciencias se usa para la cuantificación de la temperatura, es la dilatación. Ya Maxwell señalaba lo siguiente:

“La distinción entre cuerpos calientes y fríos es familiar para todos, y es asociada en nuestra mente con la diferencia de sensaciones que experimentamos al tocar varias sustancias, las cuales están calientes o frías. La intensidad de estas sensaciones es susceptible de ser graduada, por ejemplo, podemos estimar si un cuerpo está más caliente o más frío que otro al tocarlos. Las palabras: caliente, calentar, fresco, frío, son asociadas en nuestra mente con una serie de sensaciones que nosotros suponemos que indican una correspondiente serie de estados de un objeto con respecto al calor.

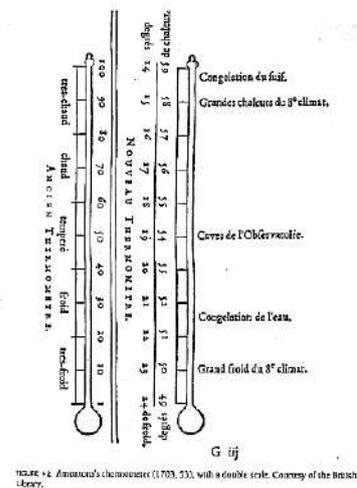
Nosotros usamos estas palabras, por lo tanto, como el nombre de estos estados, en lenguaje científico, tienen el nombre de temperaturas, la palabra caliente indica alta temperatura, frío baja temperatura, y los términos intermedios indican temperaturas, por lo tanto, la palabra temperatura en sí misma es un término general destinado a ser aplicado a alguno de estos estados del objeto.

Como el estado de un cuerpo puede variar continuamente desde frío a caliente, nosotros debemos admitir la existencia de un número indefinido de estados intermedios los cuales llamamos temperaturas intermedias.

Nosotros podemos dar nombres a algunos grados particulares de temperatura y expresar cualquier otro grado de temperatura a través de sus lugares relativos entre estos grados. La temperatura de un cuerpo indica, por lo tanto, cuán caliente o cuán frío está un cuerpo.

Cuando decimos que la temperatura de un cuerpo está más alta o menos que la de otro, nosotros pensamos que el primer cuerpo está más caliente o más frío que el segundo, pero también implica que referimos el estado de ambos cuerpos a cierta escala de temperatura. Por su uso, la palabra temperatura fija en nuestras mentes la convicción de que es posible, no solo sentir, sino además medir, cuán caliente está un cuerpo. James Clerk Maxwell. Theory of the Heat. 1899, pág., 1-2.

Hasta este momento, el término temperatura está vinculado con los grados en los cuales se puede representar el calentamiento de una sustancia. A la derecha se presenta una imagen que ilustra la organización de escalas en tiempos de Guillaume Amontons (1703), donde los términos muy caliente, caliente, temperado, frío y muy frío, van asociados ya a cantidades específicas que representan, por ejemplo, la congelación del agua, la estancia del observatorio, el endurecimiento del sebo.



Después de haber construido el termómetro, notamos que

es importante definir criterios adicionales para la organización de una escala que nos ayude a determinar cómo se incrementa y cómo decrece la temperatura de una sustancia al ser calentada.

¿Se incrementa linealmente? ¿Se incrementa en relación con otro tipo de variación por ejemplo inversa, cuadrática? ¿Qué argumentos pueden apoyar la selección de algún tipo de variación? Noten ustedes que al elegir un tipo de variación se está eligiendo, a su vez, la forma mediante la cual estará graduado su termómetro.

12.2.4.1 Un aparato para medir la dilatación de las sustancias

El dilatómetro es un instrumento utilizado para medir los cambios de longitud o anchura en unas varillas de diferentes metales sometidos a la acción del calor.

Quien primero inventó y describió un aparato de este tipo fue el físico holandés Petrus Van Musschenbroek (1692-1761), en 1731; él lo llamó pirómetro aunque actualmente se conoce como dilatómetro).



Los dilatómetros del siglo XVIII, que eran demandados por los relojeros para estudiar las propiedades térmicas de las varillas metálicas, se utilizaron en los gabinetes para desarrollar experimentos de Física. El modelo que vemos en la fotografía es similar al que figura en el libro “Leçon de Physique experimentale” (1764) de

Nollet (1700-1770). El ejemplar de la figura, data de la segunda mitad del XVIII, del año 1772, y fue construido por uno de los instrumentistas españoles más importantes su época, Juan González.

Colección de instrumentos de museo Laboratorium, en Bergara.

Veamos su funcionamiento:

https://www.youtube.com/watch?v=L-igKFz1_HU

<https://www.youtube.com/watch?v=RDntsPRRm1Q>

A través de estos, y otros dilatómetros fue posible identificar que:

Hay tres tipos de dilatación: Dilatación lineal, superficial y volumétrica.

Que cada sustancia tiene su propio coeficiente de dilatación

¿Cómo se expresan esas dilataciones?

Longitud inicial L_0 de una sustancia se incrementa cuando hay calentamiento. De modo que el incremento en la longitud ΔL , dependerá del tamaño, se observa experimentalmente que si la longitud inicial del objeto es pequeña éste se dilata poco, y si la longitud inicial es más grande el objeto se dilata aún más.

De este modo, la dilatación ΔL dependerá de la longitud inicial L_0 . También se observa experimentalmente que algunos materiales se dilatan más que otros.

Por este motivo cada material tendrá su propio coeficiente de dilatación, llamemos a este caso α .

Así, la dilatación es una ecuación:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0$$

Que podemos organizar de la siguiente manera: $L_f - L_0 = \alpha \Delta T L_0$

Si dejamos la longitud inicial de un solo lado de la ecuación obtendremos que $L_f = \alpha L_0 \Delta T +$

L_0 ; y ahora podemos factorizar L_0 . De forma que obtenemos:

$$L_f = (\alpha \Delta T + 1) L_0$$

Lo mismo es válido para la dilatación superficial.

Cambia sí su coeficiente de dilatación porque ahora el objeto incrementa su dilatación en largo y ancho. A este coeficiente se la llama β y tiene como característica que $\beta = 2\alpha$.

Así, la dilatación superficial es $S_f = (2\alpha \Delta T + 1) S_0 = (\beta \Delta T + 1) S_0$

También es válido para la dilatación volumétrica. Cambia ahora su coeficiente de dilatación porque el objeto incrementa su dilatación en largo, ancho y alto. A este coeficiente se la llama γ y tiene como característica que $\gamma = 3\alpha$.

De modo que la dilatación volumétrica es:

$$V_f = (\gamma \Delta T + 1) V_0$$

12.2.4.2 Tras la búsqueda del cero absoluto

Lo interesante de estos estudios sobre la dilatación, es que a través del trabajo con gases Jacques-Alexandre César Charles (1746 - 1823) en 1788, y posteriormente, Joseph-Louis Gay Lussac (1778 - 1850), John Dalton (1766- 1844) en 1802 concluyeron, en forma independiente, que el volumen ocupado por cualquier gas incrementa linealmente con el aumento de la temperatura, cuando la presión se mantiene constante.

Este resultado se conoce hoy día como la ley de Charles y puede expresarse de la siguiente forma:

$$V_f = (\gamma\Delta T + 1)V_0$$

Nótese la identidad de las dos expresiones. Según esta ley, γ presenta el mismo valor para varios gases, y en los trabajos experimentales de Henri-Victor Regnault (1810-1878), este coeficiente γ toma el valor aproximado de 0.003661.

appear. Here we must refer to the values of α which have been found to be correct for various permanent gases. By experiments made on the system of increasing the pressure while keeping the volume constant, Regnault found the following numbers to be correct for various permanent gases :

Atmospheric Air	0·003665.
Hydrogen	0·003667.
Nitrogen	0·003668.
Carbonic Oxide	0·003667.

Tabla de valores del coeficiente de elasticidad de los gases. Presentada por Rudolf Clausius On the Mechanical Theory of Heat. 1879, pág. 40.

Este resultado experimental, es realmente muy importante en la comprensión del comportamiento de los gases. Porque ¿Qué pasa si en un contenedor de gas el volumen final se hace cero, cuando la presión se mantiene constante? Supongamos que se actúa sobre el gas al comprimirlo a partir de las condiciones de presión de 1 atmósfera y temperatura inicial de 0 grados Celsius.

$$V_f - V_0 = (\gamma\Delta T)V_0, -\frac{V_0}{V_0} = (\gamma\Delta T)$$

O de forma similar $\frac{-1}{\gamma} = \Delta T = \frac{-1}{0,00366..} = \Delta T$

12.2.4.3 La escala absoluta de temperatura

Este valor de temperatura, representa entonces la temperatura mínima que pudiera encontrarse en la naturaleza dado que: No es posible encontrar sustancias que alcancen tal temperatura. El proceso de alcanzar tal temperatura anula el volumen de la sustancia lo cual implica el cambio de fase de la misma, y en caso de ser aplicado este proceso a un líquido este cambia a fase sólida, en caso de ser aplicado a un sólido este ¿a qué fase podría cambiar?

Así, estas características en los gases permiten a Lord Kelvin [William Thomson (1824-1907)] interpretar que es posible construir una escala de temperatura que sea independiente de la sustancia termométrica, en tanto se convierte en un límite teórico, que depende del proceso de licuefacción de los gases. Y considera:

Aunque tenemos un principio estricto para construir un sistema definido para la estimación de la temperatura, sin embargo, como se hace esencialmente referencia a un cuerpo específico como sustancia termométrica estándar, no podemos considerar que hemos llegado a una escala absoluta, y solo podemos considerar, en rigor, la escala realmente adoptada como una serie arbitraria de puntos de referencia numerados suficientemente cercanos para los requisitos de la termometría práctica.

William Thomson, “Sobre una escala absoluta de temperatura”, 1848.

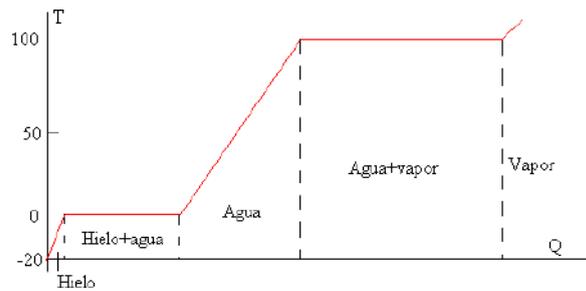
Así, la escala de temperatura, si bien puede considerarse arbitraria, no deja de estar en relación con cambios fijos en algunas sustancias o procesos, inicialmente, como hemos visto, el cambio más importante para pensar en una cuantificación es la dilatación.

Sin embargo, la dilatación no es el único cambio. Es posible observar, también, que las sustancias se solidifican, se evaporan o bullen, dependiendo de la cantidad de tiempo que se encuentren con las fuentes caliente o fría, o de algunas características medioambientales. De ahí, que en la construcción de muchos termómetros haya sido habitual usar como puntos de referencia estas características de congelación y de ebullición.

Las escalas más reconocidas han usado como sustancia de referencia el agua, y con ella sus puntos de congelación y de ebullición. Siendo estos puntos los indicadores del lugar máximo y mínimo de la escala termométrica.

12.2.4.4 Diferenciando las magnitudes calor y temperatura

Habitualmente se representa el proceso de variación de temperatura en función de la cantidad de calor a través de la siguiente gráfica que es habitual en los libros de texto:



¿Qué interpretación se puede asignar a ese comportamiento de la sustancia?

¿Están de acuerdo con la representación que allí se presenta? Para generar argumentos al respecto, piensen en las siguientes situaciones.

SITUACIONES DE ANÁLISIS

Algunas lagunas se secan o disminuyen su volumen, los charcos en las calles se secan después de que cesa la lluvia, la ropa húmeda o mojada, las manos, etc., se secan sin alcanzar temperaturas de ebullición. ¿Cómo explican ustedes que estos hechos ocurran? Y, ¿En qué lugar de la gráfica ubicarían esos cambios?

¿Qué son esos puntos de congelación y ebullición?

¿Qué ocurre con la relación entre el calor y la temperatura cuando hay hielo-agua y agua-vapor? ¿Se puede seguir argumentando que la temperatura esté midiendo el grado de calentamiento como se ha asegurado hasta ahora?

12.2.5 Sobre la naturaleza del calor

La presente sección tiene como propósitos particulares:

- Identificar diferentes perspectivas sobre la naturaleza del calor, y cuáles son sus aportes en la organización de una teoría de lo térmico.
- Identificar otras características de las sustancias bajo la acción del calor: Calores específicos y Calores Latentes.
- Establecer criterios para la medida de la acción del calor en relación con la mezcla de sustancias.

Joseph Black señalaba que una de las primeras observaciones que se pueden hacer sobre el Calor es que éste es transmisible:

Toda la experiencia que hemos relacionado a esta cualidad o afección de la materia muestra que esta cualidad es más transmisible de un cuerpo a otro que cualquier otra cualidad que conocemos. Los cuerpos calientes en contacto o en la vecindad de cuerpos fríos no pueden estar sin transmitir a estos una parte de su calor.

Determinar la cantidad en la cual una sustancia es calentada por otra, en otras palabras, determinar la cantidad de calor que es trasmisible, fue uno de los grandes retos en relación con la organización de una teoría general del Calor.

Por experiencia se sabe que, en esa transmisividad o transferencia de calor, unos cuerpos se calientan [o se enfrían] más fácilmente que otros, por ejemplo, se reconoce que los metales son buenos conductores del calor, que la madera entre tanto es un buen aislante térmico.

Dadas estas características la pregunta que surge es: ¿Qué tanto se calientan unos cuerpos respecto a otros? ¿Cómo cuantificar las cantidades de calor?

En una situación anterior, cuando tenemos agua hirviendo sobre una fuente, y notamos que la dilatación de la sustancia termométrica no sobrepasa un cierto nivel, nosotros decimos que, en esa temperatura, se encuentra el punto de ebullición del agua. El termómetro, cualquiera que este sea, ya no se dilatará más pese a que la fuente se mantenga encendida, y el agua en contacto con ella.

Notamos, entonces, lo difícil que es sostener que la temperatura a la que se encuentra una sustancia puede siempre dar cuenta de la cantidad de calor que le es suministrado. Y notamos también que, lo que medimos con el termómetro es solo uno de los efectos observables sobre el calor, que es relativo solo a ciertas condiciones tanto de la sustancia sobre la cual se miden los efectos, como de la sustancia termométrica que participa en la medición.

12.2.5.1 Exposición de una forma de medir el calor

Estas características de las sustancias habían sido apreciadas por todos aquellos quienes estaban en la búsqueda de diseñar buenos termómetros de precisión. En este contexto, Antoine Lavoisier y Simón de Laplace se proponen diseñar un método de medición de calor que queda registrado en la siguiente memoria:

PARTE 1. Mr. Lavoisier y De Laplace⁵³. Memoria Sobre El Calor (1780)

Esta memoria es el resultado de los experimentos sobre el calor, que hemos hecho en común el Sr. de Laplace y yo, durante el invierno pasado; el frío poco considerable de esta estación no nos ha permitido hacer un número mayor. Antes de publicar algo sobre este tema, nos propusimos esperar un invierno más frío que nos permitiera repetirlos varias veces con todo el cuidado posible, sin embargo, hemos decidido hacer público este trabajo aunque sea muy imperfecto, pues consideramos que el método que usamos puede ser de alguna utilidad en la teoría del calor, y que su precisión y su generalidad podrán ser adoptadas por otros físicos que tienen inviernos más favorables para este tipo de experiencias al estar ubicados al norte de Europa.

Vamos a dividir esta memoria en cuatro artículos: en el primero, expondremos una nueva forma para medir el calor; en el segundo, presentaremos el resultado de los principales experimentos hechos por este medio; en el tercero, examinaremos las consecuencias que se derivan de estas experiencias; finalmente, en el cuarto artículo, hablaremos de la combustión y la respiración.

ARTÍCULO 1. Exposición de una nueva forma para medir el calor

Cualquiera que sea la causa que produce la sensación de calor, ésta es susceptible de aumentar y disminuir, y desde este punto de vista, puede ser sometida al cálculo. Parece que los

⁵³ Mémoires de l'Académie des sciences, année 1780, p. 355. Traducción Marina Garzón Barrios.

antepasados no tuvieron la idea de medir sus observaciones, y no es sino hasta el siglo pasado que se han imaginado maneras para lograrlo.

Se parte de la siguiente observación general, un calor mayor o menor hace variar sensiblemente el volumen de los cuerpos, principalmente el de los fluidos, y se han construido instrumentos propios para determinar estos cambios de volumen; varios físicos de este siglo han perfeccionado estos instrumentos, ya sea para determinar con precisión los puntos fijos de calor tales como el grado de hielo y el de agua hirviendo a una determinada presión atmosférica, ya sea para buscar en el fluido aquellas variaciones de volumen que se aproximen lo más proporcionalmente a las variaciones de calor; de suerte que en relación con su medida no hay más que desear que sea una forma segura de apreciar los grados extremos.

Pero el conocimiento de las leyes que se refieren al calor, cuando se propaga en los cuerpos, está lejos del estado de perfección necesaria para someter al análisis los problemas relacionados con la comunicación y los efectos del calor en un sistema de cuerpos calentados con cantidades distintas, especialmente cuando su mezcla los descompone y forma nuevas combinaciones.

Se han hecho ya, un gran número de experiencias interesantes de las cuales se deduce que, una gran cantidad de calor es absorbida en el paso del estado sólido al estado líquido, y de este último al estado de vapor, sea que el calor se combine en ese paso, sea que aumente la capacidad de la materia para contenerlo. Se ha observado, además, que a igual temperatura los diferentes cuerpos no contienen una cantidad igual de calor, para el mismo volumen, y en este sentido, se observa que hay entre ellos otras diferencias que no dependen de sus respectivas densidades. Igualmente, se han determinado las capacidades de varias sustancias para contener el calor; y como en la superficie de la tierra, los cuerpos

-aún los más fríos- no están enteramente despojados de calor, se ha buscado conocer en sus variaciones las cantidades del calor absoluto indicadas por los grados del termómetro; sin embargo, todas estas determinaciones, aunque muy ingeniosas, se basan en hipótesis que todavía piden ser verificadas por un gran número de experimentos.

ACTIVIDAD

Enfoquémonos en las siguientes observaciones:

Una gran cantidad de calor es absorbida en el paso del estado sólido al estado líquido, y de este último al estado de vapor, sea que el calor se combine en ese paso, sea que aumente la capacidad de la materia para contenerlo.

A igual temperatura los diferentes cuerpos no contienen una cantidad igual de calor, para el mismo volumen, y en este sentido, se observa que hay entre ellos otras diferencias que no dependen de sus respectivas densidades.

¿Qué sentido tienen estas afirmaciones? ¿Pueden presentarse ejemplos al respecto?

Propongan alguna actividad experimental que les permita dar cuenta de que estas afirmaciones son verdaderas o falsas.

Por otra parte, hasta este punto: ¿Cómo se puede interpretar el calor desde esta perspectiva de Lavoisier y Laplace?

PARTE 2. Mr. Lavoisier y De Laplace⁵⁴. Memoria Sobre El Calor (1780)

Antes de ir más lejos, debe establecerse de manera específica qué queremos decir con estas palabras: calor libre, capacidad de calor o calor específico de los cuerpos.

Los físicos están divididos sobre la naturaleza del calor. Muchos de ellos ven el calor como un fluido vertido en toda la naturaleza, y los cuerpos son más o menos penetrados por éste, a razón de su temperatura y de su disposición particular para contenerlo. El calor se puede combinar con ellos, y en este estado, deja de actuar sobre el termómetro sin poder transferirse de un cuerpo a otro, no es sino el estado de libertad el que le permite equilibrarse en los cuerpos, esta es la forma en que lo llamamos calor libre.

Otros físicos piensan que el calor no es más que el resultado de los movimientos no sensibles de las moléculas de la materia. Sabemos que los cuerpos, incluso los más densos, están llenos de una gran cantidad de poros o huecos pequeños, cuyo volumen puede exceder considerablemente. Del mismo material que los encierra, estos espacios vacíos dejan a sus partes no sensibles la libertad de oscilar en todas las direcciones, y es natural pensar que estas partes están en una continua agitación, que, si aumenta hasta cierto punto, puede desunir y descomponer los cuerpos; este es el movimiento interno que constituye el calor, según los físicos de los que estamos hablando.

⁵⁴ Mémoires de l'Académie des sciences, année 1780, p. 355. Traducción Marina Garzón Barrios.

Para desarrollar esta hipótesis, haremos observar que, en todos los movimientos en los que no hay un cambio brusco, existe una ley general que los geómetras han designado bajo el nombre de principio de la conservación de las fuerzas vivas; esta ley consiste en que, en un sistema de cuerpos que actúan los unos sobre los otros de cualquier manera, la fuerza viva, es decir, la suma de los productos de cada masa por el cuadrado de su velocidad, es constante. Si los cuerpos están animados por fuerzas aceleratrices, la fuerza viva es igual a la que era al principio del movimiento, más la suma de las masas multiplicadas por los cuadrados de las velocidades debidas a la acción de las fuerzas aceleratrices. En la hipótesis que nosotros examinamos, el calor es la fuerza viva que resulta de los movimientos no sensibles de las moléculas de un cuerpo; éste es la suma de los productos de la masa de cada molécula por el cuadrado de su velocidad.

Si ponemos en contacto dos cuerpos cuya temperatura es diferente, las cantidades de movimiento que se comunicarán mutuamente serán en principio desiguales; la fuerza viva de las más frías se incrementará en la misma cantidad que disminuirá la fuerza viva de la otras, y este aumento tendrá lugar hasta que las cantidades de movimiento comunicadas de una parte y de otra sean iguales; en este estado la temperatura de los cuerpos alcanzará la uniformidad.

Esta forma de mirar el calor explica fácilmente por qué el impulso directo de los rayos solares es inapreciable, mientras que los rayos producen mucho calor.

Su impulso es el producto de su masa por su simple velocidad; sin embargo, aunque esta velocidad sea excesiva, su masa es tan pequeña, que este producto es casi nulo, en lugar de que su fuerza viva sea el producto de su masa por el cuadrado de su velocidad, el calor que ésta representa, es de un orden más superior al de su impulso directo. Este impulso sobre un cuerpo blanco, que refleja ampliamente la luz, es más grande que en un cuerpo negro, y sin embargo los rayos solares comunican al primero menos calor, porque estos rayos, al reflejarse, llevan su fuerza viva, que transferirán al cuerpo negro que los absorbe.

ACTIVIDAD

¿Cómo entienden ustedes estas dos perspectivas sobre el calor? Presenten algunas ideas que puedan dar cuenta de la veracidad o falsedad de cada una de las perspectivas presentadas en el texto.

¿Con cuál de estas perspectivas de análisis se sienten más identificados y por qué? Propongan situaciones y argumentos que puedan defender su hipótesis escogida.

Nosotros no decidiremos entre estas dos hipótesis anteriores. Muchos fenómenos parecen ser favorables a la última, tal es el caso, por ejemplo, del calor producido por la fricción de dos cuerpos sólidos; pero hay otros casos que se explican más simplemente con la primera hipótesis; puede ser que sean las dos a la vez. Sea lo que sea, como no se pueden formular más que estas dos hipótesis sobre la naturaleza del calor, se deben admitir los principios que les son comunes; sin embargo, siguiendo el uno y el otro, la cantidad de calor libre sigue siendo siempre la misma en la simple mezcla de los cuerpos. Es evidente, que si el calor es un fluido que tiende a entrar en equilibrio, y, que si no es más que la fuerza viva que resulta del movimiento interno de la materia, el principio que hay que seguir es el de la conservación de las fuerzas vivas. La conservación de calor libre, en la simple mezcla de los cuerpos, es entonces independiente de cualquier hipótesis sobre la naturaleza del calor; ésta ha sido generalmente aceptada por los físicos, y nosotros la adoptaremos en las investigaciones siguientes.

Si el calor es un fluido, es posible que, en la combinación de varias sustancias, éste o se combine con ellas o se libere; por lo tanto, nada indica a priori que calor libre es el mismo antes y después de la combinación, nada lo indica tampoco en la hipótesis en la que el calor es la fuerza viva de las moléculas del cuerpo; porque en las sustancias que se combinan, actuando la una sobre la otra en virtud de sus afinidades mutuas, sus moléculas están sometidas a la acción de fuerzas de atracción que pueden cambiar la cantidad de su fuerza viva y, por consecuencia, de calor; no obstante, se debe admitir el siguiente principio como principio común a las dos hipótesis.

Si en una combinación o un cambio de estado cualquiera, hay una disminución de calor libre, este calor se repartirá todo, mientras la sustancia regresa a su primer estado; y respectivamente, si en la combinación o en el cambio de estado hay un aumento de calor libre, éste nuevo calor desaparecerá en el retorno de las sustancias a su estado inicial.

Este principio es, además, confirmado por la experiencia, y la detonación de nitro nos proporcionará en lo que sigue una prueba sensible. Este principio puede generalizarse y

⁵⁵ Mémoires de l'Académie des sciences, année 1780, p. 355. Traducción Marina Garzón Barrios.

extenderse a todos los fenómenos del calor de la siguiente manera: Todas las variaciones de calor, ya sean reales o aparentes, que tiene un sistema de cuerpos, al cambiar de estado, se reproducen en un orden inverso, cuando el sistema vuelve a su primer estado. Así, en la transformación de hielo en agua y de agua en vapor, una cantidad muy considerable de calor ha desaparecido para el termómetro, lo que se repetirá en la transformación de agua en hielo y en la condensación de los vapores. En general, la primera hipótesis se transformará en la segunda al cambiar las palabras de calor libre, calor combinado y calor entregado, por aquellas de fuerza viva, pérdida de fuerza viva, y aumento de fuerza viva.

En la ignorancia en la que nos encontramos sobre la naturaleza del calor, lo que nos queda es observar sus efectos, los principales consisten en dilatar los cuerpos, hacerlos fluidos, y convertirlos en vapores. Entre sus efectos, podemos elegir uno fácil de medir, y que sea proporcional a su causa; este efecto representará el calor, de la misma manera que en dinámica representamos la fuerza por el producto de la masa y la velocidad, aunque nosotros ignoremos la naturaleza de esta modificación singular, en virtud de la cual un cuerpo responde sucesivamente a diferentes puntos del espacio.

ACTIVIDAD

¿Mantienen ustedes las hipótesis que indicaron en el acápite anterior?

En la sección: La medida de la dilatación como medida de la temperatura, se observó que algunas sustancias bajo la acción del calor sufren diversos efectos y cambian, se observó que esos cambios pueden ser usados como medida, se analizó que aquello a lo que llamamos temperatura es una organización y ordenación de esos cambios.

¿Cómo explica que ocurran estos cambios a partir de estas ideas sobre la naturaleza del calor?

En otras palabras, ¿Cómo ha actuado el calor para producir el cambio? Explíquelo.

PARTE 4. Mr. Lavoisier y De Laplace⁵⁶. Memoria Sobre El Calor (1780)

El efecto por el cual se mide generalmente el calor es la dilatación de los fluidos, y principalmente el mercurio; según las interesantes experiencias de Mr. de Luc, la dilatación de este último fluido es un poco más proporcional al calor en todo intervalo comprendido entre el grado de hielo

⁵⁶ Mémoires de l'Académie des sciences, année 1780, p. 355. Traducción Marina Garzón Barrios.

y aquél del agua hirviendo; el calor puede seguir una ley diferente en los grados más alejados; indicaremos enseguida otro efecto del calor, que es constantemente proporcional, independientemente de su intensidad.

Utilizaremos el termómetro de mercurio que está dividido en ochenta partes iguales entre la temperatura de fusión de hielo y la temperatura del agua hirviendo, a presión de una columna de 28 pulgadas de mercurio; cada parte forma un grado, el origen de grados -o cero el termómetro- es el término de la fusión de hielo, de forma que los niveles inferiores deben considerarse como negativos. Suponemos la escala del termómetro extendida indefinidamente por debajo del cero y por encima del nivel de agua hirviendo, y dividida proporcionalmente al calor. Estas divisiones, que son aproximadamente iguales desde cero hasta 80 grados, pueden ser muy desiguales en las partes alejadas de la escala; pero sean las que sean, cada grado siempre medirá una cantidad constante de calor.

Si suponemos dos cuerpos iguales en masa, y reducidos a la misma temperatura, la cantidad de calor necesaria para elevar un grado su temperatura no puede ser la misma para estos dos cuerpos. Y, si se toma por unidad aquella que puede elevar un grado la temperatura de una libra de agua común, se plantean fácilmente todas las otras cantidades de calor, respectivas a los diferentes cuerpos y que pueden expresarse como partes de esta unidad. En lo sucesivo nosotros pensaremos por capacidades de calor o calores específicos que son equivalentes a las cantidades de calor necesarias para elevar, en igualdad de masa, un mismo número de grados de temperatura. Estos valores pueden variar según los diferentes grados de temperatura; por ejemplo, si las cantidades de calor necesarias para elevar una libra de hierro y una libra de mercurio de cero a un grado, están en la proporción de 3 a 1, estas cantidades pueden usarse para elevar las mismas sustancias de 200 a 201 grados, pueden estar en una proporción mayor o menor, pero podemos suponer que estas proporciones son aproximadamente constantes desde cero hasta a 80 grados -al menos hasta este punto la experiencia no nos hace notar diferencias significativas- y es para este intervalo que determinaremos los calores específicos de diversas sustancias.

Se ha hecho uso del siguiente método para estas cantidades. Consideremos una libra de mercurio a cero grados, y una libra de agua a 34 grados; al mezclarlos, el calor del agua caliente se comunicará al mercurio, y después de unos instantes, la mezcla tendrá una temperatura uniforme. Suponemos que es de 33 grados, y que en general, la cantidad de calor sigue siendo siempre la misma para la mezcla de varias sustancias que no tengan ninguna acción química

las unas sobre las otras; bajo estos supuestos, el grado de calor perdido a través del agua habrá elevado la temperatura del mercurio a 33 grados, se deduce por lo tanto, que para elevar el mercurio a una temperatura determinada, sólo participa la treintaitresava parte del calor necesario para elevar el agua a la misma temperatura, esto permite decir nuevamente que el calor específico del mercurio es treinta y tres veces menor que el del agua.

ACTIVIDAD

¿Qué similitudes o diferencias encuentran entre el criterio utilizado por ustedes en la realización de la escala termométrica y éste presentado por Lavoisier y Laplace?

¿Hay alguna problemática que se pueda surgir en relación con estos criterios?

12.2.6 La medida de la acción del calor. La invención del calorímetro y el método de las mezclas

La presente sección tiene como propósitos particulares:

- Establecer criterios para la medida de la acción del calor en relación con la mezcla de sustancias.
- Formalizar la medida de la acción del Calor a través del método calorimétrico.

De la primera sección de la Memoria sobre el Calor de Lavoisier y De Laplace, se identificaba en el estudio del calor es mucho más importante identificar cuáles son los efectos que genera el calor que identificar: qué es el calor o cuál es su naturaleza.

Se ha dicho ya, que algunos de estos efectos pueden ser cuantificables, y la construcción del termómetro da cuenta de ello. Por otra parte, se han identificado otras acciones del calor, como el cambio de estado provocado en acción de un calor latente como allí se sugiere, o el calor que actúa cuando los cuerpos son calentados en función de su capacidad para recibir el calor, llamado calor específico, o llamado capacidad calorífica en relación con la cantidad de sustancia que se supone es capaz de retener una cierta cantidad de calor.

Ya se han identificado también algunos procedimientos que podrían permitir medir el Calor.

A continuación, en la segunda parte de la lectura, encontraremos algunos criterios para medir la cantidad de calor que es trasmisible o se transfiere de un cuerpo a otro, y que ayuda a la formalización de un método de trabajo y una medida de la cantidad de calor.

PARTE 5. Mm. Lavoisier y De Laplace⁵⁷. Memoria Sobre El Calor (1780)

Entonces, se puede establecer una regla general y bastante fácil para determinar, a través de mezclas, el calor específico de los cuerpos; porque, si se llama m la masa del cuerpo más caliente, expresada en partes de libra tomada como unidad; a el grado del termómetro que indica su temperatura; q el calor necesario para elevar un grado la temperatura de una libra de esta sustancia. Si se designa por m' , a' , q' , las mismas cantidades referidas al cuerpo menos caliente,

⁵⁷ *Mémoires de l'Académie des sciences*, année 1780, p. 355. Traducción Marina Garzón Barrios.

y finalmente se llama b al grado del termómetro que indica la temperatura de la mezcla cuando es uniforme; es visible que el calor perdido por el cuerpo m está en proporción con su masa m y el número de grados $a - b$ que se ha reducido su temperatura, multiplicado por la cantidad de calor q que puede elevar un grado la temperatura de una libra de esta sustancia. Se tendrá entonces $q m (a - b)$ para la expresión de esta cantidad de calor perdida.

Por la misma razón, la cantidad de calor adquirido por el cuerpo m' está en razón de su masa m' y el número de grados $b - a'$ en lo que su temperatura ha aumentado, multiplicado por la cantidad q' , lo que da $q' m' (b - a')$ para la expresión de esta cantidad de calor. Pero, puesto que se supone que después de mezclar la cantidad de calor es la misma que antes, hay que igualar el calor perdido por el cuerpo m con el calor adquirido por el cuerpo m' ; de esto se tiene que $m q (a - b) = m' q' (b - a')$. Esta ecuación no permite conocer ni q ni q' , pero da para su proporción, $q / q' = m' (b - a') / m (a - b)$.

Entonces, se tendrá así la proporción de los calores específicos de los dos cuerpos m y m' , de suerte que, si se comparan las diversas sustancias de la naturaleza con una misma sustancia, por ejemplo, el agua común, se podrán determinar por este medio los calores específicos de estas sustancias, en partes del calor específico de la sustancia con la cual se relaciona.

En la práctica, este método está sujeto a un gran número de inconvenientes que pueden causar errores sensibles en los resultados; en la mezcla de sustancias cuyo peso específico es muy diferente, tales como el agua y mercurio, es difícil tener una manera para asegurar que todas sus partes tienen la misma temperatura; además se debe tener en cuenta el calor robado por los recipientes y por la atmósfera, mientras la temperatura de la mezcla alcanza la uniformidad, esto exige un cálculo delicado y propenso al error. Además, no se pueden comparar directamente aquellas sustancias que tienen una acción química las unas sobre las otras; en ese caso, se debe comparar con una tercera sustancia sobre la cual éstas no tengan ninguna acción, y si no hay ninguna sustancia similar, hay que compararlos con dos cuerpos, y aún con un número mayor que, al multiplicar las proporciones para determinar algunas por medio de las otras, multiplica también los errores en los resultados. Este método sería todavía de un uso más que imposible al tener el frío o el calor producido por el uso de combinaciones, y es absolutamente insuficiente para determinar el calor que la combustión y la respiración emiten.

La observación de estos fenómenos es la parte más interesante de la teoría del calor, nosotros hemos pensado que sería de gran utilidad en esta teoría usar un método específico para determinar con precisión, puesto que, sin su ayuda, sólo se formarían hipótesis con las cuáles sería imposible hacer cumplir un acuerdo con la experiencia. Bajo esta consideración hemos determinado que nos ocuparemos en eso primero, y expondremos aquí lo que hemos alcanzado y las reflexiones a la que nos ha conducido.

Si se transporta una masa de hielo, enfriado a un grado cualquiera, hacia un ambiente cuya temperatura está por encima del cero del termómetro, todas sus partes experimentarán la acción del calor del ambiente hasta que toda su temperatura haya alcanzado el cero. En este último estado, el calor del ambiente se detendrá en la superficie del hielo, sin poder penetrar en el interior; el calor se usará sólo para derretir una primera capa de hielo, que le absorberá mientras se convierte en agua; un termómetro colocado en esta capa se mantendrá al mismo nivel, y el efecto sensible del calor sólo será el del cambio del hielo en fluido. Cuando enseguida el hielo vuelva a recibir un nuevo nivel de calor, una nueva capa del hielo se derretirá y absorberá así todo el calor que le sea comunicado; en virtud de esta fuente continua de derretimiento del hielo, todos los puntos interiores de su masa sucesivamente llegarán a la superficie, y en esta posición éstos comenzarán a experimentar otra vez la acción del calor de los cuerpos circundantes.

Uno se puede imaginar un ambiente cuya temperatura esté por encima de cero, una esfera de hielo hueca, a la temperatura de cero grados, y en el interior de la cual se coloca un cuerpo calentado a un grado cualquiera; siguiendo lo que acabamos de decir: que el calor exterior no penetrará en la cavidad de la esfera, y que el calor del cuerpo no se saldrá hacia afuera y se detendrá en la superficie interna de la cavidad de la que se derretirán continuamente las nuevas capas, hasta que la temperatura de este cuerpo alcance nuevamente el cero, no queda duda de que el derretimiento del hielo interior es debido al calor perdido por el cuerpo y no a otras causas, porque el hielo está garantizando la impresión de calor en el espesor del hielo que lo separa del ambiente, y por la misma razón, se puede asegurar que todo el calor que se disipa del cuerpo es detenido por el hielo interior y únicamente se utiliza en el derretimiento. De allí se deduce que, si se recoge con cuidado el agua contenida en la cavidad de la esfera, cuando la temperatura del cuerpo llegue a cero, su peso será exactamente proporcional al calor que este cuerpo haya perdido en el paso de su temperatura inicial a la temperatura de fusión de hielo; porque es evidente que una cantidad doble de calor debe derretir dos veces más de hielo, por lo que la cantidad de hielo

derretido es una medida muy precisa del calor utilizado para producir este efecto.

Ahora nada es más simple que la determinación de los fenómenos de calor. Por ejemplo, Queremos saber el calor específico de un sólido? Como acabamos de decir, se elevará su temperatura de un número cualquiera de grados, y al colocarlo en el interior de la esfera, se le dejará hasta que su temperatura se reduzca a cero, y se recogerá el agua que su re-enfriamiento habrá producido; esta cantidad de agua, dividida por el producto de la masa del cuerpo y el número de grados de su temperatura inicial que estaba por encima de cero, será proporcional a su calor específico.

En cuanto a los fluidos, se les contendrá en recipientes de los que se puedan determinar las capacidades del calor, y la operación será la misma que para los sólidos, de modo que, para tener cantidades de agua que sean debidas al enfriamiento de los fluidos, habrá que restar a las cantidades de agua recogida aquellas cantidades que los recipientes debían producir.

¿Queremos saber el calor que se desprende en la combinación de varias sustancias? Se les disminuirá a todas ellas -así como al recipiente que les contiene- a una temperatura de cero; enseguida se pondrá su mezcla en el interior de la esfera de hielo, teniendo cuidado de mantenerla hasta que su temperatura sea nula; la cantidad de agua recogida en esta experiencia será la medida del calor que ha sido liberado.

Para medir el grado de frío producido en ciertas combinaciones, tales como la disolución de sales, se elevarán cada una de las sustancias a una misma temperatura, que llamaremos m grados del termómetro; luego se mezclarán al interior de la esfera y se observará la cantidad de hielo derretido por el re- enfriamiento de la mezcla hasta cero; y sea a esta cantidad. Para conocer el número de grados que ha bajado la temperatura de las sustancias en su mezcla, por encima de su temperatura inicial m , se elevará la temperatura de la mezcla un número cualquiera de m' grados, y se observará la cantidad de hielo derretido por su enfriamiento hasta cero; sea a' esta cantidad. Esto se hace, porque a una cantidad a' de hielo derretido corresponde una temperatura m' de la mezcla, es evidente que la cantidad de hielo derretido debe corresponder con una temperatura igual a $(a / a') m'$; esta temperatura es aquella que resulta la mezcla de sustancias elevadas a la temperatura m ; al restar el resultado de m , se tendrá $(a' m - a m') / a'$ para el número de grados de frío producidos por la mezcla.

Se sabe que los cuerpos absorben calor al pasar del estado sólido al estado líquido, y que al regresar del estado líquido al estado sólido lo devuelven al ambiente y a los cuerpos circundantes; para determinarlo, representemos por m el nivel del termómetro sobre un cuerpo que comienza a fundirse; al calentarlo al grado $m - n$, y al colocarlo enseguida al interior de la esfera, mientras se enfría a cero, hará derretir una cantidad de hielo que llamaremos a ; al calentarlo hasta el grado $m + n'$; el derretirá, mientras se enfría, una cantidad de hielo que llamaremos a' ; al final, al calentarlo hasta el grado $m + n''$, en su enfriamiento derretirá una cantidad de hielo que llamaremos a'' . Planteado esto, se tendrá que $a'' - a'$ es la cantidad de hielo que puede derretir el cuerpo en estado líquido, al enfriarse de $n'' - n'$ grados; de esto se deduce que en el enfriamiento de n' grados se hará derretir una cantidad de hielo equivalente a $n' (a - a') / (n'' - n')$. Se encontrará paralelamente que el cuerpo, en su enfriamiento de m grados en estado sólido, derretirá el hielo en la cantidad $m a / (m - n)$; si se nombra x la cantidad de hielo que puede derretir el calor producido por el cuerpo en su paso del estado líquido en estado sólido, se tendrá que la cantidad total de hielo que se derrite por un cuerpo calentado hasta $m + n'$ grados, será $n'(a'' - a') / (n'' - n') + x + m a / m - n$.

El primer término de esta cantidad es debido al calor liberado por el cuerpo, antes de su paso al estado sólido; el segundo término es el efecto del calor que se desarrolla al momento de este paso, y el tercer término es debido al calor perdido por el cuerpo en su estado sólido, al enfriarse hasta cero. Si se iguala la cantidad anterior con la cantidad reservada a' de hielo derretido, se tendrá $n' (a'' - a') / (n'' - n') + x + m a / m - n = a'$, de donde se obtiene que $x = (n'' a' - n' a'') / (n'' - n') - m a / m - n$; para la exactitud del resultado, es ventajoso hacer n y n' poco significativas.

No sólo el valor de x estará dado por esta experiencia; se tendrán también los calores específicos del cuerpo en sus dos estados de solidez y fluidez, puesto que se conocen las cantidades de hielo que pueden derretir en estos dos estados, al enfriarse (el fluido) un número determinado de grados.

La determinación del calor que se desarrolla en la combustión y en la respiración no ofrece mayor dificultad; se quemarán los materiales combustibles en el interior de la esfera; se dejará respirar animales; pero, como la renovación del aire es esencial en estas dos operaciones, será necesario establecer una comunicación entre el interior de la esfera y el ambiente que le rodea; y, para que la introducción de un nuevo aire no provoque ningún error significativo en los

resultados, se tendrán que hacer estas experiencias a unas temperaturas un poco distintas de cero, o, al menos, reducir esta temperatura a la del aire que se introduce.

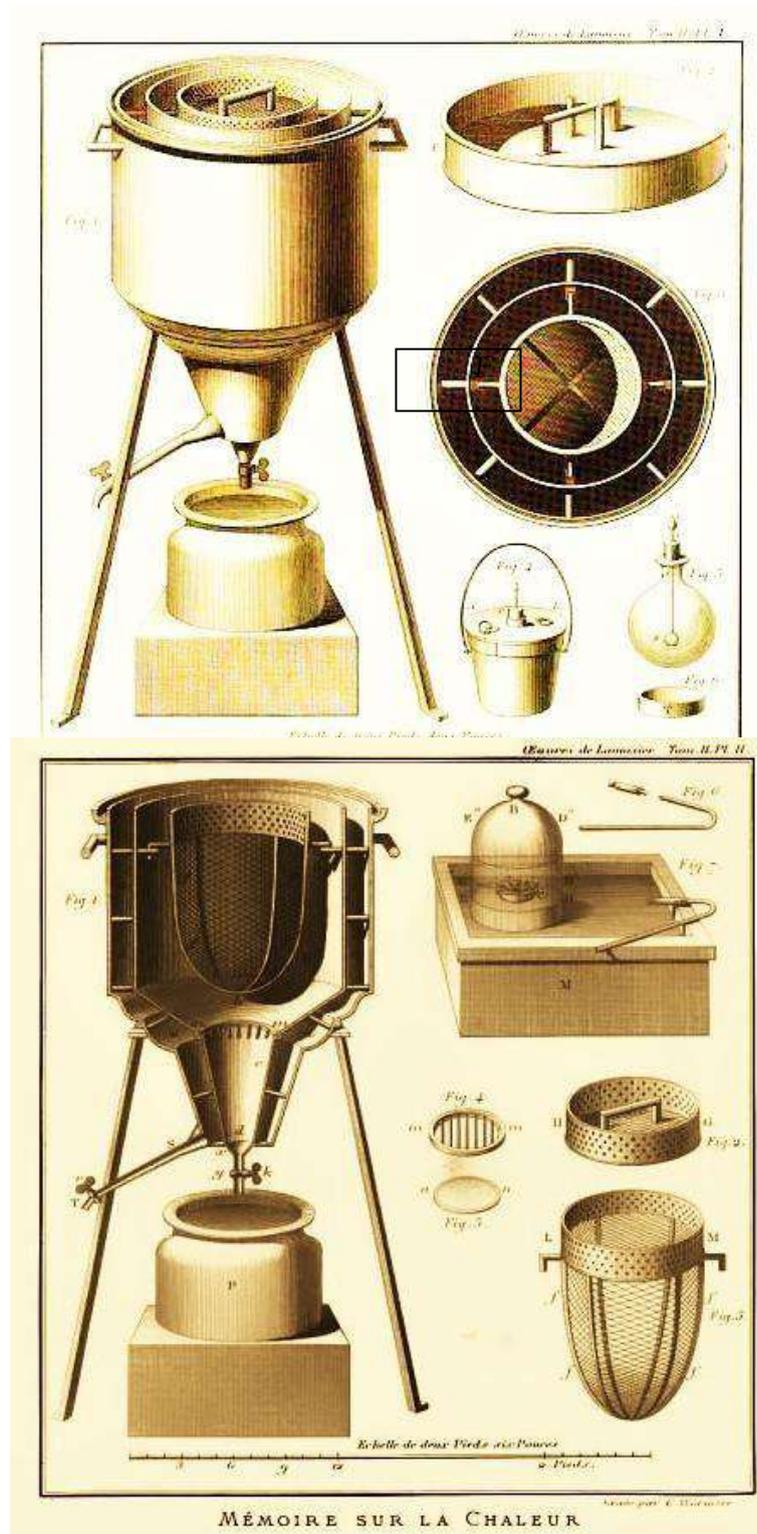
La búsqueda de calor específico de diferentes gases es más difícil, a causa de su poca densidad; porque si uno se contenta con encerrarlos en recipientes como los de otros fluidos, la cantidad de hielo fundido sería muy poco considerable, de modo que el resultado del experimento sería muy incierto. Pero, si en el interior de la esfera se coloca un tubo rizado en forma de espiral, al generar en este tubo una corriente de aire de naturaleza cualquiera, y por medio de dos termómetros ubicados en esta corriente, el uno a la entrada y el otro a la salida de la esfera, se determina el número de grados de los cuales el aire se enfría en el trayecto, se podrá enfriar de este modo una masa considerable de aire y determinar con precisión su calor específico: el mismo proceso puede usarse para tener la cantidad de calor que se libera en la condensación de los vapores de diferentes fluidos.

Se ve, por el detalle en el que hemos entrado, que el método anterior se extiende a todos los fenómenos en los cuales hay emisión o absorción de calor. Podemos siempre, en estos diferentes casos, determinar las cantidades de calor que se liberan o se absorben, y relacionarlos con una unidad común. Por ejemplo, el calor necesario para elevar una libra de agua de cero a 80 grados; así se podrá conocer y comparar entre ellos las cantidades de calor que producen las combinaciones de aceite del vitriolo⁵⁸ con agua, con cal viva⁵⁹, de cal viva con ácido nitroso, etc.; aquellos que se disipan en la combustión de fósforo, de azufre, de carbón, de piróforo⁶, etc.; en la detonación de nitro, en la respiración de los animales, etc.; lo que era imposible por los medios hasta ahora conocidos. Hemos considerado una esfera de hielo para hacer entender mejor el método que ponemos en uso. Sin embargo, sería muy difícil obtener esferas similares y las hemos reemplazado mediante la siguiente máquina.

La figura 1 de la página representa esta máquina vista en perspectiva; la figura 3 representa el corte horizontal; el corte vertical, representado en la página II, fig. 1, se ve su interior.

⁵⁸ La palabra vitriolo se deriva de vidrio, el aceite de vitriolo fue lo que hoy se denomina ácido sulfúrico, y vitriolo era la generalización para lo que hoy llamamos diferentes sulfatos.

⁵⁹ Cal viva es el óxido de calcio y óxido de calcio y magnesio. Sustancia que se inflama al contacto con el aire.



Su capacidad se divide en tres partes; para hacernos entender mejor, les distinguiremos con los nombres de contenedor interior, contenedor medio y contenedor exterior. El contenedor interior (fig. 1 y 3, plancha II) está formado por una malla de hilos de hierro sostenido por algunas

cantidades del mismo metal, es en este contenedor que ponemos los cuerpos conforme a la experiencia; su parte superior L M se cierra con una tapa H G representada por separado (placa II, fig. 2). Es enteramente entre abierta arriba, y abajo está formada por una de malla de hilos de hierro.

El contenedor medio f f f f (fig. 1, plancha II) está diseñado para contener el hielo que debe rodear el contenedor interior, y que se debe derretir al calor del cuerpo puesto en la experiencia: este hielo es soportado y retenido por una rejilla m m, debajo de la cual hay un tamiz n n; una y otro están representados por separado (ver plancha II, fig. 4 y 5). A medida que el hielo se derrite por el calor del cuerpo colocado en el contenedor interior, el agua fluye a través de la rejilla y el tamiz; cae enseguida a lo largo del cono c c d (placa II, fig. 1) y de la manguera x y, y se recoge en el recipiente P ubicado debajo de la máquina; k es una llave (grifo) a través de la cual uno puede detener a voluntad el caudal de agua interior. Por último, el contenedor exterior a a a a está diseñado para recibir el hielo que debe detener el efecto del calor del aire exterior y de los cuerpos circundantes; el agua que produce la fusión de este hielo fluye a lo largo de la manguera S T, que puede abrir o cerrar a través de llave (grifo) r.

Toda la máquina está cubierta por la tapa F G (plancha I, fig. 2) completamente abierta en su parte superior y cerrada en su parte inferior. Está compuesta de hierro blanco (latón) pintado con pintura de aceite para evitar la herrumbre.

Para desarrollar la experiencia, se llenan de hielo triturado el contenedor medio y la cubierta H I del contenedor interior, el contenedor exterior y la cubierta F G de toda la máquina entera. Entonces se deja drenar el hielo interior (llamamos así a aquel que está encerrado en el contenedor mediano y en la cubierta interior, y se debe ser cuidadoso de aplastar y presionar con firmeza en la máquina); cuando haya drenado lo suficientemente, se abre la máquina para colocar el cuerpo con el que se quiere experimentar, y se cierra inmediatamente. Se espera a que el cuerpo se haya enfriado completamente y que la máquina esté drenando suficientemente; enseguida se pesa el agua recogida en el recipiente P. Su peso medirá exactamente el calor liberado por el cuerpo; porque es visible que este cuerpo está en la misma posición como en el centro de la esfera de la cual hemos hablado, puesto que todo su calor es detenido por el hielo interior, y que este hielo garantiza la impresión de cualquier otro calor por el hielo encerrado dentro de la cubierta y del contenedor exterior.

Las experiencias de este tipo duran quince, dieciocho o veinte horas; a veces, para acelerar, ponemos hielo bien drenado en el recipiente interior, y cubrimos el cuerpo que queremos enfriar.

La Figura 4 de la plancha I representa un cubo de metal destinado a recibir los cuerpos sobre los que se quiere operar; está rematado con una tapa a b, perforada y cerrada con un corcho c, atravesado por el tubo de un pequeño termómetro.

La Figura 5 de la plancha I representa un frasco de vidrio cuya tapa está atravesada por el tubo c d del pequeño termómetro s r; se deben usar recipientes similares (de vidrio) cuando se opera sobre los ácidos y, en general, sobre las sustancias que pueden tener algún efecto sobre los metales.

T (Fig. 6 plancha I) es un pequeño cilindro hueco que se hace llegar hasta el fondo del contenedor interior para sostener los recipientes.

Es fundamental que, en esta máquina, no haya ninguna comunicación entre el contenedor medio y el contenedor exterior, lo que se probará fácilmente al reemplazar el agua del contenedor exterior. Si hay comunicación entre estos contenedores, el hielo derretido por el ambiente, cuyo calor está en la envoltura del contenedor externo, podría pasar hacia el contenedor medio, y entonces el agua que fluye desde este último contenedor no mediría el calor perdido por el cuerpo puesto en la experiencia.

Cuando la temperatura del ambiente está por encima de cero, su calor difícilmente puede llegar hasta el contenedor medio, ya que es detenido por la capa de hielo de la cubierta y del contenedor exterior; pero, si la temperatura exterior está bajo cero, el ambiente podría enfriar el hielo interior; por lo tanto, es esencial operar en un ambiente cuya temperatura no esté por debajo de cero: así, en un tiempo helado, se deberá encerrar la máquina en un apartamento que asegure el calentamiento interior; es necesario que el hielo que se usa no esté por debajo de cero. Si es este el caso, se le debe triturar, extenderlo por capas muy delgadas, y mantenerlo así durante algún tiempo, en un lugar cuya temperatura esté por encima de cero.

El hielo interior aún conserva una pequeña cantidad de agua adherida a su superficie, y uno podría pensar que esta agua debe entrar el resultado de nuestras experiencias; pero cabe señalar que al principio de cada experimento todo el hielo ya está impregnado con la cantidad de agua que entonces puede retener; de suerte que si una pequeña parte del hielo derretido por el cuerpo sigue estando adherida al hielo interior, la misma cantidad de agua inicialmente adherida a la superficie del hielo, o una muy cercana, debe separarse y verterse en el recipiente P, porque la

superficie del hielo interior cambia muy poco en esta experiencia.

Hemos tomado algunas precauciones, era imposible impedir que penetrara aire exterior en el contenedor interior; cuando la temperatura es de 9 a 10 grados, el aire contenido en este contenedor es específicamente más pesado que el aire exterior; fluye a través de la manguera xy, y es reemplazado por aire exterior que entra por la parte superior de la máquina y deja una parte de su calor en el hielo interior. Se establece entonces que, en la máquina, una corriente de aire actúa más rápido que la temperatura exterior y es considerablemente mayor, lo que derrite continuamente el hielo interior. Se puede detener, en gran parte, el efecto de esta corriente al cerrar la llave k; pero es mucho mejor operar solamente cuando la temperatura exterior no sobrepase los 3 o 4 grados; porque observamos que, en ese caso, el derretimiento del hielo interior causado por el ambiente no es sensible, así que podemos, a esta temperatura, dar cuenta de la exactitud de nuestras experiencias sobre los calores específicos de los cuerpos, una cuarentava parte, e incluso una sexagésima parte, si la temperatura exterior es de sólo uno o dos grados.

Nosotros construimos dos máquinas similares a la que acabamos de describir; una de ellas está destinada a experiencias en las que no es necesario renovar el aire interior; la otra máquina se utiliza para experiencias en las que la renovación del aire es indispensable, tales como la combustión y la respiración; esta segunda máquina no difiere de la primera sino en que ambas tapas se perforan con dos orificios, a través del cual pasan dos pequeños tubos que sirven de comunicación entre el aire interior y exterior. Se puede, por sus propios medios, soplar aire sobre materiales combustibles; estos tubos están representados en la figura 2 de la primera plancha. Ahora exponemos el resultado de las principales experiencias que hemos hecho mediante el uso de estas máquinas.*

**Desde la lectura de esta memoria, vimos, en una tesis muy interesante de M. Vilke sobre el calor -que está impresa en las memorias de Estocolmo para el año 1781- que este sabio físico había pensado antes que nosotros la idea de usar el derretimiento de la nieve para medir el calor de los cuerpos. Pero la dificultad de recoger el agua producida por el deshielo de la nieve; el tiempo considerable que cuerpos emplean para perder su calor, y que, según nuestras experiencias pueden ser doce horas y más aún; el calor que la nieve recibe de la atmósfera y de los demás cuerpos que la rodean, durante este intervalo; todas estas fueron las razones que le obligaron a abandonar este camino, y a recurrir al método de las mezclas, por lo que él no*

intentó aislar la nieve que los cuerpos deben derretir, con una capa externa de nieve o hielo que la guardase del calor de la atmósfera. Es en este aislamiento exterior en el que se encuentra la principal ventaja de nuestras máquinas, ventaja que nos ha puesto al alcance de medir las cantidades de calor que, hasta ahora, no se podían medir, como el calor que se desprende en la combustión y la respiración. Por lo demás, en estos experimentos el hielo es preferible a la nieve.

ACTIVIDAD DE PREPARACIÓN PARA LA SESIÓN

A partir del texto leído:

Realicen una organización de la lectura, tipo infograma, mapa o esquema conceptual, ubicando en éste, las principales ideas de la lectura desarrollada.

Diseñen actividades experimentales mediante las cuales sea posible cuantificar el calor.

ACTIVIDADES DURANTE LA SESIÓN

Desarrollen las actividades diseñadas junto a aquella que propusieron en la sesión anterior.

Utilicen el método de las mezclas para la calibración del termómetro. Describan paso a paso cómo se desarrolla el procedimiento. Comparen estas medidas sobre el termómetro, con aquellas que elaboraron de acuerdo con la dilatación de las sustancias.

¿Qué conclusiones se pueden establecer de estas actividades? Describan si ha habido alguna modificación o reafirmación en su comprensión sobre el calor y/o la temperatura, de acuerdo con las actividades desarrolladas hasta el momento.

12.2.7 La presión y el volumen como variables térmicas

- Identificar que los cambios térmicos de las sustancias pueden depender de la presión.
- Identificar relaciones entre presión y cambios de temperatura o presión y cambios de volumen.

ACTIVIDADES EXPERIMENTALES

Recoja agua a temperatura de ebullición en una jeringa y tape su punta. Espere un par de minutos, y ahora, bañe la jeringa con agua fría. ¿Qué cambios observa? ¿A qué se deben estos cambios?

Ahora con la punta de la jeringa muy bien tapada, mueva el émbolo en la dirección de la salida de agua. ¿Qué cambios observa? ¿A qué se deben estos cambios?

¿Actúan las mismas variables en estos casos? ¿Qué se mantiene y qué varía en estas situaciones?

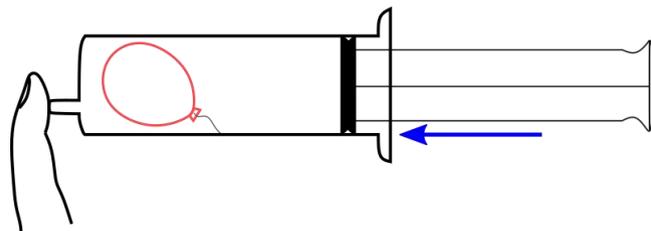
Tomen una jeringa sin su aguja, mire la escala de la jeringa y ubique el pistón o émbolo [la parte móvil de la jeringa] en una marca fija de tal escala, puede ser en la mitad. Ahora, caliente la punta de la jeringa y séllela de modo que no entre aire por ahí.

Intente mover el émbolo, notará que el aire contenido en la jeringa es bastante elástico. Por esos a los gases se les llama fluidos elásticos.

¿Qué pasa en la jeringa cuando usted intenta comprimir al máximo? ¿Se identifican variaciones térmicas?

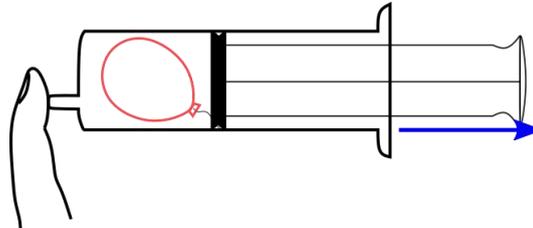
Después ponga en jeringa en un recipiente con agua que se pone a calentar hasta el punto de ebullición. Describan y representen los cambios.

Imaginen una bomba inflada pequeña dentro de una jeringa, cuyo pistón se encuentra en su mayor estiramiento,



como se aprecia en la figura. Se tapa la salida de la jeringa con el dedo y se comprime el pistón.

Ahora, si el pistón de la jeringa se encuentra lo más cerca a la salida de aire (sin presionar la bomba), y se tapa nuevamente la salida de la jeringa con su dedo estirando el pistón ¿Qué se espera que ocurra al globo? Representen los cambios.



En estos dos casos ¿Cuáles son los cambios que presentan y qué variables los representan? Descríbanlo. Representen los cambios.

¿Por qué se modifica el volumen del globo en la jeringa? ¿La bomba indica algún cambio al interior de la jeringa adicional al cambio de volumen? ¿Cuál es ese cambio?

Cuando se suelta la jeringa, hay efectos de compresión o expansión: ¿Cuál es la causa en movimiento del pistón? ¿Qué sucede al volumen del aire encerrado? Describan y representen los cambios.

¿Cuáles variables se han tenido en cuenta para describir el comportamiento del aire dentro del contenedor de cada caso y qué relaciones guardan entre sí? Señale las condiciones iniciales y finales e indique la transformación.

¿Qué ocurriría sobre el globo si en lugar de aire el cilindro estuviese lleno de agua?

Realicen estas actividades haciendo uso de la jeringa y el globo. Describan sus observaciones y amplíen o modifiquen las respuestas anteriores.

SITUACIONES DE ANÁLISIS

Sabemos que se calibran los termómetros señalando que la temperatura de ebullición del agua al nivel del mar es de 100°C . En Bogotá, sin embargo, con un termómetro común se mide que el agua hierve a 92°C a una altitud media de 2640 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Por otra parte, en La paz (Bolivia) –por ejemplo- la altura es de 3640 m.s.n.m. y el agua alcanza su temperatura de ebullición a los 85°C . Así, el cambio de fase de líquido a gas depende no

sólo de la temperatura a la cual esté el líquido, sino además de la presión a la cual este se somete. De acuerdo con esta información, analicemos las siguientes situaciones:

La temperatura a la que el huevo se cuece es diferente para la clara y la yema. La clara se endurece [se desnaturaliza] entre 60°C a 64°C. La yema se endurece entre 65°C y 70°C. Además, se sabe que en Bogotá un huevo tarda en cocer 12 minutos (yema dura), una vez el agua hierve.

Si queremos cocinar huevos bien cocidos (yema dura) ¿los tiempos de cocción en ciudades como Cartagena, Bogotá o La paz serían iguales o diferentes? Utilicen representaciones o esquemas para dar cuenta de su perspectiva.

Si un huevo se dejara de cocinar a los 3 minutos, en los tres lugares simultáneamente, ¿su temperatura sería la misma? Explique su respuesta.

De acuerdo con las respuestas dadas en las situaciones anteriores, explique con palabras, dibujos y/o esquemas ¿por qué los alimentos se cocinan más rápido en una olla a presión?

12.3 La máquina de vapor y la búsqueda de la eficiencia

12.3.1 El calor y el movimiento

Objetivos:

- Establecer relaciones geométricas y cuantitativas entre las variables Presión, Volumen y Temperatura para cuantificar la medida del calor.
- Caracterizar la relación entre movimiento y calor.

A través del trabajo de Joseph Black fue posible identificar que: las fuentes de calor son siempre aquellos cuerpos que mantienen una mayor temperatura que otros, y el calor se puede pensar como una acción que es transmisible entre unos cuerpos y otros en relación con su diferencia de temperaturas. De ahí que, una de las síntesis conceptuales más importantes en la organización de los fenómenos térmicos consista en señalar que el calor se transfiere de los cuerpos de mayor temperatura a los cuerpos de menor temperatura.

Esta síntesis que se constituye como la primera ley de la termodinámica, se encuentra asociada a la idea de que el calentamiento solo ocurre mientras existe la diferencia de temperaturas, y que los cuerpos en relación tienden a igualar sus temperaturas mientras dura el proceso. Se establece un proceso de equilibrio que involucra el equilibrio de calor para hacer posible el equilibrio de temperaturas. Es decir, es necesario pensar que el calor que un cuerpo o sistema cede es el mismo calor que el otro cuerpo o sistema recibe, y en este intercambio, los dos cuerpos o sistemas alcanzan la misma temperatura.

Este proceso de equilibración indica que solo es posible ejercer acciones cuando los cuerpos están en desbalance de alguna de las dos magnitudes calor o temperatura. Sin embargo, no responde la pregunta sobre ¿cómo se genera el calor?

Lavoisier y De Laplace hicieron notar que una observación muy conocida es la producción de calor cuando hay movimiento, que siempre que hay fricción es notoria la producción de calor. Así, un aspecto que cobra importancia es la producción de calor por movimiento, y viceversa, el aprovechamiento del movimiento cuando es producido por el calor.

De ahí que, una teoría dinámica del calor se haya constituido bajo la necesidad de comprender cómo es la relación entre calor y movimiento, y cómo hacer uso del calor para producirlo. Dos de los principales trabajos en esta dirección fueron desarrollados por Sadi Carnot, y Emile Clapeyron. En esta etapa del curso se abordará el trabajo de Émile Clapeyron, que sintetiza y formaliza matemáticamente el trabajo de Carnot.

Émile Clapeyron. Memoria sobre la potencia motriz del calor⁶⁰ Parte I.

Hay pocas preguntas tan merecedoras de captar la atención de los geómetras y de los físicos, como aquellas que se relacionan con la constitución de los gases y los vapores; el rol que éstos juegan en la naturaleza, y en la parte que atrae a la industria, explica los numerosos e importantes trabajos de los cuales han sido objeto; pero las preguntas al respecto están lejos de agotarse. La ley de Mariotte y la de M. Gay-Lussac establecen las relaciones que existen entre el volumen, la presión y la temperatura de una misma cantidad de gas; las dos leyes han obtenido después de largo tiempo el consentimiento de los científicos. Las nuevas experiencias hechas por MM. Arago y Dulong no dejan ninguna duda sobre la exactitud de la primera entre los límites muy extendidos de la presión; sin embargo, estos importantes resultados no enseñan nada sobre la cantidad de calor que poseen los gases, cuando aumentan la presión o disminuyen la temperatura, tampoco aportan a la ley de los calores específicos a presión constante y a volumen constante. No obstante, esta parte de la teoría del calor ha sido objeto de investigaciones profundas, entre las cuales se destaca el trabajo de MM. Laroche y Bérard sobre el calor específico de los gases. Por último, M. Dulong, en una tesis que publicó bajo el título de “Investigaciones sobre el calor específico de los fluidos elásticos”, estableció con las experiencias -sin poder contradecirle- que los volúmenes iguales de todos los fluidos elásticos encerrados a una misma temperatura y con una misma presión, al ser comprimidos o dilatados súbitamente en una misma fracción de su volumen, liberan o absorben la misma cantidad absoluta de calor. Laplace, y más tarde M. Poisson, publicaron sobre este tema investigaciones teóricas muy notables, pero que se basan en aportes hipotéticos que parecen cuestionables; ellos admitían que la proporción entre el calor específico a volumen constante y el calor específico a presión constante no variaba, y que las cantidades de calor absorbidas por los gases son proporcionales a su temperatura.

⁶⁰ Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur, Journal de l'École Royale Polytechnique, Vingt-troisième cahier, Tome XIV, 153-190. Traducción al castellano por Marina Garzón Barrios, con la colaboración de Carlos Andrés Bonilla. Diciembre 2014.

Entre los trabajos que aparecieron sobre la teoría del calor, citaré, por último, una obra de M.S. Carnot publicada en 1824 bajo el título de “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego”. La idea que sirvió de base a sus investigaciones me parece fecunda e incuestionable, sus demostraciones están organizadas sobre lo absurdo que sería admitir que se puede crear movimiento con todo el calor, o crear calor con toda la fuerza motriz.⁶¹

Aquí está el enunciado de varios teoremas a los cuales conduce este nuevo método de razonamiento.

- 1. Cuando un gas pasa, sin cambiar de temperatura, de un volumen y de una presión determinados, a otro volumen y a otra presión igualmente determinados, la cantidad de calor absorbido o liberado es siempre la misma, sea cual sea la naturaleza del gas escogido para el experimento.*
- 2. La diferencia entre el calor específico a presión constante, y el calor específico a volumen constante, es la misma para todos los gases.*
- 3. Cuando un gas varía el volumen, sin cambiar la temperatura, las cantidades de calor absorbidas o liberadas por este gas están en progresión aritmética, si los incrementos o reducciones de volumen están en progresión geométrica.*

Este nuevo medio de demostración me parece digno para llamar la atención de los geómetras; me parece que no tiene contradicción y que adquiere una nueva importancia desde la evidencia que se encuentra en los trabajos de M. Dulong, con los cuales se demostró, experimentalmente, el primer teorema que acabo de enunciar.

Creo que hay algún interés para retomar esta teoría; M.S. Carnot, llega a los resultados, que se deducirían de una ley más general, a través de una serie de razonamientos delicados y difíciles de comprender porque evita el empleo de análisis matemático, yo busco establecer esa ley. Pero antes de entrar en materia, es útil regresar sobre el axioma fundamental que sirve de base a las investigaciones de M. Carnot, y que será también mi punto de partida.

⁶¹ (Literalmente: de todas las partes de la fuerza motriz o del calor. En este párrafo se ha hecho referencia a la imposibilidad de encontrar procesos térmicos perfectamente reversibles en los que las transformaciones de las cantidades de trabajo mecánico y calor son absolutas.

¿Qué se sabe experimentalmente de los gases para llegar a estas conclusiones? Vamos a resaltar algunos aspectos:

Se ha señalado que calor específico de las sustancias es una medida que indica cuánto calor es necesario para aumentar en un grado la temperatura de una cantidad determinada de sustancia, un gramo o un kilogramo.

En el caso de los gases, el trabajo experimental muestra que su calor específico no es constante, y además, esta magnitud varía de acuerdo con el proceso mediante el cual se haga cambiar el estado del gas, es decir, si se actúa sobre al gas a través de un proceso a presión constante [isobárico-Ley de Charles] se obtendrán valores de calor específico diferentes a los valores que se obtendrán si se actúa sobre el gas en un proceso donde el volumen permanece constante [isovolumétrico- ley de Gay-Lussac].

A continuación, se presentan las tablas de los calores específicos obtenidos tanto a presión constante como a volumen constante, relatadas por Carnot en su libro: Sobre la potencia motriz del fuego de 1824.

TABLE OF THE SPECIFIC HEAT OF GASES.

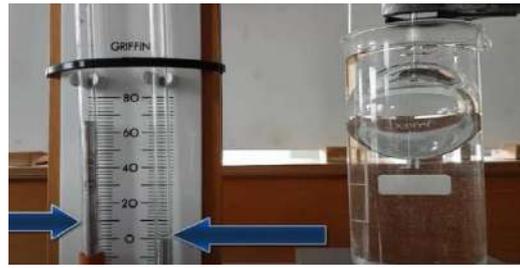
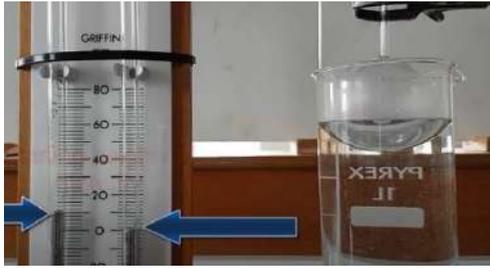
NAMES OF GASES.	Specific Heat under Const. Press.	Specific Heat at Const. Vol.
Atmospheric Air,	1.000	0.700
Hydrogen Gas,	0.903	0.603
Carbonic Acid,	1.258	0.958
Oxygen,	0.976	0.676
Nitrogen,	1.000	0.700
Protoxide of Nitrogen, . . .	1.850	1.050
Olefiant Gas,	1.553	1.253
Oxide of Carbon,	1.034	0.734

En estos procesos es importante precisar dos situaciones:

A presión constante, el aire o cualquier otro gas varía incrementando su volumen a causa de la variación de la temperatura. Cuando se realizó el termómetro de gas a presión constante, se notó que efectivamente el volumen del gas va aumentando con los incrementos de temperatura.

A volumen constante, el aire varía su presión a causa de la variación de la temperatura. Cuando se identificó el termómetro de gas a volumen constante se notó que efectivamente el volumen se mantiene constante, y se observan los cambios de temperatura a causa de la dilatación del mercurio que va aumentando en escala, que se deducen de los cambios de presión.

Ver video: <https://www.youtube.com/watch?v=n0xAQXL905c>



Calorespecífico a Presión constante	Calorespecífico a volumen constante	Diferencia entre calores específicos [Resta]
1	0,7	0,3
0,903	0,603	0,3
1,258	0,958	0,3
0,976	0,676	0,3
1	0,7	0,3
1,35	1,05	0,3
1,553	1,253	0,3
1,034	0,734	0,3

De esto se deduce que, para aumentar un grado la temperatura de esa cantidad de gas usado en la experimentación, cada gas va a requerir una cantidad diferente de calor para variar esa temperatura, según el proceso realizado, en otras palabras:

Se requiere una mayor cantidad de calor para hacer variar un grado la temperatura de un gas manteniendo su presión constante, si se mantiene su volumen constante se requiere menos cantidad de calor, en comparación.

Ahora, utilizando los datos de la tabla de Carnot,

veamos el valor de la diferencia entre los datos obtenidos a presión constante y volumen constante. Es evidente que la diferencia es la misma 0.3 para todos estos gases estudiados.

Lo que nos lleva al segundo teorema expresado por Clapeyron: “La diferencia entre el calor específico a presión constante, y el calor específico a volumen constante, es la misma para todos los gases.”

Y fortalece la idea del primer teorema: “Cuando un gas pasa, sin cambiar de temperatura, de un volumen y de una presión determinados, a otro volumen y a otra presión igualmente determinados, la cantidad de calor absorbido o liberado es siempre la misma, sea cual sea la naturaleza del gas escogido para el experimento”

En la siguiente tabla se presenta otro comportamiento importante de los gases, cuando los gases se comprimen pueden elevar su temperatura sin que exista una fuente externa de calor. En esta tabla Carnot señala tal aumento de temperatura para diferentes gases, nótese que la tabla se refiere al efecto causado por la reducción de volumen en 1/115 partes.

**TABLE OF THE ELEVATION OF TEMPERATURE
OF
Gases through the Effect of Compression.**

NAMES OF GASES.	Elevation of Temperature for a Reduction of Volume of $\frac{1}{115}$.
Atmospheric Air,	1.000
Hydrogen Gas,	1.160
Carbonic Acid,	0.730
Oxygen,	1.035
Nitrogen,	1.000
Protoxide of Nitrogen,	0.667
Olefiant Gas,	0.558
Carbonic Oxide,	0.955

Se deduce entonces que el aumento de temperatura no se establece únicamente por contacto térmico, y no siempre se necesitará tener una fuente de calor para hacer variar la temperatura del gas.

Y en la siguiente tabla, se aprecian los cambios en el calor específico de uno solo de los gases: el aire atmosférico. Este proceso se realiza a temperatura constante. Por lo cual, cada vez que

se reduce la presión aumenta el volumen del gas, y mientras se aumente la presión se reduce su volumen, siguiendo la ley de Boyle- Mariotte.

En este caso se toma como referencia que el calor específico es 1 cuando la presión es de 1 atmósfera. [Último dato de la columna a la izquierda, primer dato de la columna a la derecha.]

Veamos los datos de la columna a la izquierda correspondientes a los valores de presión, empezando por presión atmosférica 1, esta presión se reduce a la mitad en cada oportunidad, esa reducción de la mitad y la mitad de la mitad que organiza la serie 1, 1/2, 1/4, etc., recibe el nombre de progresión geométrica en este caso por el número que se multiplica es 1/2 y este recibe el nombre de razón de la progresión; de la misma forma, en la columna de presión que se encuentra a mano derecha podemos encontrar otra serie, que también es una progresión geométrica pero esta serie está creciendo al multiplicar por 2, así, 1,2,4,8, etc. las dos series nos están indicando como crece y decrece la presión por lo cual indican como crece o decrece el volumen.

SPECIFIC HEAT OF AIR.

Pressure in Atmospheres.	Specific Heat, that of Air under Atmospheric Pressure being 1.	Pressure in Atmospheres.	Specific Heat, that of Air under Atmospheric Pressure being 1.
1024	1.840	1	1.000
512	1.756	2	0.916
256	1.672	4	0.832
128	1.588	8	0.748
64	1.504	16	0.664
32	1.420	32	0.580
16	1.336	64	0.496
8	1.252	128	0.412
4	1.165	256	0.328
2	1.084	512	0.244
1	1.000	1024	0.160

Ahora veamos las columnas correspondientes a los datos de los calores específicos: en la columna de la izquierda notamos que esos calores específicos disminuyen,

¿cuánto van disminuyendo?, en la columna de la derecha por el contrario van aumentando ¿cuánto van aumentando?

Las siguientes tablas muestra que incrementa y decrece en el mismo valor 0.084.

1,84	1,756	0,084	1	0,916	0,084
1,756	1,672	0,084	0,916	0,832	0,084
1,672	1,588	0,084	0,832	0,748	0,084
1,588	1,504	0,084	0,748	0,664	0,084
1,504	1,42	0,084	0,664	0,58	0,084
1,42	1,336	0,084	0,58	0,496	0,084
1,336	1,252	0,084	0,496	0,412	0,084
1,252	1,165	0,087	0,412	0,328	0,084
1,165	1,084	0,081	0,328	0,244	0,084
1,084	1	0,084	0,244	0,16	0,084

Así se construye una serie en la cual a un cierto valor por ejemplo 1,840 se le resta 0.084y se obtiene el valor consecutivo 1.756, al que también se le resta 0.084 y así sucesivamente obteniendo todos los valores de la serie. Este tipo de series recibe el nombre de progresión aritmética.

En relación con estas observaciones, Carnot afirma:

Cuando un gas varía en volumen sin cambios de temperatura, las cantidades de calor absorbidas o liberados por el gas están en progresión aritmética, si los incrementos o decrementos de volumen se encuentran en progresión geométrica. [Carnot, pág. 81]

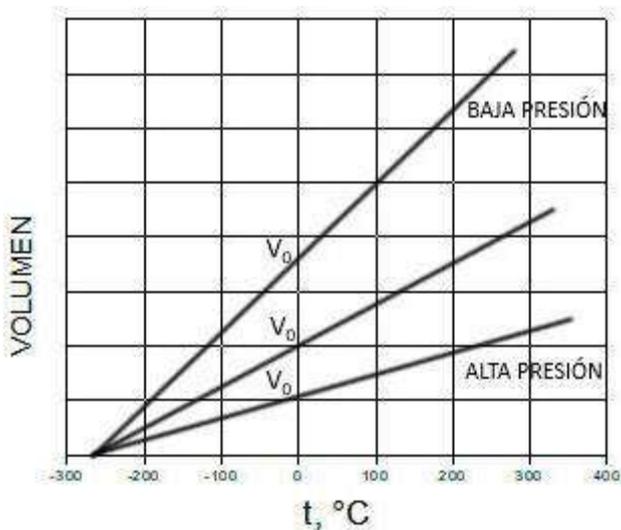
Que es el teorema 3 que Clapeyron resaltó como importante: “Cuando un gas varía el volumen, sin cambiar la temperatura, las cantidades de calor absorbidas o liberadas por este gas están en progresión aritmética, si los incrementos o reducciones de volumen están en progresión geométrica”

Recordemos ahora la siguiente expresión que corresponde a la dilatación volumétrica. Ya habíamos estudiado esta expresión, nos indica que:

El volumen final que obtiene el gas durante el proceso siempre va a depender del volumen inicial que este gas tenía.

Los incrementos en el volumen de un gas, cada vez que este gas aumenta o disminuye su temperatura en la misma cantidad, son constantes. Esto ocurre porque $[\gamma\Delta T + 1]$ es constante. Siendo γ el coeficiente de dilatación

$$V_f = (\gamma\Delta T + 1)V_0 \quad \frac{V_f}{V_0} = (\gamma\Delta T + 1)$$



En esta figura, se observa el cambio del volumen de cantidad específica de un gas, a presión constante, en función de la temperatura, de acuerdo con la ley de Gay-Lussac.

En una gráfica isovolumétrica, se muestra que, en condiciones de volumen constante, a mayor temperatura, más presión; todas las pendientes son iguales a $V_0/273$

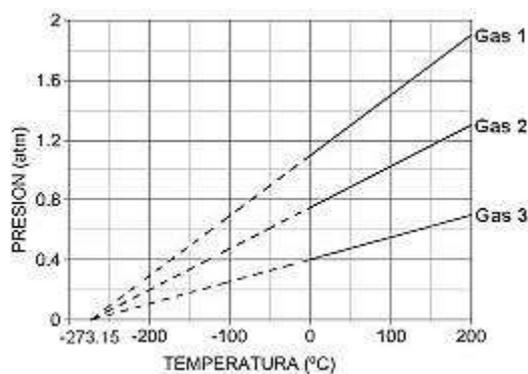
(Barrow, 2002).

Las mismas descripciones se pueden hacer cuando el proceso es a presión constante:

La presión final que obtiene el gas durante el proceso siempre va a depender de la presión inicial que este gas tenía.

Los incrementos en la presión de un gas, cada vez que este gas aumenta o disminuye su temperatura en la misma cantidad, son constantes. Esto ocurre porque $[\gamma\Delta T + 1]$ es constante. En otras palabras, no importa que el gas no esté variando su volumen γ , el coeficiente de dilatación será el mismo en la relación.

$$P_f = (\gamma\Delta T + 1)P_0 \quad \frac{P_f}{P_0} = (\gamma\Delta T + 1)$$



(Barrow, 2002).

... Nótese la identidad de las dos expresiones. Según esta ley, γ presenta el mismo valor para varios gases, y en los trabajos experimentales de Henri-Victor Regnault (1810-1878), este coeficiente γ toma el valor aproximado de 0.003661.

Tabla de valores del coeficiente de elasticidad de los gases. Presentada por Rudolf Clausius On the Mechanical Theory of Heat. 1879, pág. 40.

appear. Here we must refer to the values of α which have been found to be correct for various permanent gases. By experiments made on the system of increasing the pressure while keeping the volume constant, Regnault found the following numbers to be correct for various permanent gases :

Atmospheric Air	0.003665.
Hydrogen	0.003667.
Nitrogen	0.003668.
Carbonic Oxide	0.003667.

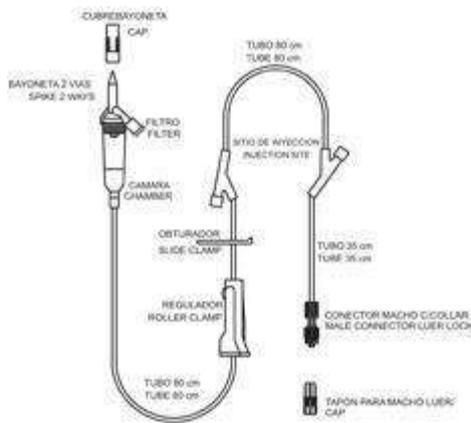
Así una conclusión fuerte e importante de todos estos estudios es, que no importa el gas con el cual se esté trabajando, los gases tendrán la misma posibilidad de expandirse o contraerse,

por lo cual, su trabajo mecánico solo dependerá del tipo de proceso que se esté realizando para modificarlo.

12.3.1.1 Construcción y análisis de termómetros de aire

ACTIVIDAD EXPERIMENTAL

Instrucciones simples



La bayoneta de la manguera servirá como bayoneta de almacenamiento de aire que será ahora la sustancia termométrica que usaremos. Este aire se expande a lo largo de la manguera, por lo cual debe dejarse un indicador que es una porción de agua salina que se moverá cada vez que el aire dentro de la bayoneta entre en contacto con cuerpos calientes o fríos.

PASO A PASO:

Para eso, vamos a utilizar una manguera como la que se muestra en la imagen (venoclis), que consta del carrito para cerrar el flujo de aire.

Ensayo. Tomemos un pitillo de plástico, introduzcámoslo en un vaso con agua sin tapar el extremo superior. Tapemos el extremo superior y saquemos el pitillo de vaso. Vemos que en el pitillo hay cierta cantidad de agua, que permanece sin moverse mientras el pitillo se encuentra tapado por el extremo. Si lo volteamos horizontalmente vemos que la cantidad de agua se desplaza cuando dejamos los dos extremos libres (destapados).

Esto mismo vamos a hacer con nuestra manguera, de modo que, en el interior encontramos una cierta cantidad de fluido indicador (agua salina), que debe estar ubicada de forma que permita que en algún momento el fluido se desplace considerablemente en las dos direcciones posibles.

Usamos el carrito de la manguera para sellar uno de los extremos, o simplemente tape uno de los extremos con el dedo para que el fluido indicador no se desplace.

Sin destapar, en la parte de la bayoneta. Recuerde que debe quedar sellado herméticamente, no se debe dejar ninguna entrada de aire en esa zona.

Ahora, debido a que el extremo del bayoneta o bayoneta ya está sellado, puedo destapar el otro extremo.

En principio, ya tenemos un volumen de aire encerrado en la bayoneta, y este aire encerrado es la sustancia que variará su volumen (se dilatará o se contraerá).

¿Cómo funciona?

En un recipiente mezclamos la misma cantidad de agua y de hielo, e introducimos la bayoneta dentro de la mezcla.

Introducimos la bayoneta del termómetro dejando el extremo sin sellar.

Esperamos un corto tiempo (pocos minutos) para que el aire contenido en ella alcance esta temperatura. Durante este proceso vemos que el aire se contrae, de forma que el fluido indicador se desplaza.

(Marcamos el lugar que alcanza el fluido).

En un recipiente que mantenemos con agua hirviendo.

Introducimos la bayoneta del termómetro como en el caso anterior.

Esperamos un corto tiempo. Durante este proceso vemos que el aire se expande, de forma que el fluido indicador se desplaza en dirección contraria a la bayoneta. (Marcamos el lugar que alcanza el fluido).

En relación con lo discutido en clase, ustedes deben dar cuenta sobre cómo establecer los otros puntos que permitan diseñar una escala. Recuerden la organización de la escala termométrica que se ha hecho con el otro termómetro de líquido.

La construcción de estos termómetros tiene como finalidad identificar las variaciones de temperatura en relación con las variaciones de volumen de gas a presión constante. Describa sus análisis al respecto.

Indague el funcionamiento de estos termómetros de gas. E identifique en ellos las características de su funcionamiento. Compare el termómetro de gas a presión constante, con el termómetro de gas a volumen constante.

Establezcan las conclusiones correspondientes.

Describa los aspectos que se tuvieron en consideración para la construcción de su termómetro de gas. ¿Qué problemas específicos tuvo que resolver durante su construcción? ¿Cómo los resolvió? ¿Cómo determinó su escala de temperatura?

¿Cuáles son sus conclusiones respecto a su trabajo experimental con el termómetro de gas?

¿Cuáles son sus conclusiones respecto a esta sección de trabajo?

12.3.2 La acción mecánica y la medida del calor

Objetivos:

- Caracterizar la relación entre movimiento y calor.
- Establecer relaciones geométricas y cuantitativas entre los procesos que tienen lugar en la máquina de vapor.

12.3.2.1 La máquina de Vapor

Hacia 1814 James Watt escribía la carta sobre las mejoras a la máquina de vapor. Estas mejoras constituyeron uno de los mayores avances a nivel de ingeniería y marcarían el desarrollo de la revolución industrial y científica del siglo XIX.

El texto presenta los hallazgos que se tenían de la ciencia del calor hasta ese momento, e introduce las mejoras que Watt desarrolló sobre una de las primeras máquinas de vapor: La máquina de Newcomen.

En este sentido, el estudio sobre las máquinas de vapor y las diversas máquinas térmicas que aparecen con ellas, nos llevan a una segunda fase en la comprensión y cuantificación del calor, teniendo como base las preguntas: ¿Cuánto movimiento es posible producir con calor? y ¿cuánto calor es posible producir con movimiento? En esta fase, se reconoce que es posible producir calor a partir del movimiento, se reconoce también que el movimiento se puede

generar a través de la acción del calor en la transformación de las sustancias, cómo medir esas cantidades.

Una parte de estas ideas fue utilizada por James Watt en las mejoras al diseño de la máquina de vapor de Newcomen, y que él consignó en la siguiente carta:

JAMES WATT (1814). ART.º I. — Historia del origen de las mejoras del señor Watt en el motor de vapor⁶² [Fragmento]

Estimado señor,

... Se sabía mucho antes de mi tiempo, que el vapor se condensaba al entrar en contacto con cuerpos fríos, y que les comunicaba calor.

Por algunos experimentos del Dr. Cullen y otros, se sabía que el agua y otros líquidos hervían al vacío a temperaturas muy bajas; agua por debajo de 100 °.

Algunos filósofos sabían que la capacidad o el equilibrio del calor, como lo llamamos entonces, era mucho menor en mercurio y estaño que en agua.

También se sabía que la evaporación causaba el enfriamiento del líquido que se evaporaba y los cuerpos en contacto con él.

Yo mismo hice experimentos para determinar los siguientes hechos:

Las capacidades de calor de hierro, cobre y algunos tipos de madera, en comparación con el agua. Posteriormente, el Dr. Irvine hizo experimentos similares con estos y otros metales.

La mayor parte del vapor se comparó con la del agua.

La cantidad de agua que podría evaporarse en una cierta caldera por medio kilo de carbón.

Las elasticidades del vapor a varias temperaturas mayores que las del agua hirviendo, y una aproximación a la ley que siguió a otras temperaturas.

Cuánta agua, en forma de vapor, se requería en cada sección de un pequeño motor Newcomen, con un cilindro de madera de seis pulgadas de diámetro y doce pulgadas de largo en la sección.

Había medido la cantidad de agua fría requerida cada vez para condensar el vapor en ese cilindro, a fin de darle una potencia de trabajo de aproximadamente 7 lb. por pulgada.

Aquí no sabía cómo se podía calentar tanta agua fría en una cantidad tan pequeña en forma de vapor, a lo que se dedicó al Dr. Black, y luego entendí por primera vez lo que se llamaba

⁶² Contenido en una carta del difunto JAMES WATT, Esq. LL. D. F. R. S. Lond. y Edin. Miembro del Instituto Nacional de Francia y de la Sociedad Báltava de Rotterdam, a David Brewster, LL. D. F. R. S. & c. *. Traducción libre Marina Garzón Barrios.

calor latente.

Pero esta teoría [La teoría de los calores latentes], aunque útil para determinar la cantidad de calor necesaria de la caldera para evaporar la cantidad de agua utilizada por el cilindro, era conocida, y para determinar, por la cantidad y el calor del agua caliente emitida por los motores de Newcomen, la cantidad de vapor requerida para trabajarlos no condujo a las mejoras que luego realicé en el motor.

Estas mejoras continuaron con el hecho establecido anteriormente, que el vapor se condensaba por el contacto de cuerpos fríos, y el conocido más tarde, que el agua puede hervir al vacío a calores inferiores a 100° [grados centígrados], y en consecuencia que no se podía obtener un vacío a menos que el cilindro y su contenido se enfriara cada vez por debajo de ese calor.

Estos, y el grado de conocimiento que poseía de las elasticidades del vapor en varios calores, fueron las cosas principales que me fue necesario considerar al idear el nuevo motor.

Señalaron que, para evitar la condensación inútil, el recipiente en el que el vapor actuaba sobre el pistón siempre debe estar tan caliente como el vapor mismo; que para obtener un grado adecuado de agotamiento, el vapor debe condensarse en un recipiente separado, que se podría enfriar a un grado tan bajo como fuera necesario, sin afectar el cilindro, y que como el aire y el agua condensada no pueden ser expulsados por el vapor como en Newcomen, deben ser extraídos por una bomba u otro dispositivo; eso, para evitar la necesidad de usar agua para mantener el pistón hermético, y también para evitar que el aire enfríe el circuito.

Durante el descenso del pistón, fue necesario emplear vapor para actuar sobre el pistón en lugar de la atmósfera.

Por último, para evitar que el cilindro fuera enfriado por el aire externo, era apropiado inclinarlo en una caja que contenía vapor, y nuevamente en una caja de madera o de alguna otra sustancia que transmitiera calor lentamente.

Aunque la teoría del Dr. Black sobre el calor latente no sugirió mis mejoras en la máquina de vapor, el conocimiento sobre varios temas que me complació comunicarme y los modos correctos de razonamiento y de hacer experimentos, de los cuales me propuso el ejemplo, ciertamente ayudaron mucho a facilitar el progreso de mis inventos; y aún recuerdo con respeto y gratitud el aviso que le complació recibir de mí cuando lo merecía muy poco, y que continuó durante toda su vida.

JAMES WATT. HEATHFIELD, mayo de 1814.

Veamos el siguiente vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=1-ndnoFV6wo>

¿Cuál es la mejora más importante que introduce Watt a la máquina de Vapor? ¿Describa cómo aporta este cambio al mejoramiento de la máquina?

De acuerdo con la lectura de la carta, presente ejemplos de las cualidades de las sustancias que son importantes para poder producir movimiento.

12.3.2.2 Los procesos de transformación calor - trabajo

Émile Clapeyron. Memoria sobre la potencia motriz del calor⁶³. Parte II.

Realice un infograma de la lectura, identificando los procesos que describe Clapeyron para una máquina de vapor, y señale en la lectura los momentos en los que se indica la relación entre fuerza motriz y calor.

Se destaca después de largo tiempo que podemos emplear el calor para generar fuerza motriz, y a la inversa, con fuerza motriz podemos generar calor. En el primer caso, debemos observar que siempre hay paso de una cantidad determinada de calor entre un cuerpo de una temperatura dada y un cuerpo de una temperatura inferior; así, en las máquinas a vapor, la producción de fuerza mecánica está acompañada por el paso de una parte del calor que la combustión genera en la fuente, donde la temperatura es muy elevada, al agua del condensador, donde la temperatura es mucho menor.

Respectivamente, siempre es posible utilizar el paso del calor de un cuerpo caliente a un cuerpo frío para la producción de una fuerza mecánica: esto es suficiente para construir un aparato semejante al de las máquinas a vapor habituales, en donde el cuerpo caliente sirve para generar vapor, y el cuerpo frío para condensarlo.

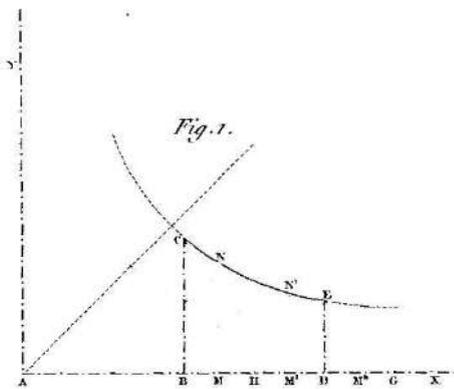
Se deduce que hay pérdida de fuerza viva, de fuerza mecánica o de cantidad de acción, todas las veces que haya contacto inmediato entre dos cuerpos de temperatura diferente, y que el calor pase de un cuerpo al otro sin intermediario; así pues, en todo aparato destinado a realizar fuerza motriz que genera calor, hay pérdida de fuerza todas las veces que haya comunicación directa de calor entre cuerpos de temperatura diferente, y como consecuencia, el efecto máximo producido no podrá ser realizado por un aparato en el que sólo se establezca contacto entre cuerpos de igual temperatura.

⁶³ Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur, *Journal de l'École Royale Polytechnique*, Vingt-troisième cahier, Tome XIV, 153-190. Traducción al castellano por Marina Garzón Barrios, con la colaboración de Carlos Andrés Bonilla. Diciembre 2014.

Ahora bien, lo que sabemos sobre la teoría de los gases y de los vapores señala la posibilidad de alcanzar este objetivo.

Imaginemos en efecto dos cuerpos mantenidos, el uno a una temperatura T , el otro a una temperatura inferior t , por ejemplo, como las paredes de una caldera a vapor, en la cual el calor generado por la combustión reemplaza sin cesar aquel calor que se ha arrastrado con el vapor que se libera; y el condensador de una máquina de fuego habitual, en el cual una corriente de agua fría quita a cada instante el calor que libera el vapor al condensarse, y esto es debido a su propia temperatura. Para simplificar, llamaremos al primer cuerpo A y al segundo B .

Tomemos un gas cualquiera a la temperatura T , y pongámoslo en contacto con la fuente de calor A ; representemos su volumen v_0 con la abscisa AB , y su presión con la ordenada CB (fig. I).

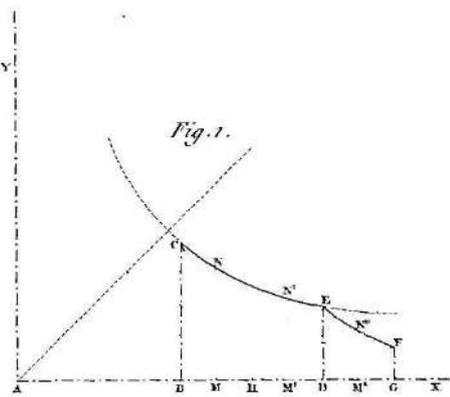


Si el gas es encerrado en un recipiente extensible, y se le permite dilatarse en un espacio vacío, donde no pierde calor por radiación ni por contacto, la fuente de calor A le proporcionará a cada instante la

cantidad de calórico que su aumento de volumen vuelve latente, y este conservará la misma temperatura T . Su presión, al contrario, disminuirá siguiendo la ley de Mariotte. La ley de esta variación puede ser representada geoméricamente por una curva CE cuyos volúmenes serán las abscisas, y las presiones correspondientes serán las ordenadas.

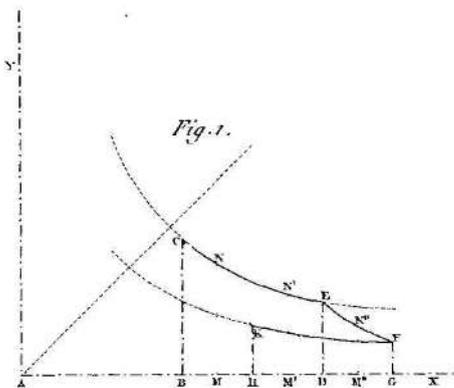
Supongamos que la dilatación del gas continúa hasta que el volumen inicial AB se vuelva AD ; y sea DE la presión correspondiente a este nuevo volumen; el gas, mientras se dilata, habrá generado una cantidad de acción mecánica que tendrá por valor la integral del producto de la presión y el diferencial del volumen, y será representado geoméricamente por la superficie comprendida entre el eje de las abscisas, las coordenadas CB , DE y la porción de la hipérbola CE .

Supongamos ahora que apartamos el cuerpo A y que la dilatación del gas continúa aislada al calor; entonces, una parte de su calórico sensible se vuelve latente, su temperatura disminuirá y su presión continuará decreciendo de una manera más rápida y siguiendo una ley desconocida, que podrá ser representada geométricamente por una curva EF cuyas abscisas serán los volúmenes del gas, y las ordenadas las presiones correspondientes; supondremos que la dilatación del gas continúa hasta que las reducciones sucesivas que experimenta el calor sensible del gas hayan disminuido la temperatura T del cuerpo A hasta la temperatura t del cuerpo B . Su volumen será entonces AG , y la presión correspondiente será FG .



De la misma forma, se verá que el gas durante esta segunda parte de su dilatación generará una cantidad de acción mecánica representada por la superficie del trapecio mixtilíneo $DEFG$.

Pongamos en consideración que, ahora el gas disminuyó hasta la temperatura t del cuerpo B , si comprimimos el gas aislado del calor, pero en contacto con el cuerpo B , la temperatura del gas tenderá a aumentar por la liberación del calórico latente vuelto sensible por la compresión, pero será absorbido paulatinamente por el cuerpo B , de modo que la temperatura del gas permanecerá igual a t . En consecuencia, la presión crecerá siguiendo la ley de Mariotte; ésta será representada geométricamente por las ordenadas de una hipérbola KF , y las abscisas correspondientes representarán los volúmenes.



Supongamos que la compresión sea ejercida hasta que el calor liberado por la compresión del gas, y que es absorbido por el cuerpo B , sea precisamente igual al calor comunicado por la fuente A al gas, porque está en contacto con ella durante su dilatación en la primera parte de la operación.

mientras el gas es dilatado, se ha transferido al cuerpo B durante la condensación del gas que se ha producido al contacto con éste.

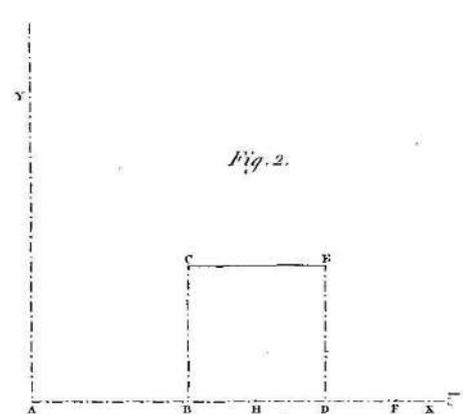
Abi está pues la fuerza mecánica generada por el paso del calor de un cuerpo caliente a un cuerpo frío, y este paso es efectuado sin que haya contacto entre cuerpos de temperatura diferente. La operación inversa es igualmente posible; así, tomemos el mismo volumen de gas AB a la temperatura T y bajo la presión BC ; encerrémoslo aislado al calor y dilatémoslo hasta que su temperatura disminuya gradualmente volviéndose igual a t ; continuemos la dilatación en el mismo aislamiento, pero después de haber introducido el cuerpo B a la misma temperatura; éste proporcionará al gas el calor necesario para mantener su temperatura, y en la operación vamos a presionar hasta que el cuerpo B haya devuelto al gas el calor que había recibido en la operación anterior.

A continuación, apartemos el cuerpo B y condensemos el gas aislado al calor, hasta que su temperatura vuelva a ser igual a T . Entonces, acerquemos el cuerpo A que tiene la misma temperatura, y continuemos la reducción de volumen hasta que todo el calor tomado del cuerpo B sea devuelto al cuerpo A. El gas se encuentra entonces a la misma temperatura y tiene la misma cantidad absoluta de calor que al comienzo de la operación; se puede concluir que éste ocupa el mismo volumen y está sometido a la misma presión.

Aquí el gas pasa sucesivamente, pero en un orden inverso, por todos los estados de temperatura y presión por los cuales había pasado en la primera serie de operaciones; en consecuencia, las dilataciones se volvieron compresiones y viceversa, pero siguieron la misma ley. De este modo, las cantidades de acción generadas en el primer caso son absorbidas en el segundo, y a la inversa, pero conservan los mismos valores numéricos, pues los elementos de las integrales que las componen son los mismos.

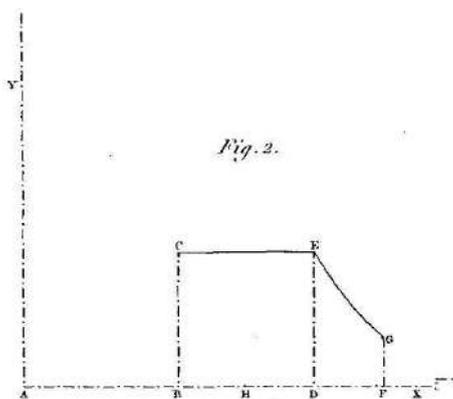
Así, mediante el método que indicamos anteriormente, se ve que se desarrollará una cierta cantidad de acción mecánica al hacer pasar calor desde un cuerpo mantenido a una temperatura determinada hacia un cuerpo mantenido a una temperatura inferior, acción que es igual a que se realiza para hacer pasar la misma cantidad de calor del cuerpo frío al cuerpo caliente al hacer el procedimiento inverso, del cual habíamos hablado en la última parte.

Se puede llegar a un resultado similar por la reducción en vapor de un líquido cualquiera. Tomemos en efecto este líquido y pongámoslo en contacto con el cuerpo A en un recipiente extensible e impermeable al calor; nosotros suponemos que la temperatura del líquido sea igual a la temperatura T del cuerpo A . Traslademos sobre el eje de las abscisas AX (fig.2), una cantidad AB igual al volumen del líquido, y sobre una línea paralela al eje de las ordenadas AY , una cantidad BC igual a la presión del vapor del líquido que corresponde a la temperatura T .



Si nosotros aumentamos el volumen del líquido, una parte de éste pasará al estado de vapor, y como la fuente de calor A proporciona el calórico latente necesario a su formación, la temperatura permanecerá constante e igual a T .

Entonces, si se colocan sobre el eje de las abscisas las cantidades que representan los volúmenes sucesivos que ocupa la mezcla de líquido y de vapor, y se toman por ordenadas los valores correspondientes a la presión, como ésta permanece constante, la curva de las presiones se reducirá aquí a una línea recta CE paralela al eje de las abscisas.



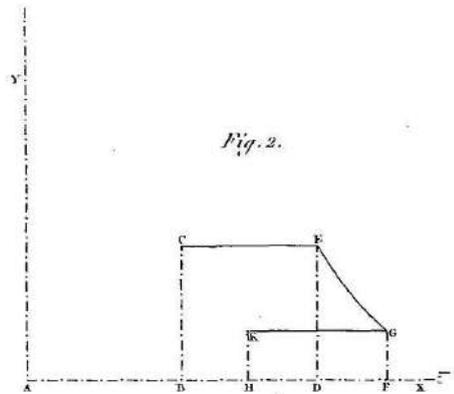
Cuando una cierta cantidad de vapor ha sido formada, y la mezcla de líquido y de vapor ocupa un volumen AD , se puede apartar el cuerpo A y continuar la dilatación. Cuando una nueva cantidad de líquido pasa al estado gaseoso, y una parte del calórico sensible se vuelve latente, la temperatura de la mezcla disminuirá, así como la presión; supongamos que se mantenga la dilatación hasta que la temperatura disminuya

gradualmente volviéndose igual a la temperatura t del cuerpo B ; sea AF el volumen, y FG la presión que le corresponde. La ley de la variación de la presión estará dada por una curva EG que pasará por el punto E y el punto G .

Durante la primera parte del proceso que acabamos de describir, se habrá generado una cantidad de acción representada por la superficie del rectángulo $BCED$ y aquella del trapecio

mixtilíneo EGF.

Ahora, acerquemos el cuerpo B poniéndolo en contacto con la mezcla de líquido y de vapor, y disminuyamos sucesivamente su volumen; una parte del vapor pasará a estado líquido, y como el calor latente que éste liberará al condensarse será absorbido paulatinamente por el cuerpo B, la temperatura permanecerá contante e igual a t . Así, continuaremos disminuyendo el volumen hasta que todo el calor proporcionado por el cuerpo A, en la primera parte de la operación, haya sido devuelto al cuerpo B.



Sea AH el volumen ocupado por la mezcla de vapor y de líquido; la presión correspondiente será KH igual a GF ; la temperatura permanece igual a t durante la reducción del volumen desde AF hasta AH , la ley de la presión entre estos dos límites será representada por la línea KG paralela al eje de las abscisas.

Al llegar a este punto, la mezcla de vapor y de líquido sobre el que operamos ocupa el volumen AH a una presión KH , y a una temperatura t , y alcanza la misma cantidad absoluta de calor que tenía el líquido al comienzo de la operación; por lo tanto, si se aleja el cuerpo B y se continúa la condensación en un recipiente impermeable al calor, hasta que el volumen se vuelva iguala AB , habrá la misma cantidad de materia ocupando el mismo volumen, y teniendo la misma cantidad de calor que al comienzo de la operación; su temperatura y su presión deberán ser también las mismas que al principio; la temperatura se volverá igual a T y la presión igual a CB ; por lo tanto, la ley de las presiones durante esta última parte de la operación estará dada por una curva que pasa por los puntos K y C, y la cantidad de acción absorbida durante la disminución del volumen desde AF hasta AB estará representada por el rectángulo $FHKG$ y el trapecio mixtilíneo $BCKH$.

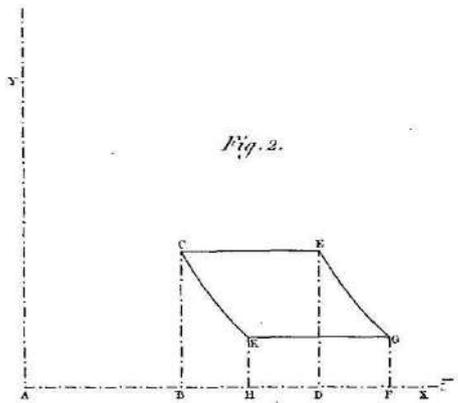


Fig. 2.

Por lo tanto, si se resta de la cantidad de acción generada durante la dilatación de aquella que fue absorbida durante la compresión, la diferencia será la superficie del paralelogramo mixtilíneo $CEGK$, que representará la cantidad de acción generada durante la serie completa de operaciones que habíamos descrito, y después de las cuales el líquido empleado se encontrará en su estado

inicial.

Es importante resaltar que todo el calórico transmitido por el cuerpo A pasó al cuerpo B , y que esta transmisión ocurrió sin que hubiera otro contacto más que entre cuerpos de la misma temperatura.

Se demostrará de la misma manera, que se puede hacer pasar calor del cuerpo B al cuerpo A , si sobre el gas se repite la misma operación en un orden inverso, pero que este resultado no será obtenido más que por la absorción de una cantidad de acción mecánica igual a la que generó el paso de la misma cantidad de calórico del cuerpo A al cuerpo B .

De lo anterior resulta que, una cantidad de acción mecánica, y una cantidad de calor que puede pasar de un cuerpo caliente a un cuerpo frío, son cantidades de la misma naturaleza, y que es posible sustituir las unas por las otras; de la misma manera que en mecánica, cuando un cuerpo puede caer desde una cierta altura y una masa se mueve con cierta velocidad son cantidades del mismo orden, que pueden transformarse las unas en las otras por acciones físicas.

Además, se sigue desde aquí, que la cantidad de acción F generada por el paso de una cierta cantidad de calor C desde un cuerpo A , mantenido a una temperatura T , hacia un cuerpo B mantenido a una temperatura t , por uno de los procesos que venimos indicando, es la misma independiente del gas o el líquido empleado, y es la más grande.

12.4 Entropía y Reversibilidad

En esta unidad se estudia la direccionalidad de los procesos, la reversibilidad e irreversibilidad en los cambios que producen ciertas magnitudes. Se analiza la magnitud entropía como aquella medida de la irreversibilidad de los procesos. Lo cual permite hacer de la termodinámica un esquema teórico general que permitiría analizar procesos físicos, químicos y biológicos desde una perspectiva de sistemas.

Objetivos:

- Relacionar el principio de conservación de la energía con la primera ley de la termodinámica
 - Identificar los procesos reversibles e irreversibles y establecer su relación con la segunda ley de la termodinámica
 - Reconocer la magnitud entropía como medida de la irreversibilidad de los procesos
- Max Planck

[1915]¹² REVERSIBILIDAD E IRREVERSIBILIDAD⁶⁴

Primera Parte. La energía, la conservación y el movimiento perpetuo

Colegas, damas y caballeros. La cordial invitación, que el rector de la Universidad de Columbia me extendió, para ofrecer en este prominente centro de la ciencia americana algunas conferencias en el campo de física teórica [...]

[...] ¿qué tanto hemos avanzado hoy hacia la unificación de nuestro sistema de la física? Los numerosos dominios independientes de la física temprana ahora aparecen reducidos a dos; mecánica y electrodinámica, o, como se puede decir: la física de los cuerpos materiales y la física del éter. La primera comprende la acústica, los fenómenos de cuerpos materiales y los fenómenos químicos, la última, el magnetismo, la óptica y el calor radiante. [...]

Si, por lo tanto, el abismo entre el éter y la materia, es de una vez superado, ¿cuál es el punto de vista que en un último análisis servirá mejor para la subdivisión del sistema de la física?

La respuesta a esta pregunta caracterizará toda la naturaleza del posterior desarrollo de nuestra

⁶⁴ Eight Lectures on Theoretical Physics. Delivered at Columbia University in 1909. Author: Max Planck. Translator: A. P. Wills. First Lecture Reversibility and Irreversibility. Traducción libre al castellano de la segunda conferencia. Marina Garzón Barrios. Diciembre 2020.

ciencia.

Es, por tanto, la más importante entre todas aquéllas [respuestas] que me propongo tratar hoy. Pero, para los efectos de una investigación más concisa, es necesario que vayamos más a fondo dentro de las particularidades de los principios de la física. Comenzaremos mucho mejor en aquel punto desde el cual se ha dado el primer paso hacia la realización real de un sistema unificado de la física, previamente postulado solo por los filósofos: en el principio de conservación de la energía. Porque la idea de energía es la única que es común a todos los distintos dominios de la física, además de las ideas de espacio y de tiempo.

En concordancia con lo que he establecido arriba, será aparente y muy autoevidente para ustedes, que el principio de la energía, antes de su formulación general por Mayer, Joule y Helmholtz, también comportó un carácter antropomórfico. Las raíces de este principio yacían en el reconocimiento del hecho de que nadie es capaz de obtener trabajo útil de la nada; y este reconocimiento se había originado esencialmente desde las experiencias que fueron acumuladas durante los intentos de solución a un problema técnico: el descubrimiento del movimiento perpetuo. En este sentido, el movimiento perpetuo ha venido a tener para la física un alcance tan significativo, similar a aquel de la alquimia para la química, aunque no fue un resultado positivo, sino más bien los resultados negativos de estos experimentos, a través de los que la ciencia hizo avances.

Hoy hablamos del principio de la energía sin mayor referencia al punto de vista técnico o lo que es del hombre. Decimos que, la cantidad total de energía de un sistema aislado de cuerpos es una magnitud cuya cantidad ni se puede aumentar ni disminuir, a través de ninguna clase de proceso dentro del sistema; y ya no consideramos la veracidad con la que esta ley se sostiene como dependiente del refinamiento de los métodos, que poseemos en el presente, para probar experimentalmente el problema de la realización del movimiento perpetuo. En esto, estrictamente hablando, descansa la improbable generalización, impresa sobre nosotros con elemental fuerza, y reposa la emancipación de los elementos antropomórficos ya mencionados.

<p>¿En qué sentido una máquina térmica que cumple el ciclo de Carnot, puede considerarse como una máquina de movimiento perpetuo? ¿Cómo se conserva la energía en esta máquina que sigue el ciclo de Carnot?</p>
--

Mientras que el principio de energía permanece delante de nosotros como una estructura

completa independiente, libre de, y separada de los accidentes pertenecientes a su desarrollo histórico, esto no es cierto, en igual medida, en el caso de aquel principio que R. Clausius introdujo en la física, a saber: la segunda ley de la termodinámica. Esta ley juega un muy peculiar papel en el desarrollo de la ciencia física, en la medida en que uno no puede asegurar hoy que haya sido encontrada una formalización reconocida como general, y, por lo tanto, objetiva. En nuestra presente consideración, es entonces, un asunto de particular interés, examinar más profundamente su significado.

En contraste con la primera ley de la termodinámica, o, el principio de la energía, la segunda ley puede ser caracterizada como sigue. Mientras la primera ley no permite en ninguno de los procesos de la naturaleza ni la creación ni la destrucción de energía, sino que permite solamente transformaciones, la segunda ley va aún más allá en la limitación de los procesos posibles de la naturaleza, en tanto que ésta no permite cualquier clase de transformaciones, sino sólo ciertos tipos sujetos a ciertas condiciones. Por lo tanto, la segunda ley se ocupa ella misma de la pregunta sobre la clase [de transformación] y, en particular, de la dirección de todo proceso natural. ¿Cuáles son las transformaciones que no se permiten? Estas transformaciones que impide la segunda ley: son las reversibles. Crear movimiento de la nada.

En este punto se ha cometido frecuentemente un error, que ha incidido de una manera muy pronunciada en el avance de la ciencia hasta hoy día. En el esfuerzo por dar a la segunda ley de la termodinámica el carácter más general posible, se ha proclamado por los seguidores de W. Ostwald como la segunda ley de la energética, y se ha hecho el intento de formular que ésta determinará, de forma general, la dirección de todos los procesos que ocurren en la naturaleza.

Algunas semanas atrás leí, en una disertación académica pública de un estimado colega, la afirmación de que la importancia de la segunda ley consistía en esto: que una piedra cae hacia abajo, que el agua no fluye hacia arriba, que la electricidad fluye de un mayor a un menor potencial, y así sucesivamente. Este es un error que está presente y que es demasiado predominante como para no hacer mención aquí.

La verdad es, que estas afirmaciones son falsas. Una piedra puede tanto subir en el aire como caer hacia abajo; el agua puede igualmente fluir hacia arriba como, por ejemplo, con un resorte; la electricidad puede fluir muy bien de un menor a un mayor potencial, como en el caso de la

descarga oscilante de un condensador.

ACTIVIDAD

OBJETIVOS: Identificar, Ejemplificar y Analizar Procesos y La Transformación

- Qué tipo de procesos son estos: una piedra cae hacia abajo, que el agua no fluye hacia arriba, que la electricidad fluye de un mayor a un menor potencial, ¿procesos reversibles o irreversibles? Justifique su respuesta.
- ¿Cuáles son las magnitudes energéticas que intervienen al producir las transformaciones?
- ¿Qué indicaría la dirección de los procesos en las situaciones anteriores? Presente su análisis energético.
- En las siguientes situaciones se encuentra una esfera en el aire a una altura cualquiera h , figura a, y una esfera que se desliza al interior de una semicircunferencia, figura b. Podría identificarse la direccional del proceso en estos estados. ¿por qué sí o por qué no? ¿Qué se requiere para identificar la direccionalidad de un proceso?



Las afirmaciones son obviamente correctas, si uno las aplica a una piedra originalmente en reposo, a agua en reposo, o a la electricidad en reposo; pero entonces, ellas siguen inmediatamente el principio de la energía, la energía cinética de la piedra o el agua solo pueden originarse a expensas de la energía gravitacional; esto es, el centro de masa tiene que descender. De manera similar, una corriente eléctrica entre dos placas condensadoras puede originarse solamente a expensas de la energía eléctrica ya presente; la energía, por lo tanto, tiene que pasar a un potencial menor. Si, sin embargo, el movimiento y la corriente están presentes, entonces uno no puede afirmar, a priori, nada con respecto a la dirección del cambio; este puede tener lugar tanto en una dirección como en la otra. Por lo tanto, no hay una nueva comprensión en la naturaleza que se obtenga de este punto de vista.

Sobre una base igualmente inadecuada descansa otra concepción de la segunda ley, de la que

ahora haré mención. Al considerar la circunstancia de que el trabajo mecánico puede transformarse muy fácilmente en calor, como por fricción, mientras que de otra parte el calor solo puede ser transformado con dificultad en trabajo, se ha hecho el intento de caracterizar la segunda ley, así: que en la naturaleza, la transformación de trabajo en calor tiene lugar completamente, mientras que, por otro lado, la [transformación] de calor en trabajo solo incompletamente, y de tal manera, que a medida que una cantidad de calor es transformada en trabajo otra cantidad correspondiente de energía tiene que experimentar correspondientemente, al mismo tiempo, una transformación compensatoria como, por ejemplo, el paso de calor de una mayor a una menor temperatura. Esta afirmación es correcta en algunos casos especiales, pero no corresponde en general a la importante verdad de este tema, como mostraré con un simple ejemplo.

12.4.1.1 Segunda Parte. Procesos reversibles e irreversibles, y las leyes de la termodinámica

Una de las más importantes leyes de la termodinámica es que la energía total de un gas ideal depende solamente de su temperatura y no de su volumen. Si se permite a un gas ideal expandirse mientras hace trabajo, y si se previene el enfriamiento del gas mediante la adición simultánea de calor de un depósito de calor a mayor temperatura, el gas permanece invariable en temperatura y contenido energético, y uno puede decir que el calor suministrado por el depósito es transformado completamente en trabajo sin intercambio de energía.

La más mínima objeción puede ser hecha a esta afirmación. La ley de la transformación incompleta de calor en trabajo se mantiene solo mediante la adopción de un punto de vista diferente, pero que no tiene nada que ver con el estatus de los hechos físicos y solamente modifica la forma de ver a la materia y, por lo tanto, no puede ser soportada ni contradicha mediante hechos, nominalmente mediante la introducción ad hoc de nuevas formas particulares de energía, y que no divide la energía del gas en numerosas partes que individualmente pueden depender del volumen. Pero es evidente, a priori, que uno nunca puede derivar de una definición tan artificial una nueva ley física, y tal es lo que tenemos que hacer cuando pasamos de la primera ley, el principio de conservación de la energía, a la segunda ley.

- Identifique qué tipo de proceso termodinámico propone Planck en este ejemplo.
- ¿Cuáles son las magnitudes energéticas que intervienen para que se desarrollen estas transformaciones?
- Describa este proceso haciendo uso de la primera ley de la termodinámica.
- Suponga que durante el proceso se hace llegar el sistema de un estado inicial A a un estado final B, caracterizados por la presión y el volumen. ¿El proceso se puede revertir? ¿Cómo o por qué?
- Interprete las posibles razones de Planck para señalar que es inadecuado decir que la segunda ley consiste en que: en la naturaleza, la transformación de trabajo en calor tiene lugar completamente, mientras que, por otro lado, la [transformación] de calor en trabajo solo incompletamente.

Deseo ahora introducir una nueva ley física: “No es posible construir un motor funcionando periódicamente que en principio involucre únicamente el levantamiento de una carga y el enfriamiento de un depósito de calor”. Para comprenderla, [hay que decir] que en un ciclo del motor pueden tener lugar muy complicados procesos arbitrarios, y, además, después de completado el ciclo, allí solo permanecerán otros cambios en los alrededores como: aquel del enfriamiento del depósito de calor y aquel del levantamiento del peso a una distancia correspondiente, que puede ser calculado desde la primera ley.

Tal motor podría por supuesto ser usado al mismo tiempo para refrigerar la máquina también, sin ningún gasto posterior de energía y materiales. Tal motor sería además el más eficiente en el mundo, no involucraría costo ponerlo en marcha; porque la tierra, la atmósfera o el océano podrían ser utilizados como depósitos de calor. Llamaremos esto, en consonancia con la propuesta de Ostwald, movimiento perpetuo de la segunda clase. Si en la naturaleza tal movimiento es realmente posible no puede ser inferido del principio de energía, y solo puede ser determinado por experimentos especiales. Justo como la imposibilidad del movimiento perpetuo de primera clase conduce al principio de la conservación de la energía, el muy independiente principio de la imposibilidad de movimiento perpetuo de la segunda clase conduce a la segunda ley de la termodinámica y, si asumimos esta imposibilidad como probada experimentalmente, la ley general se sigue inmediatamente: hay procesos en la naturaleza que por ningún camino pueden ser completamente reversibles.

- Proponga diferentes ejemplos de procesos que se puedan considerar como procesos completamente reversibles.
- Y señale las características y las razones por las cuales estos procesos son reversibles.

Para considerar, por ejemplo, un proceso con fricción a través del cual el trabajo mecánico es transformado en calor con la ayuda de aparatos adecuados, si esto fuera realmente posible de hacer, de alguna manera tales aparatos complicados serían completamente reversibles, con tal que donde quiera en la naturaleza exactamente las mismas condiciones serían restablecidas tal como existían al comienzo del proceso con fricción, entonces el aparato considerado sería como el motor descrito anteriormente, proporcionando un movimiento perpetuo de la segunda clase. Esto aparece evidente inmediatamente, si uno claramente percibe qué realizaría el aparato, este realizaría la transformación de calor en trabajo sin ningún cambio posterior.

Llamamos a tal proceso, que de ninguna manera puede hacerse completamente reversible, un proceso irreversible, y a todos los otros procesos, procesos reversibles; y así atacamos el problema de la segunda ley de la termodinámica cuando decimos que los procesos irreversibles ocurren en la naturaleza. De acuerdo con esto, los cambios en la naturaleza tienen una tendencia unidireccional. Con cada proceso irreversible el mundo da un paso adelante, sus rastros bajo ninguna circunstancia pueden ser completamente eliminados. Además de la fricción, ejemplos de proceso irreversible son: la conducción del calor, la difusión, la conducción de electricidad en conductores de resistencia finita, la emisión de luz y la radiación de calor, la desintegración del átomo en sustancias radioactivas, y así otros. Por otra parte, ejemplos de procesos reversibles son: el movimiento de los planetas, la caída libre en el espacio vacío, el movimiento no amortiguado de un péndulo, el flujo sin fricción de los líquidos, la propagación de la luz y las ondas sonoras sin absorción y refracción, las vibraciones eléctricas no amortiguadas, etc...

Porque todos estos procesos son, de por sí, periódicos o pueden ser hechos completamente reversibles mediante artificios adecuados, de tal manera que, allí permanecen cambios no observables en la naturaleza; por ejemplo, la caída libre de un cuerpo cuya velocidad adquirida es utilizada para elevar el cuerpo a su altura original, la onda luminosa o sonora, que es llevada de una manera adecuada a ser totalmente reflejada en un espejo perfecto.

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">- Proponga nuevos ejemplos de procesos que se puedan considerar como procesos completamente irreversibles.- Y señale las características o las razones por las cuales estos procesos son irreversibles. |
|--|

¿Cuáles son ahora las propiedades generales y los criterios de los procesos irreversibles, y cuál es la medida cuantitativa de la irreversibilidad? Esta pregunta ha sido examinada y respondida

por los caminos más ampliamente diferentes, y es evidente aquí de nuevo, cuán difícil es llegar a una correcta formalización del problema.

De la misma manera como originalmente encontramos que el camino del principio de la energía es a través del problema técnico del movimiento perpetuo, así también un problematécnico, nombrado: aquel de la máquina de vapor, nos conduce a la diferenciación entre procesos reversibles e irreversibles. Hace mucho tiempo Sadi Carnot, aunque utilizando una concepción incorrecta de la naturaleza del calor, reconoció que los procesos irreversibles son menos económicos que los reversibles, o que en un proceso irreversible se pierde una cierta oportunidad de producir trabajo mecánico a partir del calor. Lo que entonces podría haber sido más simple que lo que intenté hacer, de forma general, de la medida de la irreversibilidad de los procesos la cantidad del trabajo mecánico que inevitablemente se pierde en el proceso. Para un proceso reversible, entonces, el trabajo inevitablemente perdido va a ser naturalmente igual a cero. Este punto de vista, que en concordancia con el significado de la segunda ley consiste en una disipación de energía útil, tiene de hecho, en ciertos casos especiales, digamos en procesos isotérmicos, que ser él mismo útil. Ha persistido por lo tanto en algunos de sus aspectos hasta el día presente; pero para el caso general, sin embargo, se ha mostrado asimismo como infructífero y erróneo.

La razón para esto reside en el hecho de que el problema concerniente al trabajo perdido en un proceso irreversible dado, no puede ser resuelto de una manera determinada por ningún medio, con la condición que nada posterior esté especificado con respecto a la fuente energética de la que el trabajo considerado será obtenido.

<https://www.youtube.com/watch?v=GYkQ00ao-XY>

12.4.1.2 Tercera Parte. La entropía y la eficiencia de las máquinas térmicas

Un ejemplo hará esto claro. La conducción de calor es un proceso irreversible, o como Clausius lo expresa: el calor no puede pasar de un cuerpo más frío a uno más caliente sin compensación. ¿Cuál es ahora el trabajo que, de acuerdo con la definición, se pierde cuando la cantidad de calor Q pasa mediante conducción directa desde un cuerpo más caliente, a temperatura T_1 hacia un cuerpo más frío, a temperatura T_2 ? Con el fin de responder esta pregunta, hacemos uso del calor transferido involucrado para realizar un proceso cíclico reversible de Carnot, entre

dos cuerpos empleados como depósitos de calor. En este proceso, una cierta cantidad de trabajo sería obtenida, y es justo la cantidad prevista, ya que es la que se perdería en el paso directo por conducción; pero ésta no tiene valor definido mientras que no conozcamos desde donde se origina el trabajo, si, por ejemplo, en el cuerpo más caliente o en el cuerpo más frío, o en algún otro.

- Presente algunas características, eventos o razones por las cuales sea posible afirmar, como señala Clausius: El calor fluye de los lugares de mayor temperatura a los lugares de menor temperatura.

Consideremos que el calor cedido por el cuerpo más caliente en el proceso reversible no es ciertamente igual al calor absorbido por el cuerpo más frío, porque una cierta cantidad de calor se transforma en trabajo, y que podemos identificar, con exactamente el mismo derecho, la cantidad de calor Q transferida por el proceso de conducción con aquella que en el proceso cíclico es cedida por el cuerpo más caliente, o con aquella absorbida por el cuerpo más frío. Si se asume la primera o la última, consecuentemente se obtiene para la cantidad de trabajo perdido en el proceso de conducción⁶⁵:

$$Q \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1} \text{ o } Q \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

Vemos, por lo tanto, que el método propuesto para expresar matemáticamente la irreversibilidad de un proceso no afecta, en general, a su objeto, y al mismo tiempo conocemos la razón peculiar que le impide hacerlo. La declaración de la pregunta es demasiado antropomórfica. Primero, tiene que ver demasiado con las necesidades de la humanidad, en aquello que se refiere directamente con la adquisición de trabajo útil. Si uno quiere de la naturaleza una determinada respuesta, tiene que asumir un punto de vista más general, más desinteresado, menos económico. Buscaremos ahora hacer esto.

Consideremos algún proceso típico que ocurre en la naturaleza. Este llevará todos los cuerpos

⁶⁵ Nota Marina Garzón: Recordemos que el trabajo realizado en una máquina térmica se puede expresar como la diferencia entre el calor de entrada Q_1 y el calor de salida Q_2 . Por otra parte, la eficiencia de dicha máquina que se expresa como la relación entre el trabajo que la máquina realiza y el calor suministrado por la máquina, así $\eta = \frac{W}{Q}$. Nos conduce a una expresión donde el trabajo podrá ser conocido a través de $W = Q \eta$, siendo la eficiencia la relación entre los calores de entrada y los calores de salida que son proporcionales a las temperaturas absolutas de la fuente caliente y la fuente fría. $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$, la eficiencia dada en función de las temperaturas será entonces $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

concernientes en él desde un determinado estado inicial, que designó como el estado *A*, hacia un determinado estado final *B*. El proceso es siempre o reversible o irreversible. Una tercera posibilidad es excluida. Pero si es reversible o irreversible depende solamente de la naturaleza de los dos estados *A* y *B*, y en nada del camino por el cual el proceso se ha llevado a cabo; porque sólo estamos preocupados con la respuesta a la pregunta de sí o no, una vez se ha alcanzado el estado *B*, se puede ejecutar un regreso completo hasta *A*, de alguna manera concebible. Si ahora, el regreso completo de *B* a *A* no es posible, y el proceso por lo tanto es irreversible, es obvio que el estado *B* puede ser distinguido en la naturaleza mediante una cierta propiedad del estado *A*.

Hace algunos años me aventuré a expresar esto como sigue: que la naturaleza posee una mayor “preferencia” por el estado *B* que por el estado *A*. En consonancia con este modo de expresión, todos aquellos procesos de la naturaleza para cuyo estado final la naturaleza posee una preferencia menor que para el estado original, son imposibles. Los procesos reversibles constituyen un caso límite; para tales procesos, la naturaleza posee una preferencia igual por los estados final e inicial, y el paso entre ellos tiene lugar bien en una dirección o en la otra.

¿Qué interpreta de estas afirmaciones de Planck?:

- La naturaleza posee una mayor “preferencia” por el estado *B* [final] que por el estado *A* [inicial].
- Todos aquellos procesos de la naturaleza para cuyo estado final la naturaleza posee una preferencia menor que para el estado original, son imposibles.

Tenemos ahora que buscar una cantidad física cuya magnitud servirá como una medida general de la preferencia de la naturaleza por un estado dado. Esta cantidad tiene que ser una que está directamente determinada por el estado del sistema considerado, sin referencia a la historia previa del sistema, como es el caso con la energía, con el volumen y con otras propiedades del sistema. Ella debería tener la peculiaridad de incrementarse en todo proceso irreversible y de permanecer invariable en todos los procesos reversibles, y la cantidad del cambio que experimenta en un proceso proporcionaría una medida general para la irreversibilidad de los procesos.

R. Clausius realmente encontró esta cantidad y la llamó “entropía”. Todo sistema de cuerpos posee en cada uno de sus estados una entropía definida, y esta entropía expresa la preferencia de la naturaleza por el estado en cuestión. Ella puede, en todos los procesos que tienen lugar dentro del sistema, solo incrementarse y nunca decrecer. Si se desea considerar un proceso en el que

están presentes acciones externas sobre el sistema, es necesario considerar aquellos cuerpos en los que estas acciones se originan como constituyendo parte del sistema; entonces la ley, como se estableció anteriormente, es válida. De acuerdo con ella, la entropía de un sistema de cuerpos es simplemente igual a la suma de las entropías de los cuerpos individuales, y la entropía de un solo cuerpo se encuentra, de acuerdo con Clausius, con la ayuda de un cierto proceso reversible. La conducción de calor a un cuerpo incrementa su entropía y, de hecho, por una cantidad igual a la razón de la cantidad de calor proporcionado al cuerpo, con su temperatura. La compresión simple, por otra parte, no cambia la entropía.

¿Cuáles son las características que asigna Planck a la magnitud entropía? ¿Cuál es el vínculo, si lo hay entre entropía y reversibilidad o irreversibilidad de un proceso térmico?

Regresando al ejemplo mencionado anteriormente, en el que la cantidad de calor Q es conducida de un cuerpo más caliente a la temperatura T_1 a un cuerpo más frío a la temperatura T_2 , de acuerdo con lo que precede, la entropía del cuerpo más caliente decrece en este proceso, mientras, de otra parte, aquella del cuerpo más frío aumenta, y la suma de ambos cambios, que es el cambio de la entropía total de ambos cuerpos, es:

$$-\frac{Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} > 0$$

Esta cantidad positiva proporciona, de una manera libre de toda presunción arbitraria, la medida de la irreversibilidad de los procesos de conducción de calor. Tales ejemplos pueden ser citados indefinidamente. Todo proceso químico proporciona un incremento de entropía.

Consideremos aquí solamente el caso más general tratado por Clausius: un proceso cíclico arbitrario reversible o irreversible, llevado a cabo con algún arreglo físico-químico, utilizando un número arbitrario de depósitos de calor. Por cuanto el arreglo al final del proceso cíclico es el mismo que el del comienzo, el estado final del proceso va a ser distinguido del estado inicial solamente mediante la diferencia del calor contenido en los depósitos de calor, y en que cierta cantidad de trabajo mecánico ha sido realizada o consumida.

Sea Q el calor proporcionado en el curso del proceso por un depósito de calor a la temperatura T , y sea A el trabajo total producido (consistente, por ejemplo, en el levantamiento de pesos); entonces, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica:

$$\sum Q = A$$

En concordancia con la segunda ley, la suma de los cambios en la entropía de todos los depósitos de calor es positiva, o cero. Se sigue, por lo tanto, dado que la entropía de un depósito decrece en la cantidad Q/T mediante la pérdida de calor Q , que:

$$\sum \frac{Q}{T} \leq 0$$

Esta es la bien conocida desigualdad de Clausius.

En el proceso cíclico isotérmico, T es la misma para todos los depósitos. Por lo tanto:

$$\sum \frac{Q}{T} \leq 0, \text{ por lo tanto, } A \leq 0$$

Esto es: en un proceso cíclico isotérmico, se produce calor y se consume trabajo. En el caso límite, un proceso cíclico isotérmico reversible, se verifica el signo de igualdad y, por lo tanto, el trabajo consumido es cero, y también el calor producido. Esta ley juega un papel protagónico en la aplicación de la termodinámica a la físico-química.

La segunda ley de la termodinámica, incluyendo todas sus consecuencias, ha conducido así al principio del incremento de la entropía. Ustedes comprenderán ahora muy bien, habiendo recapitulado las preguntas mencionadas anteriormente, por qué expresé como mi opinión que en la física teórica del futuro la primera y más importante diferenciación de todos los procesos físicos será entre procesos reversibles e irreversibles.

De hecho, todos los procesos reversibles, sea que tengan lugar en cuerpos materiales, en el éter, o en ambos, muestran una muy grande similitud entre ellos mismos que con algún proceso irreversible. En las ecuaciones diferenciales de procesos reversibles el tiempo diferencial entra sólo como una potencia par, correspondiente a la circunstancia de que el signo del tiempo se puede invertir. Esto se cumple igualmente bien para las vibraciones del péndulo, las vibraciones eléctricas, las ondas acústicas y ópticas, y para movimientos de masas puntuales o de los electrones, si solo excluimos toda clase de amortiguamiento.

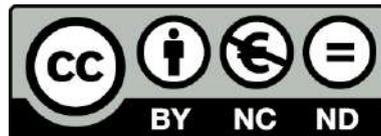
Pero a tales procesos también pertenecen aquellos procesos infinitamente lentos de la termodinámica que consisten de estados de equilibrio en los que el tiempo en general no desempeña un papel, o, como uno puede también decir, ocurre con potencia cero, que viene a ser computada como una potencia par.

Como Helmholtz ha señalado, todos estos procesos reversibles tienen la propiedad común que ellos pueden ser completamente representados por el principio de mínima acción, que da una respuesta definitiva a todas las cuestiones concernientes a un tal proceso mensurable y, en este extremo, la teoría de los procesos reversibles puede ser considerada como completamente establecida. Los procesos reversibles tienen, sin embargo, la desventaja que singular y colectivamente ellos solo son ideales: en la naturaleza real no hay tal cosa como un proceso reversible. Todo proceso natural involucra en mayor o menor grado fricción o conducción de calor. Pero en el dominio de los procesos irreversibles el principio de mínima acción ya no es suficiente; porque el principio de incremento de la entropía trae al sistema de la física un elemento completamente nuevo, ajeno al principio de acción, y que demanda un tratamiento matemático especial. El curso unidireccional de un proceso en la consecución de un estado final fijo está relacionado con esto.

Espero que las consideraciones precedentes hayan bastado para aclarar que la distinción entre procesos reversibles e irreversibles es mucho más amplia que aquella entre procesos mecánicos y eléctricos, por lo tanto, esta diferencia, con mejor derecho que cualquier otra, puede ser ventajosa para clasificar todos los procesos físicos, y que puede, eventualmente, jugar el papel principal en el futuro de la física teórica.

Sin embargo, la clasificación mencionada necesita de un definitivo mejoramiento esencial, porque no se puede negar que, en la forma presentada, el sistema de la física aún sufre de una fuerte dosis de antropomorfismo. En la definición de irreversibilidad, así como en la de entropía, se hace referencia a la posibilidad de llevar a cabo en la naturaleza ciertos cambios, y esto no significa, fundamentalmente, nada más que la división de los procesos físicos es hecha dependiendo de la capacidad manipulativa del hombre en el arte de la experimentación, que por cierto no siempre permanece en un estado fijo, sino que está siendo continuamente más y más perfeccionado. Si, por lo tanto, la distinción entre procesos reversibles e irreversibles va a tener realmente un significado perdurable, tiene que trascender y estar formulada independiente de cualquier referencia a las capacidades de la humanidad. ¿Cómo puede pasar esto? Deseo establecerlo la próxima semana. La conferencia de mañana estará dedicada al problema de brindarles antes, algunas de las más importantes del gran número de consecuencias prácticas que se siguen del principio de la entropía.

Realice un infograma de la lectura, ubicando en este por lo menos cuatro de las principales ideas que aborda Planck para describir los procesos reversibles e irreversibles, y la magnitud entropía desde este punto de vista.



13 Anexo 2. Actividades para la consolidación de experiencia investigativa en enseñanza de las ciencias 2016 -2023

Marina Garzón Barrios (mgarzonb@pedagogica.edu.co). Profesora Departamento de Física. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad Pedagógica Nacional (Colombia).

13.1 Cursos:

Título experto en análisis de información en el ámbito socioeducativo (2017-2018).
Curso online de Métodos de investigación en el ámbito socioeducativo. Facultat d'Educació. Universitat de Barcelona.

13.2 Invitaciones Académicas:

- De Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación - UMCE (Santiago - Chile): *Para establecer criterios y paradigmas de la Didáctica de las ciencias experimentales, con el fin de promover y fortalecer líneas de investigación e innovación consensuadas entre especialistas de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN) y de la Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación (UMCE)*?. Durante: 19 al 24 marzo de 2018.
- De Universidad del Valle (Cali-Colombia): *Para realizar la Conferencia Inaugural de la Maestría en Educación con énfasis en enseñanza de las Ciencias*. Durante 6 de abril de 2019. Conferencia: **La actividad experimental y la construcción de fenomenologías para la enseñanza de las ciencias**.
- Conferencista Invitada. VII Encuentro Nacional de Enseñanza de la Física. Conferencia: **La medida de la carga fraccional, particularidades del quehacer experimental en física** Santiago de Chile. Octubre 2021. Santiago de Chile -Chile

13.3 Participación en proyectos de Investigación Universidad Pedagógica Nacional

2018. **Relaciones de equivalencia y construcción del campo fenomenológico: El caso de la electroquímica.**

2019. **Estabilización de un campo fenomenológico y construcción de instrumentos y formas de medida como síntesis teóricas.**

2020. **Estructuración teórica en la consolidación de un dominio fenomenológico: De la electroquímica al Ion. Abordaje para la enseñanza de las ciencias.**

2021. **Teorización y Formalización en la estructuración de la relación carga ion. Fundamentos para la enseñanza de las ciencias.**

2022 – 2023. **La actividad Experimental en la formación de profesoras y profesores de Física.**

13.4 Publicaciones

Libros

Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias. S Sandoval Osorio, JF Malagón Sánchez, M Garzón Barrios, Colección CIUP 41 años 2018 ISBN: 978-958-5416-89-5

La electricidad transforma sustancias. El dominio fenomenológico de la electroquímica. S Sandoval Osorio, JF Malagón Sánchez, M Garzón Barrios, Universidad Pedagógica Nacional. 2022

Artículos o capítulos de libros

Análisis histórico-críticos para la enseñanza de las ciencias. El comienzo de la electroquímica. SS Osorio, JFM Sánchez, MG Barrios, LT Vargas Tecné, Episteme y Didaxis: TED, 3584-3585. 2021

Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de las ciencias. SS Osorio, JFM Sánchez, MG Barrios, MMA Manrique, LT Vargas. Tecné, Episteme y Didaxis: TED, 3600-3600. 2021

Conclusiones del IX congreso internacional sobre formación de profesores de ciencias. MG Barrios, DFM Sierra, DAD Timoté, HJR Orejuela Tecné, Episteme y Didaxis: TED, 3605-3610; 2021

La Electroquímica: un nuevo ámbito de fenómenos, la experiencia que se construye y la síntesis teórica que se pone en juego. SS Osorio, JFM Sánchez, MG Barrios, LT Vargas Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte) 22; 2020

Constitution of a phenomenological domain for the teaching of sciences. Implications of the voltaic phenomenon's case study MMA Manrique, JFM Sánchez, SS Osorio, MG Barrios. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências* (Belo Horizonte) 20; 2018

Memoria sobre el calor por MM. Lavoisier y De Laplace MG Barrios *Revista Física y Cultura*; 2016

13.5 Participación en la organización en eventos de socialización sobre enseñanza de las ciencias y de la física:

Salón de la Ciencia desde 2018 - 2023. Departamento de Física. Realizado anualmente en Universidad Pedagógica Nacional – UPN (Bogotá D.C.).

3er Encuentro de Estudios Históricos para la Enseñanza de las Ciencias y 6to Encuentro sobre la Enseñanza de la Mecánica. Realizado en Universidad Pedagógica Nacional – UPN (Bogotá D.C.). Durante: 4 y 5 de octubre de 2018.

IX Congreso Internacional sobre formación de Profesores de Ciencias. Organizó y moderó el Panel “Historia y Filosofía en la Formación de Profesores de Ciencias” 13 de noviembre de 2020, en el marco de las actividades precongreso. –modalidad virtual.

13.6 Participación en eventos de socialización sobre enseñanza de las ciencias y de la física:

SIMPOSIO: Avances de la didáctica de las ciencias y la matemática y su impacto en el aula escolar. Realizado en: Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación - UMCE (Santiago - Chile). Durante el 22 marzo de 2018.

XI Encuentro de la Asociación de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur (AFHIC). Realizado en: Universidad Nacional de Tres de Febrero, (Buenos Aires - Argentina) D.C. Durante: 11 al 15 de junio de 2018.

9o Congreso Nacional de Enseñanza de la Física y la Astronomía. Realizado en: Universidad Antonio Nariño. Bogotá, D.C. Durante: 7, 8, 9 de noviembre de 2018. Taller: La pila voltaica. Diferenciando tensión y corriente eléctrica.

13th Biennial Conference of the European Science Education Research Association. ESERA 2019. Presentación de Poster. Por realizar: 26 al 30 de agosto de 2019. Bologna-Italia.

Garzón Marina; Castells Marina; La substancialització en l'estructuració teórica sobre la calor a la història de la ciència. Un acostament didàctic. XVII JORNADA SOBRE LA HISTÒRIA DE LA CIÈNCIA I L'ENSENYAMENT. “Antoni Quintana i Marí” Barcelona, 15 i 16 de novembre de 2019.

V congreso nacional de grupos de investigación y I Encuentro de posgrados 12 y 13 de diciembre de 2019. *Cali -Colombia*

Semana de la investigación. Universidad Pedagógica Nacional. septiembre 10 al 13 de 2019

Enseñanza y educación en ciencias, en el marco de la Semana de la Investigación y la Proyección Social, Universidad Pedagógica Nacional, 2020. Bogotá 20 al 23 de octubre –modalidad virtual

V Encuentro Nacional de Matemáticas y Física. 10 Congreso Nacional de Enseñanza de la Física y la Astronomía 28, 29 y 30 de octubre 2020. Ponente: **Caracterización de la corriente eléctrica en procesos electroquímicos.** Universidad de la Amazonía. Florencia-Caquetá. Colombia. –modalidad virtual. También participé como evaluadora de ponencias para el congreso.

Comité Académico del IX Congreso Internacional sobre Formación de Profesores de Ciencias. Bogotá los días 13 a 15 de octubre de 2021.

VII Encuentro Nacional de Enseñanza de la Física Taller. Construcción de magnitudes. Octubre 2021

III Jornadas de Fundamentos, Filosofía e Historia de la Física realizadas en modalidad de videoconferencia los días 11, 12 y 13 de octubre de 2022

13.7 Dirección de trabajos de Grado y Maestría

Maestría (Corresponde al grado de Master de investigación de la comunidad europea)

Una perspectiva fenomenológica para la enseñanza de la caída de los cuerpos: propuesta experimental. Harold Mauricio Claret Valencia 16/12/2019 Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales

Aproximaciones históricas alrededor del concepto del electrón: La actividad experimental relativa al estudio de la naturaleza corpuscular u ondulatoria de los rayos catódicos. Juan Mauricio Guzmán Benavides. 6/05/2021 Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales.

La idea de equilibrio-desequilibrio del Calórico en el ciclo de Carnot : un análisis para la enseñanza de los procesos térmicos. Palacios Hernández, Armando Antonio; Laguna Rivera, Cesar Augusto (Universidad Pedagógica Nacional, 2023)

Pregrado (Corresponde al nombre de Grado de la comunidad europea)

El aula inclusiva como un escenario de reflexión para la enseñanza de la física: La fenomenología del sonido. Juan Sebastián Sanabria Quiñones. Licenciatura en Física. Universidad Pedagógica Nacional, 2016.

La Fenomenología de la vibración: una propuesta para el aula incluyente. Estefanee Daniela Martínez Pérez. Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional, 2017.

Radiación Térmica: construyendo la identidad entre luz y calor. Cristian Camilo Moreno Arias. Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional, 2017.

Caracterización de un pulso electromagnético generado por una descarga Electroestática. Andrés Felipe González Gacheta. Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional 2018.

Actividades experimentales para el estudio del fenómeno de la rotación de la tierra. Palacios Hernández Armando Antonio y Rentería Díaz Diana Carolina. Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional, 2019.

Equivalencia y equilibrio: Nociones fundamentales para construir y comprender el concepto de energía. González Pulido Daniel, Santiago, Lesmes Perilla. Cristian Felipe y Salamanca Acosta Freddy Leonardo. Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional, 2020.

Consideraciones y estrategias experimentales para la enseñanza de la física: Transformación del movimiento en corrientes eléctricas. Jiménez Juan amilo Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional, 2020.

Actividades experimentales para el estudio del fenómeno de refracción del sonido. Arévalo Pulido Leidy Yohanna. Licenciatura en Física. Universidad Pedagógica Nacional, 2020.

Pensando la experimentación en el campo de la electrostática: Un estudio histórico para la enseñanza de los fenómenos de atracción y repulsión en grado sexto, desde una perspectiva fenomenológica. Mora Motta Cristian Sneider. Universidad Pedagógica Nacional, 2021.

Fenómeno de la circulación Termohalina y su influencia en los cambios de temperatura en el planeta : propuesta experimental sobre una de las causas naturales del cambio climático. Mónica Lizeth Pulido. Universidad Pedagógica Nacional, 2021.

La experimentación en la combinación y separación de sustancias para apreciar procesos de discretización en la materia : una propuesta de enseñanza para grado décimo organizada a través de un estudio histórico. Dina María Velásquez. Universidad Pedagógica Nacional, 2021.

Enseñanza de los procesos de convección en relación con el movimiento de placas tectónicas y el fenómeno de subducción en la Tierra, una propuesta de aula desde la asignatura de física. Carlos Robles Méndez. Universidad Pedagógica Nacional, 2021.

La descarga eléctrica y su carácter electromagnético. Una propuesta de aula para identificar el pulso y las interferencias electromagnéticas a través de actividades experimentales. Michael Santiago Jiménez Caballero. Universidad Pedagógica Nacional, 2022

Análisis de la luz a partir de su interacción eléctrica : una propuesta experimental para generar conocimientos sobre el efecto fotoeléctrico. García Maldonado, Luisa Yineth. Universidad Pedagógica Nacional, 2023