
Modelo sistémico del proceso proyectual para una ingeniería que diseña mediante materiales avanzados

Exploración científica en
tintas inteligentes

Jessica Fernández Cano

Directores:

Dr. Francisco Javier Peña Andrés

Dr. José María Manero Planella

Programa de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Departamento Ciencia e Ingeniería de los Materiales,
Universitat Politècnica de Catalunya, España.

Departamento de Ingeniería de Diseño Industrial,
Elisava facultad de diseño e ingeniería de Barcelona, España.

BARCELONA, NOVIEMBRE, 2021

Tesis presentada para obtener el título de Doctora por la Universitat Politècnica de Catalunya.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



ELISAVA

UNIVERSITAT DE VIC
UNIVERSITAT CENTRAL DE CATALUNYA

Modelo sistémico
del proceso
proyectual para
una ingeniería que
diseña mediante
materiales
avanzados

Exploración científica en
tintas inteligentes

Jessica Fernández Cano

+

+

“La vida consiste en una serie infinita de nuevos comienzos, donde el valor está en la liberalización de las cosas físicas.

— Jessica Fernández Cano

+

+

El proceso de diseño en la ingeniería utiliza un modelo sistémico que destaca por un patrón común que ha ido evolucionando desde Archer (1968), pasando por French (1985), Nigel Cross (2000) y Michael F. Ashby (2009) hasta la actualidad. Aunque en este proceso de diseño el ingeniero o la ingeniería aplica diversos métodos, técnicas y herramientas para la selección de un material óptimo, hasta la fecha, estos no colocan a la ciencia de los materiales como punto de partida en el proceso de diseño.

Por otra parte, ocurre que en estos momentos se está planteando una revolución industrial que viene dada de entender una nueva escala material, energética y tecnológica que es definida por recientes avances científicos en diversas áreas de conocimiento y también en el campo de los materiales.

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es definir un modelo sistémico en un proceso de diseño en la ingeniería que ponga en valor a los materiales avanzados desde el inicio. Este proceso debe realizarse desde una perspectiva científica que busca comprender las posibilidades innovadoras para generar futuras propuestas avanzadas.

Es un momento histórico en que existen más descubrimientos científicos desde los nuevos materiales que los obtenidos en períodos históricos anteriores. Por lo tanto, se considera relevante la necesidad de afrontar el proceso de diseño desde un enfoque que posicione a los materiales avanzados como un motor de innovación. Esto genera un reto ya que esta revolución industrial, al cohabitar con un ritmo acelerado del desarrollo tecnológico, científico y social, requiere de una visión en la cual los materiales no sean solo contemplados en las fases finales de selección sino desde el inicio de manera transversal. Dicho reto, requiere que sean las posibilidades de los materiales avanzados, el punto de partida en el proceso de diseño, de modo que inspire a la creación de innovadores escenarios futuros. En este marco, uno de los ejemplos más claros viene dado por el grafeno. La investigación sobre grafeno y materiales grafénicos es una de las áreas de mayor crecimiento y aunque está en pleno proceso de investigación y desarrollo, augura un gran potencial disruptivo.

Esta investigación se estructura en cuatro bloques principales: Primero se define el marco de investigación para que el presente documento exponga el pensamiento de un o una profesional de la ingeniería en referencia a descubrimientos científicos significativos en la historia, procesos y teorías relacionadas a la temática de estudio. Adicionalmente, definir qué materiales avanzados son de interés para el trabajo de esta tesis doctoral. Segundo se determina el proceso necesario en diseño mediante materiales avanzados, se implementa en la práctica y se estudia analíticamente mediante métodos cualitativos y cuantitativos. Tercero se describe uno de los casos de éxito principales y resultados de esta tesis doctoral, que pone en valor tanto el proceso definido como el uso de materiales bidimensionales. Cuarto se detalla el proceso mediante un mapa de los resultados obtenidos y el alcance de estos.

Este documento expone la aplicación teórica y experimental del modelo sistémico transdisciplinar propuesto en el proceso de proyecto para una ingeniería que diseña mediante materiales avanzados, concretamente en la exploración científica de tintas inteligentes. Por otro lado, presenta un caso de éxito y resultado de esta tesis doctoral: *Smart Skin Tattoo*, un ultrawearable de electrónica epidérmica, no invasivo y efímero que permite almacenar y generar datos personales de un modo no invasivo sin necesidad de incorporar sistemas de alimentación energética y que se implementó de forma real en personas. Por último se muestra el proceso para la concesión de una patente relacionada al diseño de la tecnología *Smart Skin Tattoo*, con referencia P201830504 y con título de "Dispositivo de comunicación previsto para disponerse sobre la piel de un usuario".

The engineering design process uses a systemic model that stands out for a common pattern that has evolved from Archer (1968), through French (1985), Nigel Cross (2000) and Michael F. Ashby (2009). Although in this design process the engineer applies different methods, techniques and tools for the selection of an optimal material, to date, these do not place materials science as a starting point in the design process.

Additionally, an industrial revolution that comes from understanding a new material, energy and technological scale is happening. It is defined as the nanoscale by recent scientific advances in various areas of knowledge such in the field of materials.

The main objective of this Doctoral Thesis is to define a systemic model in an engineering design process that considers advanced materials from the beginning. This process must be carried out from a scientific perspective that seeks to understand the innovative possibilities to generate future advanced proposals.

It is a historical moment in which there are more scientific discoveries from new materials than those obtained in previous historical periods. Therefore, the need to face the design process from an approach that positions advanced materials as an engine of innovation is considered relevant. This creates a challenge since this industrial revolution, by coexisting with an accelerated pace of technological, scientific and social development, requires a vision in which materials are not only considered in the final stages of selection but from the beginning of the design process in a transversal way. This challenge requires that the advanced materials must be considered in the starting point in the design process to inspire the creation of innovative future scenarios. In this framework, one of the clearest examples of materials is graphene. Research on graphene and graphene materials is one of the fastest growing areas and although it is in the process of research and development, it augurs a great disruptive potential.

This research is structured in four main blocks: First, the research framework is defined so that this document exposes the thinking of an engineering professional in reference to significant scientific discoveries in the history, processes and theories related to the subject of study. Additionally, define what advanced materials are of interest for the work of this doctoral thesis. Second, the process in design for using advanced materials is determined, implemented and analytically studied using qualitative and quantitative methods. Third, one of the main success stories and results of this doctoral thesis is described, which highlights both the defined process and use of two-dimensional materials. Fourth, the process is detailed through a map of the results obtained.

In summary, this document exposes the theoretical and experimental application of the transdisciplinary systemic model proposed to introduce advanced materials during the design and engineering process, specifically in the scientific exploration of smart inks. Then, it presents a success case study generated during the thesis: *Smart Skin Tattoo*, an ultrawearable of epidermal, non-invasive and ephemeral electronics that allows storing and generating personal data in a non-invasive way without the need to incorporate energy supply systems and that was implemented in a real event with people. Finally, the process for the granting of a patent related to the design of the *Smart Skin Tattoo* technology is shown, with reference P201830504 and with the title of "Communication device intended to be placed on the skin of a user".

Agradecimientos

La trayectoria de esta tesis doctoral ha sido un largo proceso de trabajo y crecimiento personal. Durante todo este periodo, son muchas las personas e instituciones que han ayudado, animado y contribuido a que hoy yo pueda entregar mi documento de tesis doctoral.

Me gustaría agradecer la implicación en todo momento de la dirección de ELISAVA facultad de diseño e ingeniería de Barcelona. También a la dirección de OFFF! Festival por la confianza y colaboración realizada para el testeo de Smart Ink Tattoo. Sobre todo, agradecer el generoso asesoramiento, aporte de herramientas y materiales de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), el Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia (ICN2) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

De forma personal y en primera instancia dedicaros un especial “gracias”, a vosotros, los directores de esta tesis doctoral, Dr. Javier Peña Andrés y Dr. José María Manero Planella gracias por vuestra confianza, ayuda, enseñanza, consejos, ánimo y apoyo en cada una de las etapas de este proceso.

A ti Javier Peña, en este caso no como director sino como persona de referencia en mi vida, te agradeceré siempre como me has cuidado, enseñado, animado y motivado a resolver cada imprevisto para seguir adelante, sobre todo a entender que la vida es materia en todos sus estados, es química, es esfuerzo, es resiliencia, es amor y mucho sentido del humor.

Tampoco puedo olvidar el apoyo de muchas de las personas compañeras en mi trabajo que han hecho todo lo posible por ayudar a que pudiera tener los tiempos, los recursos y el descanso mental para acabar esta tesis doctoral. Muy agradecida por sus tiempos, por las lecturas de mis contenidos y los feedbacks de mis textos, por sus consejos y ayuda o simplemente palabras de ánimo. No puedo enumerar a todas las personas, pero sí destacar algunas que están ahí desde el inicio. Gracias Dr. Pere Llorach, Dr. Oscar Tomico, Judit González, Mariana Eidler, Maria Visa, Xavier Tutò, Jordi Cano, Guillem Martí, Dra. Laura Benítez, Dr. Daniele Porretta, Dr. Ramón Faura, Dra. Ainoa Abella, Dr. Juan Crespo, Dr. Francesc Ribot, Guim Espelt, Javi Camino, Dra. Laura Cleries, Dra. Danielle Wilde, Dr. Albert Montull, Santiago Albert, Jorge Pensi, Alba G. Corral, Rebeca Font, Nadia Pons, Cristina Taverner y Silvia Escursell.

Compartir con todas las personas de mi entorno científico y que en un momento u otro han contribuido y apoyado esta línea de investigación ha sido un privilegio. Personas que como yo, nos emociona el estudio y comportamiento de los materiales. Decir que me han encantado vuestras experiencias, vuestras palabras de cariño, el apoyo a mi trabajo y los buenos consejos, no los olvidaré. Dra. Laia Mogás (MIT Media Lab y UPenn, Estados Unidos) han sido increíbles tus charlas motivadoras, llenas de pasión y energía. Trabajar contigo ha sido un buen aprendizaje. Los debates, las videollamadas y las cenas de “esbarjo” vs “afterwork” y tú mítico “anyway...” sencillamente genial. Dra. Maria Boto (School of Arts of University College Ghent, Bélgica) gracias por tus siempre cariñosas palabras, por tu ánimo en la investigación realizada y por nuestro super “match” en Smart Ink, me ayudaste a investigar para abrir los ojos en las Living Ink. Dra. Valentina Rognoli (Politecnico di Milano y Materials Experience Lab, Italia) gracias por creer en mi proyecto y abrirme las puertas a tu entorno de diseño y experimentación en materiales, por las buenas charlas, consejos y risas en tus visitas a España. Dra. Chele Esteve (Universidad Politécnica de Valencia, España) me encanta tu frescura y visión de síntesis! Muchas gracias por tu ánimo constante y el “si, si, ¿pero cuando cierras la carpeta? esto ya lo tienes..!”. Dra. Heura Ventura (Universidad Politécnica de Barcelona, España) no olvidaré nunca las veces que en tu tiempo libre me has ayudado... grabado quedó el día de

“qué bonitos son tus artículos... Jessica, no cal! Quizá puedes ahorrar energía de eso”.

Como no, agradecer a todas las personas que he tutorizado sus proyectos durante este proceso, decirles gracias por creer en mi trabajo, escogerlo de forma voluntaria para que forme parte de vuestra experiencia y sobre todo por hacer más grande y valioso lo compartido. A ninguno ni a ninguna os olvidaré nunca.

A esos amigos y amigas, los que me habéis dado energía día a día, gracias por haber sido atentos, todoterrenos, animadores, pacientes, colaborativos, alegres y motivadores. Con vosotros y vosotras mi vida ha sido más fácil. Gracias a todos y todas, en especial a los incansables Adri Arnaste y Goretti Arnaste, Fran Morente, Angel Casanovas, Montse Cazorla, Montse Guardia, Sergi Palou, Elsa Camacho, Jorge Rodriguez, Roberto Bolullo y Sara Vera.

Máximas gracias a mis personas preferidas Alba Sierra, José Villena y Jordi Montaner. Me siento afortunada de compartir tantas fracciones de vida inolvidables con vosotras... sois increíbles, pura motivación y un ejemplo de actitud en la vida.

Y por último, el agradecimiento a los que de verdad han vivido el “*backstage*” de esta tesis doctoral en estos 6 largos años: mi familia. ¡A vosotros y vosotras mil gracias! En especial a Paqui Cano, a Ezequiel Fernández y a Rosa Fernández, gracias de nuevo por vuestra eterna paciencia, empatía, ayuda, flexibilidad, ánimo y cuidados sin condiciones!

¡Muchas gracias a todos y todas!

Sin vosotros y vosotras no sería la persona que soy hoy.

Sumario

1. Introducción	12
1.1. Motivación personal.	13
1.2. Investigación y objetivos.	15
1.3. Contexto y realización de la tesis doctoral.	17
2. Investigación teórica	20
2.1. La ingeniería sistémica transdisciplinar.	22
2.1.1. Pensamiento sistémico	23
2.1.2. Teoría general de sistemas	25
2.1.3. Estructuras disciplinares	26
2.2. El caos y la complejidad para modelos de innovación.	28
2.2.1. Ciencia del caos.	28
2.2.2. Ciencia de la complejidad.	31
2.2.3. Creatividad científica.	32
2.3. Proceso de ingeniería en diseño con perspectiva futura.	34
2.3.1. Creatividad en el proceso de ingeniería.	35
2.3.2. Ciencia de la ingeniería en el diseño.	37
2.3.3. Innovación desde las tecnologías avanzadas.	38
2.3.4. Análisis de modelos de referencia en la ingeniería.	39
2.3.5. Síntesis de los modelos de referencia en la ingeniería.	44
2.4. Materiales avanzados en nanotecnología disruptiva.	46
2.4.1. Materiales de base carbono.	47
2.4.2. Materiales bidimensionales grafénicos.	48
3. Exploración práctica. Diseñar mediante materiales avanzados como proceso de innovación.	52
3.1. Modelo transversal del proceso en ingeniería de diseño.	54
3.2. Metodología de estudio.	57
3.2.1. Alcance del estudio y proceso metodológico.	57
3.2.2. Condiciones del estudio.	58
3.2.3. Indicadores del estudio según objetivos.	60
3.3. Resultados y discusión del estudio.	61
3.3.1. Test 01. Proceso de diseño en la ingeniería	
Reto: problema, ámbito de mejora o necesidad	61
3.3.2 Test 02. Proceso de diseño en la ingeniería.	
Reto: propiedad inusual de un material avanzado, grafénicos	61
3.3.3. Justificación de los métodos estadísticos del estudio.	61
3.3.4. Resultados por ítems e indicadores.	63
3.3.5. Justificación del proceso mediante proyectos destacados.	67
3.4. Conclusiones del capítulo.	76

4. Electrónica epidérmica no invasiva. <i>Smart Skin Tattoo</i>	78
4.1. Exploración científica. Teórica (Scientific Exploration).	80
4.1.1. Materiales grafénicos en electrónica flexible.	81
4.1.2. Relación entre cuerpo humano y electrónica epidérmica.	83
4.1.3. Materiales en la tecnología epidérmica.	85
4.2. Exploración científica. Experimental (Scientific Exploration).	93
4.2.1. Alcance del ensayo y procedimiento metodológico.	94
4.2.2. Condiciones de estudio. Materiales, técnica e ítems de evaluación.	94
4.2.3. Resultados del estudio y caracterización de los materiales en tinta.	100
4.2.4. Consideraciones del estudio.	106
4.3. Propuesta de Valor (Value Proposal).	109
4.4. Arquitectura de la propuesta (Architecture of the proposal).	110
4.4.1. Viabilidad industrial.	110
4.4.2. Usabilidad Producto, Servicio y Sistema.	125
4.4.3. Solicitud de la patente de invención P201830504.	127
4.5. Innovación Avanzada (Improved innovation).	128
4.5.1. Contexto de implementación en OFFF Festival Barcelona 2018.	130
4.5.2. Experiencia de usuario.	130
5. Implementación de materiales avanzados en el ámbito de las tintas	136
5.1. Materiales avanzados en la formulación de tintas inteligentes.	137
5.2. Procedimiento aplicado para el proceso de innovación.	140
5.2.1. Exploración científica.	143
5.2.2. Propuesta de Valor.	153
5.2.3. Arquitectura de la propuesta.	158
5.2.4. Innovación Avanzada	164
5.3. Conclusiones del capítulo	166
6. Conclusiones	168
7. Bibliografía	174

Figuras

Figura 1.1. Esquema estructural de la tesis. Elaboración propia. | 16

Figura 1.2. Esquema del contexto en esta tesis doctoral. Elaboración propia. | 17

Figura 2.1. Gráfico resumen de la investigación en el marco teórico. Elaboración propia. | 22

Figura 2.2 Esquema de pensamiento sistémico. Elaboración propia. | 24

Figura 2.3. Esquema de las estructuras disciplinares. Las disciplinas ortodoxas se indican con números de D1-D3. Adaptación de: Rousseau y Wilby 2014. | 27

Figura 2.4. Uso del enfoque sistémico para el estudio de sistemas complejos en la ingeniería. Elaboración propia. | 29

Figura 2.5. Diagrama de influencia. Adaptación de: M. Reynolds, K. Forss, R. Hummelbrunner, M. Marra 2012. | 31

Figura 2.6. Gráfico de Ingeniería en diseño para la innovación. Elaboración propia. | 34

Figura 2.7. Esquema comparativo entre el proceso clásico y el proceso de sistemas complejos en ciencia e ingeniería. Adaptación de: Maldonado y Gómez-Cruz 2011. | 37

Figura 2.8. Proceso de trabajo general en la ingeniería. Adaptación de: Suram y Bryden 2015. | 41

Figura 2.9. Análisis gráfico de los modelos de referencia seleccionados respecto al proceso general de la ingeniera en diseño. Elaboración propia. | 45

Figura 2.10. Contexto histórico de la hoja de ruta: tecnología e innovación para GRMs en Graphene Flagship. Fuente: Döscher y Reiß 2021. | 49

Figura 2.11. Panorama global de innovación basado en registros de publicación y patentes en materiales gráficos. Fuente: Döscher y Reiß 2021. | 50

Figura 3.1. Gráfico de análisis entre proceso de trabajo general en la ingeniería y el propuesto para el estudio en esta tesis doctoral. Elaboración propia. | 55

Figura 3.2. Propuesta de proceso general de trabajo en la ingeniería. Elaboración propia. | 56

Figura 3.3. Cronograma para los estudios en el Test 01 y Test 02. Elaboración propia. | 59

Figura 3.4. Histograma obtenido de la muestra de la población. Resultados del software PSPP. | 62

Figura 3.5. Gráfico de valores comparativos entre Test 01 y Test 02. Elaboración propia. | 63

Figura 3.6. Gráfico de análisis entre en esquema general del proceso de diseño implementado en el ensayo con el propuesto para la siguiente etapa de exploración. Elaboración propia. | 65

Figura 3.7. Sincronización de etapas en el proceso de la Ingeniería en diseño. Elaboración propia. | 65

Figura 3.8. Gráfico de estudio y resultados para el proceso de diseño en ingeniería para innovación disruptiva. Elaboración propia. | 66

Figura 3.9. Evaluación del proceso para el caso de estudio Glufo. Elaboración propia. | 68

Figura 3.10. Ficha resumen para el caso de estudio Glufo. Elaboración propia. | 69

Figura 3.11. Evaluación del proceso para el caso de estudio Breio. | 70

Figura 3.12 Ficha resumen para el caso de estudio Breio. Elaboración propia. | 71

Figura 3.13. Evaluación del proceso para el caso de estudio Purleaf. Elaboración propia. | 72

Figura 3.14. Ficha resumen para el caso de estudio Purleaf. Elaboración propia. | 73

Figura 3.15. Evaluación del proceso para el caso de estudio Oishy. Elaboración propia. | 74

Figura 3.16. Ficha resumen para el caso de estudio Oishy. Elaboración propia. | 75

Figura 4.1. Esquema de trabajo para proyecto Smart Skin Tattoo. Elaboración propia. | 79

Figura 4.2. Esquema base para definir el marco de exploración científica experimental. Elaboración propia. | 80

Figura 4.3. Estudio prospectivo de la industrialización de GRM hasta 2030. Fuente: Döscher et al. 2021. | 82

Figura 4.4. Krebs Cycle of Creativity III de la Dra. Neri Oxman (marzo 2018). | 83

Figura 4.5. Mapa de clasificación de publicaciones científicas sobre electrónica epidérmica (review de publicaciones del 2017 al 2021). Elaboración propia. | 86

Figura 4.6. Análisis de 30 artículos publicados entre 2017 y 2021 sobre electrónica epidérmica respecto a 7 ítems ponderables. Elaboración propia. | 89

Figura 4.7. Gráfico de materiales base en circuitos de tatuajes temporales. Elaboración propia. | 92

Figura 4.8. Esquema del ensayo para las 120 probetas por muestra producidas. Elaboración Propia. | 97

Figura 4.9. Descripción del código de las probetas. Elaboración propia | 99

Figura 4.10. Resumen de la metodología en el ensayo. | 99

Figura 4.11. Procedimiento de producción de las probetas en serigrafía. Imágenes propias. | 101

Figura 4.12. Algunos resultados de las pruebas realizadas. Imagen propia. | 102

Figura 4.13. Observación morfológica en microscopio de las muestras. Imagen propia. | 102

Figura 4.14. Posición de las probetas seleccionadas para el análisis. Elaboración propia. | 104

Figura 4.15. Rugosidad de cinco secciones de cada probeta analizada con el perfilómetro. Elaboración propia. | 105

Figura 4.16. Imágenes del análisis y comparación de materiales en SEM. Elaboración propia. | 106

Figura 4.17. Representación de resultados y valoración de las tintas individualmente según los 4 ítems de evaluación. Elaboración propia. | 107

Figura 4.18. Diseño gráfico de la tecnología Smart Skin Tattoo (derecha). Imagen propia. | 109

Figura 4.19. Implementación del prototipo con la capa de comunicación personalizada (izquierda). Imagen propia. | 109

Figura 4.20. Esquema conceptual de la propuesta de valor para Smart Skin Tattoo. Elaboración propia. | 110

Figura 4.21. Tiempos de trabajo para el desarrollo de los primeros prototipos viables. Elaboración propia. | 111

Figura 4.22. Fichas de trabajo y análisis de las muestras realizadas en laboratorio. Imágenes propias. | 112

Figura 4.23. Gráfico de evaluación sobre las condiciones más óptimas para serigrafiar el diseño de Smart Skin, según la cantidad de hilos, la densidad de la tinta, la presión ejercida y la cantidad de capas impresas. Elaboración propia. | 114

Figura 4.24. Pantalla dañada tras quedarse pegado un soporte. Imágenes propias. | 115

Figura 4.25. Ensayos que, al pasar por el horno, se arrugaron o quedaron inutilizables. Imágenes propias. | 115

Figura 4.26. Primera secuencia de aplicación en piel. Imágenes propias. | 116

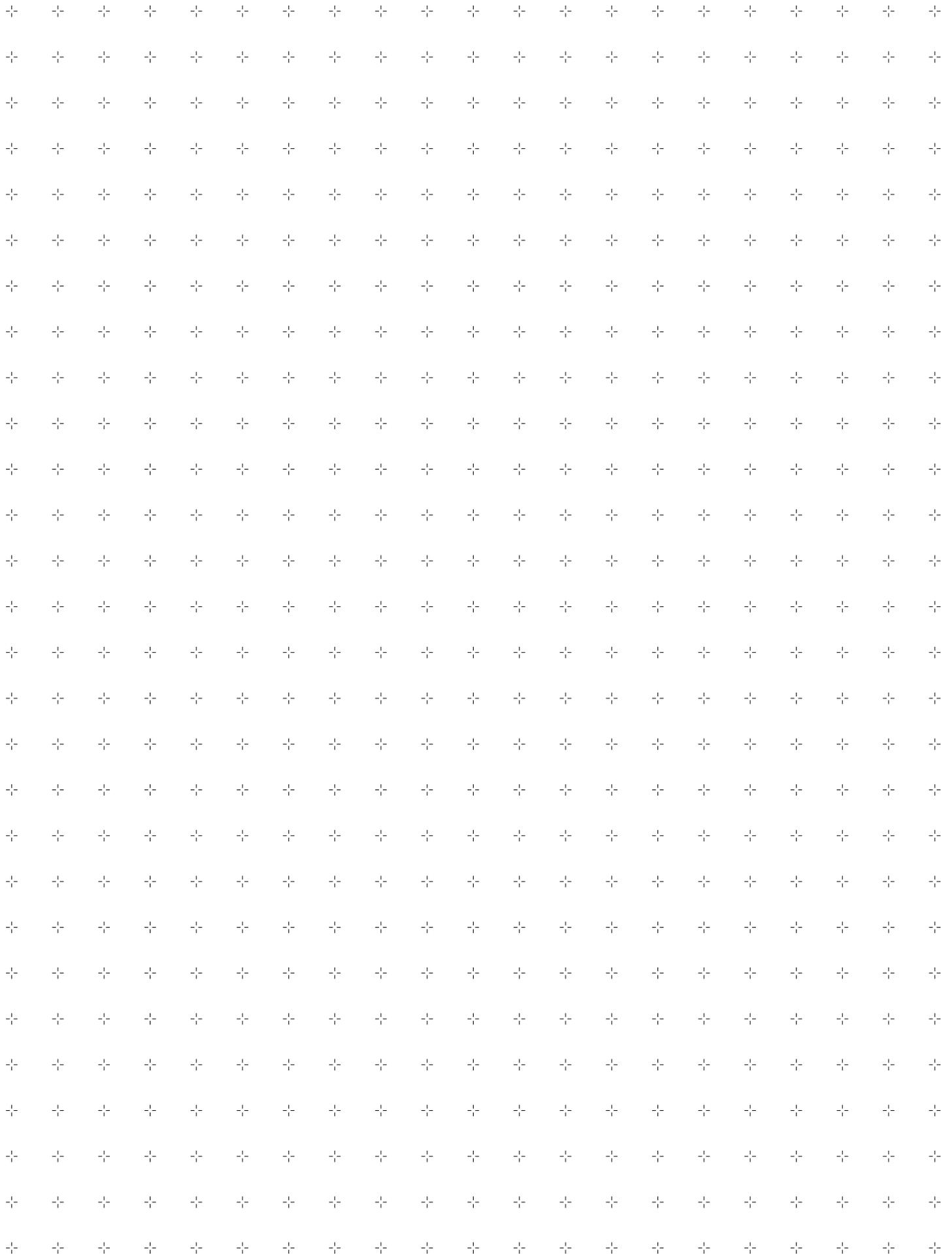
Figura 4.27. Primeros tatuajes aplicados. Imágenes propias. | 117

Figura 4.28. Muestras sobre sustratos adhesivos hipoalergénicos. Imágenes propias. | 118

Figura 4.29. Diseño gráfico de la tecnología. Elaboración propia. | 119

- Figura 4.30. Muestra finales sobre el sustrato hipoalergénico. Imágenes propias. | 120
- Figura 4.31. Curado de las muestras. Imágenes propias. | 121
- Figura 4.32. Clasificación de las muestras después de la impresión. Imágenes propias. | 121
- Figura 4.33. Medición de las muestras. Imágenes propias. | 122
- Figura 4.34. Smart Skin Tattoo. Integración tecnológica. Imágenes propias. | 123
- Figura 4.35. Esquema de componentes del producto. Aplicación para OFFF! festival. Elaboración propia. | 124
- Figura 4.36. Secuencia básica de uso. Elaborado por el equipo de trabajo OFFF! festival. | 125
- Figura 4.37. Características principales de la tecnología. Elaboración propia. | 126
- Figura 4.38. Dispositivo de comunicación previsto para disponerse sobre la piel de un usuario. Imagen propia. | 127
- Figura 4.39. Detalles de Smart Skin Tattoo, diseño patentado P201830504. Imagen propia. | 128
- Figura 4.40. Imprementación del diseño para OFFF! Festival. Testeo con usuarios. Imagen propia. | 128
- Figura 4.41. Localización del hall del Design Hub (zona naranja). Imagen propia. | 130
- Figura 4.42. Secuencia de uso en OFFF festival. Imágenes propias. | 131
- Figura 4.43. Imágenes de Smart Skin Tattoo durante el testeo. Elaboración propia. | 134
- Figura 5.1. Gráfico del proceso de diseño en ingeniería para innovación avanzada. | 137
- Figura 5.2. Esquema descriptivo para la definición de tinta inteligente. Elaboración propia. | 138
- Figura 5.3. Trabajo de investigación Smart Ink. Elaboración propia. | 139
- Figura 5.4. Etapas del proceso de diseño en la ingeniería para la innovación avanzada. Elaboración propia. | 140
- Figura 5.6. Proyecto P04-TB Exploración teórico-científica. | Elaboración: Marta Tudurí 2021. | 144
- Figura 5.7. Proyecto P04-TB. Estructura de la célula procariota con pared celular grampositiva y gramnegativa. Elaboración: Marta Tudurí 2021. | 145
- Figura 5.8. Proyecto P05-TO. Materiales y herramientas del ensayo. Elaboración: Gemma Delgado, 2020. | 147
- Figura 5.9. Proyecto P05-TO. Proceso en el laboratorio. Gemma Delgado, 2020. | 148
- Figura 5.10. Proyecto P04-TO. Células analizadas. Elaboración: Marta Tudurí, 2021. | 149
- Figura 5.11. Proyecto P04-TO. Células analizadas. Elaboración: Marta Tudurí, 2021. | 150
- Figura 5.12. Proyecto P05-TO. Datos extraídos y comparación de los espectros de absorción de todas las muestras. Gemma Delgado, 2020. | 151
- Figura 5.13. Proyecto P01-TG. Antropometría y comportamiento del cuerpo. Elaboración: Marta Gomez, 2021. | 154
- Figura 5.14. Proyecto P01-TG. Antropometría y comportamiento del cuerpo. Elaboración: Marta Gomez, 2021. | 155
- Figura 5.15. Proyecto P05-TO. Proceso de Sketching formal de una idea. Elaboración: Gemma Delgado, 2020. | 156
- Figura 5.16. Proyecto P05-TO. Prototipos ágiles y pruebas de movimiento de una posible configuración básica de la propuesta. Elaboración: Gemma Delgado, 2020. | 157
- Figura 5.17. Proyecto P01-TG. Detalle de componentes. Elaboración: Marta Gomez, 2021. | 158
- Figura 5.18. PIELVIVA. Marta Gomez, 2021. Representación del circuito electrónico con tintas de grafito. Elaboración: Marta Gomez, 2021. | 159
- Figura 5.19. Proyecto P01-TG. Diseño de detalles constructivos. Elaboración: Marta Gomez, 2021. | 160
- Figura 5.20. INK.24V. Esquema de instalación eléctrica. Elaboración: Damià Cusí, 2020. | 162
- Figura 5.21. INK.24V. Damià Cusí, 2020. Diseño de la instalación completa. Elaboración: Damià Cusí, 2020. | 162
- Figura 5.22. Proyecto P03-TB. Estudio paramétrico de resistencia de materiales textiles, considerando el encapsulado de hongos y simulando especulativamente las restricciones que se conocen de Marte. Elaboración: Martí Capdevila, 2021. | 163
- Figura 5.23. Proyecto P03-TB. Propuesta final de un traje espacial para Marte ante radiación. Elaboración: Martí Capdevila, 2021. | 166
- Figura 5.23. Comparativa y ponderación de los resultados obtenidos. Elaboración propia. | 166
- Tablas**
- Tabla 2.1. Aportes en la innovación científica aplicando la teoría del caos. Elaboración propia. | 30
- Tabla 2.2. Clasificación de las ciencias de la complejidad. Maldonado, y Gomez-Cruz 2011. | 32
- Tabla 2.3. Modelos de Procesos en la ingeniería de diseño. Fuente: Howard, Culley y Dekoninck 2008. | 40
- Tabla 2.4. Modelos de referencia en Procesos de Ingeniería y Diseño. Elaboración propia. | 41
- Tabla 3.1. Condiciones del estudio para el Test 01 y Test 02. Elaboración propia. | 59
- Tabla 3.2. Tabla de relación entre Objetivos e Indicadores. Elaboración propia. | 60
- Tabla 3.3. Tabla de relación entre Indicadores y preguntas de Evaluación en el Test 01 y Test 02. Elaboración propia. | 60
- Tabla 3.4. Resultados para la evaluación del test 01. Elaboración propia. | 61
- Tabla 3.5. Resultados para la evaluación del test 02. Elaboración propia. | 61
- Tabla 3.6. Resultados por ítems del estudio en Test 01 y Test 02. Elaboración propia. | 63
- Tabla 4.1. Cálculos y ponderación por ítems de estudio de la figura 4.5 y figura 4.6. Elaboración propia. | 90
- Tabla 4.2. Tabla de clasificación en materiales y procesos para tatuajes efímeros (estudio del 2017 al 2020). Elaboración propia. | 91
- Tabla 4.3. Datos de los materiales usados en el ensayo. Fuente Fichas técnicas de los materiales. Elaboración propia. | 95
- Tabla 4.4. Criterio de ponderación de propiedades técnicas de la selección. Elaboración propia. | 95
- Tabla 4.5. Datos de los requerimientos a ponderar. Elaboración Propia | 96
- Tabla 4.6. Resultados de la ponderación en la selección de sustrato. Elaboración propia. | 96
- Tabla 4.7. Dimensiones de las probetas en el ensayo. Elaboración propia. | 97
- Tabla 4.8. Resultados de las pruebas en pantallas de serigrafía. Elaboración propia. | 98
- Tabla 4.9. Probetas seleccionadas. Elaboración propia. | 103
- Tabla 4.10. Resultados obtenidos al someter las probetas a distintos tests en laboratorio. Elaboración propia. | 104
- Tabla 5.1. Resumen de los resultados obtenidos en cada una de las etapas de proceso desarrollado. Elaboración propia | 142

1. Introducción



La introducción a esta tesis doctoral se define en tres principales partes. En primer lugar, describe la motivación personal y perfil profesional de la autora. En segunda instancia, determina el marco de investigación y objetivos de la tesis doctoral. Por último, explica el contexto en el que se aplica esta investigación.

1.1. Motivación personal.

Esta tesis doctoral se inicia desde una motivación reflexiva y personal asociada a mi trayectoria profesional enmarcada siempre en los entornos de la Ingeniería y la Investigación.

Mi motivación proyectual siempre ha sido aportar valor al proceso de diseño desde la ingeniería mejorando la eficiencia de los procesos y optimización de los recursos. Mi inquietud profesional ha sido generar oportunidades mediante el conocimiento de los materiales, las nuevas tecnologías que se desarrollan a partir de estos y desarrollar capacidades especulativas desde el conocimiento científico. Finalmente, destacar que uno de mis posicionamientos personales ha sido fomentar una cultura igualitaria para las mujeres en profesiones consideradas de hombres.

Mi primer contacto con el contexto de la ingeniería fue al iniciar la formación profesional con especialización en “Delineación Industrial”. Durante mis 5 años de formación trabajaba paralelamente en talleres mecánicos, de estampación y embutición y en pequeñas oficinas de diseño. En una de estas prácticas tuve la oportunidad de realizar mi primer proyecto de producción europea con solo 17 años de edad, una máquina de halterofilia para la empresa Salter que evitaba lesiones lumbares a usuarios y usuarias que trabajaban la musculación con elevado peso. No obtuve beneficio económico de ello, pero sí supuso una buena experiencia y me hizo tener claro a qué me quería dedicar: a crear para aportar un valor a la sociedad.

Desde ese momento todas las oportunidades que me dieron las aproveché sin pereza y aprendí mucho de mis compañeros ingenieros en cómo hacer las cosas (en esa época la ingeniería era todavía una profesión considerada de hombres). Ellos me enseñaron a calcular, a diseñar y a dimensionar mecanismos, automatismos tanto mecánicos, como hidráulicos y neumáticos, entre muchas otras competencias de la ingeniería. Me siento afortunada, ya que, a pesar de haber vivido muchas situaciones negativas de género en mi trayectoria profesional, durante todo ese tiempo fueron 3 magníficas personas las que vieron en mí un valor, confiaron y me dieron la oportunidad de realizar todo lo que finalmente llegué a hacer.

Mi primer trabajo a tiempo completo fue a los 18 años, empecé en el sector de *packaging* para las áreas de farmacia, estética, higiene y alimentación, todos los proyectos eran el desarrollo de maquinaria industrial para productos de primera necesidad y de consumo masivo. En este sector estuve 12 años consecutivos. Mi aprendizaje fue muy natural, empecé escuchando, después reproduciendo las ideas de otros y luego produciendo las mías propias. En solo 3 años ya me dieron la responsabilidad de llevar mi primer equipo de proyectistas en el departamento de I+D. Al llegar a los 29 años ya había finalizado más de 100 proyectos industriales en producción por todo el mundo. En los cuales mi labor consistía en dirigir y realizar el diseño mecánico, de la instalación eléctrica, de la neumática, de la formalización de producto y de la puesta en marcha en la cadena de producción industrial. También asegurarme de cumplir las normativas sanitarias e industriales de implementación en países europeos, americanos y asiáticos. De ese periodo, los proyectos que recuerdo como más significativos para mí fueron los que realicé para Unilever, Procter & Gamble, Nestlé, Andros Food, l'Oréal y Coca Cola Company.

Llegado a este punto me sentía algo estancada y también sentía que para avanzar en mis nuevas inquietudes debía aumentar mi formación. Eso hizo que, a pesar de mi edad tardía, me animara a matricularme en la universidad para realizar una “Ingeniería Técnica de Diseño Industrial”. Me gustó tanto que posteriormente decidí hacer un “Máster universitario europeo en Ingeniería de Diseño”. Durante estos 5 años de formación seguí trabajando en el sector que conocía, pero me empecé a posicionar más cerca de la gestión de proyectos. La tipología de proyectos que realizaba tenía una aproximación a la optimización y rendimiento de procesos en empresas y a la coordinación de equipos de diseño. Esto me llevó a especializarme en estrategias y procesos de diseño para la innovación y trabajar para empresas tecnológicas, la banca e instituciones públicas.

Mi inquietud era trabajar desde el enfoque especulativo y creativo que nos permite el conocimiento científico-tecnológico, con el objetivo de definir un proceso que favorezca que el trabajo de los científicos y sus descubrimientos en laboratorio tenga una transferencia ágil a la industria de forma efectiva. Todo ello desde la perspectiva del diseño.

Una vez acabados estos estudios y con una visión clara de qué me gustaría hacer, inicié mis primeras aproximaciones a ello. A su vez me propusieron la labor de ser la responsable de proyectos de Ingeniería en ELISAVA facultad de diseño e ingeniería de Barcelona, considerada una de las universidades más prestigiosas de diseño en España. Esta posición me permitió proponer y explorar nuevas áreas de investigación con el objetivo de desarrollar un proceso que permitiera generar propuestas disruptivas desde el conocimiento científico, tecnológico y de materiales. Es por ello que, estos últimos años he trabajado para integrar el proyecto de ingeniería de diseño en ámbitos de investigación y desarrollo en *Smart Ink*, *Printed Electronics*, *Functional Textiles*, nanobiosensórica integrada en el humano y aplicaciones de materiales grafénicos.

Poco después, percibí interesante realizar una investigación más detallada y que me permitiera ser publicada. Por ello, hice un planteamiento de una tesis doctoral que me permita aportar valor a la docencia, mediante definir un proceso global: “el proceso de diseño de la ingeniería” (Llorach-Massana y Fernández 2018; del Corral et al. 2016). El cual, desde hace 3 años, forma parte integral del plan de estudios del grado en ingeniería de diseño industrial en Elisava. La consolidación de este trabajo me permitió participar en la creación del máster de ingeniería de diseño industrial en 2017 en el cual actualmente soy la directora, lo cual me ha permitido extender este conocimiento a ingenieros que desean afrontar los retos desde la perspectiva de diseño y materiales avanzados.

Trabajar esta perspectiva desde grado, máster y empresas de ingeniería me ha permitido plantear una base de estudio en esta tesis doctoral, que busca una propuesta definida sobre un “**Modelo sistémico del proceso proyectual para una ingeniería que diseña mediante materiales avanzados**”, concretamente, desde la exploración científica en tintas inteligentes.

Durante estos 6 últimos años he integrado el desarrollo de esta tesis doctoral con mi compromiso profesional a tiempo completo con Elisava en las labores de profesora, directora del máster de ingeniería, responsable de área de proyectos de grado en Ingeniería e investigadora del grupo emergente HIMTS de *Elisava Research*, entre otras actividades.

Aunque he participado en algún congreso nacional e internacional, e incluso he sido invitada a otras universidades de Europa y Latinoamérica para difundir esta forma de trabajar e investigar, mi objetivo principal es proporcionar, en disciplinas afines al diseño y la ingeniería, una herramienta adecuada que facilite y ayude a afrontar un proceso de trabajo de forma sencilla de modo que se pueda alcanzar al objetivo final con una mayor garantía de éxito. Esto me propongo conseguirlo a través de la publicación de los resultados de la presente tesis, que en este momento ha quedado aplazada con el objeto de finalizar esta etapa.

1.2. Investigación y objetivos.

El proceso de diseño en la ingeniería utiliza un modelo sistémico que destaca por un patrón común que ha ido evolucionando desde el modelo Archer (1968), pasando por French (1985), Nigel Cross (2000) y Michael F. Ashby (2009) hasta la actualidad (Cross 2021; Ashby, Ferreira y Scho-dek 2009; Howard, Culley y Dekoninck 2008). Aunque en este proceso de diseño el ingeniero o la ingeniera aplica diversos métodos, técnicas y herramientas para la selección de un material óptimo, hasta la fecha, estos modelos no colocan a la ciencia de los materiales como punto de partida en el proceso de diseño.

Por otra parte, ocurre que en estos momentos se está planteando una revolución industrial que viene dada de entender una nueva escala material, energética y tecnológica que es definida por recientes avances científicos en diversas áreas de conocimiento y también en el campo de los materiales («European Commission»2021).

Es un momento histórico en que existen más descubrimientos científicos mediante la implantación de nuevos materiales que los obtenidos en períodos históricos anteriores. Por lo tanto, se considera relevante la necesidad de afrontar el proceso de diseño desde un enfoque que posicione a los materiales avanzados como un motor de innovación. Esto genera un reto tanto a ingenieros e ingenieras como a diseñadores y diseñadoras ya que esta revolución industrial, al cohabitar con un ritmo acelerado del desarrollo tecnológico, científico y social, requiere de una visión en la cual los materiales no sean solo contemplados en las fases finales de selección sino desde el inicio de manera transversal.

Dicho reto, requiere que sean las posibilidades de los materiales avanzados, el punto de partida en el proceso de diseño, de modo que inspire a la creación de innovadores escenarios futuros. En este marco, uno de los ejemplos más claros viene dado por el grafeno. La investigación sobre grafeno y materiales grafénicos es una de las áreas de mayor crecimiento y aunque está en pleno proceso de investigación y desarrollo, augura un gran potencial disruptivo (Döscher y Reiß 2021).

Por tanto, este documento describe un modelo sistémico transdisciplinar planteado para la aplicación de un proceso de diseño en la ingeniería que permite implementar de forma eficaz este tipo de materiales avanzados mediante la sinergia que se genera entre la ciencia y la ingeniería de materiales y las metodologías de diseño.

El objetivo principal de esta investigación es definir un modelo sistémico en un proceso de diseño en la ingeniería que ponga en valor a los materiales avanzados desde el inicio. Este proceso debe realizarse desde una perspectiva científica que busca comprender las posibilidades innovadoras para generar futuras propuestas avanzadas.

Los objetivos específicos de investigación son:

1. Entender el proceso de diseño en la ingeniería para valorar que los materiales avanzados son un elemento de innovación disruptiva.
2. Valorar si el proceso de diseño puede comenzar desde la propiedad diferenciadora de un material avanzado.
3. Definir un modelo sistémico predecible para el proceso de la ingeniería de diseño industrial, facilitando la búsqueda de la eficiencia durante el proceso creativo desde el conocimiento científico.
4. Consolidar los parámetros de valor (las variables del modelo) para la definición de un modelo sistémico predecible desde el análisis en estudios de casos.
5. Comprender el alcance los materiales grafénicos a nivel científico, para entender como pueden ser integrados en la ingeniería de diseño como catalizadores de una innovación basada en materiales avanzados.
6. Determinar el impacto de las propuestas avanzadas aplicando el proceso propuesto y valorar el interés que suscita en un proyecto de estas características.

Para determinar el alcance de estos objetivos se estructura esta investigación por cuatro bloques principales:

- Investigación teórica de la tesis: Definir el marco de investigación para que la presente investigación exponga el pensamiento de un o una profesional de la ingeniería en referencia a descubrimientos científicos significativos en la historia, procesos y teorías relacionadas a la temática de estudio. Adicionalmente, definir qué materiales avanzados son de interés para el trabajo de esta tesis doctoral.
- Exploración práctica: Determinar el proceso necesario en “diseño mediante materiales avanzados”, implementarlo en la práctica y estudiarlo analíticamente mediante métodos cualitativos y cuantitativos.
- Viabilidad en un caso de éxito: Descripción de uno de los casos de éxito principales y resultados de esta tesis doctoral, que pone en valor tanto el proceso definido como el uso de materiales bidimensionales.
- Mapa de resultados: Descripción del proceso mediante los resultados obtenidos.

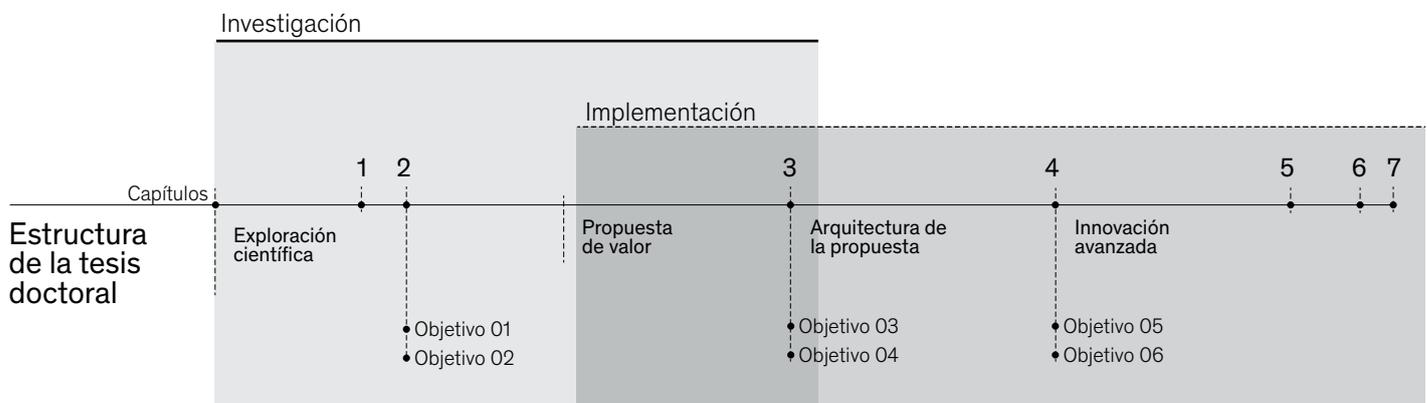


Figura 1.1

Esquema estructural de la tesis.

Elaboración propia.

1.3. Contexto y realización de la tesis doctoral.

Esta tesis doctoral se realiza como estudiante del programa de doctorado en “Ciencias e Ingeniería de los materiales” en la Universidad Politécnica de Catalunya e investigadora en grupo emergente HIMTS de Elisava Research en ELISAVA facultad de diseño e ingeniería de Barcelona.

La investigación expuesta en este documento de tesis está enmarcada principalmente en el área de proyectos del Grado de Ingeniería en Diseño Industrial, ELISAVA facultad de diseño e ingeniería de Barcelona. En la facultad, uno de los ámbitos más relevantes de investigación se centra en el impacto social de los materiales desde la ciencia.

Este ámbito de investigación ha liderado en los últimos años proyectos internacionales como *Design Does* (Varios 2018), *Material Designers* (MaDe) («MaDe»2021) o plataformas que ponen en valor los materiales como es el caso de MaterFAD en Barcelona con visión internacional («Materfad»2021).

Desde la facultad se trabaja con una visión holística de los materiales y el diseño que permite integrar y relacionar dos propuestas académicas de referencia como son “*Master’s Degree in Design Through New Materials*” y “*Máster en Ingeniería de Diseño Industrial*”, estos dos programas comparten una misma misión: crear con y desde el material avanzados de forma innovadora.

En la figura 1.2 se muestran las conexiones del contexto de desarrollo en la investigación realizada durante esta tesis doctoral.

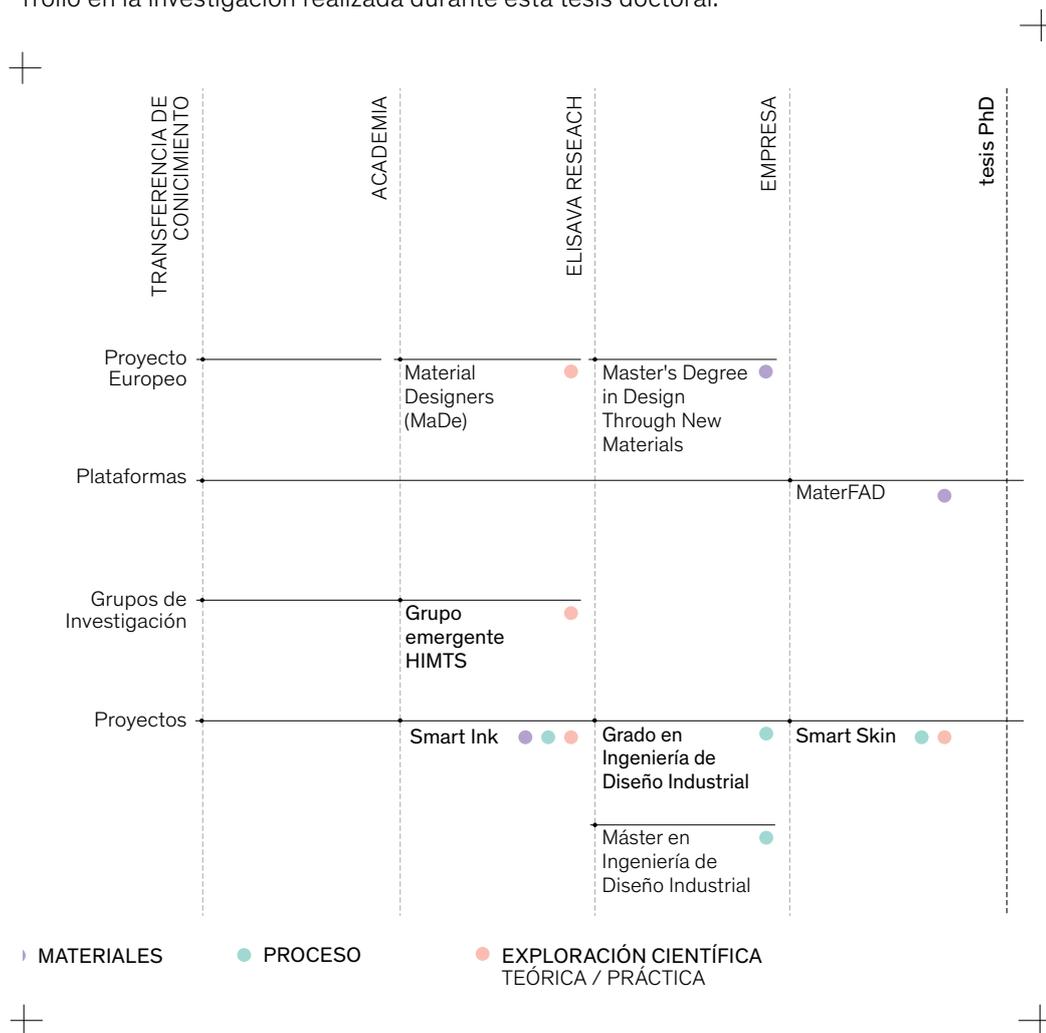
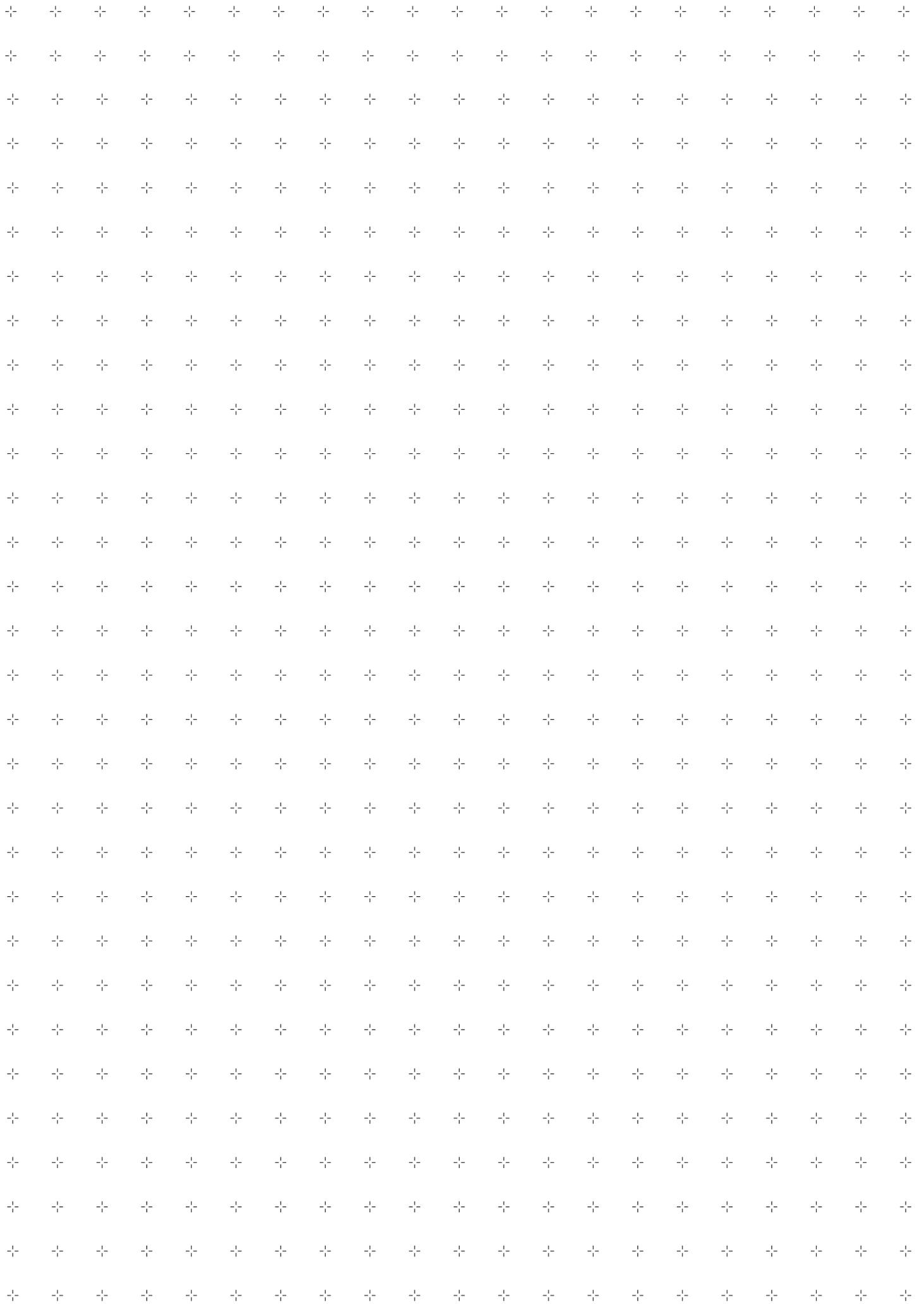
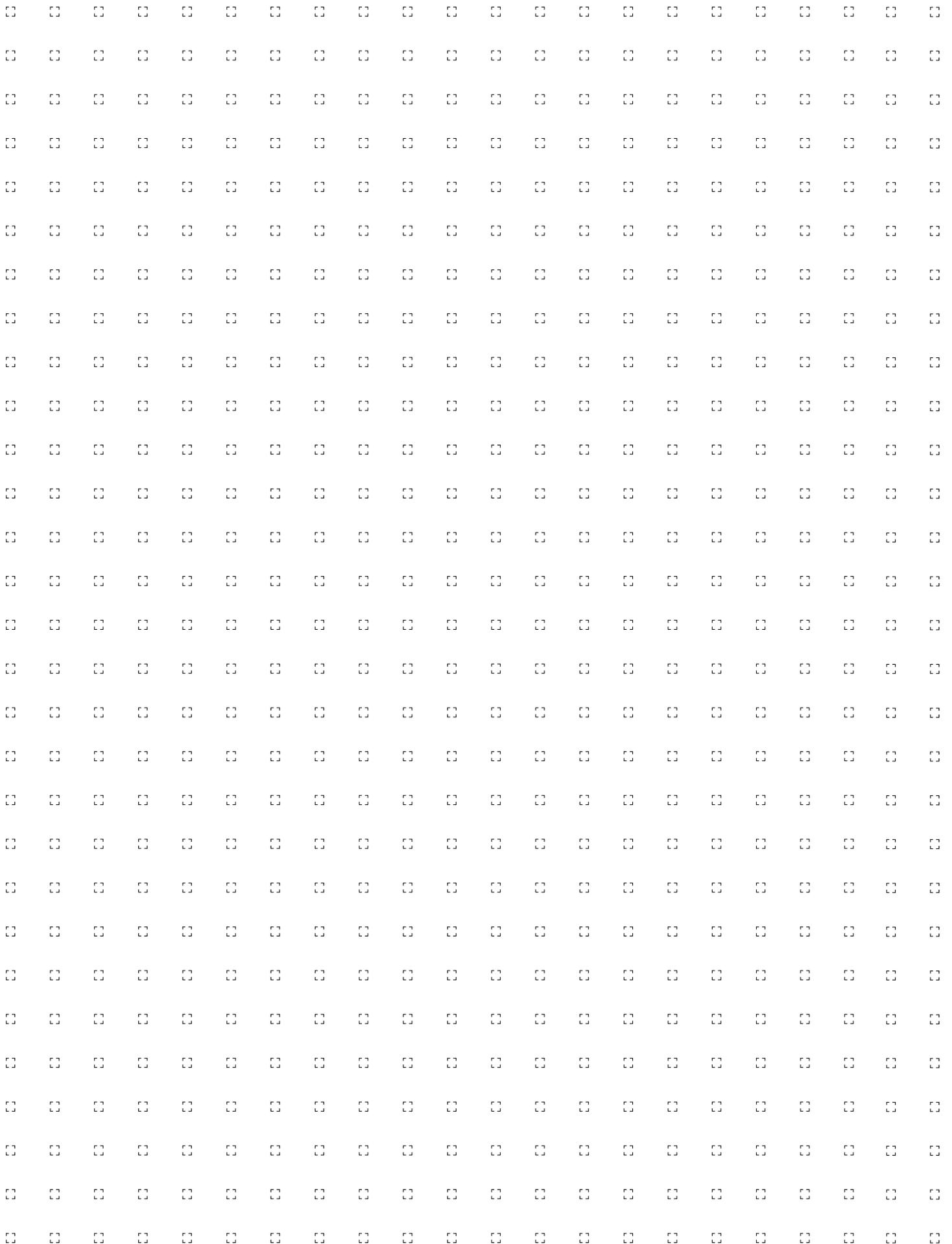


Figura 1.2 Esquema del contexto en esta tesis doctoral. Elaboración propia.

Uno de los materiales de mayor expectación en estos últimos años, que se otorgó un Premio Nobel en 2010 a sus descubridores, es el grafeno. (Menéndez y Blanco 2014; Garcia Naumis 2010). Este material bidimensional ha creado un gran interés tanto a investigadores, como a empresas y a academia (Döscher y Reiß2021; Kinaret 2018). El observar su amplia polivalencia permite proponer una serie de escenarios anteriormente inimaginables. Por ello se ha escogido este material como base para esta tesis doctoral, un material que permite especular desde sus propiedades técnicas, que permite innovar en campos a escala nano y que permite ser manipulado en laboratorio.



2. Investigación teórica



El marco teórico de esta investigación corresponde a la lectura de literatura científica y selección de la información de rigor que da base al enfoque planteado en los objetivos expuestos en la introducción. Se ha distribuido en cuatro principales bloques de contenidos.

El primer bloque de contenido define y pone en contexto la relación entre la ingeniería y el pensamiento sistémico. A su vez, define la terminología y conceptos correspondientes. Se expone cómo la teoría general de sistemas forma parte de la consolidación de modelos para los procesos de trabajo de la ingeniería y la relación de esta con el origen de nuevos descubrimientos científicos y nuevas ciencias desarrolladas. Muestra como en el contexto ingenieril actual se da gran importancia al trabajo mediante modelos de *transdisciplinariedad sistémica*.

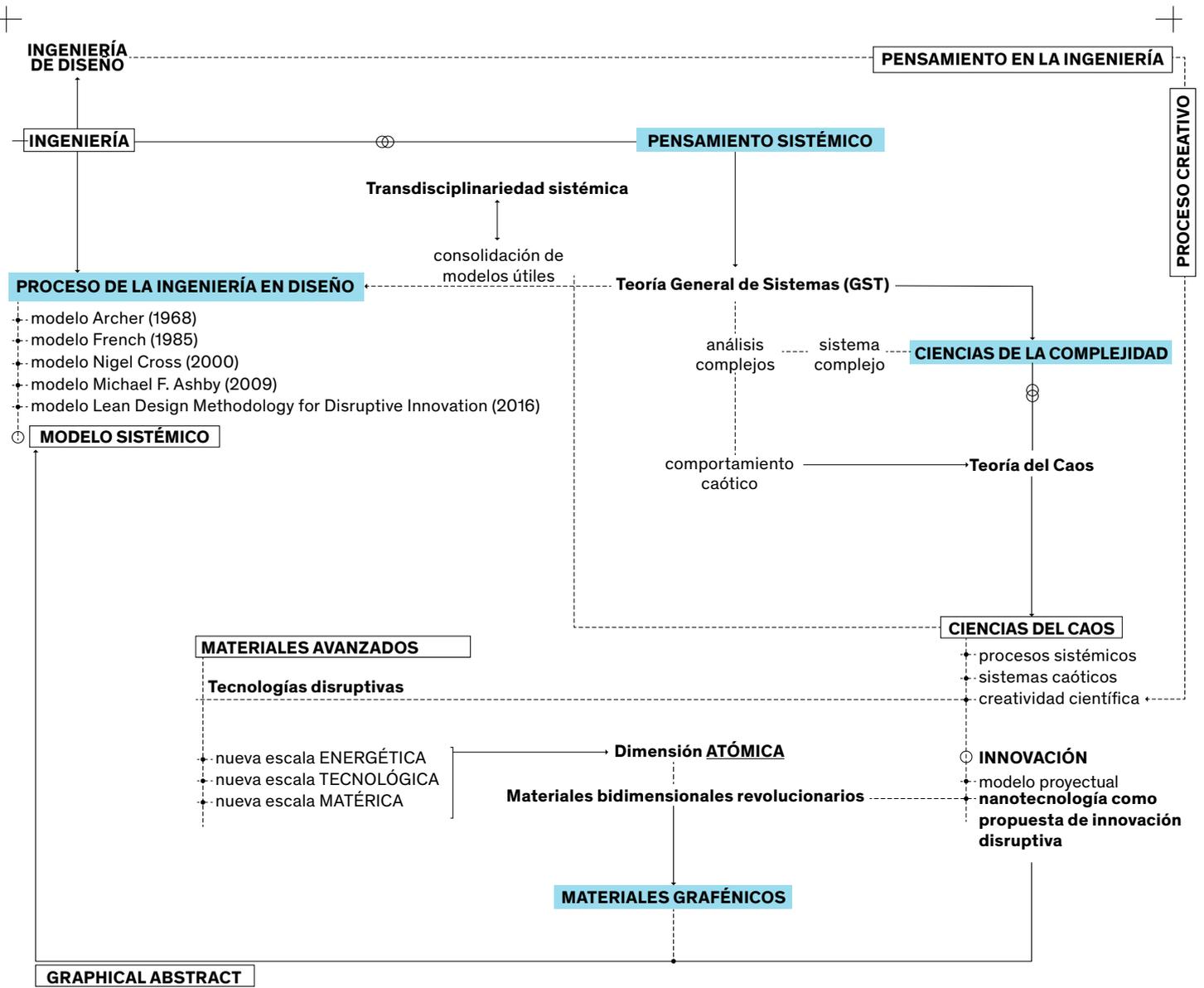
En el segundo bloque se enmarcan las ciencias de la complejidad y teoría del caos desde el valor de la teoría general de sistemas en la realización con los análisis complejos. Se muestra la relación entre procesos sistémicos, sistemas caóticos y creatividad científica para la obtención de resultados en propuestas de innovación. Este marco busca mostrar la relación entre las denominadas *ciencias del caos* y el proceso creativo en la ingeniería en diseño, para comprender cómo estos constituyen los actuales modelos científicos transdisciplinares.

En tercer lugar, se investiga para analizar el proceso creativo y pensamiento en la ingeniería; se define la relación entre ingeniería en diseño y conocimientos científicos específicos para aportar valor de innovación y se describe cómo ello viene dado desde el entendimiento de tecnologías disruptivas.

Posteriormente, se escogen y definen cinco procesos de trabajo, para ello se sigue un criterio de selección determinado tanto por su relevancia en la obtención de resultados, como por su relación con el proceso de diseño e ingeniería. Esto será el punto de partida para la definición de un modelo sistémico de trabajo en esta propuesta de tesis, con el objetivo de ser aplicado en la ingeniería actual. De este modo se permitirá plantear una visión prospectiva desde un modelo sistémico predecible en la ingeniería de diseño contemporáneo.

Por último, se contextualiza la actual revolución industrial que viene propiciada por entender una nueva dimensión atómica en una nueva escala atómica, energética y tecnológica que está siendo consolidada por recientes avances científicos. Para esta tesis doctoral, se propone estudiar el papel de los materiales bidimensionales, concretamente los materiales grafénicos, en la industria futura.

A continuación se muestra un gráfico de síntesis de la investigación realizada en este marco teórico y se expone la relación entre los campos estudiados (figura 2.1).



- Principales grupos de contenido
- Conceptos destacables
- Relación de paradigmas / teorías
- Relación de conceptos
- Relación con direccionalidad
- Relación secundaria con direccionalidad
- Relación recíproca
- Enumeración de conceptos
- Conclusión de la enumeración

Figura 2.1. Gráfico resumen de la investigación en el marco teórico. Elaboración propia.

2.1. La ingeniería sistémica transdisciplinar.

Las labores y competencias del/la ingeniero/a del siglo XXI han requerido de un cambio significativo dentro del contexto profesional actual. Los científicos Abbas y Chris, en su informe sobre la ingeniería del siglo XXI, parten de una definición clara respecto a ello cuando argumentan que “la resolución de problemas es una característica definitoria de la identidad de ingeniería”. A su vez, el estudio realizado concluye diciendo que la ingeniería del siglo XXI, comparativamente con la ingeniería del pasado, tiene altas dotes de conocimiento tecnológico, ambiental y social para la resolución de problemas de forma global; es decir, de forma sistémica (El-Zein y Hedemann 2016).

Según argumenta la historia de la tecnología, la ingeniería se considera sinergia de la tecnología y describe a su profesional como una persona que desarrolla tecnología a través de nuevos materiales hallados y su procesado. Los datos encontrados sobre el término moderno, tienen origen alrededor de 200 años d.C., se consolida en el movimiento cultural Renacentista¹. Desde ese momento, y hasta el siglo XX, la ingeniería fue considerada una profesión autónoma. Desde 1981 en adelante Melvin et al., analizan el origen y la evolución del papel del profesional de la ingeniería en la historia tecnológica, describen la “observación de la necesidad de una formación profesional y más sistemática de los ingenieros”. Por otro lado destacar que, el conocimiento respecto a las primeras formaciones sobre ingeniería se encuentra en la Francia de 1747 con la fundación de la *Ecole des Pont et Chaussees*, el primer centro docente profesional que impartió la enseñanza de la ingeniería del mundo moderno (Kranzberg, Pursell y Aunsuategui 1981).

En la descripción más amplia de ingeniero/a, se le define como la persona que discurre con ingenio trazas y modos de conseguir ejecutar algo («Real Academia Española» 2021) Otra de las definiciones más consolidadas para describir a un/a ingeniero/a en diseño es la definida por Sheppard, en la que atribuye como una de sus cualidades que el pensamiento sistémico es intrínseco al mismo (Sheppard 2003).

Dada la evidenciada relación entre ingeniería y pensamiento sistémico se considera importante definir la terminología, los conceptos, las estrategias y la lógica de los mismos.

En cuanto al diseño, éste es un concepto fundamental en la educación en ingeniería. La educación en procesos de diseño permite transferir conocimientos básicos de diseño a los estudiantes y les ayuda a comprender cómo las industrias diseñan y desarrollan sus productos (Butt et al. 2018)

Las prácticas de desarrollo de productos altamente integradas de hoy enfatizan la necesidad de transformar la educación en ingeniería de disciplinaria a transdisciplinaria que incorpore el diseño. De hecho, las disciplinas de ingeniería comparten un proceso de diseño de ingeniería común a pesar de las diferencias en la terminología

2.1.1. Pensamiento sistémico.

El desarrollo del pensamiento basado en el concepto central de sistema ha influenciado a todos los campos de la ciencia y tecnología. Los términos de *sistema*, *sistemática/o*, *enfoque sistémico*, *pensamiento sistémico* y la *teoría general de los sistemas* son algunos de los elementos conceptuales que caracterizan al movimiento de los sistemas (Herrera Jiménez 2007). Para este estudio se considera necesario definir estos términos dado que facilitarán la comprensión de la investigación realizada.

En términos etimológicos y en una de sus acepciones, se describe que un sistema define un conjunto organizado de doctrinas, ideas o principios, generalmente destinados a explicar la disposición o el trabajo de un todo sistemático. También se entiende por un procedimiento organizado o establecido, una manera de clasificar, simbolizar, o esquematizar. A su vez, se define sistemática como la metódica en el procedimiento o plan marcado por el rigor y la regularidad. Si consideramos la definición más amplia, la sistémica/o se entiende como perteneciente o relativo a la totalidad de un sistema general o local («Merriam-Webster Dictionary» 2021; «Real Academia Española» 2021).

El físico Mario Bunge, define el enfoque sistémico como “la propiedad de los objetos de ser o pertenecer a un sistema”, mientras que otros investigadores afirman que el enfoque sistémico organiza el trabajo de la persona usuaria y ayuda a entender más claramente la complejidad de un fenómeno del mundo real (Herrera Jiménez 2007; Kefalas 2011).

¹ Europa Occidental en los siglos XV y XVI

El pensamiento sistémico define como sistema a los grupos o combinaciones de elementos interrelacionados, interdependientes, o que interactúan formando entidades colectivas (Arnold y Wade 2015). La descripción más consolidada es la definida por los investigadores Josep O’Conor e Ian McDermott, estudiosos del pensamiento sistémico aplicado, en la que describen que un sistema es “una entidad cuya existencia y funciones se mantienen como un todo por la interacción de sus partes”. También argumentan que “El pensamiento sistémico es un método empleado para identificar algunas reglas, algunas series de patrones y sucesos a fin de prepararnos de cara al futuro e influir sobre él en alguna medida. Nos aporta cierto control”. Es importante entender que los comportamientos de los distintos sistemas dependen de la comprensión y la relación entre sus partes. Se debe considerar que los sistemas forman parte de subsistemas mayores y a su vez están compuestos de sistemas más pequeños (O’Connor y McDermott 1998; Wierzbicki 2015).

Sobre la concepción general de los sistemas, Schoderbek et al. Define que un sistema se identifica por un límite, los cuales no se consideran absolutos. Este tiene entradas (inputs) y salidas (outputs), que pueden ser físicas o abstractas. Un sistema está formado por distintos subsistemas que se interrelacionan por elementos del proceso. Los procesos realizan la labor de transformación de inputs en outputs. Estos procesos se retroalimentan para mantener el equilibrio y proporcionar una jerarquía. A su vez, un sistema también puede ser considerado un subsistema de un sistema más amplio. Se debe entender que la parte interna de la sistémica está en constante interacción con el medio en el que se encuentra en muchos niveles (Schoderbek, Schoderbek y Kefalas 1990; Wilby 2011).

En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente los ítem y elementos de consideración en el funcionamiento del pensamiento sistémico.

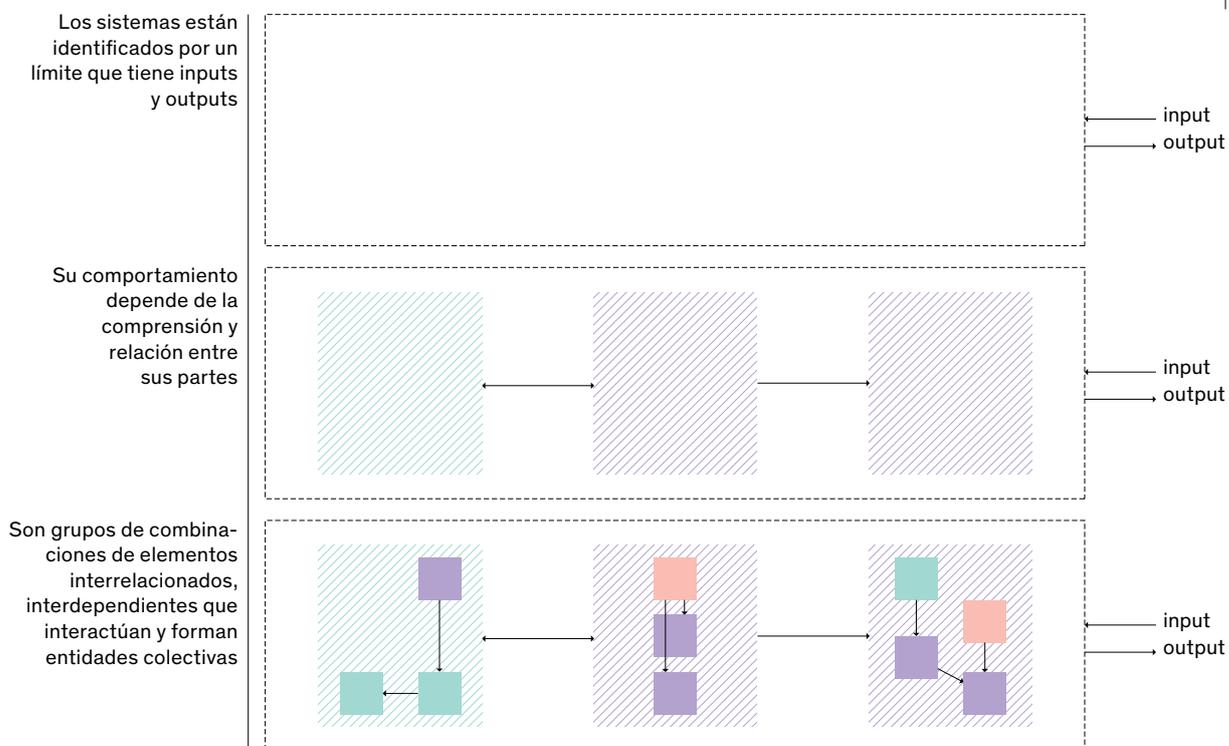


Figura 2.2
Esquema de pensamiento sistémico.
Elaboración propia.

El pensamiento sistémico ha ido progresando a medida que las personas han ido imaginando nuevas formas de hacer que establezcan una diferencia práctica. Actualmente se entiende el pensamiento sistémico desde la capacidad del ser humano para reconocer y aplicar los

principios sistémicos de retroalimentación, las propiedades emergentes y el pensamiento circular. La Dra. Jennifer Wilby, investigadora de la gestión de metodologías basadas en la teoría de sistemas en la *The Business School, University of Hull (UK)* y vicepresidenta administrativa de *International Society for the Systems Sciences (ISSS)*² consolidó la definición de *transdisciplinariedad sistémica* y considera que este forma de pensar identifica a la Ingeniería actual (Rousseau et al. 2018).

Contemplando la resolución de problemas complejos dentro de un modelo sistémico, se considera interesante valorar la teoría fractal como elemento de inspiración en un planteamiento de modelo predecible. Se entiende la “dimensión fractal” como una medida de la fragmentación de un objeto fractal (Mandelbrot 1983). La geometría fractal ofrece un poderoso enfoque para la descripción cuantitativa de los sistemas complejos, altamente irregulares y aleatorios. De hecho, el concepto fractal describe una dimensión no integral con un grado de irregularidad que es independiente de la escala (Nigmatullin y Evdokimov 2016 ; Mahjani et al. 2016).

El uso de análisis de sistémica fractal en el estudio de componentes independientes es un procedimiento de datos que intenta estimar las señales observadas o las fuentes en problemáticas complejas. Este proceso se considera interesante para los investigadores, ya que permite demostrar la adaptación de los procesos que se producen en los dispositivos técnicos complejos de un mismo patrón (Kolombet et al. 2016).

Una vez entendida la relación entre pensamiento sistémico y pensamiento general de sistema en la ingeniería, se ve necesario definir el origen de la teoría.

2.1.2. Teoría general de sistemas.

La teoría general de sistemas (GST) insiste en la no linealidad, la sensibilidad en las condiciones de inicio, el probabilismo y el comportamiento caótico (Kesić 2015). En la realización de análisis complejos, la estructura de un modelo probabilístico proporciona una expresión más natural y real en los datos de un proceso (Zheng, Song y Ge 2016). Aplicar este modelo tiene tres claras evidencias:

1. El modelo probabilístico se puede tratar de forma natural con valores que faltan en un conjunto de datos.
2. Permite crear un algoritmo de maximización de la eficiencia que se puede aplicar para la estimación de parámetros en el modelo, lo que podría reducir en gran medida la carga de cálculo y el margen de error.
3. Es más fácil de generalizar la estructura de un modelo único con el fin de manejar los problemas más complejos.

Cabe destacar que la capacidad potencial de la teoría del probabilismo se amplió a partir de la teoría cuántica (Kimura, Nuida y Imai 2010). Esto se considera cuando existen muchas variables sistémicas y datos a gran escala se usa el probabilismo para garantizar la precisión de los resultados (Luo et al. 2016).

En la literatura hallada se consideraba al científico ruso Alexander Bogdanov (1928-1973) como el indiscutible precursor de la teoría general de sistemas varios años antes que se le reconociera dicho trabajo al biólogo austriaco Ludwig Von Bertalanffy (1901-1973). Claramente, es a este último a quien se le adjudica la formulación del marco teórico para describir los principios de organización sistémica (Hofkirchner y Schafrenek 2011; Martínez, González y Brito 2009).

La visión global de la teoría general de sistemas se basa en el trabajo realizado por Bertalanffy mostrado en las publicaciones de sus

² “Society for General Systems Research” (SGSR) una de las primeras y más antiguas organizaciones dedicadas a la investigación interdisciplinaria sobre la naturaleza de los sistemas complejos. A día de hoy sigue siendo claramente la más inclusiva. Actualmente es denominada y referenciada como “International Society for the Systems Sciences” (ISSS) (Bertalanffy 1989; «International Society for the Systems Sciences» 2021; Drack y Schwarz 2010)

investigaciones de 1925 sobre el *sistema abierto*. Una teoría prematura para su época pero que se consolidó fuertemente en 1945. Actualmente está sólidamente asentada en el contexto científico (Pereda Feliú 2010; Johansen Bertoglio 2004).

Para el desarrollo de esta teoría, Bertalanffy se enriquece de la noción de sistema heredada de los pensadores griegos, en concreto de la visión holística de Aristóteles en su metafísica. El holismo pone de relieve la idea de que los sistemas deben ser vistos como un todo y no como un conjunto de partes. Este planteamiento le permitió comprender la importancia del entorno en un sistema, que según el holismo epistemológico³, determina que “el organismo debe ser estudiado no como la suma de las partes, sino como una totalidad organizada, de modo que es el todo lo que permite distinguir y comprender sus partes, y no al contrario. Las partes no tienen entidad ni significado alguno al margen del todo, por lo que es inadmisibles que el todo sea la suma de tales partes”. El holismo metodológico en la ciencia es un acercamiento a la investigación que enfatiza el estudio de los sistemas complejos. Esta visión ayudó a Bertalanffy a demostrar que en la realidad priman los sistemas abiertos (Ponte et al. 2016; Viniegra Velázquez 2014; Martínez, González y Brito 2009).

Bertalanffy definió que la física ordinaria de su momento solo se ocupaba de los sistemas cerrados, es decir, que solo se consideraban sistemas aislados sin tener presente el medio en el que estaban. La aplicación de la teoría de sistemas abiertos en la física ha llevado a importantes descubrimientos y avances científicos, entre ellos el *principio de la equifinalidad*⁴; la *2ª ley de la Termodinámica* que contempla entropía como un input de transformación de un sistema abierto y cerrado; y el planteamiento del *modelo de retroalimentación*⁵ (Martínez, González y Brito 2009; Bertalanffy 1989)

La teoría general de los sistemas dio base al desarrollo de una serie de teorías asociadas; tales como: (1) la cibernética, originada por Norbert Wiener al aplicar la teoría general de los sistemas, (2) la teoría de las catástrofes, (3) la teoría del caos y (4) los sistemas adaptativos complejos, donde W. Ross Ashby propone el modelo de adaptabilidad, funciones escalonadas que definen un sistema que al atravesar un valor crítico pasa a una nueva familia (Bohórquez Arévalo y Espinosa 2015; Pereda Feliú 2010; Martínez, González y Brito 2009; Johansen Bertoglio 2004; Castillo 1981).

Por otro lado, Oscar Johansen define la teoría general de sistemas como un enfoque interdisciplinario, aplicable a cualquier sistema natural o artificial (Johansen Bertoglio 2004). La teoría general de sistemas pretendía ser una nueva disciplina que permitiera establecer un cuerpo teórico para la resolución de problemas en diferentes áreas del conocimiento. Para ello, se parte de la base de que es necesario no estudiar solamente partes y procesos aislados. El principal problema son las relaciones que resultan de la interacción dinámica. La teoría general de sistemas trata de romper con el concepto tradicional de que todas las ciencias pueden reducirse a la física (Lopreato y Bertalanffy 1970; Bertalanffy 1968, 1989)

Comprender el estudio de sistemas desde diferentes disciplinas científicas, ha permitido crear las bases del pensamiento sistémico y de su sistematización, vinculada a la transdisciplinariedad. Por tanto, a continuación se define el funcionamiento de estructuras disciplinares usadas en los procesos estandarizados.

2.1.3. Estructuras disciplinares.

Una vez determinado que la ciencia de sistemas se aplica a las disciplinas especializadas, cabe la necesidad de describir cómo se entienden las estructuras disciplinares dentro de los procesos conocidos. En esta

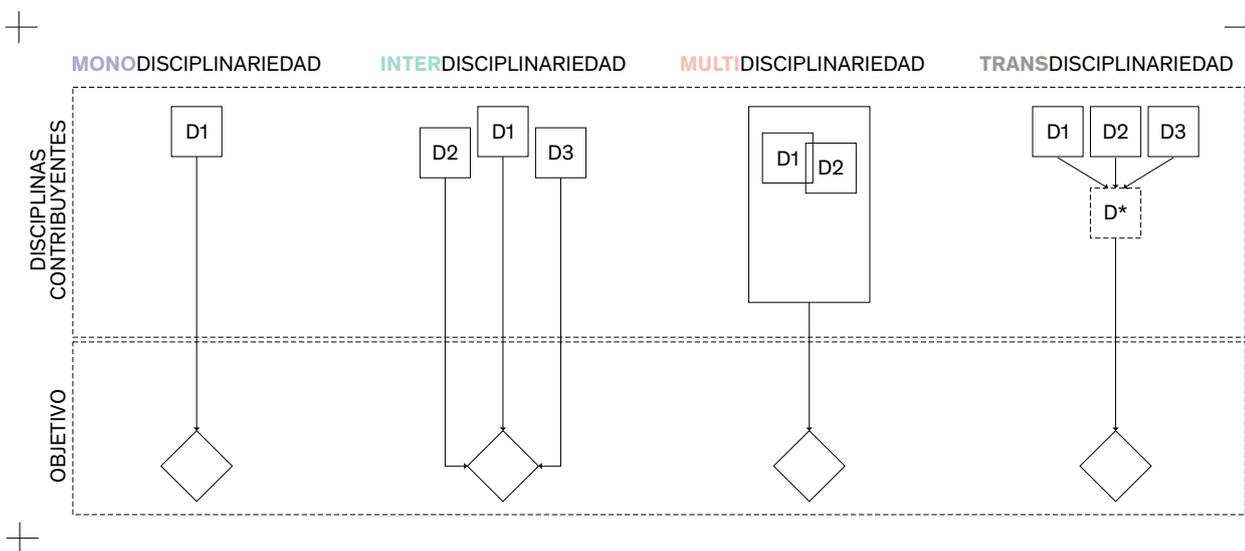
³ Teoría del conocimiento, se ocupa de problemas tales como las circunstancias históricas, psicológicas y sociológicas que llevan a la obtención del conocimiento, y los criterios por los cuales se lo justifica o invalida, así como la definición clara y precisa de los conceptos epistémicos más usuales, tales como verdad, objetividad, realidad o justificación.

⁴ Significa que idénticos resultados pueden tener orígenes distintos, porque lo decisivo es la naturaleza de la organización. Así mismo, diferentes resultados pueden ser producidos por las mismas "causas".

⁵ Este planteamiento hace que el sistema se autorregule, es decir, que garantiza la estabilización o la dirección de acción

investigación se acota al funcionamiento de estructuras *transdisciplinares*, *multidisciplinares*, *interdisciplinares* y *monodisciplinares*.

El término transdisciplinariedad apareció de manera simultánea en los trabajos de investigadores tan diversos como Jean Piaget, Edgar Morin y Eric Jantsch, entre otros. Este término nació de la necesidad de explicar la situación difusa entre los límites de las disciplinas, sobre todo en el campo de la docencia, es por ello que se entiende por transversalidad al esfuerzo coordinado entre dos o más disciplinas académicas (Nicolescu y Vallejo 1996). Cuando se habla de multidisciplinariedad se refiere a hacer uso de una o varias disciplinas simultáneamente, reconociendo sus diferentes enfoques, pero sin tratar una vinculación entre ellas. La interdisciplinariedad es el proceso de combinar dos o más disciplinas o campos de estudio, en un intento de sintetizarlos en algo nuevo. Mientras que la monodisciplinariedad consiste en el uso de una única disciplina. Estas distinciones se ilustran esquemáticamente en la figura 2.3 (Rousseau y Wilby 2014; Petrişor 2013; Wilby 2011; Salmons y Wilson 2007).



El Dr. Basarab Nicolescu, físico cuántico apasionado en definir el rol de la ciencia contemporánea, es uno de los impulsores del manifiesto de referencia para consolidar el término transdisciplinariedad. Es conocido por su contribución en la fundación del “*Centre International de Recherches et Études Transdisciplinaires (CIRET, París)*” y la elaboración de la “*Carta de la Transdisciplinariedad*”, adoptada en el Primer Congreso Mundial de la Transdisciplinariedad llevado a cabo en el Convento da Arrábida, en 1994, Portugal («*Centre International de Recherches et Études Transdisciplinaires CIRET*» 2020 ; Anés et al. 1994).

El enfoque transdisciplinario se basa en la comprensión de sistemas complejos. La transdisciplinariedad se considera que está entre las disciplinas y que tiene como objetivo comprender la unidad del conocimiento (Nicolescu 2013; Anés et al. 1994).

La transdisciplinariedad se conoce desde las ciencias naturales, las sociales y las humanidades; así como en numerosas profesiones. En los procesos de investigación sobre futuros sostenibles y no sostenibles, se valora que la investigación transdisciplinaria se beneficie de la capacidad de las personas para pensar de forma creativa sobre futuros alternativos (Lawrence 2015).

Se podría concluir que el valor diferenciador de la transdisciplinariedad sistémica respecto al resto de disciplinas mencionadas (multidisciplinariedad, interdisciplinariedad y monodisciplinariedad) es que se puede ver a través de los límites entre disciplinas y permite entender los

Figura 2.3. Esquema de las estructuras disciplinares. Las disciplinas ortodoxas se indican con números de D1-D3. Adaptación de: Rousseau y Wilby 2014.

mecanismos mentales y creativos de las personas que proponen soluciones innovadoras (Scott, Cavana y Cameron 2016; Rousseau y Wilby 2014).

En este marco de estudio interesa entender que las decisiones de diseño ante cualquier problema propuesto, son abordadas desde la sistémica. Plantear una visión global de la toma de decisiones proporciona una mejor resolución de diseño con perspectiva holística⁶ e inclusiva.

Se ha definido que la interdisciplinariedad implica puntos de contacto entre las disciplinas donde cada una aporta sus problemas, conceptos y métodos de investigación. Sin embargo, la transdisciplinariedad es lo que simultáneamente le es inherente a las disciplinas y permite adoptar el mismo método de investigación (Pérez Matos y Setién Quesada 2008). A su vez, el enfoque de sistemas complejos se relaciona con dicha transdisciplinariedad (Hofkirchner y Schafranek 2011), es por ello que se procede a la definición de estos conceptos.

2.2. El caos y la complejidad para modelos de innovación.

Este apartado enmarca el valor de la teoría general de sistemas en la realización de análisis complejos. A su vez, se muestra una clara asociación al comportamiento caótico, clasificado como sistema complejo. Este comportamiento determina un interés para la comprensión de la gestión de resultados en la toma de decisiones de un proceso de trabajo (Zheng, Song y Ge 2016; Kesić 2015; Miceli et al. 2005). La teoría del caos es uno de los enfoques más predominantes de la ciencia de la complejidad. Es por ello que se considera necesario el estudio de esta en relación a la investigación realizada (Hung y Lai 2016; Mathews, White y Long 1999)

Para mayor entendimiento del marco de investigación planteado y la relación entre conceptos propios del entorno de trabajo, se muestra la relación entre sistemas complejos y teoría del caos, manteniendo siempre un enfoque sistémico que, como se ha descrito previamente en el apartado 2.1, es un valor del pensamiento natural del ingeniero o ingeniera (figura 2.4).

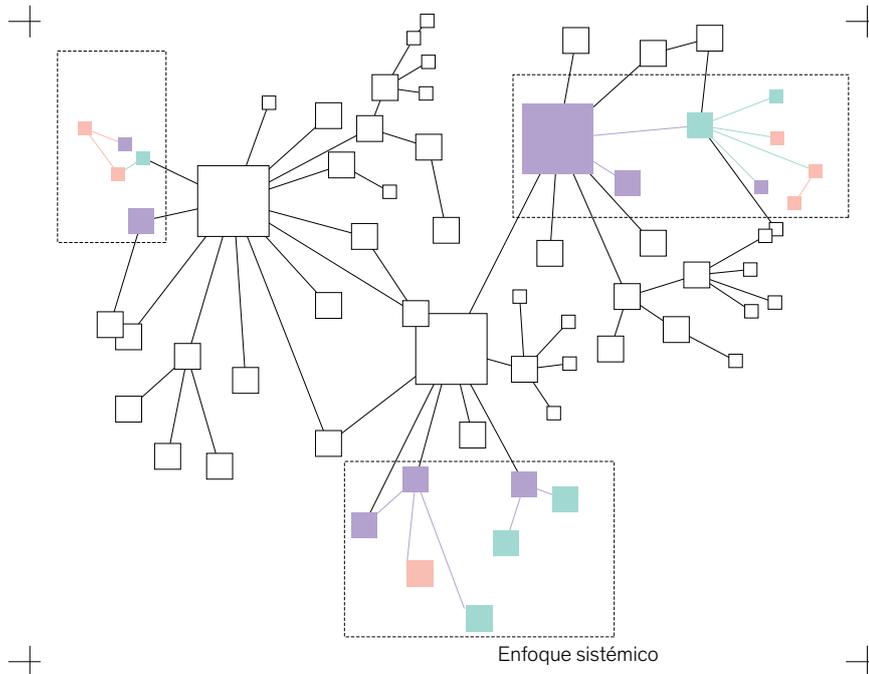
Para ello, se definirán en primer lugar la teoría del caos, la ciencia del caos y su relevante influencia para innovar. En segundo lugar se definirán las ciencias de la complejidad y *el paradigma de la complejidad*. Por último, se estudia cómo estas ciencias constituyen los actuales modelos científicos que proponen parámetros de innovación en los descubrimientos científicos complejos, interpretando la *creatividad científica* como un nuevo ámbito de valor.

El objetivo es poder entender los procesos sistémicos con relación a los sistemas caóticos. Este estudio permitirá asentar las bases de un nuevo modelo proyectual que facilite acercarse con mayor eficacia a propuestas de innovación.

2.2.1. Ciencia del caos.

En el lenguaje cotidiano el término caos implica un comportamiento impredecible o al azar. En general tiene una connotación negativa que incluye la desorganización indeseable o confusión («Merriam-Webster Dictionary» 2021; «Dictionary» 2021). Sin embargo, en el ámbito científico, este comportamiento impredecible se considera un fenómeno de gran interés en distintos campos de investigación, lo cual genera atracción y atención en la comunidad científica. En especial, se considera que controlar los parámetros del caos es un potencial atribuido a la ingeniería (Agrawal y Vishal 2016).

⁶. Holístico: Perteneciente o relativo de holismo. "La concepción de cada realidad como un todo distinto de la suma de las partes que lo componen" («Real Academia Española» 2021)



En este contexto, se considera necesario referenciar las conclusiones del estudio realizado en *“Teoría del caos y método científico”* del Profesor A. J. Coppo. En éste se argumenta con distintos estudios de caso como “el caos se ha convertido en un método, un modelo y una forma de generar conocimiento científico en el área de los sistemas complejos”. A su vez, permite aproximarse con mayor fiabilidad a la realidad de las cosas (Coppo 2010). Los sistemas caóticos tienen tipificada una estructura de aspecto aleatorio, que por su determinismo permite predicciones exactas en el corto plazo, aunque no son posibles a largo plazo (Sivakumar 2017).

El caos, en su sentido científico, consiste en un patrón irregular de comportamiento generado por reglas bien definidas de retroalimentación no lineal, comúnmente encontradas en la naturaleza y en la sociedad humana. Se considera un comportamiento dinámico del sistema determinista⁷ caracterizado por la dependencia sensible de las condiciones lineales que implican impredecibilidad y una compleja estructura organizativa (Schuldberg 2011).

En investigación, la teoría del caos se usa para identificar el orden en sistemas complejos y aparentemente impredecibles, considerada por algunos científicos una subdivisión de la ciencia de la complejidad. Se llegó a decir que la teoría del caos desafió la visión mecanicista⁸ predominante del universo⁹. Esto llevó al descubrimiento como el de nuevas leyes asociadas con la dinámica no lineal y sistemas complejos (Hung y Tu 2014; Lerner y Lerner 2004).

Los investigadores de la década de los 80 encontraron la forma de

Las sociedades humanas son sistemas dinámicos de realimentación al igual que los sistemas de la naturaleza. Los descubrimientos que se atribuyen a la teoría del caos permiten la capacidad de profundizar la comprensión del comportamiento y la naturaleza de las sociedades. Esto ha permitido aplicar un desarrollo estratégico en los procesos fundamentales. Poco después de ver las posibilidades de la teoría aplicada, expertos en física, en biología y en economía crearon un modo para comprender la complejidad de la naturaleza y la definieron como ciencia del caos. Esta nueva ciencia definía un método para entender un orden en el azar y en la irregularidad, traspasando las disciplinas científicas tradicionales.

Figura 2.4. Uso del enfoque sistémico para el estudio de sistemas complejos en la ingeniería. Elaboración propia.

⁷ Doctrina según la cual todos los acontecimientos, y en particular las acciones humanas, están unidos y determinados por la cadena de acontecimientos anteriores («Real Academia Española» 2021).

⁸ Doctrina según la cual toda realidad natural tiene una estructura semejante a la de una máquina y puede explicarse mecánicamente («Real Academia Española» 2021).

⁹ Relaciones causa-efecto lineal simple.

aplicar la teoría del caos a sus investigaciones consiguiendo unos resultados extraordinarios que claramente la consolidó como la ciencia del caos. Ellos mismos la definían como la tercera revolución del siglo en el ámbito de las ciencias físicas, a la vez que fue considerada la clave para la resolución de sistemas complejos (Gleick 1987).

Para mayor comprensión del valor de esta ciencia, se presentan algunos referentes que muestran que el uso de la teoría del caos ha sido un parámetro de innovación en los descubrimientos científicos complejos. Los autores Shih y Jiun, en su estudio de la relación entre la innovación y el caos, hacen referencia a una serie de casos documentados en los que muestran que la teoría del caos ha llegado a ser un excelente catalizador para la innovación científica que pone en cuestión los modelos predictibles previos. En la tabla 2.1 se han seleccionado algunos de los casos más significativos de la literatura estudiada (Hung y Lai 2016; Schuldberg 2011; Coppo 2010; Uzer et al. 1995; Gleick 1987; Day 1983; Lorenz 1972; Lorenz y Lorenz 1963).

	Ciencia	Aportes en la innovación científica
Edward Lorenz	Matemática y meteorología	Introdujo los conceptos de sensibilidad a la condición inicial o comúnmente llamado efecto mariposa o "atractor extraño"
Joseph Ford	Termodinámica	La teoría del caos dinámico: transición del movimiento regular
James Maxwell	Electromagnetismos	Capacidad de reconocer la importancia de los sistemas que dependen de las condiciones iniciales
Henri Poincaré	Matemática y física	La conclusión que no es posible predecir con exactitud la evolución futura de algunos sistemas porque las condiciones iniciales sólo se conocen de manera aproximada
Henry Adams	Termodinámica	Estudió el caos y el primer principio de la segunda ley de la termodinámica: la ley de la dispersión de la energía
Ilya Prigogine	Física	Estudió el azar, el caos, la incertidumbre y el no-equilibrio, desde una óptica que negaba toda concepción determinista
Tom Ray	Matemática	Creó el primer programa computacional de "vida artificial", basado en técnicas de matemática caótica (simulación biológica)
Robert Shaw	Sistemas de la información	Descubrió la relación entre el caos, los atractores, y la teoría de la información fundada en la entropía. Postulando que "el caos es la creación de la información"
Richard H. Day	Economía (caótica)	Demostó cómo las fluctuaciones de carácter errático e inestable podrían surgir del proceso clásico, determinista crecimiento económico

Tabla 2.1.
Aportes en la innovación científica aplicando la teoría del caos.
Elaboración propia.

En el estudio realizado por Cheng y Van de Ven, sobre el proceso de desarrollo en casos innovadores, se valora positivamente su conclusión respecto a que "el caos determina que el proceso de innovación consiste en un sistema dinámico no lineal, sin orden y estocástico¹⁰, o relativo al azar" (Hung y Lai 2016; Cheng y Van De Ven 1996; Thiéart y Forgues 1995; Stacey 1993).

¹⁰ Teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria («Real Academia Española» 2021)

Una vez entendida la teoría del caos y su valor de innovación en la implementación dentro de las investigaciones científicas, existe la oportunidad de vincular este concepto para la definición sistémica de un modelo que defina un proceso creativo desde el contexto desconocido.

2.2.2. Ciencia de la complejidad.

En la investigación realizada se muestra el interés de los expertos por manifestar la relación entre la teoría del caos, la ciencia de la complejidad y el vínculo a la sistémica. El Dr. Emily F. Gates, en su estudio *"Making sense of the emerging conversation in evaluation about systems thinking and complexity science"* hace un extenso análisis y pone sobre la mesa el interés, desde las áreas científicas, en considerar que existe un potencial de pensamiento sistémico y su relación con la ciencia de la complejidad para transformar las práctica de la evaluación e implementación en procesos (Gates 2016).

La definición más consolidada, para ciencia de la complejidad, es la determinada por los autores Reynolds et al. (2012) cuando la describen como la ciencia que estudia fenómenos en los que las interconexiones entre elementos no son lineales. A su vez, las propiedades emergentes de las interconexiones están sujetas a incertidumbre. Este enfoque que se ha determinado como un paradigma alternativo de la ciencia clásica, es un conjunto de ideas, teorías, perspectivas y métodos para el estudio de sistemas complejos. Dichos autores relacionan las *ciencias de la complejidad* con el *pensamiento sistémico* y muestran mayor conciencia y valor en la resolución de problemas complejos a través de los diferentes caminos que permiten las ciencias de la complejidad.

La ciencia de la complejidad y el pensamiento sistémico comparten una preocupación por desafiar las prácticas de modelos racionales. Buscan fomentar una perspectiva dinámica más holística que influye en la capacidad de evaluar, dentro de un proceso, problemas complejos de manera democrática. A su vez, promueven la necesidad de abordar la aparición y el cambio de sistemas basándose en la causalidad abierta a la improvisación, los resultados impredecibles, enfatizar el enfoque de valor y la búsqueda de respuestas en un proyecto. Finalmente elevar la preocupación por los procesos que facilitan la evaluación participativa y que crean inteligencia colectiva e innovadora en interacciones. En la figura 2.5 se muestra cómo estos diferentes caminos de pensamiento se relacionan entre sí con mayor o menor influencia (M. Reynolds, K. Forss, R. Hummelbrunner, M. Marra 2012).

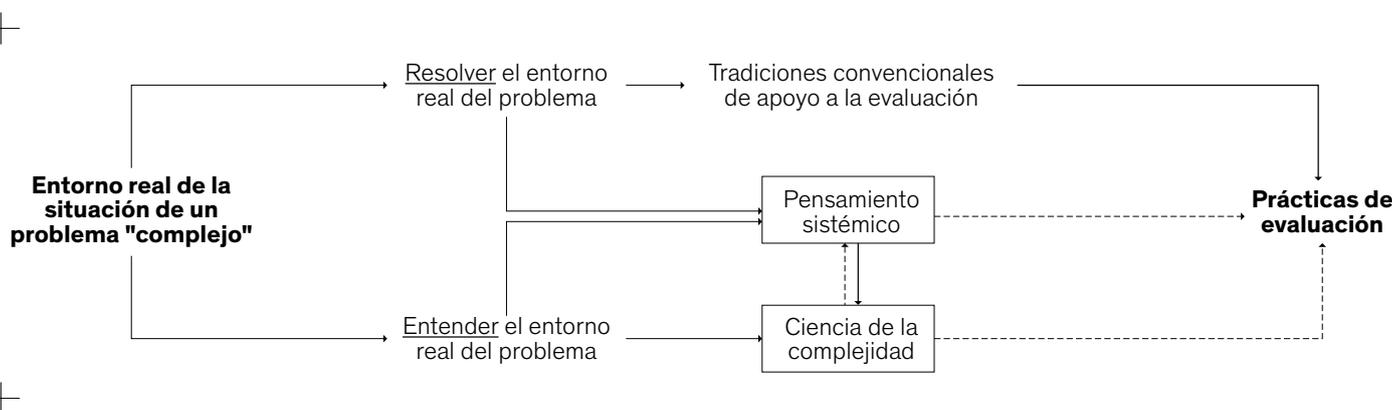


Figura 2.5. Diagrama de influencia. Adaptación de: M. Reynolds, K. Forss, R. Hummelbrunner, M. Marra 2012.

Las ciencias de la complejidad permiten una comprensión de la realidad y de los fenómenos que tienen o pueden tener lugar. En la tabla 2.2 se muestra una lista de autores representativos y considerados padres de la ciencia de la complejidad. Paralelamente se determina que sus campos de aplicación y estudio son la administración, la educación, la ingeniería, los sistemas de salud pública, los sistemas vivos, los métodos multiescalares y la economía entre otros (Maldonado-Castañeda 2012; Maldonado y Gómez-Cruz 2011).

Aportes a la innovación científica	Nombre	Año
Termodinámica del no-equilibrio	I. Prigogine	Premio Nobel, 1977
Teoría del caos	E. Lorenz - D. Ruelle	1962 - 1977
Principio de fractales	B. Mandelbrot	1977
Teoría de catástrofes	R. Thom	Medalla Fields 1977
Ciencia de conexiones	L. Barabasi, S. Strogatz, Watts	2001 - 2003
Lógicas no-clásicas	Numerosos autores	Desde 1950 a la actualidad

Tabla 2.2.
Clasificación de las ciencias de la complejidad. Maldonado y Gómez-Cruz 2011.

Más próximo al contexto enmarcado en el plan de investigación de esta tesis se muestran estudios como los de “*Complex adaptive systems theory and firm product innovativeness*” y “*Applying complexity science to new product development: Modeling considerations, extensions, and implications*” sobre sistemas complejos y ciencia de la complejidad aplicados a la ingeniería y a la industria de producto. Estos determinan que existen variables de influencia positiva en la capacidad de innovación en productos y la reducción de los tiempos de diseño e implementación de los mismos (Akgün, Keskin y Byrne 2014; Oyama, Learmonth y Chao 2014).

Secundando las referencias anteriores mencionadas, se puede decir que: *el paradigma de la complejidad surge de la coincidencia de ideas planteadas y de las teorías de varias áreas de conocimiento, las cuales tienen en común el estudio del comportamiento complejo y los sistemas no lineales* (Mattos et al. 2016).

El contexto del paradigma de la complejidad viene implícito de la racionalidad post ciencia clásica. Este paradigma emergente determina que: si hay un número de condiciones adicionales determinadas, estas se convierten en innovación. Es por ello que algunos afirman que “la transición del pensamiento hacia el paradigma de la complejidad debe convertirse en un imperativo básico del desarrollo de la civilización moderna” (Arshinov y Budanov 2016).

2.2.3. Creatividad científica.

Tanto la teoría del caos como el paradigma de la complejidad constituyen los actuales modelos científicos transdisciplinares de los que se nutren teóricos de diversas áreas científicas para aproximarse a sus respectivos objetos de estudio. La ciencia es evolutiva y transformadora, aclara fenómenos que no se llegan a comprender por razonamientos cotidianos y es referente en la búsqueda e integración del conocimiento (Fajardo-ortiz et al. 2014; Pérez 2003).

La creatividad tiene que ver mucho con cómo son las personas y cómo funcionan psicológica y sistemáticamente. David Schuldberg profesor de psicología en la University of Montana–Missoula, especiali-

zado en la creatividad y los modelos de sistemas dinámicos no lineales, modulares y conectados entre sí, relaciona y argumenta que la teoría del caos puede ser muy adecuada para la comprensión rigurosa del proceso creativo. En su estudio, se toma de base la teoría de *sistema dinámico no lineal* y proporciona modelos que ayudan a entender el por qué del ser humano. Los modelos de aplicaciones de sistemas dinámicos no lineales permiten mostrar una transición de un movimiento regular o periódico a un movimiento complejo, irregular o caótico. Por ello, Schuldberg propone que el uso de estos sistemas permite una comprensión más profunda de lo creativo y pone en manifiesto las conexiones entre dicha teoría y la creatividad para aplicar la teoría del sistema dinámico no lineal al proceso creativo (Schuldberg 2011).

La conexión de la teoría general de sistemas con el proceso creativo se encuentra descrita en el estudio de Andreas Hieronymi, el cual ha definido un enfoque desde la sistémica. Esto aporta “un valor particular en la comprensión de la creatividad, ya que proporcionan un lenguaje transdisciplinario de cómo funcionan los sistemas y cómo se adaptarán” al proceso creativo (Hieronymi 2013).

La actualidad corresponde a un periodo histórico en el que la creatividad es un fenómeno social, en el que la *creatividad científica está altamente conectada con las aptitudes profesionales*. Para ello se deben asumir una serie de variables de conocimiento que requieren ser adquiridas previamente. La creatividad científica de las personas frente a sus investigaciones científicas, sus logros científicos y las percepciones del entorno de aprendizaje creativo están estrechamente relacionadas (Usta y Akkanat 2015).

Varios estudios sobre el aprendizaje en a distintas edades determinan que la creatividad científica es una forma de resolución de problemas que requiere la interacción e integración de conocimiento de dominio general, conocimiento de dominio específico, habilidades de proceso científico y creatividad científica divergente. Estos estudios, también definen las capacidades individuales y sociales para resolver problemas científicos y técnicos complejos de manera innovadora y productiva (Yang et al. 2019, 2016; Heller 2007).

La formación en pensamiento creativo, en particular el pensamiento divergente, ha mostrado efectos prometedores en la mejora de la creatividad en contextos organizativos y de educación superior. La creatividad científica se relaciona con características de personalidad como la motivación, el interés, la concentración y la búsqueda del conocimiento para aportar un valor. Incluso de forma osada hay investigadores que utilizan el término de *sobredotación científica* junto al de *creatividad científica* (Sun, Wang y Wegerif 2020; Ayas y Sak 2014).

Una vez descritos los conceptos relacionados con teoría del caos, teoría general de sistemas y ciencias de la complejidad, además de la asociación entre estos, se observa que se puede plantear un marco de estudio referente a los parámetros necesarios en el proceso de un ingeniero o ingeniera desde la creatividad científica. También se encuentra necesario relacionar estos parámetros con el proceso proyectual en la ingeniería actual.

Estos conceptos, que han sido desarrollados en contextos de investigación científica para la innovación, se han trasladado en la implementación para procesos de innovación. Estos han permitido a las empresas innovadoras tener un aumento creativo desde una visión del trabajo sistémico. Por ello, se plantea como ítem de investigación a consideraren esta tesis doctoral.

Las organizaciones basadas en el conocimiento tienen como prioridad fomentar las condiciones que motivan a los equipos de trabajo a desarrollar soluciones creativas. Actualmente, en los estudios de ingeniería y diseño, se practican nuevas formas de aprendizaje y de ejecución de retos de un proyecto. Por tanto, desde las estructuras de trabajo transversal, se busca motivar a las personas para desarrollar productos que sean novedosos y útiles. Dentro del proceso creativo, el trabajo desde una estructura de información plana permite la mejora de la eficiencia en los resultados creativos (Miron-Spektor y Beenen 2015).

Es por ello que la visión de la teoría del caos relacionada al proceso creativo en el diseño con conocimientos científicos (el/la ingeniero/a en diseño), se considera un parámetro de innovación en los descubrimientos y un ítem a valorar en la búsqueda de la eficiencia, en la resolución de problemas y en la aproximación a enfoques disruptivos.

2.3. Proceso de ingeniería en diseño con perspectiva futura.

Para los concededores del ámbito, existe una clara relación entre las competencias del ingeniero/a en diseño, su proceso creativo y la capacidad de resultados en innovación en proyectos realizados con éxito. Pero es cierto que ha sido poco entendida por la sociedad el alcance de las posibilidades de esta profesión. Es por ello que, en estas últimas décadas investigadores, instituciones docentes y asociaciones afines, se han preocupado por definir y unificar el proceso de trabajo en la ingeniería, en concreto la especialización en diseño.

La *National Academy of Engineering (NAE)* publicó un informe para comunicar y mejorar la comprensión pública de la ingeniería. El cual define que esta realiza una diferencia en la vida de las personas, partiendo de que el valor de la ingeniería no es solo su habilidad en matemáticas y ciencia. Recalca que los mensajes actuales sobre la ingeniería a menudo ignoran otras características vitales de la misma, tales como: la creatividad, el trabajo en equipo y la comunicación. Finalmente el informe concluye que (1) los ingenieros e ingenieras hacen un mundo de diferencia; (2) los ingenieros e ingenieras son creativos solucionadores de problemas; (3) los ingenieros e ingenieras ayudan a moldear el futuro y (4) la ingeniería es esencial para nuestra salud, felicidad y seguridad («Developing Effective Messages for Improving Public Understanding of Engineering» 2021).

Para entender el proceso de diseño de un ingeniero o ingeniera se debe comprender su forma de pensar. Como se ha explicado previamente en esta investigación (apartado 2.1) el pensamiento sistémico es considerado intrínseco a la formación en ingeniería. Aunque las definiciones de ingeniería son variadas en función de la especialización, se determina que la investigación de esta tesis doctoral se centrará en la especialización de ingeniería en diseño y se acotará al pensamiento sistémico aplicado en el proceso proyectual, para la obtención de resultados innovadores y

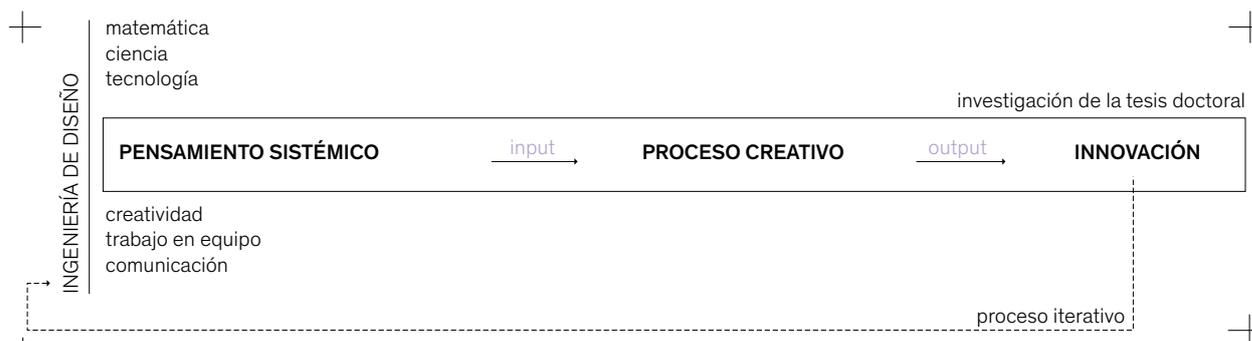


Figura 2.6.
Gráfico de Ingeniería en diseño para la innovación. Elaboración propia.

diferenciadores (figura 2.6).

El/la profesional de la ingeniería en diseño tiene la capacidad de visionar el alcance del proyecto con objetividad y está dotado para generar, evaluar y realizar ideas de forma creativa (Sheppard 2003). Clive L. Dym describe que la ingeniería de diseño es un proceso sistemático e inteligente en el que los/las diseñadores/as generan, evalúan y especifican conceptos para dispositivos, sistemas y procesos, cuya forma y función satisface los objetivos de los/las cliente/as o las necesidades de los/las usuarios/as, a la vez que cumplen un conjunto de restricciones¹¹ (Dym 2006; Dym et al. 2005; Akili 2015).

Adams et al., en su estudio sobre el papel de la práctica reflexiva en la ingeniería en diseño, defiende que es un profesional reflexivo que su conocimiento no sólo es racional y cognitivo que le permite destacar en la crítica para la práctica. Además, haciendo referencia a Schön, describe que se caracteriza por “enfatar las actividades de resolución de problemas, las razones del problema y la solución a través de la experimentación, que a su vez se involucra de manera fluida en una variedad de representaciones” (Adams, Turns y Atman 2003).

Estudios en este campo coinciden en que los antecedentes del proceso en la ingeniería en diseño se basan en un diseño ingenieril claro y consolidado. Además, se define claramente que el diseño de ingeniería es un proceso iterativo¹² en la toma de decisiones y no lineal, que pasa por distintas fases de divergencia y convergencia, en el cual se trabaja de forma sistemática desde la conceptualización de un producto hasta la implementación del mismo. La integración de las etapas de flujo de trabajo permite compartir información de manera natural, entre el equipo de ingeniería de diseño, teniendo como resultado ciclos de diseño más cortos y eficaces.

2.3.1. Creatividad en el proceso de ingeniería.

David H. Cropley en su análisis sobre La creatividad en la ingeniería, dice que la creatividad es un elemento fundamental de la ingeniería y define que “la creatividad tiene que ver con la generación de soluciones novedosas y eficaces a los problemas; mientras que la ingeniería y diseño de ingeniería tiene un objetivo similar pero centrado en soluciones tecnológicas” (Cropley 2016).

El proceso creativo forma parte del proceso de ideación del/la ingeniero/a de diseño y de su capacidad de aportar soluciones ante una problemática o reto planteado. Los métodos de ideación desarrollados en las últimas cuatro décadas se clasifican en métodos intuitivos y lógicos. “Los métodos intuitivos intentan superar los bloqueos mentales mientras que los métodos lógicos hacen uso de gráficos, bases de datos, búsquedas de patentes y principios físicos entre otros”. Para el caso mencionado, se ha estudiado el proceso de diseño en relación a las actividades cognitivas asociadas del/la ingeniero/a. Cabe detallar, que la investigación cognitiva¹³, en el diseño de ingeniería, obtiene resultados que proporcionan un mejor diseño final, real y próximo en entornos más complejos (Hernandez, Shah y Smith 2010).

En la actualidad, los/las ingenieros/as en diseño han podido confiar en un amplio campo de ciencias probadas y validadas físicamente. No obstante, la tendencia es que los nuevos materiales de propiedades inusuales, las tecnologías que se están desarrollando en torno a ellos y las nuevas industrias digitales, prefiguren el futuro. Esto requiere un perfil de ingeniero/a en diseño creativo, con conocimiento de metodologías de ideación, que ayude a encontrar nuevos caminos que implementen de forma inteligente esta nueva ciencia emergente (Bleuzé et al. 2014).

¹¹ Cita en idioma original:
«Engineering design is a systematic, intelligence process in which designers generate, evaluate, and specify concepts for device, systems or processes whose form and function achieve clients objectives or users needs while satisfying a specified set of constraints».

¹² Según la RAE: Expresar una acción que se compone de acciones repetidas.

¹³ «La cognición es el conjunto de procesos y mecanismos que permiten al individuo procesar una cierta información, ya sea a través de los sentidos o la experiencia, aunque usualmente se requiere de ambos».

En la ingeniería en diseño es de gran ayuda el uso de técnicas y herramientas que faciliten la creatividad en su proceso de trabajo y la evaluación de conceptos para posibles propuestas innovadoras. El conocimiento de los parámetros que definen el proceso ayuda a aproximar la garantía de éxito. Asimismo, asienta las bases para prefigurar y definir el proceso del/la ingeniero/a en diseño contemporáneo (Chakrabarti 2013).

Los términos de creatividad e innovación se han definido y redefinido en muchos artículos y textos en función de las necesidades de la investigación en cuestión. Se define que la creatividad es la originalidad y diferenciación aplicada a un concepto en las distintas etapas de diseño y que la innovación es la implementación en el mercado de ideas creativas. Es decir que puede ser comercializado (Oman et al. 2014; Fogarty, Creanza y Feldman 2015; Jung y Chang 2016).

Para esta investigación se define la innovación como una nueva oportunidad que genera valor mediante una idea creativa, que en su desarrollo e implementación en el mercado tiene un resultado de éxito. Por consecuencia, se puede decir que si una idea implementada en el mercado no genera beneficios económicos a la empresa no es una idea innovadora, solo es una idea original.

En la ingeniería en diseño se enfrentan a una serie de retos importantes y extraordinarios. Se centran en la creación de nuevos productos con una visión de implementación en el mercado aportando valor a la humanidad. A su vez, son conscientes y expertos conocedores de las limitaciones fundamentales, tales como: el impacto en el medio ambiente, la eficiencia energética, la rentabilidad, la accesibilidad a todo perfil de personas o la simplificación de los procesos de fabricación.

El estudio realizado por Dumas et al., en el que plantea a numerosos académicos del sector la pregunta ¿cómo se pueden preparar adecuadamente a estudiantes de ingeniería de diseño para interactuar eficazmente con los retos de ingeniería de hoy en día?, concluye que el/la ingeniero/a en diseño debe ser consciente de que la nueva tecnología, los nuevos materiales y los sistemas deben ser diseñados por ellos/as. Además, añade que es fundamental el desarrollo de la solución creativa de problemas¹⁴ para la próxima generación de profesionales de la ingeniería en diseño, si quieren estar preparados para crear nuevos diseños adecuados a las necesidades de la sociedad futura (Dumas, Schmidt y Alexander 2016).

Mihály Csíkszentmihályi¹⁵, sugirió que la persona, el campo y el dominio son relevantes para la comprensión de la creatividad y la innovación. La investigación de la creatividad en las dos últimas décadas se ha basado cada vez más por una perspectiva de sistemas. Sternberg en su libro argumenta que la creatividad es un hábito, y que detrás de todas las innovaciones se encuentra la creatividad, por lo que se puede decir que las innovaciones surgen de un hábito. En este contexto se define hábito como “un patrón de comportamiento que una persona hace a menudo de una manera regular y repetida, que ha sido integrado, hasta convertirse en casi involuntario” («Merriam-Webster Dictionary» 2021; «Dictionary» 2021).

Es decir, se podría determinar que la creatividad se convierte en una forma de vida que la persona utiliza regularmente y sin apenas ser consciente de ello (Sternberg 2012).

La creatividad y la innovación son vitales para la realización del potencial del ingenio humano. El Dr. Udo Lindemann, experto investigador en el desarrollo sistemático de producto ingenieril afirma que, en la ciencia, la mayor parte de la investigación empírica es juzgar el resultado

¹⁴Término en inglés: “Creative Problem Solving”

¹⁵Mihály Csíkszentmihályi, psicólogo que ha destacado por su trabajo acerca de la felicidad, la creatividad, el bienestar subjetivo y la diversión, pero es más famoso por su creación de la teoría del flujo y por el trabajo que ha realizado durante mucho tiempo acerca de ese tema.

de un proceso creativo y no el proceso en sí; y que, si no se entiende el proceso creativo es difícil ser capaz de enseñar y entrenar la creatividad en el diseño de ingeniería de una manera eficiente (Editorial board of IJDCI 2013).

La investigación de la creatividad en la ingeniería comenzó sobre la década de 1950. Expertos y asociaciones sobre psicología (American Psychological Association - APA) y las áreas de la ciencia (National Science Foundation - NSF) muestran que los métodos de enseñanza de la creatividad a estudiantes de ingeniería son una de las principales preocupaciones para la mejora del nuevo profesional. Además, el contexto social actual está constituido por un mundo donde la tecnología define el ritmo del progreso y las pautas de vida en las sociedades (Gay 2016). El ingeniero como experto en el proceso creativo, desde el conocimiento científico, la técnica y la tecnología, tiene un papel clave en el diseño y creación de nuevos paradigmas en las sociedades futuras.

La unión de diseño e ingeniería permite englobar y aproximar los vínculos entre ciencia, tecnología y sociedad a un nivel profundo. El diseño desde la tecnología “puede ser identificado como el proceso de composición de la relación deseable entre la ciencia, la tecnología y la sociedad de una manera multifacética hacia el futuro, teniendo en cuenta el arte, la cultura y los sistemas sociales” (Taura 2016).

La industria está poniendo un mayor énfasis en el reclutamiento de personas de la ingeniería creativa debido al impacto de la innovación en el éxito económico y social. Esto requiere de la creatividad en la generación de ideas diferenciadoras y con visión innovadora. Así se proponen conceptos eficaces desarrollables desde los procesos de la ingeniería (Starkey, Toh y Miller 2016).

2.3.2. Ciencia de la ingeniería en el diseño.

En la teoría de diseño existe una obstinación en relacionar el método de diseño al método científico para la creación de una ciencia del diseño, aun habiendo demostrado que el diseño y la ciencia son claramente actividades muy distintas. Cross propone que sería más fructífero considerar el diseño como una tecnología, más que como una ciencia y establece las bases para ese punto de vista. Hace especial énfasis en la idea de que tanto el diseño como la tecnología implican la aplicación de modelos de conocimiento que no son del tipo puramente “científico” (Cross 2021; Cross, Naughton y Walker 1981). Por otro lado, Steven M. Smith afirma que el método científico se ha consolidado como el mejor método para explorar y explicar cualquier bloque de conocimiento (Editorial board of IJDCI 2013).

Para relacionar el proceso de diseño en la ingeniería, teniendo en consideración los sistemas complejos, este estudio toma como referencia la comparativa de Maldonado y Gómez (figura 2.7). Esta muestra cómo el modelado sistémico del proceso ingenieril, planteado en sistemas complejos, permite abordar retos de alta dificultad sin la necesidad de eliminar la incertidumbre, a su vez aportando resultados de mayor precisión (Maldonado y Gómez-Cruz 2011).



Figura 2.7. Esquema comparativo entre el proceso clásico y el proceso de sistemas complejos en ciencia e ingeniería. Adaptación de: Maldonado y Gómez-Cruz 2011.

La definición de diseño es amplia, se define:

1. “Crear, construir de acuerdo al plan ideado”(«Oxford Dictionary» 2021).
2. “El arte o la acción de concebir y producir un plan o dibujo de algo antes de que se haga” («Merriam-Webster Dictionary» 2021).
3. “Proyecto, plan que configura algo” («Real Academia Española» 2021).

Autores como Margolin y Buchanan, en su estudio “The idea of design” sobre distintos ensayos desde una visión de diseño de productos, definen diseño como una actividad proyectual que tienen la finalidad de producir objetos en un determinado contexto (Margolin y Buchanan 1995). Nigel Cross, cuando habla de la naturaleza del diseño dice “una de las características más básicas del ser humano es la de hacer una amplia gama de herramientas y otros artefactos para satisfacer su propio propósito” (Cross 2021, 2008).

Tanto académicos como profesionales han comenzado a examinar el diseño como un enfoque estratégico y alternativo a los procesos de desarrollo de productos y servicios tradicionales (Roper et al. 2016).

2.3.3. Innovación desde las tecnologías avanzadas.

El siglo XXI es considerado un periodo de grandes avances científicos, que han permitido un rápido desarrollo de tecnologías disruptivas en comparación con épocas anteriores. Tecnologías como computación, conectividad o robótica, junto a la tendencia hacia la convergencia de disciplinas de ingeniería tradicionales, han llevado al desarrollo de nuevos campos de interés, así como a la creación de nuevos paradigmas para la ingeniería que anuncian una era de inteligencia y convergencia¹⁶. El desarrollo de estos nuevos campos científicos ayudará a hacer frente a los retos del futuro y permitirá “construir sistemas adaptativos complejos, tales como: sistemas inteligentes de transporte multimodal, sistemas multienergéticos optimizados, sistemas inteligentes de prevención de desastres y ciudades inteligentes” (Noor 2012).

El profesor Clayton Christensen publicó por primera vez una investigación sobre la comprensión del valor de las tecnologías disruptivas en 1997. La tecnología disruptiva introduce nuevos paradigmas, posee la capacidad de iniciar nuevos mercados y nuevas industrias y cambia el estado de la competencia tecnológica de las empresas (Cheng et al. 2016).

El término innovación disruptiva define, una propuesta disruptiva desde la tecnología avanzada que provoca una extinción de los sistemas que le anteceden una vez implementada en el mercado con éxito (Vecchia-to 2016; Christensen, Raynor y McDonald 2015).

Expertos en la terminología de innovación y localización de esta en el mercado, como son Danneels, Markides, and Tellis, definen que una innovación disruptiva es “una innovación que cambia los parámetros de rendimiento, o las expectativas del consumidor, de un mercado al proporcionar radicalmente nueva funcionalidad”(Nagy, Schuessler y Dubinsky 2015).

La tecnología permite abrir paradigmas disruptivos que generen innovación en los incipientes mercados tecnológicos. Además, las tecnologías evolucionan a un ritmo que no suele estar sincronizado con la capacidad de los segmentos de mercado para explotar plenamente sus potenciales (Yang et al. 2016).

¹⁶ Los campos interdisciplinarios incluyen cibernética, ingeniería, sistemas de ingeniería, biomecatrónica / ingeniería robótica, ingeniería del conocimiento, ingeniería de sistemas y escalas múltiples

¹⁷ Este modelo describe cómo desarrollar un acorazado para la Marina Real.

2.3.4. Análisis de modelos de referencia en la ingeniería.

Aunque el modelo de proceso de desarrollo más antiguo que se ha visto data de 1920¹⁷, las discusiones sobre los procesos de diseño y desarrollo comenzaron firmemente poco después de la Segunda Guerra Mundial. En ese instante los grandes proyectos de ingeniería realizados exigieron nuevas técnicas para hacer frente a la creciente escala y complejidad de los retos (Dubberly 2008).

Un proceso se entiende como “una serie sistemática de operaciones que se llevan a cabo con el fin de producir algo”, o bien como el “conjunto de las fases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial”. A su vez, un modelo es considerado un “esquema teórico de un sistema, o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”(«Oxford Dictionary» 2021; «Real Academia Española» 2021).

En base a estas definiciones se podría determinar que un modelo de proceso es un esquema teórico y sistémico que se elabora para facilitar la comprensión del estudio o realización de una serie de operaciones que tienen el fin de producir algo.

Un proceso consta de una entrada (input) y una salida (output), entre los que se genera una transformación. Los procesos tienen una calidad fractal, lo que permite que se puedan añadir más fases para detallar etapas y sub-etapas dependiendo de la complejidad del proceso (Dubberly 2008).

Dada la diversidad de posibilidades que diferentes métodos están generando en algunos modelos actuales, se considera interesante estudiar en profundidad y definir de forma focalizada un proceso propio para la ingeniería en diseño, basado en procesos, metodologías y herramientas específicas del ámbito. Todo ello, con el fin de mejorar la eficiencia en el desarrollo e implementación con éxito de una propuesta de diseño ingenieril.

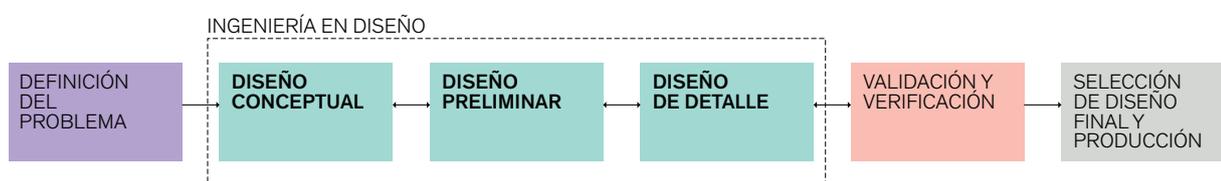
En el estudio sobre los modelos de proceso consolidados para la ingeniería en diseño, se determina como relevante la clasificación realizada por Howard, Culley y Dekoninck, mostrada en la tabla 2.3. Esta define la importancia de la comprensión del proceso de diseño ingenieril para gestionar la actividad de diseño y ayudar a la mejora de los productos en su eficiencia global en empresas que tienen como base creativa la ingeniería (Howard, Culley y Dekoninck 2008). En dicha tabla los autores han definido los límites del proceso de la ingeniería en diseño, resaltando las similitudes y diferencias entre las fases que contiene dicho proceso.

Models	Establishing a need phase	Analysis of task phase	Conceptual design phase	Embodiment design phase	Detailed design phase	Implementation phase				
Booz et al. (1967)	X	New product strategy development	Idea Generation	Screening & evaluation	Business analysis	Development	Testing	Commercialisation		
Archer (1968)	X	Programming	Data Collection	Analysis	Synthesis	Development	Communication	X		
Svensson (1974)	Need	X	Concepts	Verification	Decisions	X		Manufacture		
Wilson (1980)	Societal need	Recognize & formalize	FR's & Constraints	Ideate and create	Analyze and/or test	Product, prototype, process		X		
Urban and Hauser (1980)	Opportunity identification	Design			Testing		Introduction (launch)	Life Cycle management		
VDI-2222 (1982)	X	Planning	Conceptual design	Embodiment design	Detail design	X				
Hubka and Eder (1982)	X	X	Conceptual design	Lay-out design	Detail design	X				
Crawford (1984)	X	Strategic planning	Concept generation	Pre-technical evaluation	Technical development	Commercialisation				
Pahl and Beitz (1984)	Task	Clarification of task	Conceptual design	Embodiment design	Detailed design	X				
French (1985)	Need	Analysis of problem	Conceptual design	Embodiment of schemes	Detailing	X				
Ray (1985)	Recognise problem	Exploration of problem	Define problem	Search for alternative proposals	Predict outcome	Test for feasible alternatives	Judge feasible alternatives	Specify solution	Implement	
Cooper (1986)	Ideation	Preliminary Investigation	Detailed investigation	Development	Testing & Validation	X		Full production & market launch		
Andreasen and Hein (1987)	Recognition of need	Investigation of need	Product principle	Product design	Production preparation	Execution				
Pugh (1991)	Market	Specification	Concept design		Detail design	Manufacture	Sell			
Hales (1993)	Idea, need, proposal, brief	Task clarification	Conceptual design	Embodiment design	Detail design	X				
Baxter (1995)	Assess innovation opportunity	Possible products	Possible concepts	Possible embodiments	Possible details	New product				
Ulrich and Eping (1995)	X	Strategic planning	Concept development	System-level design	Detail design	Testing & refinement	Production ramp-up			
Ullman(1995)	Identify needs	Plan for the design process	Develop engineering specifications	Develop concept	Develop product	X				
BS7000 (1997)	Concept	Feasibility	Implementation (or realisation)					Termination		
Black (1999)	Brief/Concept	Review of 'state of the art'	Synthesis	Inspiration	Experimentation	Analysis/reflect	Synthesis	Decisions to constraints	Output	X
Cross (2000)	X	Exploration	Generation	Evaluation	Communication	X				
Design Council (2006)	Discover	Define	Develop	Deliver	X					
Industrial Innovation Process (2006)	Mission statement	Market research	Ideas phase	Concept phase	Feasibility Phase	Preproduction				

Tabla 2.3.
Modelos de Procesos en la ingeniería de diseño. Fuente: Howard, Culley y Dekoninck 2008.

Para afianzar las bases de este bloque de investigación se parte de los modelos sistémicos aplicados en la ingeniería actual. Esta parte permite plantear una visión prospectiva para un modelo sistémico predecible en la ingeniería en diseño contemporánea, cuyo reto requiere de los materiales avanzados como punto de partida del proceso de diseño, de modo que inspire a la creación de innovadores escenarios futuros.

Si se observa el proceso estándar de diseño en la ingeniería, los materiales tienen un papel fundamental. Su correcta selección permite realizar productos óptimos, funcionales y eficientes. Desde los orígenes de la ingeniería se han propuesto diversos workflows para definir un modelo genérico de diseño en la ingeniería. La mayoría concluyen en una secuencia clara: (1) definir el problema; (2) diseño de Ingeniería (en esta etapa se desarrolla el diseño conceptual, diseño preliminar, detalles y requerimientos de diseño); (3) validación y verificación; (4) selección del diseño final y producción (Corral et al. 2016; Suram y Bryden 2015; Pahl et al. 2007; Ertas y Jones 1996) (figura 2.8).



Para el diseño del modelo de proceso propuesto en esta investigación se han tenido en cuenta los parámetros de la figura 2.8 y se ha revisado e investigado de forma analítica la literatura escrita. Entre los estudios sobre modelos de proceso consolidados para la ingeniería en diseño, se determina como relevante la clasificación realizada por Howard, Culley y Dekoninck en su artículo “Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literatura”, mostrada en la tabla 2.4 (Howard, Culley y Dekoninck 2008).

Figura 2.8. Proceso de trabajo general en la ingeniería. Adaptación de: Suram y Bryden 2015.

Modelo	Año	Etapas	Descripción
Archer: Design Process	1968	3	Modelo de estructura prescriptible configurado para persuadir a los diseñadores con la finalidad de que adopten mejores formas de trabajo [27]
French: Design Process For Engineers	1985	5	Primer modelo aceptado para definir el diseño en la ingeniería, su proceso de trabajo y el papel del pensamiento de diseño en la conceptualización ingenieril [28]
Nigel Cross: Design Process	2000	4	Modelo descriptivo simple del proceso de diseño genérico, basado en las actividades esenciales que realiza el diseñador [27]
Michael F. Ashby	2009	5	Modelo para la innovación en proyectos de diseño ingenieril a través del conocimiento de los nuevos materiales y tecnologías emergentes, en especial desde los nanomateriales y nanotecnología [29]
Lean Design Methodology For Disruptive Innovation	2016	5	Modelo que combina las estrategias de negocios con la visión de innovación en productos-servicios y sistemas desde las tecnologías disruptivas [30].

Tabla 2.4. Modelos de referencia en Procesos de Ingeniería y Diseño. Elaboración propia.

Por tanto, a continuación se describen los procesos seleccionados.

Modelo Archer: Design process (1968).

El modelo definido por Archer se basa en la estructura de un modelo prescriptible configurado para persuadir a los diseñadores y las diseñadoras con la finalidad de que adopten mejores formas de trabajo. En este caso el proceso es más sistemático y algorítmico de lo habitual y requiere mayor trabajo analítico para la generación de soluciones. La intención es poder entender perfectamente la problemática, su origen y el por qué de esta. Este modelo incluye interacciones entre el exterior y el propio proceso de diseño. También se consideran los inputs del cliente, la experiencia del diseñador y los output para la comunicación de la solución.

Archer divide el proceso en tres principales fases que son constituidas por seis etapas de proceso. Las fases son: (1) fase analítica, (2) fase creativa y (3) fase ejecutiva (Cross 2021).

La fase analítica lista todos los requerimientos de diseño para definir el grupo de especificaciones lógicas necesarias para identificar correctamente la problemática. Esta fase incluye la etapa de (a) programming y (b) data collection. En la etapa programming se definen las cuestiones más importantes mientras que en la etapa data collection se recoge toda la información necesaria.

La fase creativa propone posibles soluciones a cada una de las especificaciones definidas en la fase analítica. En esta fase se incluyen las etapas de (c) analysis, (d) synthesis y (e) development. En la etapa analysis se identifican los subproblemas y especificaciones concretas; en synthesis se plantean las propuestas de diseño y en development se realizan los prototipos para la validación final.

La fase ejecutiva implementa las directrices de viabilidad y contempla la etapa de (f) communication. En esta es donde se genera la documentación para la fabricación industrial.

Modelo French: Design process for engineers (1985).

El modelo de proceso de diseño en la ingeniería de Michael J. French es uno de los referentes históricos, define por diseño todo proceso de ideación, invención, visualización, cálculo, gestión, refinamiento y especificación de detalles que determina la forma de un producto de ingeniería (French 1985; Cross 2021)

El modelo se basa en definir el proceso desde cuatro principales fases: (1) análisis del problema, (2) diseño conceptual, (3) realización de esquemas y (4) definición de los detalles.

El proceso empieza con una fase inicial de búsqueda de oportunidades cubriendo una necesidad real. Una vez definido el problema, se pasa al análisis del problema. A continuación, se define el marco del problema que permite pasar a la generación de

soluciones para la conceptualización de diseño. Esta da paso a la fase más exigente, la de realización de esquemas, en ella se deben tener en cuenta todos los inputs externos para la definición de aspectos comerciales y técnicos, entre otros. En ésta, los esquemas se trabajan con mayor profundidad y desde estos esquemas se entra en la fase definición de los detalles. Finalmente se genera la documentación para la fabricación industrial.

Modelo Nigel Cross: Design process (2000).

En su estudio por la comprensión de los modelos de diseño aplicados en el proceso de diseño de la ingeniería, Cross desarrolló un modelo descriptivo simple del proceso de diseño genérico, basado en las actividades esenciales que realiza el diseñador o la diseñadora. Este modelo dividido en cuatro fases fue destacado por incluir y consolidar la comunicación en el proceso de diseño como parte básica del proceso: (1) exploración, (2) generación, (3) evaluación y (4) comunicación.

La exploración es la parte que corresponde al estado del arte de un problema localizado y es la etapa que permite definir el problema. La generación es la etapa que permite crear un concepto después de una exploración inicial del problema. Son las primeras propuestas y permite desarrollar las capacidades de visualización de un diseñador. Después de la selección de la posible propuesta de diseño, esta se encuentra sujeta a evaluación con respecto a los objetivos, requerimientos, cálculos, restricciones y criterios del diseño. Una vez evaluado se pasa a la comunicación de un diseño. Esta etapa es definida por Cross como esencial en la actividad global del diseñador, ya que permite la correcta producción de un artefacto en industria y la comprensión de la funcionalidad pensada y estudiada (Cross 2021).

Modelo Michael F. Ashby (2009).

A través del conocimiento de los nuevos materiales y tecnologías emergentes, en especial desde los nanomateriales y nanotecnología, Michael F. Ashby junto a Paulo J. Ferreira y Daniel L. Schodek, proponen un modelo para la innovación en proyectos de diseño ingenieril. Este se basa en un proceso específico que tiene como objetivo integrar estos conocimientos técnicos dentro del proceso creativo, desde el enfoque sistémico. Plantean un modelo basado en un proceso iterativo, en el que la clave está en generar iteraciones convergentes de ida y vuelta entre fases para encontrar resultados óptimos (Ashby, Ferreira y Schodek 2009).

Dicho modelo se divide en cinco principales fases: (1) los requerimientos del diseño que vendrán dados del estudio de las necesidades del mercado; (2) conceptualización, (3) realización, (4) detalles de la propuesta diferenciadora y (5) especificaciones de viabilidad de producto.

Los autores apuntan que una de las principales diferencias de este modelo, respecto a otros relacionados con el proceso de diseño de producto, está en el desarrollo en profundidad de los detalles constructivos y técnicos del proyecto. En la mayoría de modelos, se define la descomposición del problema en muchos sub-problemas en las primeras fases. Pero este modelo propone que no todos los sub-problemas tienen que ser resueltos en la fase inicial. Dado que hay problemas principales que pueden quedar tapados por los sub-problemas, en este modelo se plantea el análisis de los detalles a posteriori. Uno de sus puntos más importantes es la generación de prototipos, los cuales tienen que ayudar a analizar el diseño y el proceso de integración.

Modelo lean design methodology for disruptive innovation (2016).

Las empresas de base tecnológica buscan innovar continuamente a pesar de que los consumidores no son capaces de utilizar todas las funciones y características de la tecnología. Las innovaciones disruptivas son bienvenidas para equilibrar la diferencia entre el valor intrínseco de las innovaciones tecnológicas y el valor económico percibido por los distintos segmentos de clientes. El definir claramente las características de la innovación disruptiva y el uso de un método estructurado de resolución de problemas que incluya la metodología de estrategia de mercado y de diseño, permite acercarse a este tipo de resultados que un target localizado de consumidores espera.

Brat et al. han definido un modelo que “combina análisis de mercado con la innovación del modelo de negocio y la evolución del sistema dirigido, junto con una propuesta de diez vectores de la invención para provocar la interrupción de las tecnologías existentes en el mercado” (Brad, Murar y Brad 2016).

2.3.5. Síntesis de los modelos de referencia en la ingeniería.

Como síntesis de los modelos estudiados se muestra una comparativa en la que se analizan y clasifican los procesos de dicha selección. Estos se orientan en base a las etapas del proceso de trabajo general de la ingeniería en diseño de la figura 2.8. Los cinco, son modelos sistémicos aplicados en la ingeniería actual que presentan una relación con la selección de materiales. A su vez, permiten abordar retos complejos sin la necesidad de eliminar la incertidumbre. Por tanto, se determina que los modelos que dan la base a este estudio son los indicados en la tabla 2.4.

Como resultado de este análisis se muestra un gráfico del estudio que pone en relevancia las similitudes entre las fases que contienen los seis procesos (figura 2.9).

	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	DISEÑO CONCEPTUAL	DISEÑO PRELIMINAR	DISEÑO DE DETALLE	VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN	SELECCIÓN DE DISEÑO FINAL Y PRODUCCIÓN
Archer: Design Process (1968)	Fase analítica Programación Recolección de datos	Fase creativa Análisis Síntesis Desarrollo			Fase ejecutiva Comunicación	
French: Design Process for Engineers (1985)	Análisis del problema Necesidad Oportunidad Marco del problema	Conceptualización de diseño Generación de soluciones		Realización de esquemas Análisis inputs Aspectos comerciales Aspectos técnicos		Definición de detalles Documentación Fabricación industrial
Nigel Cross: Design (2000)	Exploración Definición problema	Generación Creación conceptos Primeras propuestas Visualización		Evaluación Objetivos Requerimientos Cálculos Restricciones Criterios de diseño		Comunicación Producción en la industria Compresión funcionalidad
Michael F. Ashby (2009)	Necesidades de mercado Requerimientos de diseño	Conceptualización Especificaciones Estructura funcional Principios de diseño Evaluación y selección	Realización Desarrollo composición, escala, forma Ensamblaje Optimización de funciones Evaluación y selección		Detalle Análisis componentes Materiales y procesos Optimización Planos	
Lean Design Methodology for Disruptive Innovation (2016)	Tecnología de gama alta Selección y entendimiento Extracción de brechas Identificación consumidores Identificación "blue ocean"	Generación nuevos espacios de ideación Análisis resultados (diferentes perspectivas) Detalle soluciones Solución conflictos Definición soluciones disruptivas			Especificación de producto Viabilidad	

Figura 2.9. Análisis gráfico de los modelos de referencia seleccionados respecto al proceso general de la ingeniería en diseño. Elaboración propia.

2.4. Materiales avanzados en nanotecnología disruptiva.

Lo que distingue la actual época de la pasada es la tardía conciencia del significado de la tecnología en las cuestiones humanas. En un segundo término se puede decir que uno de los hechos que ocurren actualmente es que se cohabita con un ritmo acelerado del desarrollo tecnológico que, a su vez, forma parte de la vida cotidiana de forma progresiva. Otro de los inputs a valorar es la incipiente comprensión de que la tecnología está relacionada con las actitudes humanas (Basalla 1991).

Actualmente se vive en un momento de cambio de era social e industrial, que también plantea una tercera revolución industrial de carácter tecnológico y sostenible que fomentará nuevas sociedades futuras de autoabastecimiento mediante incipientes energías fruto de las tecnologías emergentes. Esta revolución viene dada de entender la nueva escala métrica, energética y tecnológica que será definida por recientes avances científicos.

Existe un gran impulso de nuevos conceptos y desarrollos en la ciencia de los materiales, los cuales están propiciando cambios revolucionarios en la sociedad actual; se considera indiscutible el protagonismo de los materiales en la vida de las personas. Los avances en la ciencia e ingeniería de los materiales mantienen una estrecha relación con la innovación tecnológica. Las tecnologías cambian las culturas sociales, políticas y económicas (Cela-Conde y Ayala 2017; Singer et al. 1958).

Las Key Enabling Technologies (KETs), concepto acuñado por la Comisión Europea (CE) y consideradas elementos vitales en la estrategia europea (European Commission 2016), definen las 6 tecnologías emergentes que tienen una capacidad directa e indirecta para abordar los principales desafíos sociales, mejorar la competitividad, generar empleos y contribuir al crecimiento económico. Dichas tecnologías se basan en el dominio de conocimientos tales como las tecnologías avanzadas de fabricación; los materiales avanzados; la fotónica; la biotecnología industrial; la micro y nanoelectrónica y la nanotecnología («European Commission» 2021; Páez-Avilés, Juanola-Feliu y Samitier 2018).

En este momento el paradigma métrico, energético y tecnológico que se presenta de carácter revolucionario es creado en una nueva escala métrica, la escala nano. Para comprender este paradigma se debe entender que la nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a escala nano. Entre las definiciones más afianzadas y utilizadas está la adoptada por “The Royal Society and the Royal Academy of Engineering”, la cual define la nanotecnología como “el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas controlando el tamaño y la forma a escala nano numérica, entre los 100 y 0.2 nanómetros”¹⁸ (Royal Academy of Engineering 2016; Dowling et al. 2004).

La “National Science and Technology Council” define nanotecnología como “la investigación y el desarrollo de tecnología a escala atómica, molecular o macromolecular, con una longitud aproximada del rango de entre 1-100 nanómetros, para crear una comprensión fundamental de los fenómenos y materiales en escala nano y para crear estructuras, aparatos y sistemas que tengan propiedades y funciones inéditas por su pequeño y/o intermedio tamaño” (National Science and Technology Council Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering 2011).

Otra definición dada recientemente es que “la nanotecnología es la comprensión y el control de la materia a un tamaño comprendido entre

¹⁸ Frase traductor: “as the design, characterisation, production and application of structures, devices and systems by controlling shape and size at the nanometre scale”.

aproximadamente 1 y 100 nanómetros (nm), donde los fenómenos únicos permiten nuevas aplicaciones no es factible cuando se trabaja con materiales a granel o incluso con átomos o moléculas individuales" (Toumey 2016). Es sabido que hay una escala en particular y que ciertos fenómenos son exclusivos de esa escala. Los elementos y los procesos no sólo son más pequeños en la nanoescala, sino que también son diferentes.

Trabajar a esta escala ha permitido la producción de una serie de avances científicos que han propiciado el acercamiento de creativos, diseñadores y desarrolladores de producto. La nanotecnología está revolucionando la ciencia, la biomecánica, la medicina y los productos de consumo. Ejemplos tales como: la aplicación de nanotecnología en el campo biomédico en la administración de fármacos para el tratamiento del cáncer, ha generado gran interés en la investigación de la transferencia de calor nano y el flujo de fluidos (Ghassemi y Shahidian 2017); Se ha generado un amplio campo de posibilidades en el sector de la ortopedia proporcionando recientes avances en la ingeniería de tejido óseo, materiales implantables y biocompatibles (Garimella y Eltorai 2017); también es el caso de la industria de la alimentación y envasado inteligente para la prevención de la contaminación (Dilmaçunal 2017) o el desarrollo de materiales de envasado de alimentos menos contaminantes, más económicos y más eficientes (G.Ponce et al. 2018).

El origen de este planteamiento científico fue propuesto por el premio Nobel Richard Feynman en 1959 en su discurso "There is plenty of Room at the Bottom", conferencia pronunciada en la reunión anual 'American Physical Society' en el Instituto de Tecnología de California en Pasadena. En su discurso el físico advirtió que no hay nada en las leyes físicas que impida al ser humano manipular, diseñar y controlar cosas a escala microscópicas (Feynman 1959).

Los nanomateriales son materiales que contienen nanopartículas, de un tamaño que no supera los 100 nanómetros al menos en una de sus dimensiones. No son materiales descubiertos, sino formas nanométricas de materiales conocidos como oro, plata, platino, hierro y otros. Cuando estos mismos materiales se sintetizan con tamaño nanométrico suelen mostrar cambios apreciables en sus propiedades. (Ashby, Ferreira y Schodek 2009; Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología 2009).

Aunque el término de nanociencia se considera relativamente nuevo, las nanopartículas de carbón se han estado utilizando para el refuerzo de ruedas por lo menos durante 100 años. Además, desde hace millones de años la naturaleza ha utilizado su propia nanotecnología para desarrollarse, como por ejemplo, es el caso del proceso de la fotosíntesis (Ashby, Ferreira y Schodek 2009).

2.4.1. Materiales de base carbono.

El carbono es uno de los elementos más abundantes de la naturaleza y tiene la capacidad de combinarse químicamente consigo mismo y con otros elementos mediante fuertes enlaces covalentes. Esta combinación puede dar lugar a una gran variedad de estructuras que permiten el desarrollo de materiales con propiedades muy diferentes: materiales extremadamente duros y aislantes, o fácilmente deslaminables y altamente conductores, o muy densos y con una alta resistencia mecánica (Borrell y Salvador 2015).

En el campo de la nanociencia, un descubrimiento como el del Grafeno en 2004 por los físicos Andre Geim y Konstantin Novoselov y a los que posteriormente se les otorgó el premio nobel de física por dicho descubrimiento en 2010 («The Nobel Prize» 2018), ha causado una auténtica revolución científica y tecnológica creando expectativas más allá de lo imaginable (Menéndez y Blanco 2014; Geim y Novoselov 2007).

A partir de ese instante, la investigación sobre este nanomaterial bidimensional ha creado un substancial cuerpo científico de conocimiento. En consecuencia, el aumento de aplicaciones en Grafeno ha sido exponencial y con el respaldo para la creación de un mercado industrial que ha desembocado en un gran interés por adquirir y proteger la propiedad intelectual en todos los posibles procesos y aplicaciones del mismo. Es significativo destacar el índice que se determina en 2014 respecto al número de patentes de Grafeno, ya que destaca por haber superado significativamente el de otros materiales de referencia en la historia, incluyendo el Silicio (Zurutuza y Marinelli 2014).

Este hallazgo se considera de extremado valor y se convierte en el nanomaterial del que se espera una revolución mayor que la que representó el silicio o el oro en su momento. Además, “los experimentos que permite el Grafeno suponen un punto de inflexión en los fenómenos de la física cuántica” (Garcia Naumis 2010).

Antonio Castro Neto del departamento de física de Boston University afirma que “el progreso y el desarrollo humano siempre ha sido caracterizado por los avances en el control de los materiales”. Desde la prehistoria los seres humanos han utilizado los materiales para la confección de tecnologías que permitan modificar en su beneficio el medio que le rodea” («Boston University: Physics Department» 2016).

Actualmente, la investigación sobre grafeno es una de las áreas de mayor crecimiento en la ciencia, pero sigue siendo un campo novel. Aun existiendo desafíos y oportunidades para su investigación, el grafeno sigue sin ser un material de estado sólido estándar (Castro Neto 2010)

2.4.2. Materiales bidimensionales grafénicos.

El grafeno destaca por su variedad en propiedades inusuales obtenidas a escala nano y en un estado molecular bidimensional, algunas de estas no encontradas en otros materiales hasta el momento. Este material ha abierto un nuevo campo de investigación en escala y dimensión. A su vez, la investigación en materiales grafénicos está generando un intenso interés de inversión y desarrollo en todo el mundo. Son muchos los países que han iniciado programas de I+D sobre grafeno para posicionarse en innovación. El descubrimiento del grafeno ha causado una auténtica revolución científica y tecnológica creando expectativas más allá de lo imaginable (Menéndez y Blanco 2014; Castro Neto 2010).

Este nanomaterial es uno de los más recientes descubrimientos nanotecnológicos y ha llegado de la mano del Premio Nobel de Física de 2010, que fue otorgado a Andre Geim y Konstantin Novoselov (Geim y Novoselov 2007).

En enero de 2013, Graphene Flagship fue seleccionado como un consorcio financiado por el programa Future and Emerging Technologies (FET) de la Comisión Europea. El grafeno se ajustó a los requisitos de financiación para la investigación en Europa porque existía una comunidad de investigadores y empresas que trabajaban para cumplir las expectativas trazadas (Alvial-Palavicino and Konrad 2018). Desde entonces, el consorcio ha ido creciendo con el paso de los años y ha afianzado las bases para el estudio de “Graphene and related materials” (GRM)¹⁹. A continuación se muestra el estudio de Graphene Flagship que contextualiza tecnología e innovación para los GRM (figura 2.10) (Döscher et al. 2021).

¹⁹ Graphene and Related Materials (GRMs), es decir materiales grafénicos o relativos al grafeno.

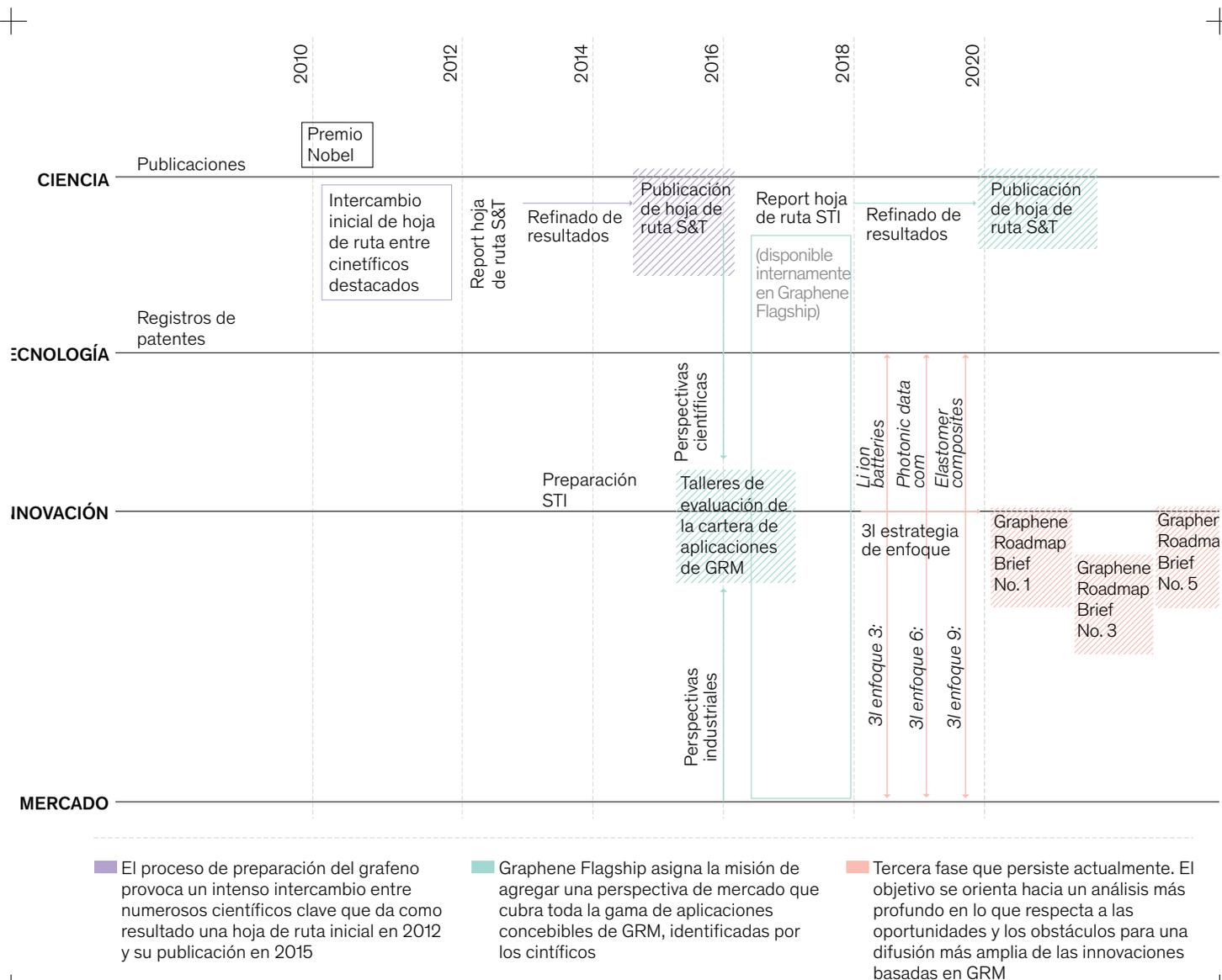


Figura 2.10. Contexto histórico de la hoja de ruta: tecnología e innovación para GRMs en Graphene Flagship. Fuente: Döscher y Reiß 2021.

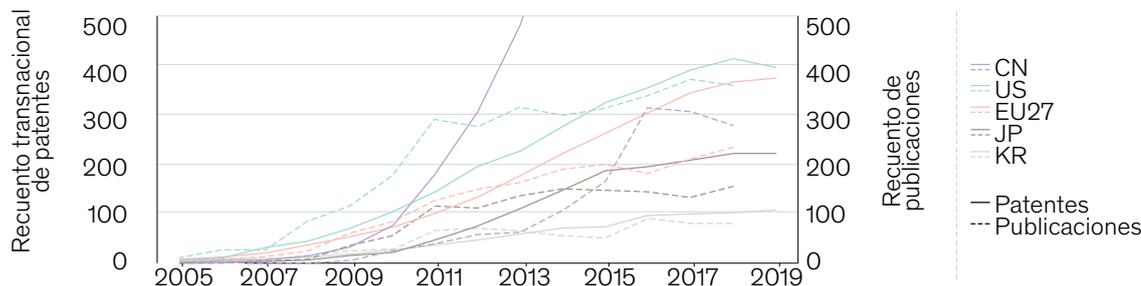


Figura 2.11.

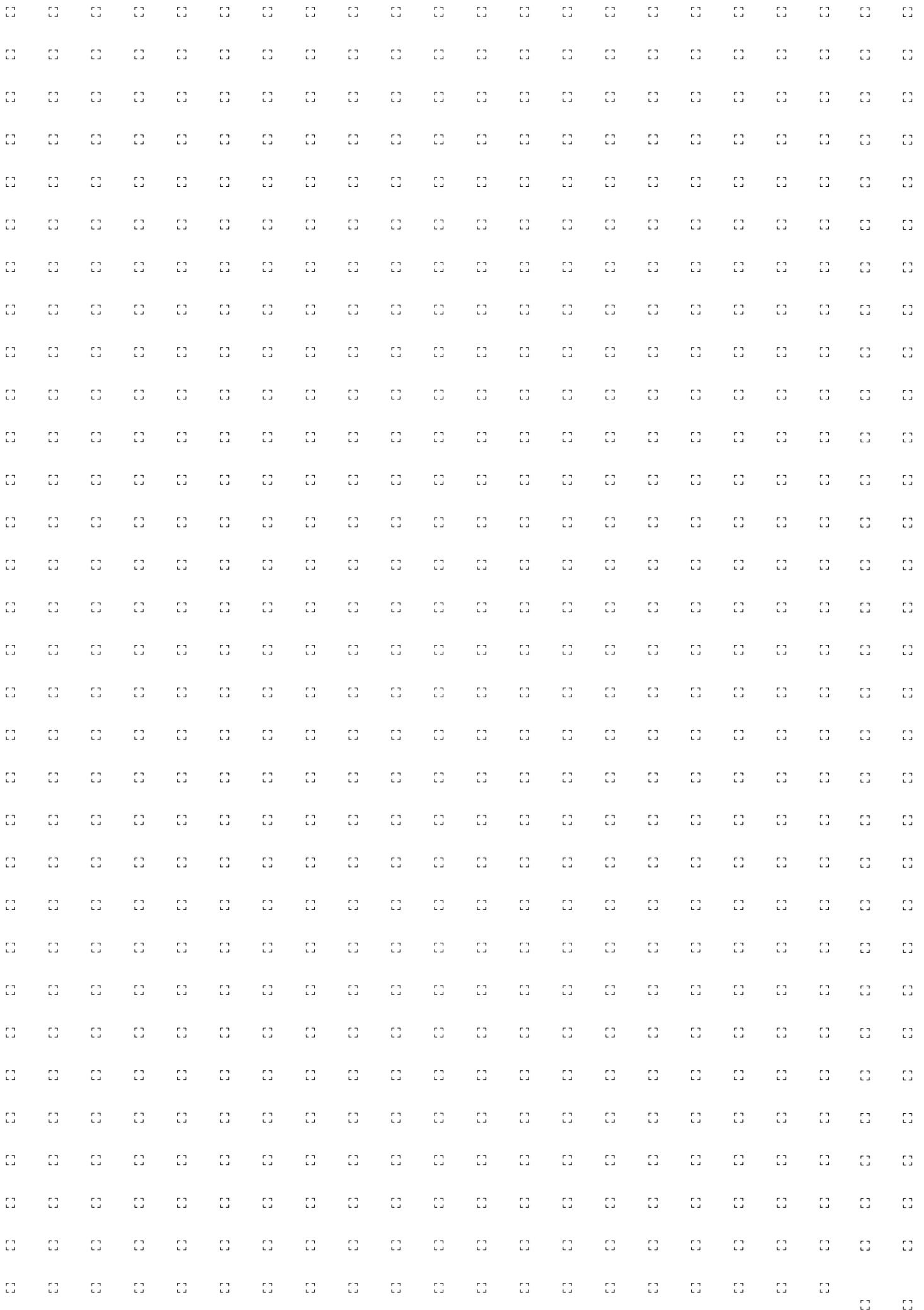
Panorama global de innovación basado en registros de publicación y patentes en materiales grafénicos. Fuente: Döscher y Reiß 2021.

El análisis publicado por Henning Döscher y Thomas Reiss en su informe “Graphene Roadmap Briefs (No. 1): innovation interfaces of the Graphene Flagship” muestra que los principales países investigando y generando patentes en grafeno son China, Estados Unidos y Europa. En diferentes intensidades, desarrollos muy similares ocurrieron en la mayoría de los mercados globales. El número de patentes se desarrolló con una mayor dinámica en los primeros años y sobre 2011 se llegó a una saturación en patentes. En paralelo el número de publicaciones pasaba de un comportamiento exponencial a otro lineal, especialmente entre los años 2017-2019 (figura 2.11) (Döscher et al. 2021).

El grafeno ha generado numerosas nuevas teorías en la ciencia fundamental. Es por ello que ha incentivado a la investigación y estandarización de los procesos y protocolos industriales frente a la responsabilidad de este material en la sociedad actual (Vijaya Kumar y Pattammattel 2017).

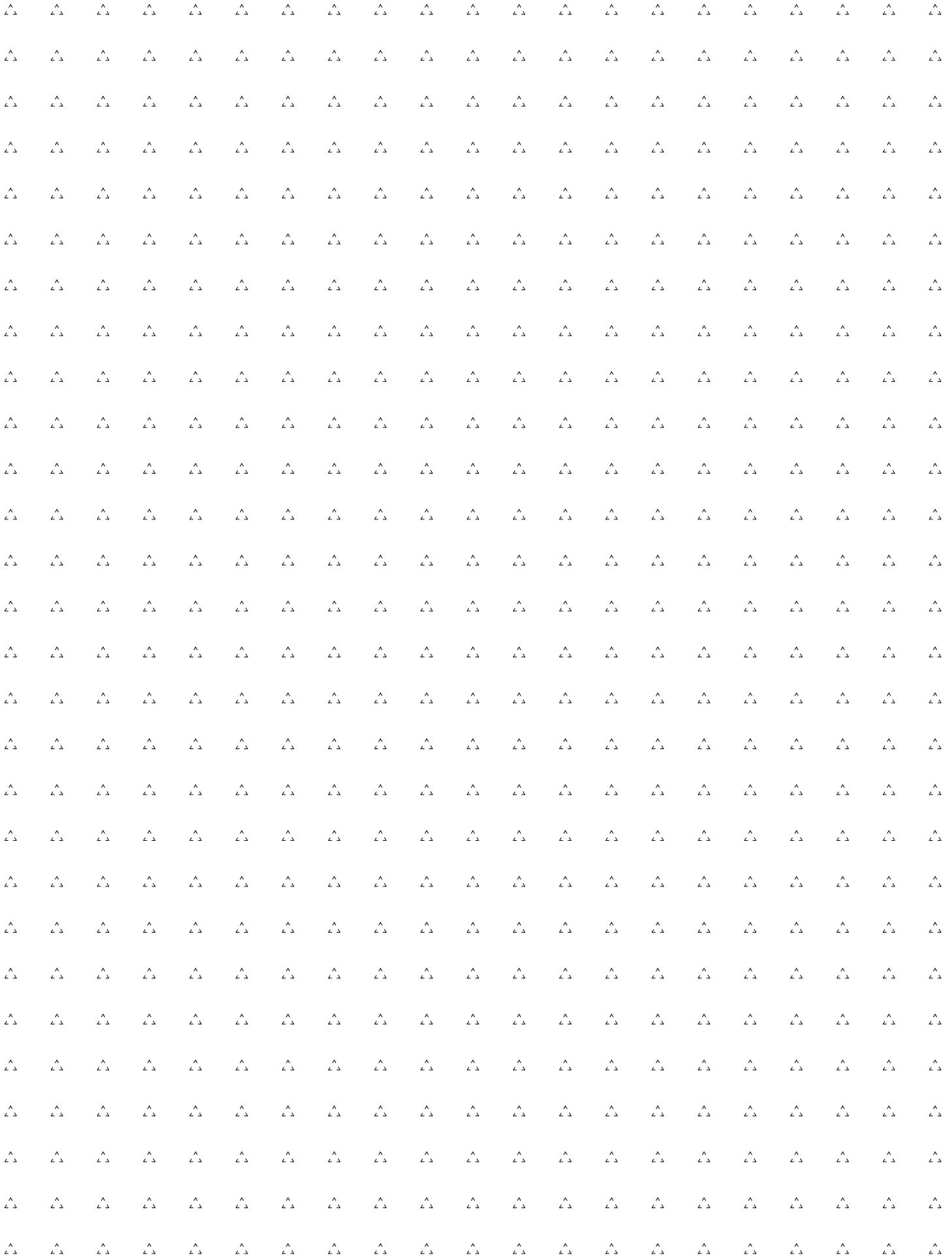
Las principales áreas y aplicaciones de materiales grafénicos son en materiales compuestos; almacenamiento y generación de energía, electrónica, fotónica, sensores y datos; y tecnologías biomédicas (Kinaret 2018; Meister et al. 2017).

El grafeno ha sido un catalizador en aplicaciones de dispositivos electrónicos portátiles. Se destacan como más relevantes: (1) *aplicaciones de sensores físicos portátiles*, utilizados para controlar el movimiento de partes del cuerpo humano o un estímulo externo a través de la medición de datos físicos, incluida la presión, la torsión, el estiramiento y el tacto (propiedades piezoresistivas y mecánicas); (2) *usos sanitarios y aplicaciones bioelectrónicas*, para detección física, dispositivos *bioelectrónicos* que pueden describirse como sistemas no invasivos que se integran directamente en el cuerpo humano, la monitorización de la temperatura, detección de bioseñales tales como el latido del corazón, la cantidad de glucosa o bacterias presentes en el cuerpo o medición de oxígeno en la sangre (propiedades de nanosensórica y conductoras); (3) *almacenamiento y recolección de energía*, dispositivos autoalimentados, como sensores táctiles portátiles y dispositivos de comunicación asistida, que pueden cargarse mediante un simple movimiento del cuerpo sin una fuente de alimentación externa (H. Kim and Ahn 2017).



3. Exploración práctica.

Diseñar mediante materiales avanzados como proceso de innovación.



En el proceso de diseño de ingeniería, existen varias metodologías y herramientas que son utilizadas para que durante el proceso de diseño se pueda obtener la selección de materiales óptima en función de las necesidades de diseño (Maine y Ashby 2017). La mayoría de estas herramientas basadas en ciencia de la ingeniería de materiales, están definidas por sistemas paramétricos y cuantitativos. Estos son usados principalmente en la fase de diseño de detalle del desarrollo de nuevos productos.

Este capítulo describe y desarrolla el estudio teórico y práctico realizado para definir un proceso de diseño eficiente que permita, en la ingeniería, ayudar a la creación de nuevas propuestas disruptivas, teniendo como punto de partida el conocimiento científico en materiales avanzados.

1. Definir un modelo sistémico predecible para el proceso del ingeniero de diseño industrial, facilitando la búsqueda de la eficiencia durante el proceso creativo desde el conocimiento científico.
2. Consolidar los parámetros de valor (las variables del modelo) para la definición de un modelo sistémico predecible desde el análisis en estudios de casos.

El contexto de diseño en el que una oportunidad de mercado empresarial depende de la capacidad de innovación, requiere de un perfil de diseñador o diseñadora con una visión sistémica fundamentada en un mayor conocimiento científico (Grajewski et al. 2015). El verdadero cambio estará en que profesionales del diseño y la ingeniería tengan un proceso de diseño que facilite la integración de este conocimiento proporcionado. A su vez, una reducción en el gap temporal actual para el avance tecnológico (Diamond 2016). Es por ello que, el diseño desde la ingeniería tiene un papel relevante en la actualidad debido a la tendencia que existe de que los nuevos materiales de propiedades inusuales, las tecnologías que se están desarrollando en torno a ellos y las nuevas industrias digitales prefiguren el futuro (Bleuzé et al. 2014).

Históricamente las tecnologías se encontraban vinculadas a centros de investigación y a sectores productivos que podían asumir los costes de implantación de dicha tecnología y como consecuencia no se encontraban al alcance de todos (González, Fernández y Peña 2015). El disponer de fácil acceso a nuevos materiales de perfil disruptivo y facilitados por publicaciones en revistas científicas («ScienceDirect» 2021), programas de selección de materiales, materialotecas y empresas como CES («CES selector» 2021), MATWEB («Matweb» 2021), MATERFAD («Materfad» 2021), entre otros, permiten crear desde las propiedades de los materiales de forma distinta en el inicio de un proceso creativo (Cheng et al. 2016).

Existen algunas propuestas y modelos de proceso en diseño ya consolidados que plantean la necesidad de poner en valor el conocimiento en materiales en el proceso de diseño desde distintos enfoques. Ashby defiende la necesidad de incluir el proceso de selección de materiales en el diseño desde la conceptualización de una propuesta y no esperar al desarrollo de la propuesta (Maine y Ashby 2017). Karana sin embargo propone comprender las relación entre material, producto y personas, comprender el material desde tocarlo hasta definirlo tanto técnicamente como sensorial o experimentalmente (Karana et al. 2016, 2015). Según

Maeda a cada contexto en la era de los datos se le asigna una misión, a la ciencia la de exploración; a la ingeniería la de invención; al diseño la comunicación; al Arte la expresión, a este enfoque planteado en 2007 se le denomina *Bermuda Quadrilateral*. Poco después, Oxman concreta dicho enfoque con el *The Krebs Cycle of Creativity*, donde propone una visión global que une el conocimiento científico en el desarrollo de soluciones para problemas empíricos de la ingeniería frente al papel de la ciencia en proporcionar conocimiento y predecir posibilidades. Así como entender que el diseño consiste en producir soluciones que maximicen y aumenten la experiencia humana frente al papel del arte, que es el de cuestionar el comportamiento humano y crear conciencia del mundo que nos rodea (Antonelli y Burckhardt 2020; Oxman 2016).

Estamos en un momento histórico en el que los materiales no tienen limitaciones constructivas o implementables en de desarrollo de una propuesta, se dispone de un amplio abanico de posibilidades que ofrece la oportunidad de diseñar un material en base a unos requerimientos técnicos específicos. A pesar de este contexto, existe un desconocimiento de las amplias posibilidades de estos en características innovadoras, dinámicas y avanzadas. Algunos ni siquiera están caracterizados, forman parte de descubrimientos en laboratorios. Esto implica que haya un *gap* entre los descubrimientos en la ciencia de materiales avanzados y la implementación en el proceso de diseño. En consecuencia, también en la industria de futuro.

Es por ello que este capítulo propone un modelo transversal que determine el proceso de trabajo en la ingeniería de diseño más próximo a las necesidades futuras y que integre el conocimiento y procesos conocidos hasta el momento. Una vez definido se lleva a evaluación mediante su implementación en el desarrollo de proyectos de ingeniería en diseño.

Este estudio propone como resultado un modelo final que permite definir un esquema general de proceso de diseño en la ingeniería para innovación disruptiva.

3.1. Modelo transversal del proceso en ingeniería de diseño.

Esta sección tiene como objetivo afianzar las bases de un modelo de esquema general de proceso de diseño en la ingeniería que ha sido aplicado en el grado de ingeniería en diseño industrial de Elisava, facultad de diseño e ingeniería de Barcelona.

En primer lugar se muestra los dos pasos principales que se han seguido en el desarrollo de la herramienta y que ha permitido dicha definición, también como se ha concretado la estructura de trabajo. En segundo lugar se explica la metodología de estudio e ítems de evaluación en base a los objetivos de investigación. En tercer lugar se exponen los resultados estadísticos de los Test realizados, así como 4 estudios de caso. Todo ello para finalmente concluir con la justificación de resultados y siguientes pasos a realizar.

En referencia al análisis realizado de los modelos mostrados en el apartado 2.3.4 de esta tesis doctoral, se observa la necesidad de unificar y proponer un nuevo modelo genérico para este estudio, así como la unificación de acciones y términos propios en el contexto mostrado en esta investigación. En este se define el proceso en la ingeniería de diseño en 6 principales etapas y se relaciona con el considerado proceso de trabajo general en la ingeniería mostrado en la figura 2.8. Una vez comparados se describen las acciones posibles dentro de cada etapa (figura 3.1).

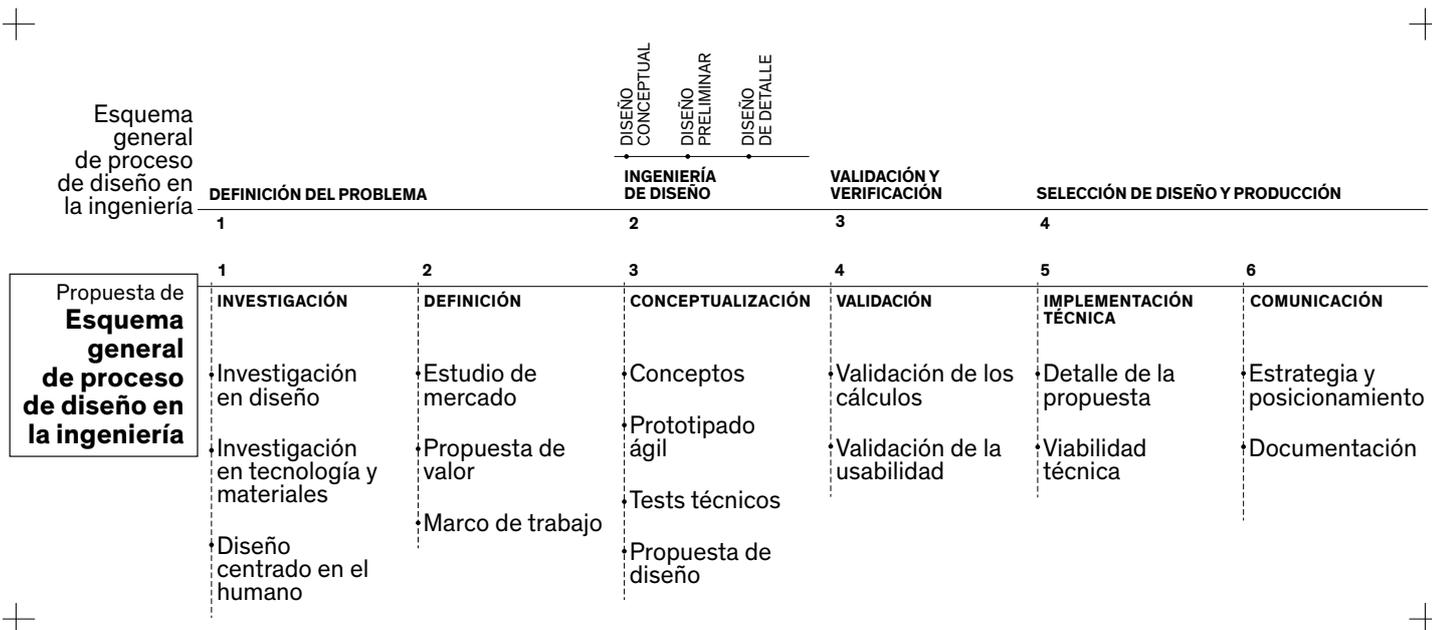


Figura 3.1. Gráfico de análisis entre proceso de trabajo general en la ingeniería y el propuesto para el estudio en esta tesis doctoral. Elaboración propia.

Todo proceso de diseño está formado por una serie de convergencias y divergencias en el tiempo, asociadas al volumen de información encontrado o ítems a resolver (divergencia) frente a la toma de decisiones (convergencia). Algo importante a tener presente en el diseño de un proceso que pretende reflejar de forma clara como se trabaja.

Es por eso que, en la definición del modelo expuesto en este capítulo de tesis, se han tenido presente el modo en como se definen las etapas de un proceso, el significado de las etapas y actividades que la conforma, así como la unificación de términos similares. También se considera importante expresar una estimación en el tiempo de la convergencia y divergencia de trabajo frente a las etapas. Para la comprensión del proceso expuesto, se ha diseñado un esquema funcional que se muestra de forma gráfica en la figura 3.2.

Dicho proceso se ha experimentado e implementado en Elisava facultad de diseño e ingeniería de Barcelona desde 2015 hasta la actualidad en el grado en ingeniería de diseño industrial. Los resultados han sido claramente significativos y se muestran durante esta investigación (Llorach-Massana y Fernández 2018; Corral et al. 2016).

El proceso definido para este estudio se divide en 6 principales etapas que se describen a continuación:

Dicho proceso parte de definir un reto, este será el punto de partida del proceso. Se toma como inicio del proceso una de las propiedades inusuales más significativas de los materiales avanzados. Es importante determinar aquellas que no existen en ningún otro material cotidiano.

En la primera etapa, la de investigación, es una etapa divergente. Tiene el objetivo de investigar desde la revisión de literatura científica. Cada punto de partida, antes de la propuesta, debe ir correctamente avalado por la publicación de uno o varios artículos científicos que permitan confirmar su viabilidad y capacidad de implementación futura. También poder comprender el funcionamiento de los inputs y outputs en estos materiales incipientes. A su vez se considera la necesidad de explorar y entender el contexto de diseño para su implementación.

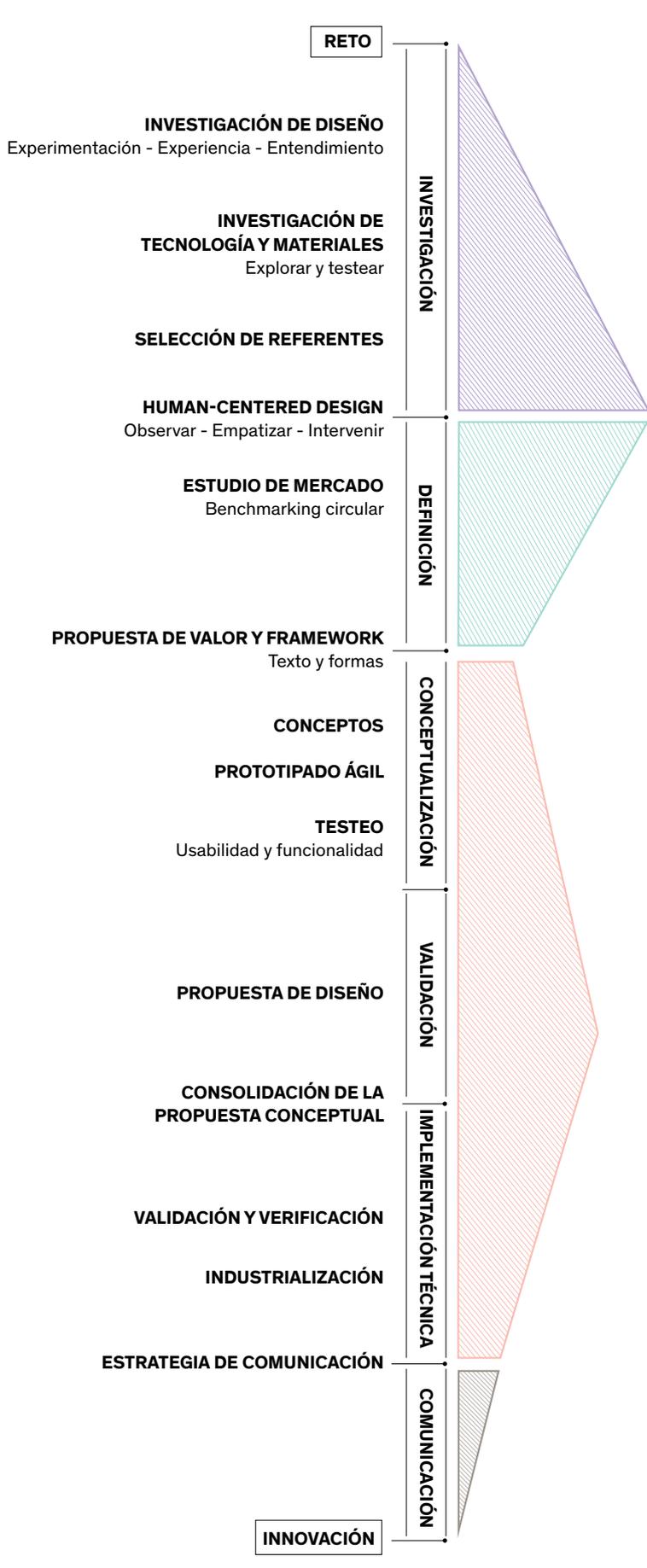


Figura 3.2.
Propuesta de proceso general de trabajo en la ingeniería.
Elaboración propia.

En la segunda etapa, la de definición, es de convergencia. Se realiza estudio de oportunidades en el ámbito de aplicación mediante un estudio de mercado y el análisis de ámbitos potenciales de innovación. Determinar estos a través de necesidades no resueltas Y se codiseñar con el usuario mediante metodologías de human-center design (Brown y Wyatt 2010; Brown 2008).

Estas dos propuestas convergen en lo definido como propuesta de valor, la cual propone como solucionar una problemática no resuelta en el ámbito de aplicación encontrado. Deberá ser aquella que solo mediante la propiedad escogida y definida en el reto resuelva dicha problemática. Si existen otras formas de resolver la problemática, quedaría descartada. Esta propuesta debe responder a las siguientes preguntas: (a) ¿a quien va dirigido?, (b) ¿qué problemática resuelve no resuelta con anterioridad?, (c) ¿cómo genera disrupción la materia tecnológica aplicada? y (d) ¿Cuál es el ámbito de aplicación?

En la tercera etapa, la de conceptualización, se fomenta el pensamiento creativo desde el conocimiento de las posibilidades de los materiales investigados. Se busca potenciar la visión y capacidad imaginativa desde el conocimiento. Se trabaja la propuesta de valor mediante el uso de técnicas de *sketching*, prototipado ágil y Test de usabilidad con las personas.

En la cuarta etapa, la de validación, se realiza el diseño de detalle mediante las técnicas necesarias de viabilidad teórica y práctica de sus funcionalidades, su usabilidad, su ergonomía, sus sistemas tecnológicos o similar.

La quinta etapa, la de Implementación técnica, es la que define los detalles constructivos que garantizan la viabilidad técnica e industrial para la futura implementación de la propuesta en el mercado comercial. Para ello se utilizan técnicas de selección de materiales, cálculos paramétricos, cálculos de impactos ambientales, dimensionado energético y costes.

En la sexta y última etapa, la de comunicación, se realiza toda la documentación técnica e industrial necesaria para el desarrollo correcto del proyecto y la estrategia comercial. Finalmente se define la imagen del proyecto.

Una vez aplicado dicho proceso se espera conseguir una propuesta diferenciadora, de carácter innovador y disruptivo en algunas ocasiones.

Una vez definido el marco de trabajo en esta investigación se procede a describir la metodología realizada para los Test de estudio que permitirán evaluar el proceso implementado

3.2. Metodología de estudio.

La metodología de investigación realizada en este estudio se ha definido en tres principales partes. En la primera parte se ha definido el alcance del estudio y se ha hecho uso de métodos de investigación cuantitativos y métodos estadísticos de contraste de hipótesis (Prat Bartés et al. 1997). En la segunda parte se han definido las condiciones del estudio y temporización. Por último, se ha definido los indicadores de medición que permiten el análisis de la hipótesis planteada desde la investigación realizada.

3.2.1. Alcance del estudio y proceso metodológico.

El alcance del estudio define las etapas metodológicas de este con el objetivo de acotar los ítems a evaluar, a su vez definir la relación entre la investigación previa y los ensayos propuestos en este apartado, además de determina los parámetros de cálculo para la evaluación del ensayo a realizar.

Las etapas metodológicas de este estudio son las siguientes:

1. Definir el Test 01. Proceso de diseño en la ingeniería (figura 3.2) en el que el reto es un problema, un ámbito de mejora o una necesidad. Se aplicará a una muestra (superior a 30, N°=171).
2. Definir el Test 02. Proceso de diseño en la ingeniería (figura 3.2) en el que el reto es una propiedad inusual de un material avanzado. Se aplicará a una muestra (superior a 30, N°=94).
3. Establecer mediante estadística la regla de medida y normalizar la muestra a estudiar.
4. Realizar un contraste de hipótesis:
 - Comparar el estadístico de la muestra de la población (x) con la muestra del Test 02 (x1). Para este caso se determina que la probabilidad tiene un nivel de significación de $\alpha = 0.05\%$ Y de confianza de $1 - \alpha = 95\%$.
 - Se determina que (a) si se acepta cuando la hipótesis nula
 - Se determina que (a) si se acepta cuando la hipótesis nula y que (b) no se acepta cuando la hipótesis alternativa .
 - Se aplica la fórmula de contraste de hipótesis con los resultados estadísticos obtenidos en las muestras estudiadas.
5. Realizar una comparativa individual de los siete ítems de estudio en el Test mediante una comparativa de la muestra del Test 01 y Test 02.

Para el cálculo de datos estadísticos se usará el software libre PSPP, que permite el análisis de datos y la representación visual de los mismos.

Para la obtención de los datos de estudio se utilizará un formulario diseñado con preguntas tipo Test, estas son formuladas desde los indicadores vinculados a los objetivos de este estudio.

3.2.2. Condiciones del estudio.

Este estudio busca obtener valores resultantes de dos Test de evaluación formados por una muestra superior a 250 participantes, estos participantes pueden participar en el Test de forma individual o grupal con un máximo de cuatro personas por proyecto realizado. El periodo de estudio es desde el 2015 al 2017, durante el cual se han realizado varias iteraciones de la misma. Los evaluadores son 10 profesionales, con un perfil de ingenieros expertos en proyectos de diseño y activos en docencia académica.

El sistema de evaluación incluye un seguimiento del estudio mediante 17 sesiones de 1.5h vinculadas a las etapas del proceso (figura 3.3), Una vez finalizadas, será evaluado el resultado con un cuestionario de siete preguntas relacionadas a los objetivos de la investigación.

A continuación se describen los detalles de las condiciones del estudio, el reto en cada caso y la temporización por etapa de proceso estudiado, con un total de 265 participantes entre los dos Test realizados (tabla 3.1).

Condiciones del estudio	Test 01	Test 02
Contexto	Académico. Estudios de Grado en Ingeniería de Diseño Industrial. Elisava facultad de diseño e ingeniería de Barcelona.	Académico. Estudios de Grado en Ingeniería de Diseño Industrial. Elisava facultad de diseño e ingeniería de Barcelona.
Periodo	Del 2015 al 2016	Del 2015 al 2017
Sesiones de trabajo	17	17
Duración de la sesión	1,5h	1,5h
Periodo temporal de aplicación	20 semanas	20 semanas
Participantes	171 personas	94 personas
Evaluadores	Tutores de los proyectos	Tutores de los proyectos
Reto	Problema, ámbito de mejora o necesidad	Propiedad inusual de un material avanzado

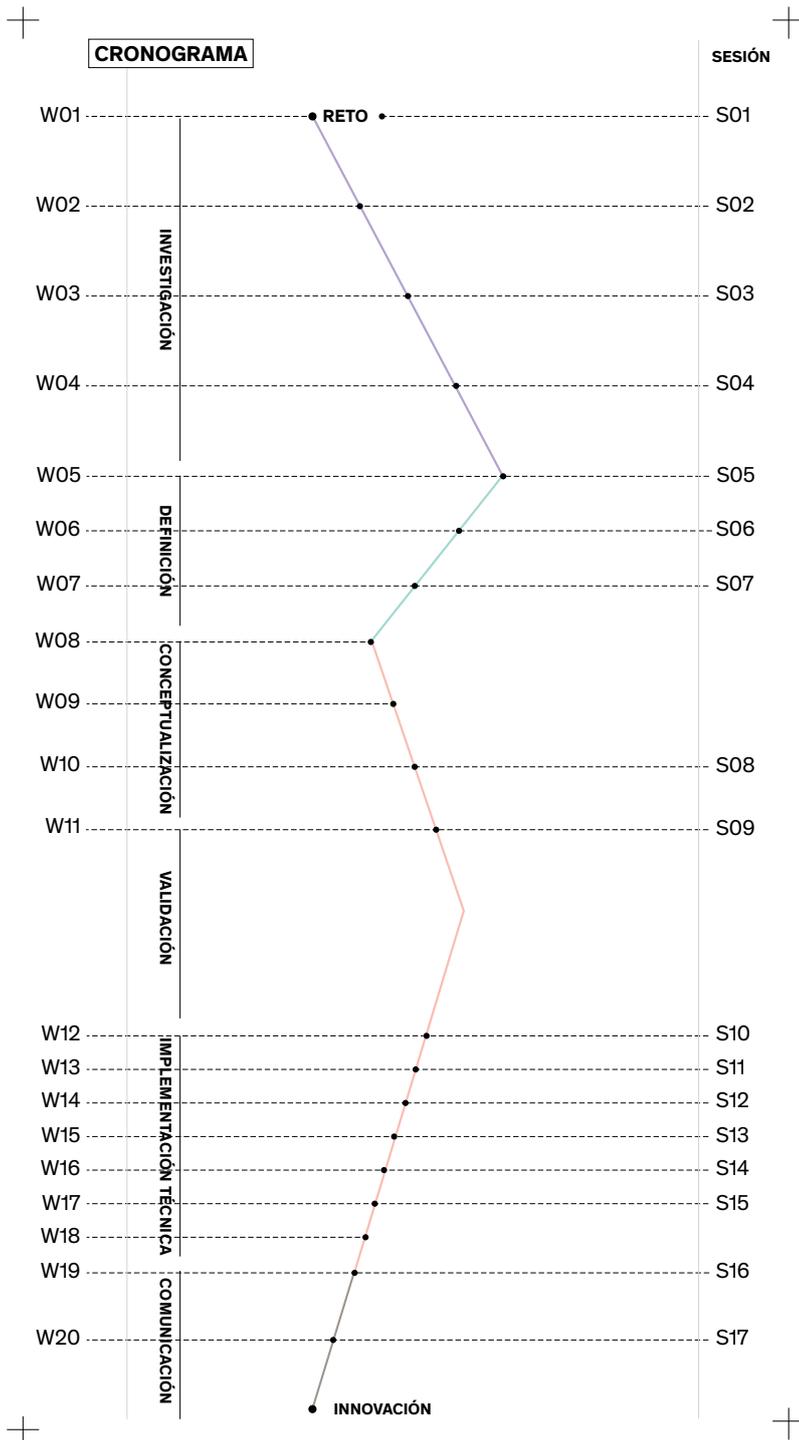


Tabla 3.1.
Condiciones del estudio para el Test 01 y Test 02. Elaboración propia.

Figura 3.3.
Cronograma para los estudios en el Test 01 y Test 02. Elaboración propia.

3.2.3. Indicadores del estudio según objetivos.

Para validar la hipótesis planteada se determinan en este estudio cuatro objetivos principales:

1. Aumentar la capacidad de investigación en ámbitos con necesidades no resueltas por los materiales actuales.
2. Afianzar las bases de un modelo específico para un contexto delimitado, inicialmente al diseñador ingeniero, que permite poner en valor las posibilidades de los materiales avanzados encontrando una oportunidad de mercado.
3. Demostrar la capacidad de innovación que tiene un proceso de diseño cuando el punto de partida es un material avanzado.
4. Definir un proceso de diseño que integre la visión científico-técnica que define el desarrollo de nuestro entorno.
5. Estos objetivos definen los siguientes indicadores de evaluación (tabla 3.2).

Objetivo	Indicador de evaluación
1	I-1. Grado de investigación en ámbitos con necesidades no resueltas por los materiales actuales.
	I-2. Calidad de la revista del artículo de referencia científica (índice, perfil, cuartil) vs. propuesta diferenciadora.
2	I-3. Aumento de la capacidad en localizar un campo de aplicación que genere oportunidad de negocio.
	I-4.. Mejora en la construcción de una idea, diseño y desarrollo de ingeniería para la viabilidad de la misma mediante el uso del conocimiento científico en laboratorio.
3	I-5. Resultados viables, innovadores y disruptivos.
	I-6. Integración de diferentes campos de la ingeniería con una visión mayor del conocimiento científico-técnico.

Tabla 3.2.

Tabla de relación entre Objetivos e Indicadores. Elaboración propia.

Estos indicadores se formulan para el test O1 y test O2 de la siguiente forma (tabla 3.3):

Indicador	Test O1	Test O2	Valor
I-1	E-1. ¿Ha mostrado facilidad en adquirir un conocimiento de las posibilidades inusuales de un Material Avanzado que le permiten afrontar un problema no resuelto de forma diferenciadora?	E-1. ¿Ha adquirido un conocimiento de las posibilidades inusuales en GRAFENO que le permiten afrontar un problema no resuelto de forma diferenciadora?	1-5
I-2	E-2. ¿Ha realizado una propuesta de valor significativa basada en el descubrimiento científico publicado?	E-2. ¿Ha realizado una propuesta de valor significativa basada en el descubrimiento científico publicado?	1-5
I-3	E-3. ¿Las etapas previas han permitido encontrar un campo de aplicación que genera una propuesta diferenciadora en el ámbito aplicado?	E-3. ¿El conocimiento avanzado de las propiedades inusuales ha permitido encontrar un campo de aplicación que genera una propuesta diferenciadora en el ámbito aplicado?	1-5
I-4	E-4. ¿La propuesta realizada es innovadora y viable industrialmente?	E-4. ¿La propuesta realizada es innovadora y viable industrialmente?	1-5
I-5	E-5. ¿La propuesta se aleja de resultados obvios?	E-5. ¿La propuesta se aleja de resultados obvios?	1-5
I-6	E-6. ¿Demuestra capacidades imaginativas más allá de lo previsible en el resultado realizado?	E-6. ¿Demuestra capacidades imaginativas más allá de lo previsible en el resultado realizado?	1-5
I-7	E-7. ¿Se observa que la comprensión del proceso de diseño ha sido asumida sin dificultad?	E-7. ¿Se observa que la comprensión del proceso de diseño ha sido asumida sin dificultad?	1-5

Tabla 3.3. Tabla de relación entre Indicadores y preguntas de Evaluación en el Test O1 y Test O2. Elaboración propia.

El criterio de valoración respecto a los proyectos medidos se ha definido del 1 a 5 con el siguiente valor: (5) increíblemente, (4) sorprendentemente, (3) mucho, (2) satisfactoriamente y (1) poco.

3.3. Resultados y discusión del estudio.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del estudio realizado bajo los parámetros especificados previamente. Los resultados han sido validados durante un periodo de tres años, han participado 265 personas y 10 evaluadores. Se han obtenido un total de 91 resultados específicos para este caso.

3.3.1. Test 01. Proceso de diseño en la ingeniería. Reto: problema, ámbito de mejora o necesidad.

Para el primer test se toma como proceso de trabajo el definido en la figura 3.2 Y se aplica el cuestionario de la tabla 3.3 (Apartado: test 01). En este caso, el punto de partida es un reto conocido para el proceso de diseño habitual: problema, ámbito de mejora o necesidad.

Ha habido 171 participantes que han trabajado para obtener 58 resultados de proyecto. En la tabla 3.4 Se muestra la media aritmética por pregunta realizada para tener un valor cuantitativo evaluable.

TEST 01

Pregunta	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7
Media	1,86	1,09	2,03	2,22	1,86	1,03	3,71

Tabla 3.4.
Resultados para la evaluación del test 01. Elaboración propia.

3.3.2 Test 02. Proceso de diseño en la ingeniería. Reto: propiedad inusual de un material avanzado, grafénicos.

Para el segundo test se toma como proceso de trabajo el definido en la figura 3.2 Y se aplica el cuestionario de la tabla 3.3 (Apartado: test 02). Se procede a aplicar el proceso de diseño definido en el esquema y teniendo como punto de partida un reto nuevo: propiedad inusual de un material avanzado. En este caso, materiales bidimensionales, en concreto materiales grafénicos.

Es este caso ha habido 94 participantes que han trabajado para obtener 33 resultados de proyecto. En la tabla 3.5 Se muestra la media aritmética por pregunta realizada para tener un valor cuantitativo evaluable.

TEST 02

Pregunta	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7
Media	3,97	3,79	3,27	3,18	3,85	3,03	3,85

Tabla 3.5.
Resultados para la evaluación del test 02. Elaboración propia.

3.3.3. Justificación de los métodos estadísticos del estudio.

En este estudio el conjunto de individuos que forman la población es de 265 personas, los cuales se les ha solicitado participar en el estudio y han sido evaluados mediante el Test 01 y Test 02.

Para determinar los valores poblacionales de la media (μ) y la desviación típica (σ) del estudio, se realiza previamente una media aritmética individual de cada uno de los proyectos resultantes en los Test 01 y Test 02. Se han obtenido 91 casos reales realizados por estas 265 personas.

Estos valores poblacionales han sido calculados mediante un software estadístico (pspp), aplicando método de estadística descriptiva de frecuencia. Dando como resultados una media $\mu = 2,55$ y una desviación típica o estándar de $\sigma = 0,96$. Representando las frecuencias absolutas del Test 01 y Test 02 mediante un histograma, se pueden observar los valores del estudio en la gráfica mostrada en la figura 3.4.

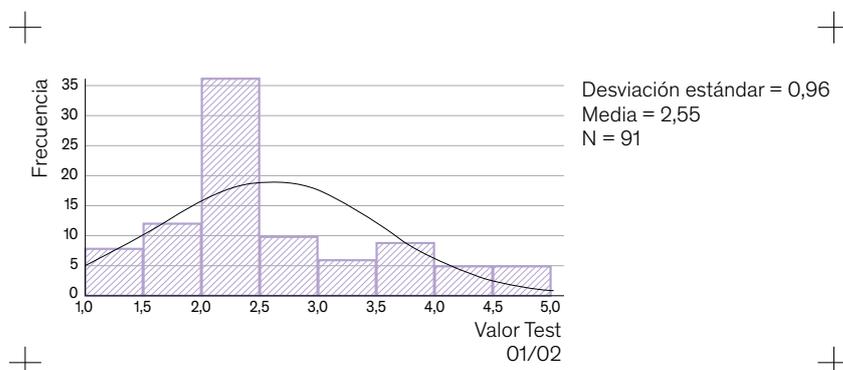


Figura 3.4.
Histograma obtenido de la muestra de la población. Resultados del software PSPP.

El conjunto de individuos que forman la muestra es de 94 personas, a los cuales se les ha solicitado participar para ser evaluados mediante el Test 02.

Para determinar el valor muestra de la media (\bar{X}), se realiza previamente una media aritmética individual de cada uno de los proyectos resultantes en los Test 02. Se han obtenido 33 casos reales realizados por estas 94 personas.

Este valor muestra ha sido calculado mediante el mismo software (pspp), dando como resultados una media $\bar{X} = 3,56$.

Una vez estudiada la muestra, se procede a realizar un contraste de hipótesis unilateral en el que se aplican las fórmulas definidas (Prat Bartés et al. 1997). La muestra seleccionada para el contraste corresponde al caso de estudio en el Test 02.

Para realizar un contraste de hipótesis se determinan los siguientes parámetros:

1. Para la muestra se escoge una hipótesis nula (H_0) de $\mu = 2,55$, por lo tanto, se determina que para la hipótesis alternativa (H_1) se debe dar la condición en la que $\mu \geq 2,55$.
2. El índice de significación escogido es de 5%, por tanto: $\alpha = 0,05$
3. El nivel de confianza es de un 95%, dado que: $1 - \alpha = 0,95$
4. El valor de la muestra a comparar (Test 02) es: $\bar{X} = 3,56$
5. La muestra a comparar esta realizada sobre 33 valores.

Por tanto, si:

$$\bar{X} \longrightarrow Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

Se obtiene que:

$$\bar{X} \rightarrow Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} = \frac{3,56 - 2,55}{0,96/\sqrt{33}} = \frac{1,01}{0,16} = 6,04$$

- Según los valores definidos en la tabla de la función de distribución normal estándar para este caso, el valor crítico es $z_{\alpha} = 1,64$.
- Es definido que: **SI** se acepta hipótesis nula (H_0) cuando $z \leq z_{\alpha}$ y se rechaza la hipótesis nula (H_0) cuando $z > z_{\alpha}$.
- Dado que $z > z_{\alpha}$ que $6,04 > 1,64$, se determina que no se acepta la hipótesis nula (H_0) y si la hipótesis alternativa (H_1).
- Estos resultados muestran, con un nivel de confianza del 95%, que la percepción de los evaluadores en el proceso aplicado en el Test 02 frente al aplicado en el Test 01 es significativamente superior.

3.3.4. Resultados por ítems e indicadores.

Desde los valores obtenidos y escritos en los apartados 3.3.1 Y 3.3.2, Se ha realizado una comparativa de los siete ítems de estudio en el Test 01 y 02. En la tabla 3.6 Se muestra la media aritmética evaluada por cada Test y el diferencial ente ellos (columna df.), De modo que permite el cálculo de porcentaje de los resultados obtenidos (columna %).

TEST 01	MEDIA	TEST 02	MEDIA	Df.	%
E-1	1,86	E-1	3,97	2,11	53,1
E-2	1,09	E-2	3,79	2,7	71,3
E-3	2,03	E-3	3,27	1,24	37,8
E-4	2,22	E-4	3,18	0,96	30,1
E-5	1,86	E-5	3,85	1,99	51,6
E-6	1,03	E-6	3,03	2,03	65,9
E-7	3,71	E-7	3,85	0,14	3,68

Tabla 3.6.
Resultados por ítems del estudio en Test 01 y Test 02. Elaboración propia.

A su vez, se presenta la gráfica de resultados obtenidos en la cual se pueden valorar la trayectoria por ítem y que el Test 02 es de resultados elevados en prácticamente todos los ítems evaluados (figura 3.5).

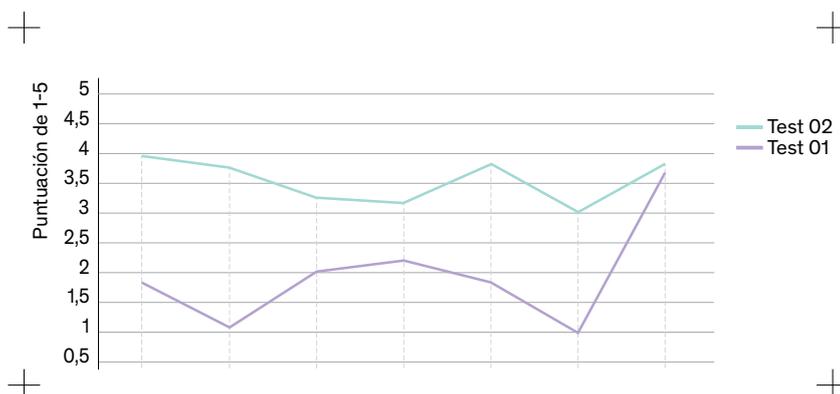


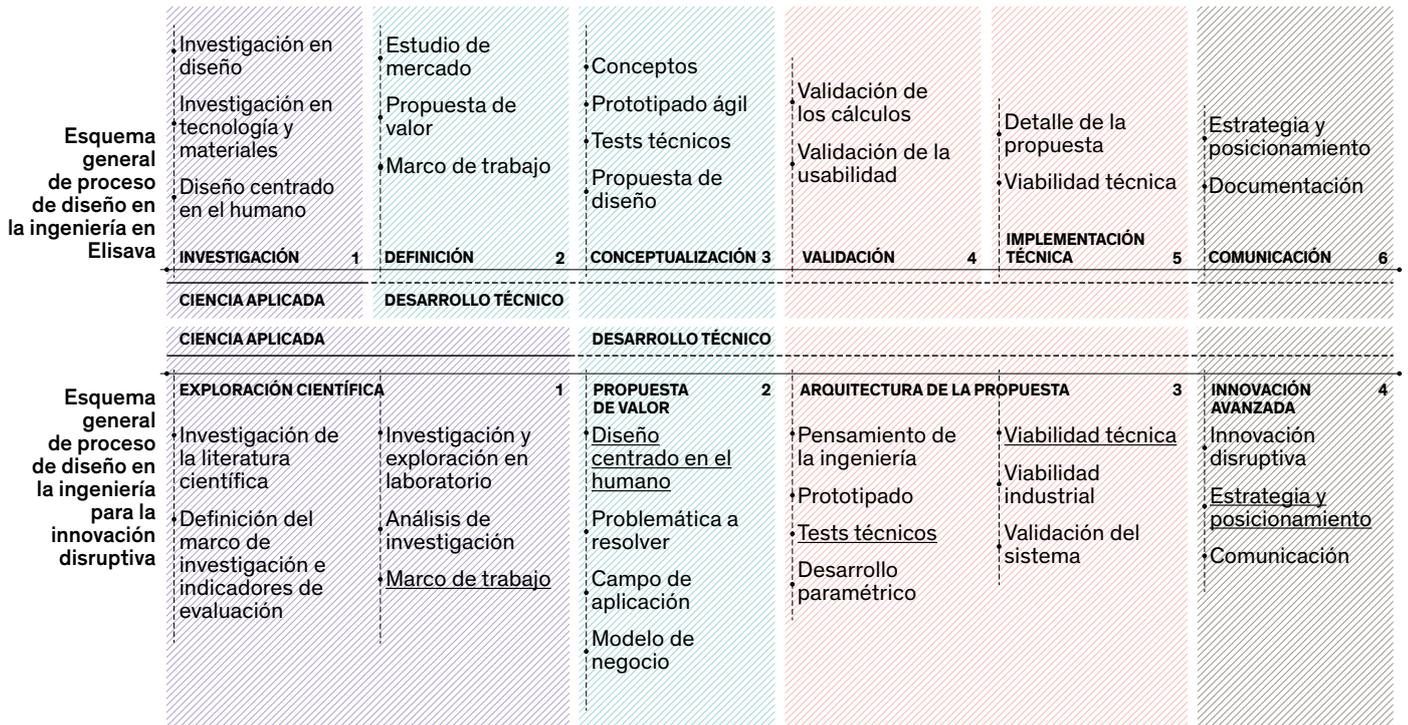
Figura 3.5.
Gráfico de valores comparativos entre Test 01 y Test 02. Elaboración propia.

Del estudio cuantitativo realizado se observa que:

1. El proceso de diseño aplicado en el Test 02 recibe un 53,1% de aceptación positiva superior al aplicado en el Test 01. Lo cual significa que resulta más fácil adquirir un conocimiento de las posibilidades inusuales de un material avanzado para afrontar un problema no resuelto de forma diferenciadora.
2. Se han realizado propuestas de valor significativo basada en el descubrimiento científico publicado en el Test 02 de un 71,3% superior al Test 01.
3. Las etapas del proceso de diseño previamente definidas de forma genérica (figura 3.2) Han permitido encontrar un campo de aplicación que genera una propuesta diferenciadora en el ámbito aplicado de 37,8%, algo significativamente superior para el Test 02 que el Test 01.
4. Los resultados de proyecto obtenidos en ambos Test son de carácter innovador y aparentemente viables industrialmente, aunque la percepción de innovación observada en el estudio es 30,1% superior en el Test 02 que el Test 01.
5. El grado de innovación viene dado por la capacidad de implementación de una propuesta de forma diferenciadora, lo que requiere que esta se aleje de resultados obvios. En el análisis de resultados obtenidos en el Test 02 muestra una valoración de un 51,6% superior al del Test 01, lo cual indica que el proceso facilita innovar de forma diferenciadora ante el proceso conocido.
6. Se observa en el Test 02 que el perfil del diseñador muestra capacidades imaginativas más allá de lo previsible un 67% superior al que ha aplicado el proceso del Test 01. Es un valor de cambio relevante para fomentar resultados diferenciadores e innovadores al mercado.
7. Se observa que la comprensión del proceso de diseño ha sido asumida sin dificultad en ambos Test lo cual indica que es un proceso estudiado para facilitar la implementación en procesos de trabajo y que se adecua a la comprensión del ingeniero que diseña.

Como resultado final, este estudio ha permitido generar un gráfico resumen de resultados basado en la hipótesis planteada, que muestra el proceso aplicado, la relación con los objetivos e indicadores de estudio, así como los ítems estudiados (figura 3.8). En este estudio se obtiene como resultado un nuevo esquema de trabajo que define el proceso de diseño en la ingeniería para la innovación disruptiva que contempla el proceso conocido, pero dando valor al conocimiento en materia avanzada como punto de partida para proyectos que requieran de resultados innovadores y disruptivos.

Para mayor comprensión de los resultados obtenidos se muestra un esquema comparativo entre el proceso aplicado y el resultante para la siguiente fase de trabajo (figura 3.6). Se propone un esquema de trabajo evolucionado en el que ponga en relevancia la investigación científica en el proceso de diseño de un ingeniero de diseño que tiene como objetivo garantizar un resultado de innovación disruptiva desde el conocimiento en materiales avanzados, al que hemos denominado proceso de diseño en la ingeniería para la innovación disruptiva²⁰ (figura 3.8).



Durante el estudio realizado se destaca la importancia de poner en relevancia que las etapas de un proceso no pueden ser lineales, sino que forman parte de un sistema transversal que funciona debido a la retroalimentación entre etapas (figura 3.7). Algo que se ha decidido redefinir en el nuevo esquema para el proceso de diseño en la ingeniería para la innovación disruptiva (figura 3.8).

Figura 3.6. Gráfico de análisis entre en esquema general del proceso de diseño implementado en el ensayo con el propuesto para la siguiente etapa de exploración. Elaboración propia.

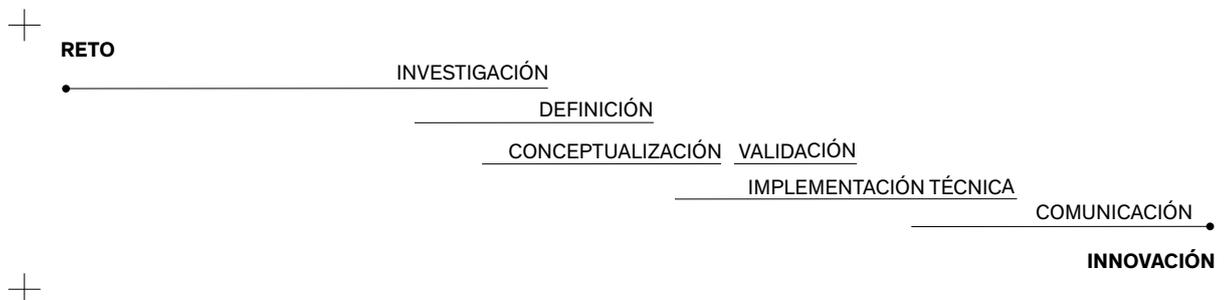
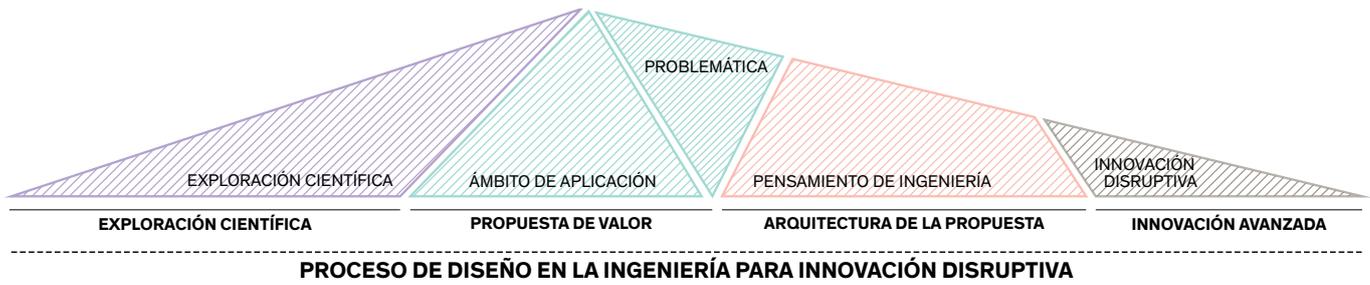


Figura 3.7. Sincronización de etapas en el proceso de la Ingeniería en diseño. Elaboración propia.

²⁰ Engineering Design Process for Disruptive Innovation



PROCESO GENERAL DE TRABAJO EN LA INGENIERÍA

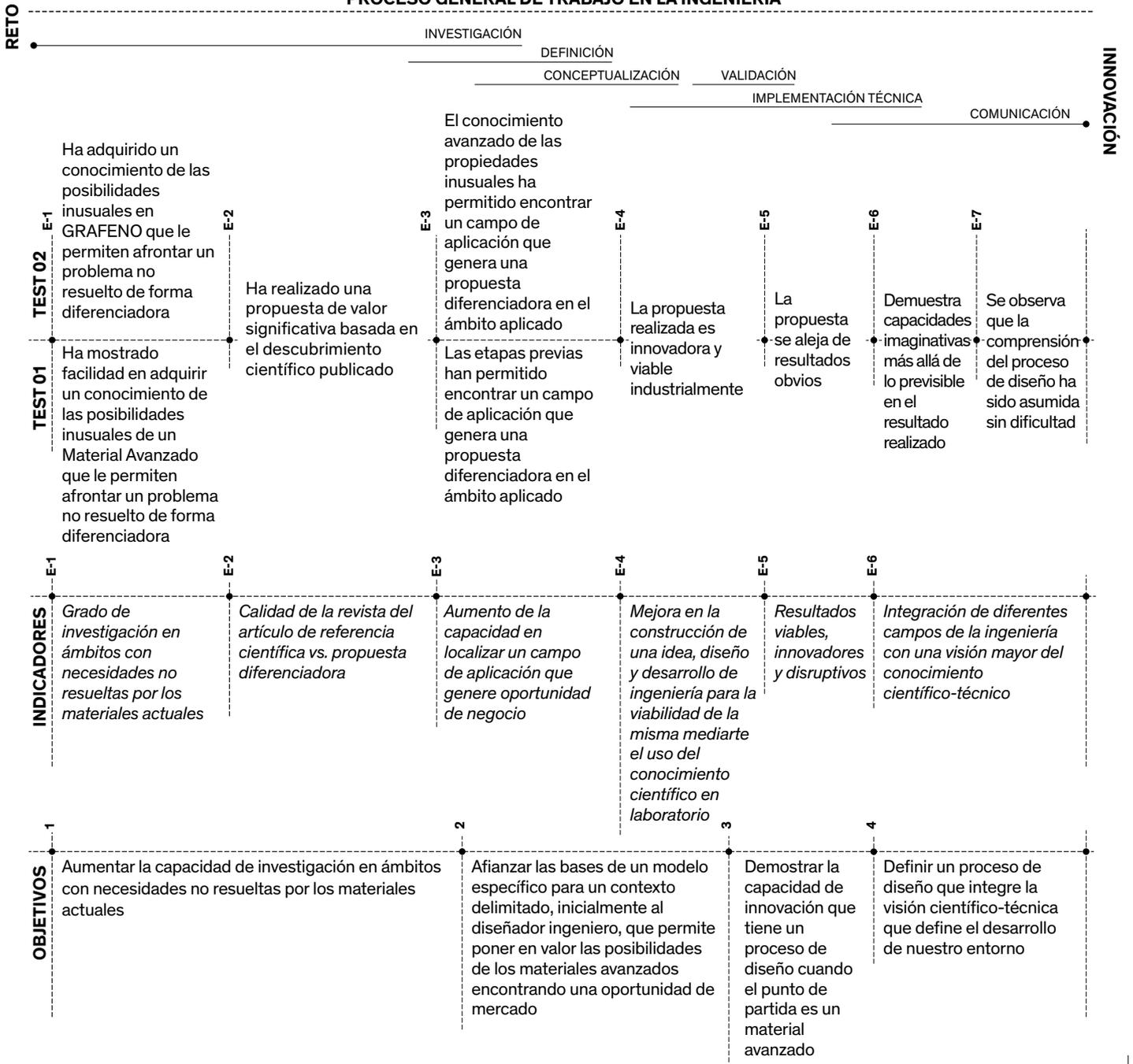


Figura 3.8. Gráfico de estudio y resultados para el proceso de diseño en ingeniería para innovación disruptiva. Elaboración propia.

El proceso de diseño en la ingeniería para la innovación disruptiva detallado en la figura 3.8 Permite definir unas etapas principales que serán las siguientes:

La primera etapa esta determinada por Exploración Científica²¹, la cual parte de un reto, que tiene el objetivo fomentar la exploración de una propiedad inusual en un material avanzado, como por ejemplo el grafeno desde el conocimiento científico.

La segunda etapa es la de Propuesta de Valor²², esta debe ser incentivada por una investigación científica exhaustiva que facilitará el campo de aplicación que a su vez generará la oportunidad para resolver un problema no resuelto desde el diseño en ese momento y teniendo presente las necesidades del usuario.

La tercera etapa consiste en construir la Arquitectura de la Propuesta²³, esta etapa es en la que se aplican las técnicas y herramientas del diseñador e ingeniero para construir, validar, verificar y confirmar la viabilidad industrial de la propuesta realizada. Es una de las etapas más amplias del proceso.

La cuarta y ultima etapa es innovación avanzada²⁴ y tiene el resultado de una propuesta mejorada. Es decir, una propuesta de innovación disruptiva que cambia parámetros de rendimiento y eficiencia, las expectativas del usuario y del mercado al proporcionar radicalmente una nueva funcionalidad, un nuevo producto o nuevo servicio. Los cuales, dentro de los sistemas actuales, superan los usados con anterioridad. Estos resultados surgen del conocimiento de las posibilidades de una tecnología avanzada, la aplicación del método y la visión de sus posibilidades diferenciadoras. Se considera innovadora si es implementable en el mercado con garantía de éxito. A su vez, presenta un nuevo modelo de negocio que desbanca a sus competidores tecnológicos (Vecchiato 2016; Christensen, Raynor y McDonald 2015).

Al aplicar el proceso y obtener un resultado de propuesta disruptiva e innovadora se plantea un cambio de paradigma. Esta propuesta se considera que está contextualizada hacia una sociedad con objetivos de futuro sostenible. Por ello, se tiene presente las interdependencias dinámicas de los productos y servicios para la futura producción. Este concepto sistémico permite aumentar su competitividad en el mercado y criterio de sostenibilidad. Se puede decir que tienen un potencial claro para mejorar significativamente la productividad de los recursos en industria (Catulli, Cook y Potter 2017). El concepto *Product-Service Systems* (PSS) tiene como idea central proporcionar soluciones a los clientes mediante la integración de productos y servicios, satisfaciendo los requisitos de los clientes, reducir al mismo tiempo el consumo de recursos y la mejora del impacto medioambiental (Qu et al. 2016)

3.3.5. Justificación del proceso mediante proyectos destacados.

A continuación se mostrarán una serie de casos que son resultado de aplicar el proceso definido en el apartado anterior (fernández cano et al. 2017). A su vez se muestran los gráficos de evaluación frente al porcentaje de desarrollo por etapas del esquema de proceso rediseñado (figura 3.8).

²¹ Scientific Exploration

²² Value Proposal

²³ Architecture of the Proposal

²⁴ Improved Innovation

Caso de estudio CS01:
Glufo (Claussen et al. 2012; Hossain y Slaughter 2020).

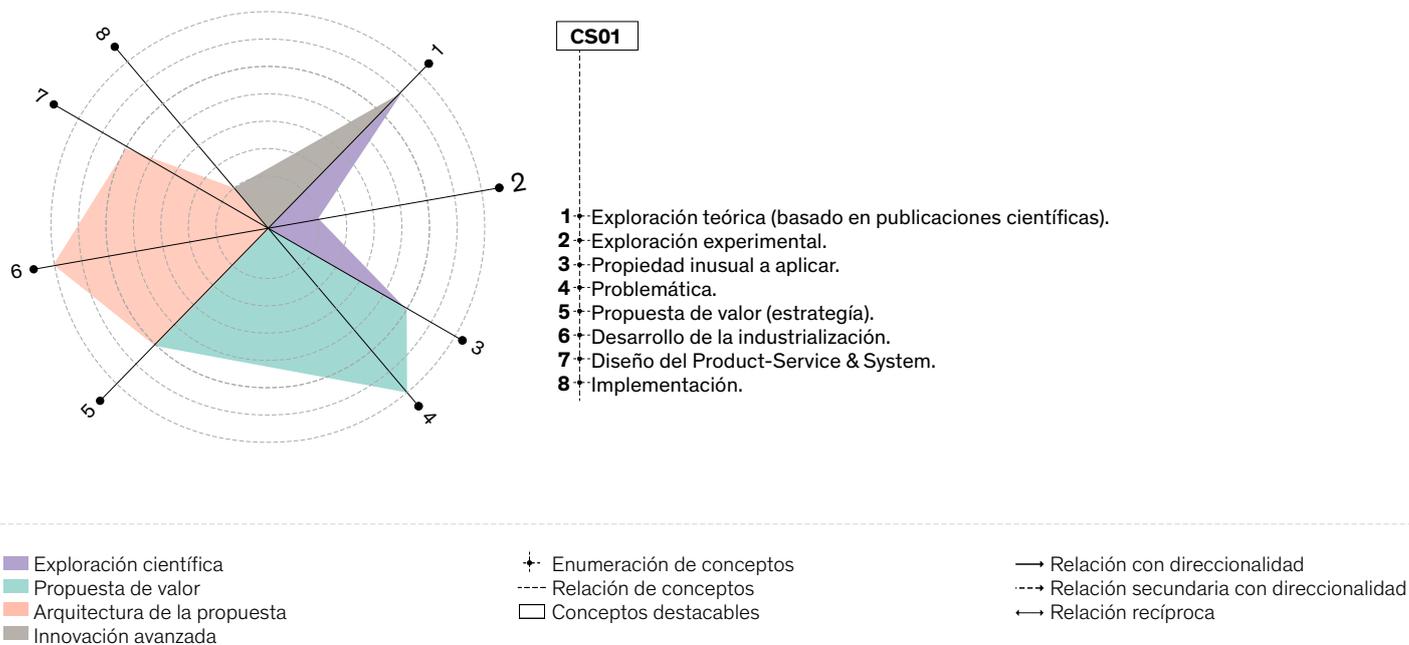


Figura 3.9.
 Evaluación del proceso para el caso de estudio Glufo. Elaboración propia.



Caso de estudio CS02:
Breio (Boland et al. 2014; Tariq et al. 2020).

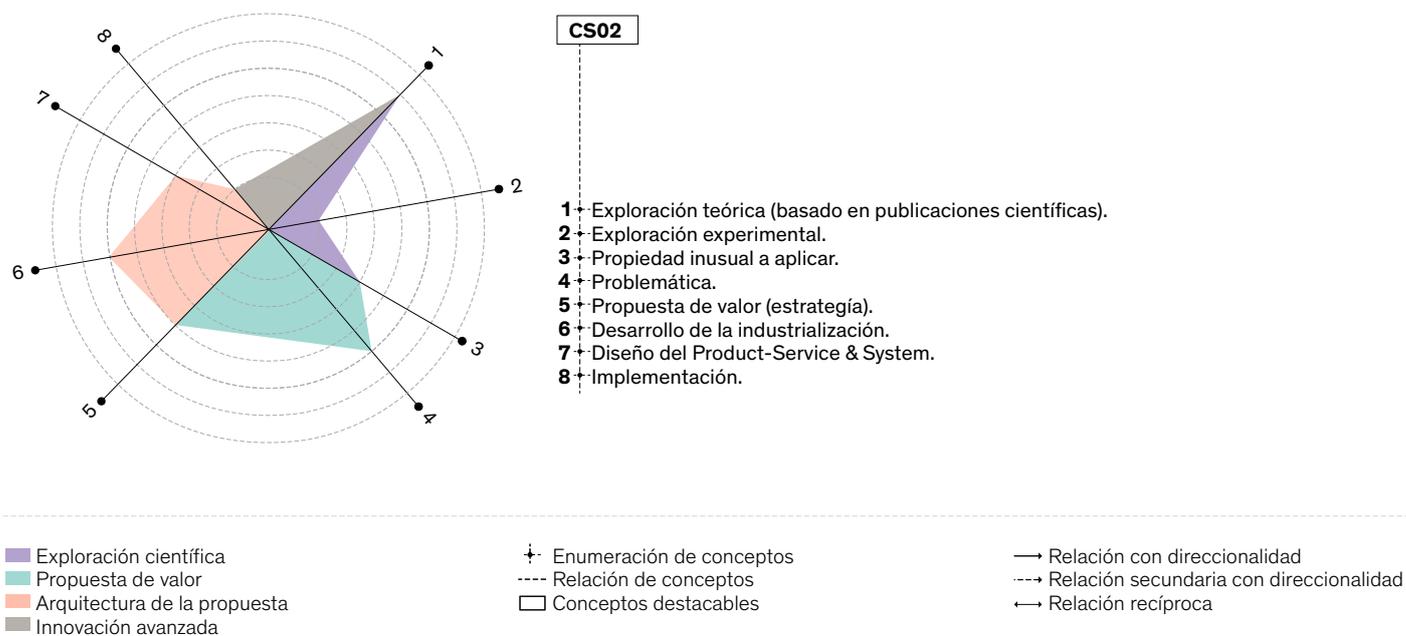
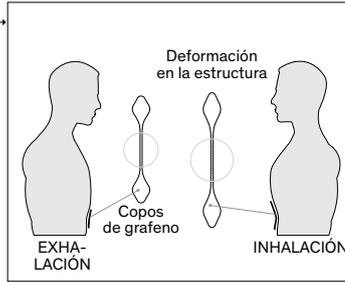


Figura 3.11.
Evaluación del proceso para el caso de estudio Breio.

MATERIALES GRAFÉNICOS

EXPLORACIÓN CIENTÍFICA

"Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites"
Fuente: Boland et al. 2014



PROPUESTA DE VALOR

PROPIEDAD INUSUAL

- biosensórica
- detectar el nivel de glucosa en sangre en la epidermis.

SOCIEDAD

- ansiedad o depresión

PROBLEMÁTICA

- Según la OMS "alrededor del 10% de la población mundial vive con depresión o ansiedad. Entre 1990 y 2013 los casos aumentaron un 50%, con más de 615 millones de personas afectadas". El estrés laboral es el segundo problema de salud relacionado con el trabajo más frecuente en Europa. Solo en España, el 59% de las personas trabajadoras sufre algún tipo de estrés.

INNOVACIÓN

Este caso de estudio se diseñó en 2017. Actualmente se sigue trabajando esta línea de innovación

"Fabrication and Investigation of Graphene-Rubber Nanocomposite Based Multifunctional Flexible Sensors"
Fuente: Tariq et al. 2020



ARQUITECTURA DE LA PROPUESTA

INDUSTRIA

BLOQUE A

BLOQUE B

DIFUSOR DE LUZ
Ilumina de forma difusa el producto en sí.

PESO
Aporta equilibrio a todo el producto, generando así el efecto de péndulo.

BASE
Encargada de la estabilidad de todo el producto y de clipar todos los componentes.

PCB
Integración de todos los componentes electrónicos.

ADHESIVO
Zona de adhesión del producto con el usuario que se realiza mediante un adhesivo bio-compatible situado en los dos extremos del wearable.

BASE
Soporte de todos los componentes del wearable.

G-BAND
Sensor de grafeno incorporado en la parte central del producto que va en contacto con la piel.

PCB
Integración de todos los componentes electrónicos.

WEARABLE INTEGRADO AL CUERPO QUE PERMITE REDUCIR LA ANSIEDAD DE LAS PERSONAS DURANTE SU JORNADA LABORAL, MEDIANTE UN BIOSENSOR DE GRAFENO QUE DETECTA Y CONCIENCIA SOBRE EL ESTADO FÍSICO Y MENTAL DE LA PERSONA.

CS02_BREIO. JOSEP RIMBAU

Figura 3.12
Ficha resumen para el caso de estudio Breio. Elaboración propia.

Caso de estudio CS03:
Purleaf (Akhavan y Ghaderi 2012; Wibowo et al. 2018).

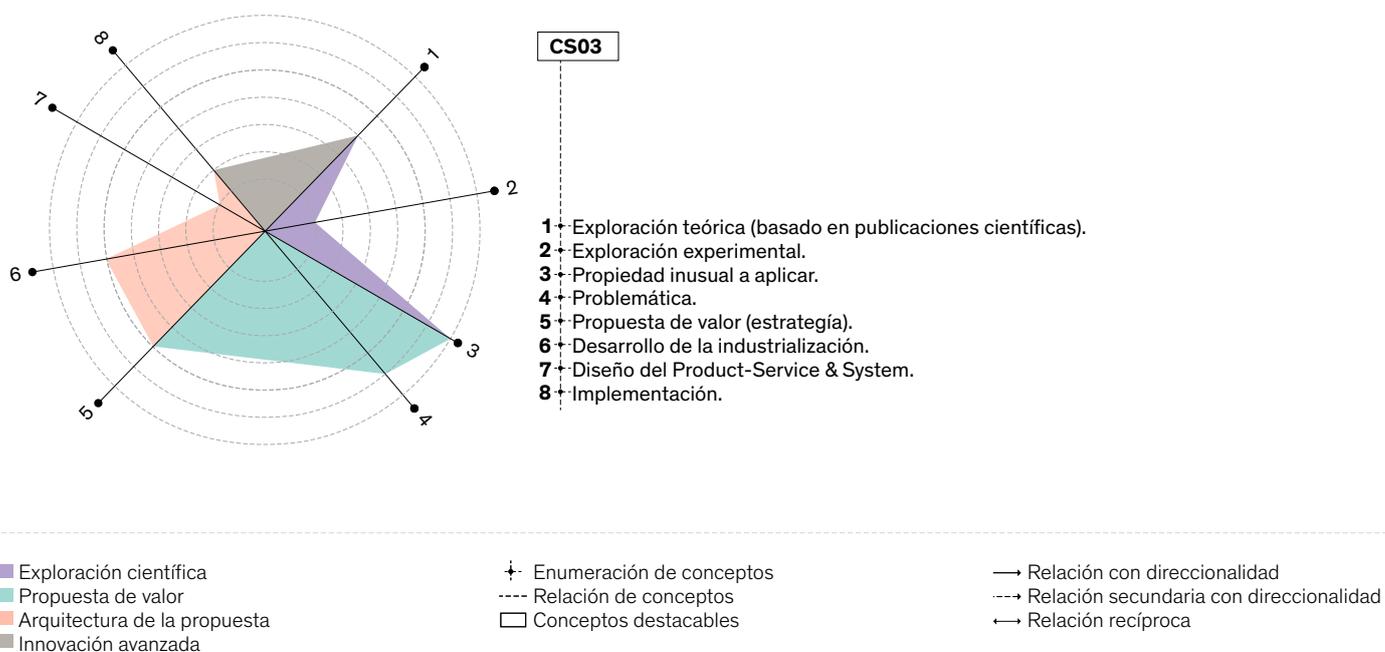


Figura 3.13.
 Evaluación del proceso para el caso de estudio Purleaf. Elaboración propia.

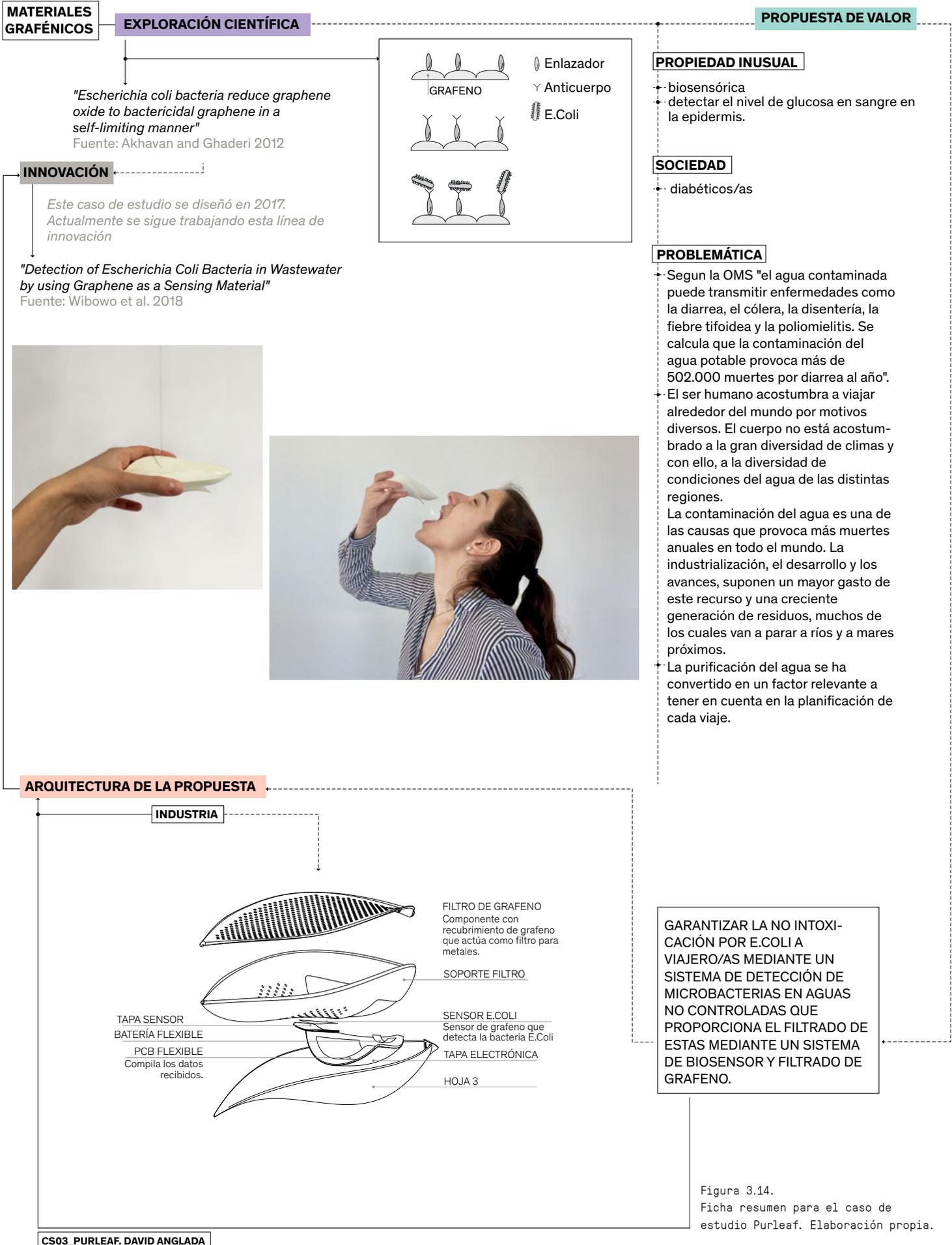


Figura 3.14.
Ficha resumen para el caso de estudio Purleaf. Elaboración propia.

Caso de estudio CS04:
Oishy (Cao et al. 2013; Huang et al. 2018).

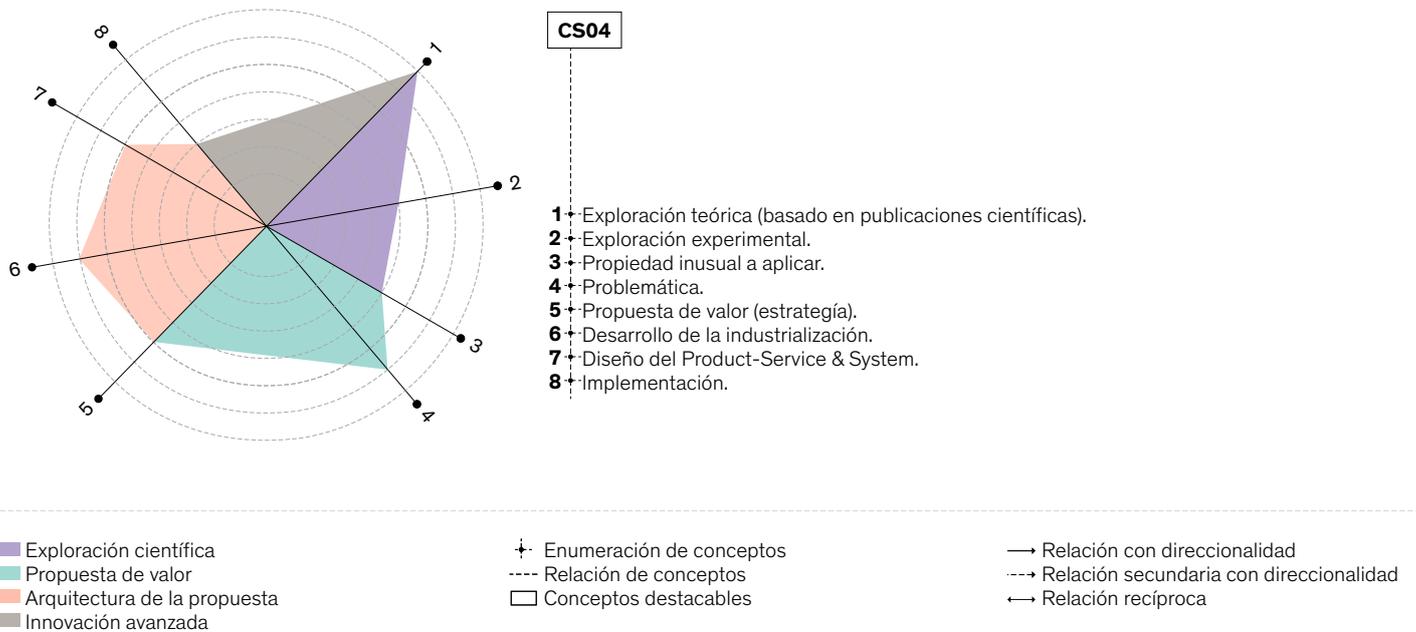
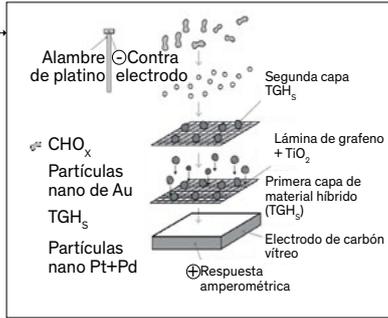


Figura 3.15.
 Evaluación del proceso para el caso de estudio Oishy. Elaboración propia.

MATERIALES GRAFÉNICOS

EXPLORACIÓN CIENTÍFICA

"An integrated sensing system for detection of cholesterol based on TiO_2 -graphene-Pt-Pd hybrid nanocomposites"
Fuente: Caos et al. 2013



PROPUESTA DE VALOR

PROPIEDAD INUSUAL

- biosensórica
- detectar el nivel de glucosa en sangre en la epidermis.

SOCIEDAD

- diabéticos/as

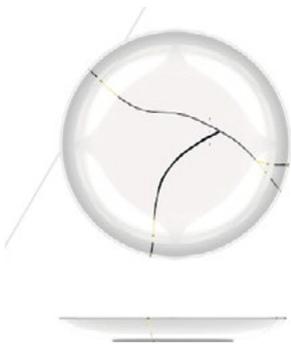
PROBLEMÁTICA

- Según la OMS "la diabetes será la séptima causa de mortalidad en 2030".
- La incidencia de diabetes en la población estadounidense, en el año 2012, fue de 1.7 millones de casos nuevos. En el 2010 fueron 1.9 millones, y actualmente, miles de personas siguen sin estar diagnosticadas en todo el mundo.
- Según la OMS, la diabetes es una enfermedad crónica que aparece cuando el páncreas no puede producir insulina o cuando el cuerpo no puede hacer un buen uso de la insulina que produce. Esta insulina es una hormona producida por el páncreas que actúa como una llave que permite que la glucosa de los alimentos ingeridos pase de la sangre a las células del cuerpo para producir energía. La incapacidad de producir insulina o de utilizarla de manera eficaz influye en unos niveles elevados de glucosa en sangre (hiperglucemia), lo que puede producir daños corporales y fallos en órganos y tejidos. Actualmente, los procedimientos que existen para comprobar la cantidad de glucosa en sangre son completamente invasivos, práctica que muchas personas no toleran.

INNOVACIÓN

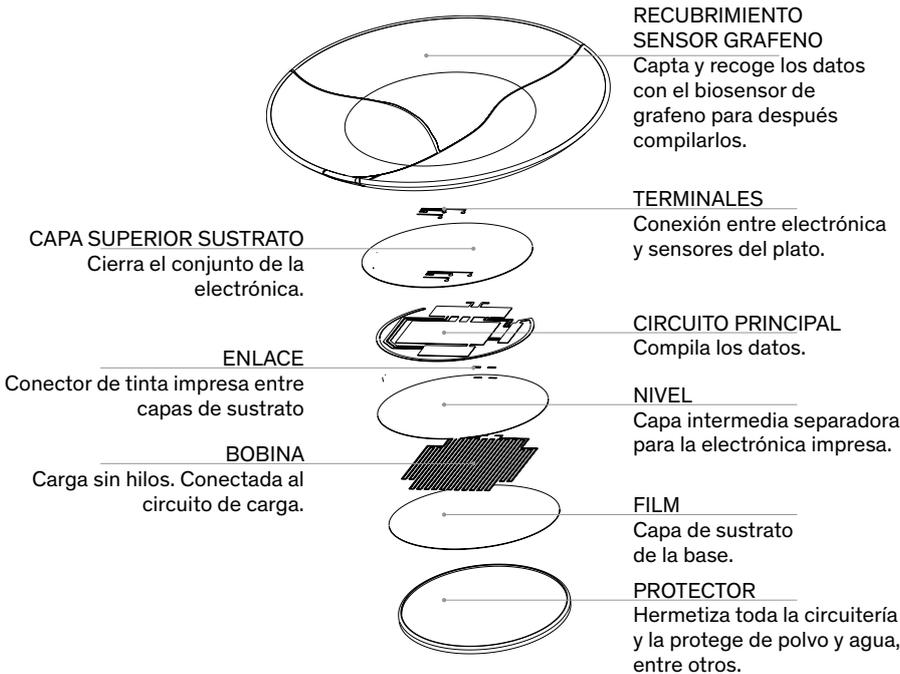
Este caso de estudio se diseñó en 2015. Actualmente se sigue trabajando esta línea de innovación

"Graphene and Au NPs co-mediated enzymatic silver deposition for the ultrasensitive electrochemical detection of cholesterol"
Fuente: Huang et al. 2018



ARQUITECTURA DE LA PROPUESTA

INDUSTRIA



VAJILLA INTELIGENTE QUE DETECTA EL ÍNDICE DE COLESTEROL LDL, SAL Y AZÚCAR DE LOS ALIMENTOS PERMITIENDO AYUDAR A LAS PERSONAS A CONTROLAR SU DIETA Y MEJORAR SU CALIDAD DE VIDA.

Figura 3.16.
Ficha resumen para el caso de estudio Oishy.
Elaboración propia.

CS04_OISHY. JORDI FORGAS

3.4. Conclusiones del capítulo.

El proceso de diseño desarrollado ha tenido unos resultados que muestran una diferenciación respecto a los procesos cotidianos precedentes.

Uno de los factores más significativos del estudio realizado es que al aplicar el proceso desde las propiedades inusuales de un material avanzado en el inicio, en este caso grafénicos, ha permitido elevar la capacidad de investigación en ámbitos con necesidades no resueltas por los materiales actuales, se determina entre un 50% y 71% superior. Para estos casos se ha tenido en cuenta la relevancia y la calidad de la revista del artículo de referencia científica, se puede decir que es un parámetro claro al obtener una propuesta diferenciadora.

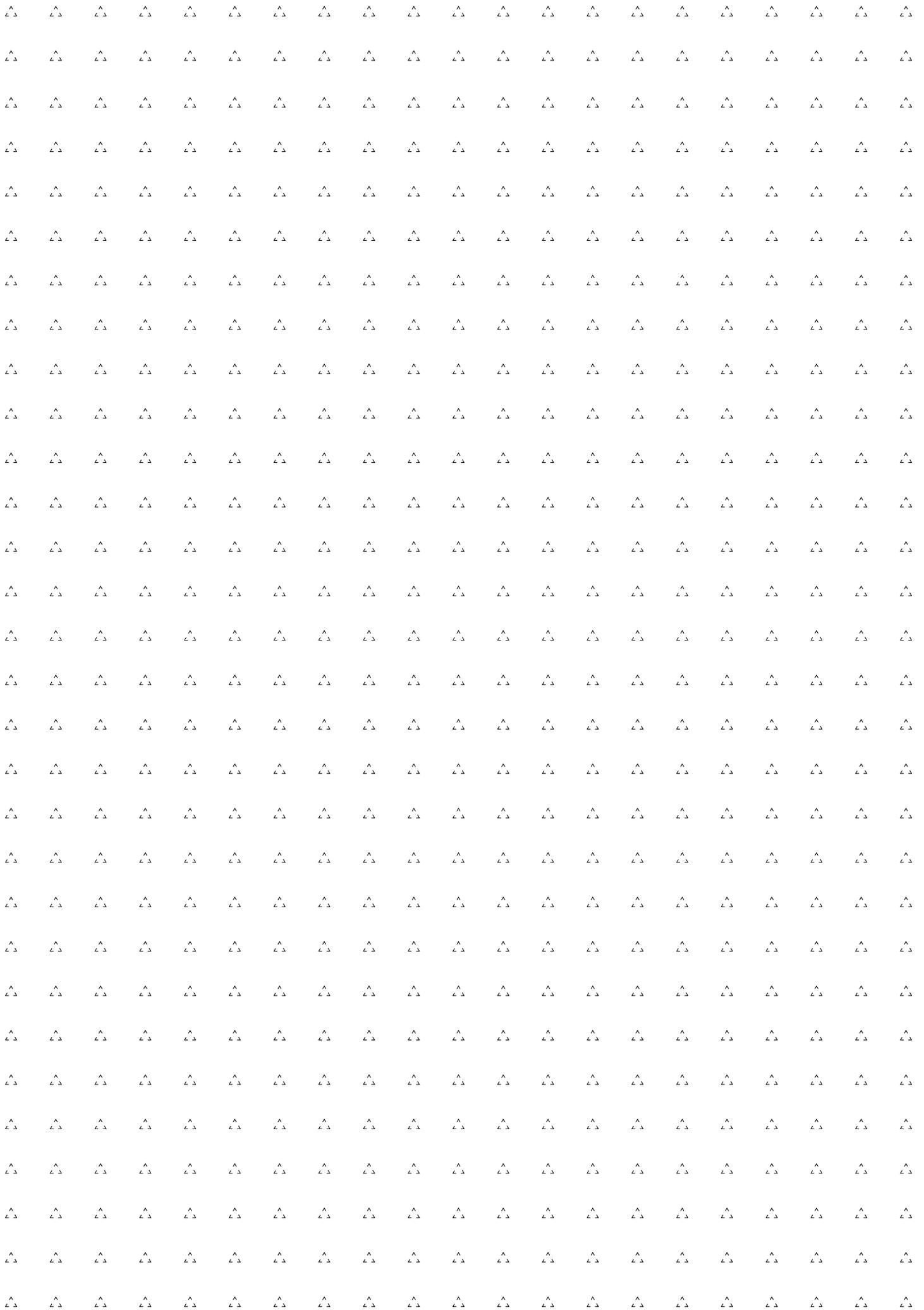
Este estudio ha permitido afianzar las bases de un modelo específico que permite poner en valor las posibilidades de los materiales avanzados encontrando una oportunidad de mercado y proporcionando propuestas viables industrialmente en un 30% superior a los procesos cotidianos.

Los resultados demuestran que el proceso facilita la capacidad de innovación disruptiva al proporcionar propuestas que se alejan de resultados obvios en un 51,6% superior. Esto es debido a que el proceso propuesto facilita el conocimiento que permite tener como punto de partida un material avanzado. A su vez, en el uso del proceso propuesto se percibe que el 65,7% de los resultados permiten la integración de diferentes campos de la ingeniería con una visión mayor del conocimiento científico-técnico.

El que la diferencia de comprensión entre el proceso conocido y proceso propuesto en el estudio sea inapreciable (3,68%) es muy favorable para la implementación del mismo.

En este estudio los usuarios han adquirido el proceso de forma natural, sistémica y lógica obteniendo unos resultados claramente significativos, diferenciadores e innovadores. Esto es concluyente para determinar que se ha proporcionado un proceso de diseño que permita definir un perfil de diseñador futuro con habilidades para explorar diferentes campos de la ingeniería mediante la visión de las posibilidades científico-técnicas que se trabajan desde los laboratorios científicos.

Dado que el proceso de diseño ha sido asumido sin dificultad, se puede decir que cambiar el proceso de diseño en la ingeniería con los objetivos definidos en este estudio no altera la comprensión del proceso de trabajo ni requiere de formación específica adicional. Lo cual valida los resultados obtenidos en ambos procesos ya que elimina la variable de comprensión del proceso.



4. Electrónica epidérmica no invasiva. *Smart Skin Tattoo*



Smart Skin Tattoo es el resultado de una investigación teórica-científica y práctico-experimental que ha permitido proponer el diseño de una tecnología disruptiva y no invasiva en el cuerpo humano, esta permite la gestión de datos personalizados como si de una huella dactilar se tratara.

El proyecto se enmarca dentro del paradigma de las tintas inteligentes, compuestos poliméricos en los que su base son los materiales avanzados. El proceso de diseño aplicado permite aproximarse a la especulación de tecnologías futuras mediante el estudio, la caracterización y la selección de los materiales más adecuados para la mejora de vida de las sociedades futuras. A su vez, nace con la perspectiva de lograr una propuesta de diseño que muestre como el cuerpo humano es un elemento básico en la integración de elementos configurados por materiales que tienen como requerimiento de diseño ser flexibles, hipoalergénicos, eficientes y sostenibles industrialmente.

La propuesta que se muestra en este apartado, es resultado del proceso de diseño definido en esta tesis (figura 3.8). En primer lugar, se ha realizado una exploración científica, teórica y práctica, de materiales avanzados. Esta propuesta se basa en materiales de dimensión atómica bidimensional, concretamente las que se pueden aplicar en el ámbito de las tintas conductivas. En segundo lugar, se describe el valor de la propuesta realizada incluyendo posibilidades de aplicaciones prospectivas, posicionándose frente a competidores de mercado e inventivas protegidas con patentes o modelos de utilidad. En tercer lugar, se definen los detalles constructivos para la comprensión de propuesta, su proceso de fabricación y viabilidad industrial. Por último, se ha realizado la implementación de la propuesta en personas reales para la validación de la misma y mostrar su capacidad de innovación en un contexto real.

A continuación, se muestra un esquema de en el que se incluyen subetapas, técnicas o herramientas que permite definir el alcance realizado durante el proceso de trabajo en este caso de estudio específico (figura 4.1).

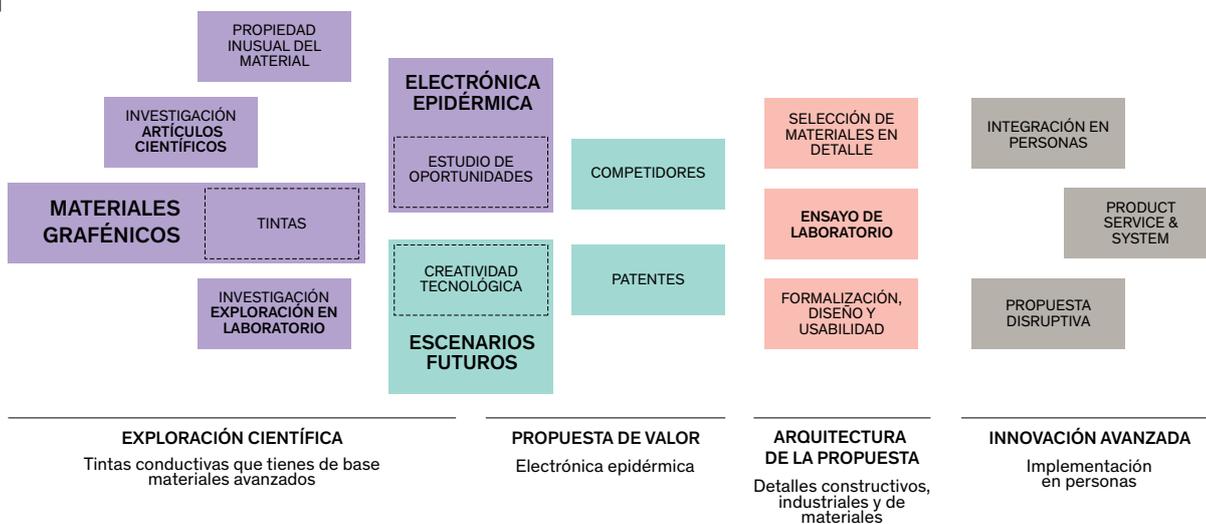


Figura 4.1.
Esquema de trabajo para proyecto *Smart Skin Tattoo*. Elaboración propia.

En este capítulo se muestran los detalles y toma de decisiones que han llevado a un resultado de innovación avanzada mediante la aplicación del proceso de diseño definido en esta tesis doctoral (figura 3.8). El resultado ha dado lugar a un diseño de tecnología disruptiva que se ha implementado con éxito en personas.

Tras validar la viabilidad, usabilidad y resolución del descubrimiento para la implementación industrial se perfeccionó el diseño y se solicitó una patente de invención, en fecha 25 de mayo del 2018. Esta ha sido concedida el pasado 28 de septiembre del 2021 por el ministerio de industria español (Oficina Española de patentes y marcas) con referencia P201830504.

Para comprender el proceso y toma de decisiones que desemboca en la propuesta *Smart Skin Tattoo*, se procede a contextualizar la investigación y la selección de materiales en el ámbito de las tintas conductoras, en este capítulo se detallará el marco de investigación y los elementos de estudio necesarios.

En los contenidos explicados previamente en capítulos anteriores, se ha demostrado la eficiencia del proceso de trabajo frente a los objetivos de proyecto propuesto. Dicho proceso permite implementar un proceso creativo desde materiales avanzados, obteniendo resultados de innovación avanzada y disruptiva.

Para este capítulo, se detalla como dicho proceso, permite crear desde la ciencia de materiales, una propuesta que genera una oportunidad significativa en el ámbito de materiales relacionados al grafeno y en las tecnologías para la electrónica epidérmica. La propuesta es *Smart Skin Tattoo*.

4.1. Exploración científica. Teórica (Scientific Exploration).

Para la comprensión detallada del contexto en el que se presenta este caso de estudio se considera necesario hacer una exploración científica de la literatura publicada para generar el marco teórico.

Se empieza por entender los sistemas existentes en electrónica epidérmica, el tipo de tintas conductoras propias del sistema, las condiciones de uso y procesado. A su vez definir los materiales óptimos para ello y sus características específicas. Todo ello dará paso definir el marco de exploración científica experimental. Los objetivos de investigación, los ítems de estudio, así como los elementos del test a estudiar se definen con los objetivos del proyecto (figura 4.2).



Figura 4.2.
Esquema base para definir el marco de exploración científica experimental.
Elaboración propia.

Una vez definidos los intereses en esta tesis en capítulos anteriores, a continuación, se muestra el interés específico y las necesidades prospectivas para materiales grafénicos de este caso de estudio, concretamente en lo relativo a la electrónica flexible. Seguidamente se argumenta el porqué de tener presente que esas propiedades técnicas y mecánicas de los materiales de base grafénicos permiten una aproximación más

natural y menos invasiva en el cuerpo humano. Para finalmente enmarcar una oportunidad de desarrollo científico e industrial mediante la selección de publicaciones científicas que contextualizan donde está el valor para la propuesta de este apartado de tesis doctoral.

Objetivos principales para este apartado de investigación.

1. Comprender el alcance de los materiales grafénicos para la electrónica epidérmica en el ámbito de la investigación científica y la industria futura.
2. Determinar las propiedades de los materiales necesarias para la integración tecnológica de la electrónica epidérmica en el cuerpo humano.
3. Definir los materiales y sustratos de interés en el ámbito de la tecnología epidérmica, portable y efímera.

Para ello se ha realizado un mapa de posicionamiento, el cual se centra en la lectura y el estudio de publicaciones científicas en ciencia de los materiales y en el ámbito de aplicación. Se ha determinado limitar la búsqueda a un periodo que ocupa desde el 2017 al 2021 (previo a la entrega de revisión de esta tesis doctoral).

4.1.1. Materiales grafénicos en electrónica flexible.

Como se ha mostrado durante el estudio realizado en esta tesis (capítulo 2, apartado 2.4.2), el campo de aplicación de los materiales bidimensionales grafénicos es amplio y su alcance llega a las principales áreas industriales actuales.

Desde esta investigación y para el caso de estudio *Smart Skin Tattoo* se considera el explorar dos de estas áreas: la biosensórica y la aplicación en sistemas de electrónica flexible, o más concretamente, electrónica impresa.

El interés en la biosensórica es dado a que el grafeno permite obtener grandes cantidades de biodata²⁵ no conocida hasta el momento para el diseño de productos well being, ofreciendo mejoras en el bienestar de las personas. Sin embargo, esta aplicación comporta dificultad en la estabilización de los datos proporcionados por esta nueva materia, es por ello que la biosensórica se descarta en este punto de la investigación.

Por lo contrario, la aplicación en sistemas de electrónica impresa requiere de un menor índice conductor y por tanto se puede seleccionar un material grafénico de menor procesado, menor cantidad de uso por superficie y por consecuencia más económico. Aun teniendo estas propiedades caracterizadas, se sigue trabajando para la mejora cualitativa de este material.

Esto se describe en la figura 4.3, que muestra el período entre 2018 y 2020 caracterizado como una fase de consolidación del grafeno y materiales relacionados (GRM); con poca expansión cuantitativa, pero significativa mejora cualitativa. Esta figura ilustra la proyección a 10 años vista de la industrialización de dichos materiales. Y este proceso se entiende mediante un análisis prospectivo sobre producción de grafeno, calidad y estándares a los que debe atenerse el material y la economía, mercado y aplicaciones que se van conformando a su alrededor. Al analizar la proyección industrial de los GRM sobre la línea del tiempo, se pone en manifiesto que, se prevé llegar a la producción en masa de tintas o pastas de grafeno en menos de 10 años (Döscher et al. 2021).

²⁵ Se considera Biodata al volumen de datos procesados en masa que son extraídos de parámetros en sistemas orgánicos mediante sensórica

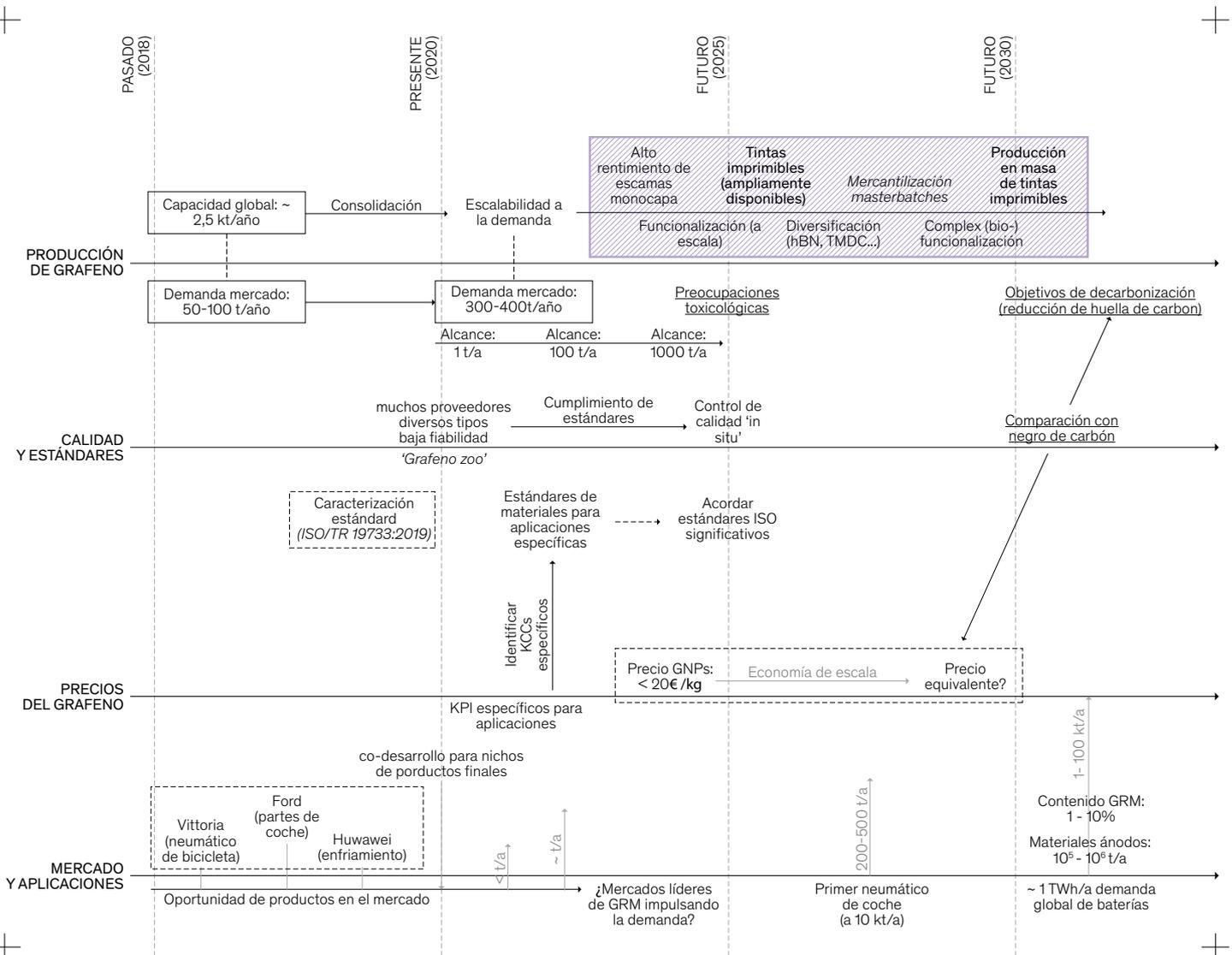


Figura 4.3.
Estudio prospectivo de la industrialización de GRM hasta 2030.
Fuente: Döscher et al. 2021.

Esto es así debido a que el grafeno muestra propiedades clave para abordar las necesidades emergentes en electrónica. Su gran área de superficie y estabilidad química, combinadas con su excelente conductividad eléctrica y térmica, lo hacen prometedor como electrodo flexible impreso en dispositivos electrónicos flexibles y portátiles (Torrissi y Carey 2018).

Los dispositivos electroquímicos desarrollados a partir de tintas conductoras han permitido el diseño de sistemas innovadores que promueven la flexibilidad para el diseño de electrónica que tengan como materiales base el de carbono, como grafito, nanotubos de carbono y grafeno (Camargo et al. 2021).

En base a este estudio se determina que existe un elevado interés en la exploración y producción de grafeno para generar compuestos de base polimérica en formato tinta imprimible o implementable en las posibles técnicas gráficas.

La electrónica flexible es un gran campo de oportunidad en la industria electrónica. Permite diseñar sistemas electrónicos de aplicaciones

inexistentes en un formato ligero, flexible y transparente. A su vez, en la implementación y la fabricación industrial masiva, los costes son inferiores a los equivalentes en electrónica cotidiana. Dado que esta tecnología permite plantear sensores autónomos de energía para la realización de los sistemas conectados, esta propiedad se considera de gran interés para el estudio de este bloque de investigación (Ferrari et al. 2015).

Una tinta conductora es una pasta termoplástica viscosa que conduce electricidad mediante partículas conductoras incluidas en el material compuesto. La función básica de la tinta conductora es crear conexiones conductoras para su uso transportador eléctrico. Añadir que, las tintas conductoras son suspensiones de nanomateriales conductores en agua o en un medio disolvente, que incluye un compuesto polimérico que actúa como estabilizador (Saidina et al. 2019).

De acuerdo con los diferentes componentes funcionales, las tintas conductoras tradicionales se pueden dividir en tres tipos: tinta conductora de base (1) carbono, (2) polímero y (3) metal (Wang y Liu 2019).

Las tintas conductoras han surgido como una forma nueva de mejorar las técnicas de fabricación de productos electrónicos. El interés de la comunidad científica e industrial por investigar y desarrollar estas tintas es motivado por características tales como sencillez en la producción, bajo coste, menor generación de residuos, producción en masa y métodos de fabricación respetuosos con el medio ambiente. Además, los dispositivos diseñado con estos materiales aportan características como flexibilidad, ligereza, posibilidad de miniaturización y en algunos casos, transparencia óptica (Rocha Camargo et al. 2021; Meister et al. 2017).

4.1.2. Relación entre cuerpo humano y electrónica epidérmica.

El cuerpo humano es complejo por definición y siempre ha sido un generador de inspiración e investigación para nuevos descubrimientos en los ámbitos de ingeniería, medicina y de las ciencias en general. Actualmente es un campo de interés aún mayor ya que los nuevos materiales y tecnologías permiten comprender con más precisión su comportamiento.

El arte, el diseño, la ingeniería y la ciencia son actualmente uno de los enfoques de trabajo para el contacto de diseño con humanos. Personas de referencia en estos campos como es el caso de la Dra. Neri Oxman (figura 4.4) se plantean nuevos términos, como el de "ecología de

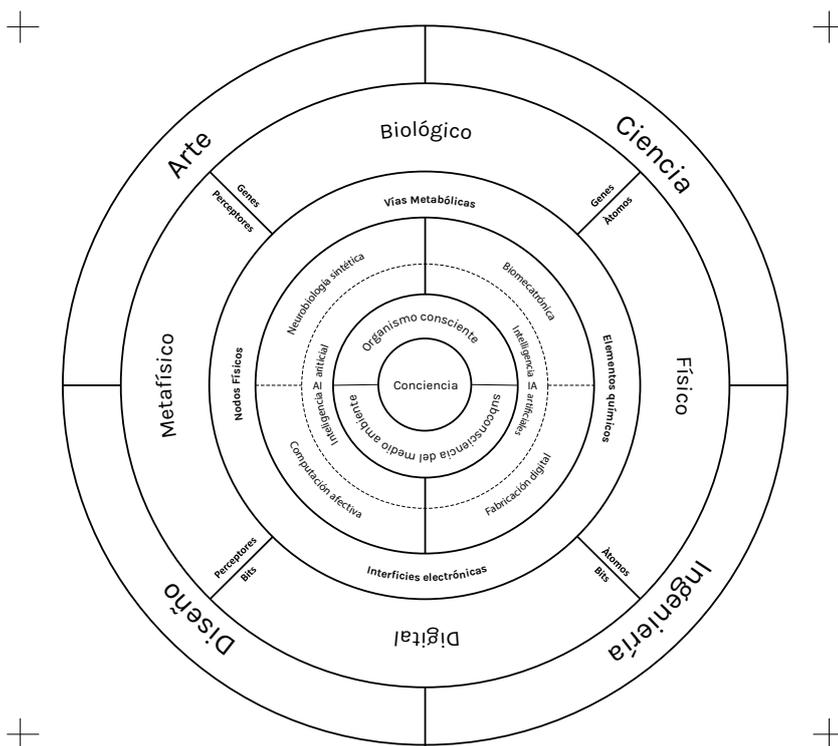


Figura 4.4. Krebs Cycle of Creativity III de la Dra. Neri Oxman (marzo 2018).

materiales" que busca que se combine la ciencia de los materiales, las tecnologías de fabricación digital y el diseño orgánico para crear nuevas posibilidades para el futuro mediante una perspectiva artística (Antonelli y Burckhardt 2020).

Existe una clara tendencia de investigación a implementar y relacionar nanotecnología con el comportamiento de la piel humana. La piel está dotada de una gran variedad de propiedades que inspiran a la ingeniería de materiales a plantear un diseño o desarrollo de propuestas en una nueva escala: la nanoescala. La comprensión de posibles aplicaciones innovadoras de materiales avanzados en dicha escala y los métodos de procesamiento actuales están permitiendo avances inesperados en el diseño de sistemas que imitan la función de la piel biológica favoreciendo las tecnologías para la fabricación de dispositivos flexibles (Chortos y Bao 2014).

La investigación en estos campos, tales como explorar las posibilidades de materiales bidimensionales a escala nano (grafeno), entender las oportunidades de proyectar sobre piel humana y aplicar tecnologías avanzadas de electrónica impresa sobre ella proporciona un mercado de producto, al que se le ha denominado electrónica epidérmica. Este campo permite el diseño de sistemas y dispositivos de "piel electrónica" que son considerados elementos clave para el avance de la inteligencia artificial, en la interacción inmediata con humanos y especialmente en aplicaciones biomédicas (Lou et al. 2017). Algunos escenarios de aplicación prometedores se describen mediante experimentos realistas relacionados con la geolocalización o la obtención de parámetros de salud o biodata (temperatura, respiración, sudor y pH), todo ello enfocado en la atención médica, el bienestar y las actividades deportivas (Amendola et al. 2021). Los dispositivos electrónicos epidérmicos ofrecen amplias aplicaciones en la monitorización biológica y la biomedicina, lo cual esta permite abrir innovadoras posibilidades en este sector (Yin et al. 2020).

La electrónica epidérmica se determina por distintos parámetros tales como el grosor, el módulo de elasticidad, la rigidez a la flexión y la densidad de la masa en el área adaptada a la epidermis. Nuevos sistemas tecnológicos de laminación y adición de nanomateriales para dispositivos en la piel permiten un contacto y una adhesión adecuada de la electrónica, que es mecánicamente invisible para las personas. A su vez, permiten incorporar sensores electrofisiológicos, de temperatura, de tensión, transistores, diodos emisores de luz, fotodetectores, inductores de radiofrecuencia, capacitores, osciladores y diodos rectificadores (Kim et al. 2011).

Con la evolución de los materiales poliméricos de propiedades elongables y los avances en materiales, mecánica, electrónica y tecnologías de la información, se ha creado un campo de interés en el sector de la electrónica epidérmica inteligente que ha permitido generar sensores extensibles para biomiméticos, sensores de presión/deformación, sensores térmicos, sensores ópticos y sensores bioquímicos (Nie et al. 2021).

Investigaciones tales como el diseño de biosensores electroquímicos epidérmicos no invasivos para el control glucémico (Kim, Campbell y Wang 2018) o los sensores táctiles flexible e-skins que se colocan en la piel para simular las propiedades integrales de la percepción humana (Lou et al. 2017) han dado paso a una serie de propuestas prometedoras. Mediante estas, la electrónica epidérmica permite especular sobre sensores táctiles multifuncionales para recopilar datos físicos como el ritmo cardíaco, la temperatura, el movimiento, los estímulos eléctricos del cuerpo humano y las sutiles vibraciones externas que condicionan el bienestar (well being) de la persona (Cui, Li y Xing 2018). Paralelamente, también se plantean propuestas emergentes de nanogeneradores y piezotrónicos para nuevas de pieles basadas en electrónica flexible (Yuan et al. 2019).

La electrónica epidérmica se considera un campo importante en la ingeniería biomédica del futuro, aunque las posibilidades en otros campos también son numerosas y potenciales. Los materiales que se utilizan todavía son diversos aunque recientes estudios proponen sistemas de bajo coste al pensar en la implementación del grafeno en los dispositivos epidérmicos (Yong Ju Yun et al. 2017).

4.1.3. Materiales en la tecnología epidérmica.

En el campo de exploración teórica se ha realizado un análisis inicial sobre las características, requerimientos y materiales propios para el diseño de tecnología epidérmica. Para ello se han tenido en cuenta más de cincuenta publicaciones científicas aprobadas en el periodo comprendido entre 2017 y 2021. Entre estas se ha hecho una selección final de treinta proyectos con el objetivo de analizarlos, clasificarlos, determinar ámbitos de uso, sistemas de aplicación y requerimientos de diseño. Para la selección de estos treinta proyectos se ha tenido presente que facilitarían datos sobre el uso de materiales, procesos definidos, suministros energéticos requeridos, así como propiedades de *stretchability*²⁶.

En la figura 4.5 se ilustra la clasificación de las publicaciones seleccionadas según dos criterios de interés en esta investigación. El primero es la adaptabilidad de la electrónica epidérmica a la piel humana; en esta ocasión se toma como referencia la definida por Liu et al. cuando determinan tres principales estrategias de aplicación de la electrónica al cuerpo: sustrato funcional, integración semiflexible y tatuajes efímeros (Liu, Pharr y Salvatore 2017). El segundo criterio de interés trata de valorar si los proyectos estudiados requieren de suministro eléctrico integrado.

La mayoría de proyectos desarrollados en este campo de investigación necesitan un consumo energético constante para su correcto uso. Sin embargo, se observa una tendencia a proponer sistemas que no requieran de consumo directo o de elementos de almacenaje energético, sino que pueden alimentarse de energía próximas a estos, como por ejemplo sistemas de carga Wireless o de transmisión de información como es el caso de la tecnología de radiofrecuencia.

Esta primera aproximación facilita la comprensión y entendimiento científico sobre este perfil de proyecto. A su vez, determina el contexto actual sobre proyectos de electrónica epidérmica en referencia a eficiencia, sostenibilidad e invisibilidad matérica. Este review tiene como objetivo definir la clasificación formal de los sustratos, los materiales compuestos usados, sus procesos y si se requieren de suministro eléctrico adicional o no.

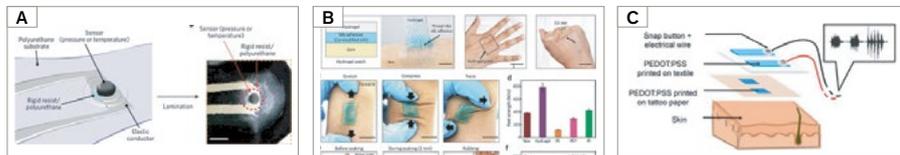
Para comprensión del mapa de clasificación de publicaciones científicas sobre electrónica epidérmica se explica el criterio de diseño a continuación: de izquierda a derecha se orienta la clasificación estratégica siguiente: (1) sustrato funcional, (2) integración semiflexible y (3) tatuajes efímeros (Liu, Pharr y Salvatore 2017). Se ha extraído una imagen por cada artículo de literatura científica clasificado y sus referencias se han identificado con una letra que ayudará a la búsqueda de la información mostrada en la figura 4.5. Respecto a si requieren de suministro eléctrico adicional o no se ha decidido que los que requieren de suministros estén ordenados en la parte superior y los que no requieren suministro en la parte inferior de la figura.

De los proyectos mapeados en esta investigación y expuestos gráficamente en la figura 4.5, se referencian a continuación por bloques estratégicos.

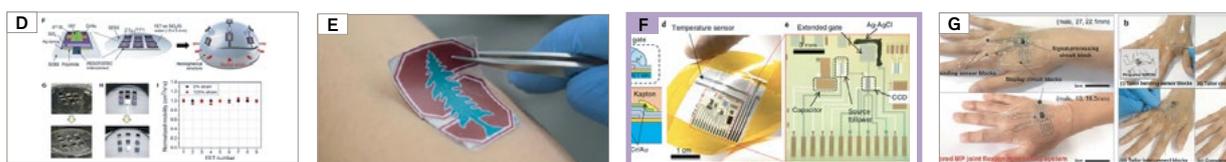
²⁶ Término inglés sin traducción literal. *Stretchability* determina la resistencia a la torsión ya la flexión sobre la piel de las personas sin que llegue a fracturar el sistema diseñado.

**REQUIERE
SUMINISTRO
ELÉCTRICO**

**SUSTRATO
FUNCIONAL**



**INTEGRACIÓN
SEMI-FLEXIBLE**



**TATUAJE
EFÍMERO**

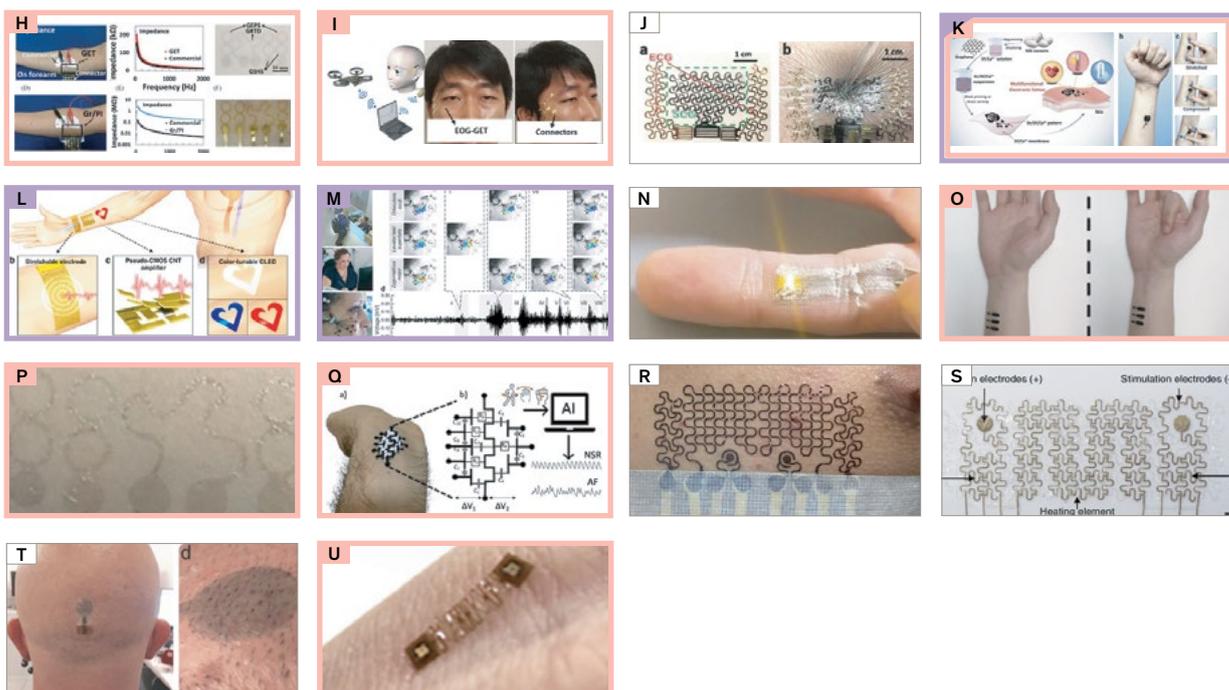
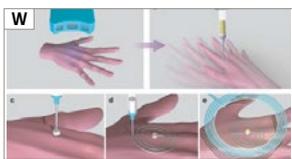


Figura 4.5.
Mapa de clasificación de publicaciones científicas sobre electrónica epidérmica (review de publicaciones del 2017 al 2021) .
Elaboración propia.

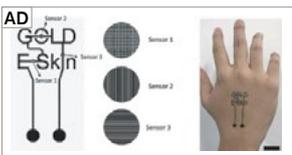
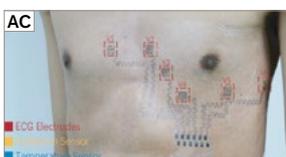
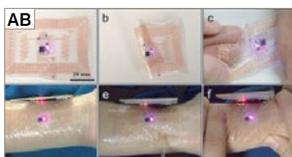
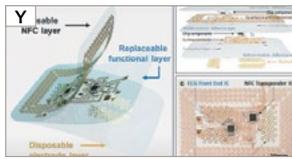
NO REQUIERE SUMINISTRO ELÉCTRICO

SUSTRATO FUNCIONAL

INTEGRACIÓN SEMI-FLEXIBLE



TATUAJE EFÍMERO



 Se usa un composite polimérico de base **GRAFENO**

 Se nombra un proceso de **SERIGRAFÍA** para la deposición de tinta conductora

- Sustrato funcional, destacan las publicaciones de Matsuhisa et al. 2017 (A), Seo et al. 2018 (B) y Bihar et al. 2018 (C), que requieren de suministro eléctrico.
- Integración semiflexible destacan Yue Wang et al. 2017 (D), Parlak et al. 2018 (E), Nakata et al. 2018 (F) y Yoon et al. 2019 (G), que requieren suministro eléctrico y Zhu et al. 2018 (W) que no lo requiere;
- Tatuajes efímeros destacan Ameri and Wang 2020 (H), Ameri et al. 2018 (I), Ha et al. 2019 (J), Qi Wang et al. 2019 (K), Koo et al. 2017 (L), Inzelberg et al. 2018 (M), Williams et al. 2019 (N), Li et al. 2020 (O), Ameri et al. 2017 (P), Ergen 2021 (Q), Youhua Wang et al. 2018 (R), Choi et al. 2018 (S), Ferrari et al. 2020 (T), Yong et al. 2020 (U), Sempionatto et al. 2020 (V), que requieren suministro eléctrico y Chung et al. 2019 (X), Jeong et al. 2019 (Y), Alberto et al. 2020 (Z), Yao et al. 2017 (AA), Jeong et al. 2017 (AB), Yin et al. 2019 (AC) y Gong et al. 2019 (AD) que no lo requieren.

El review realizado contextualiza los intereses de esta investigación. Este es trasladado como uno de los informes de evidencias inventivas necesarios en la solicitud de la patente del proyecto realizado en esta tesis doctoral. Es por ello que se destaca los estudios que usan composites de base grafénica y los que en el proceso de industrialización y técnicas graficas usan la serigrafía (ver leyenda en la parte inferior-derecha de la figura 4.5).

Del estudio realizado en el mapa de la figura 4.5 se observa una creciente tendencia al uso de compuestos poliméricos de base grafénica en sistemas de electrónica impresa, frente a otros compuestos con materiales conductores. También se determina que, la gran mayoría de proyectos relacionados con electrónica epidérmica requiere de suministro eléctrico adicional, dificultando la ligereza de la propuesta inicial.

En un segundo análisis de estas publicaciones (ver figura 4.6) se muestra una valoración más extensa para un mayor entendimiento del contexto de los proyectos de electrónica epidérmica.

En este caso, cada una de las treinta publicaciones se analiza según 7 ítems de ponderación:

Ítems para aplicaciones: (A) posibilidad del material, (B) biodata, (C) multi-aplicaciones.

Ítems que definen la autonomía energética: (D) requiere suministro eléctrico, (E) no requiere suministro eléctrico.

Ítems que determinan la clasificación de los sustratos respecto a su integración en el cuerpo humano: (F) sustrato funcional, (G) Integración semi-flexible, (H) tatuaje efímero.

Por otro lado, se determinan tres ítems relevantes de los cuales la literatura publicada profundiza más en unos casos que en otros: la conductividad, el dimensionado o grosor y la stretchability. Sobre estos se indica: (I) si se incluyen datos específicos, (J) cuando no se aportan datos.

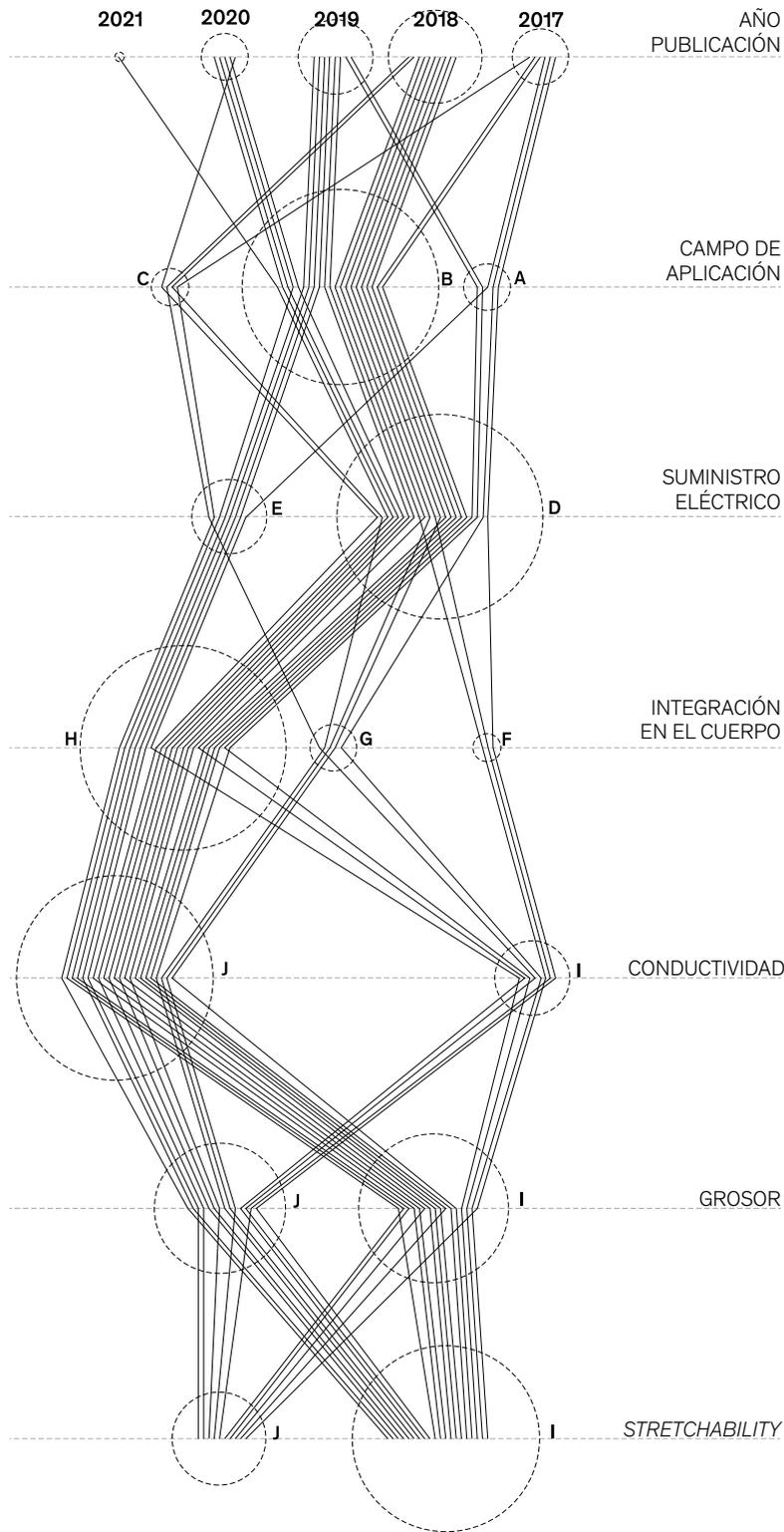


Figura 4.6. Análisis de 30 artículos publicados entre 2017 y 2021 sobre electrónica epidérmica respecto a 7 ítems ponderables. Elaboración propia.

Año de publicación	Campo de aplicación (%)			Suministro eléctrico (%)		Integración en el cuerpo (%)			Conductividad (%)		Grosor (%)		Stretchability (%)	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	I	J	I	J
2017	10	6,67	3,33	13,33	6,67	3,33	3,33	13,33	10	10	13,33	6,67	16,67	3,33
2018	0	26,67	6,67	30	3,33	6,67	13,33	13,33	13,33	20	13,33	20	20	13,33
2019	6,67	20	0	13,33	13,33	0	0	26,67	3,33	23,33	13,33	13,33	16,67	10
2020	0	13,33	3,33	13,33	3,33	0	0	16,67	0	16,67	13,33	3,33	13,33	3,33
2021	0	3,33	0	3,33	0	0	0	3,33	0	3,33	0	3,33	0	3,33
TOTAL	16,67	70	13,33	73,32	26,66	10	16,66	73,33	26,66	73,33	53,32	46,66	66,67	33,32

Tabla 4.1.

Cálculos y ponderación por ítems de estudio de la figura 4.5 y figura 4.6.

Elaboración propia.

Del análisis de los artículos seleccionados para este apartado representados en la figura 4.5, figura 4.6 y tabla 4.1, se extraen una serie de conclusiones que se exponen a continuación.

Existe una tendencia en el ámbito de la tecnología flexible que tienen como objetivo implementar aplicaciones que permitan monitorizar los datos biológicos (biodata) mediante sensores biométricos en un 70% frente al resto del estudio.

Una de las necesidades claras es definir propuestas que permitan diseñar sistemas de autonomía energética. Actualmente cuando se proponen un sistema con electrónica epidérmica, existe la dificultad de integrar la alimentación de la energía necesaria para el funcionamiento. En el estudio realizado solo un 26,6% ha logrado sistemas que no requiere suministro eléctrico. El poder realizar sistemas autónomos en esta categoría permite un intervalo más amplio de innovación final.

Respecto a la formalización de los sustratos, se observa que el objetivo principal del contexto científico es el de reducir al máximo los grosores y la cantidad de material usado. La electrónica epidérmica se integra en la piel de forma amable y para eso requiere simplificar la forma. Es por eso que se determina positivo que el 73,3% de las propuestas estudiadas se centran en una estética y formalización de tatuaje efímero que facilita la integración en el cuerpo humano.

Se considera interesante destacar que en estos proyectos de investigación se mantega, en la integración tecnológica, el concepto de tatuaje temporal ya que es más cómodo, adaptable al cuerpo y no invasivo.

Por otro lado, existe una falta de información sobre propiedades como la conductividad. En el estudio realizado el 73,3% no considera necesario cuantificarlo o no lo ha hecho constar. Para ser más precisos, solo en 3 casos se dan valores de conductividad. Esto tiene una cierta lógica ya que se conoce que estos datos en tintas conductoras son complejos de estabilizar, caracterizar y cuantificar. A su vez, se observa que, aunque no se dan datos concretos de conductividad, en algunos casos, sí que se relación la variación de comportamiento de esta propiedad respecto a la stretchability.

Para elementos que van integrados en el cuerpo uno de los ítems más importantes es el grosor del elemento, en el estudio se observa que la el 53,3% dan esta información el resto no lo definen.

Respecto a la stretchability se le da cierta importancia, es la propiedad que determina la resistencia a la torsión ya la flexión sobre la piel de las personas sin que llegue a fracturar el sistema diseñado.

En general se observa que las publicaciones estudiadas se centran más en las propiedades del material relacionadas con su adaptabilidad en el cuerpo, que con las propiedades referentes a su buena eficiencia o su funcionamiento a largo plazo.

Para el interés de esta tesis, entre los proyectos clasificados como tatuajes temporales, se pasa a analizar los materiales y procesos descritos en las publicaciones. El objetivo es entender las tendencias en este ámbito y el porque los materiales deben ser el punto de partida en el proceso de diseño de la ingeniería (figura 3.8). Por ello se ha creado la tabla 4.2, que detalla los materiales y procesos para el desarrollo de tatuajes efímeros expuestos previamente en el estudio de la figura 4.5. Para esta etapa de análisis, la selección se reduce a 22 casos, dado que son todos los que cumplen los requerimientos de investigación. Paralelamente se observa que el compuesto de material más usado es la tinta, lo cual permite una reducción del material usado, ligereza, reducción del grosor y obtener una fácil adaptabilidad a los sustratos seleccionados.

REFERENCIA		MATERIALES			PROCESOS		
PUBLICACIÓN	POSICIÓN FIG.3.2	CIRCUITO	SUSTRATO	ADHESIVO	TÉCNICA	CORTE	TRANSFERENCIA
Alberto et al. 2020	Z	Plata (tinta)	-	Papel de tattoo	Impresión	n/a	Transferencia húmeda
Ameri and Wang 2020, Ameri et al. 2018, Ameri et al. 2017	H, I, P	Grafeno (nanopartícula)	PMMA	Papel de tattoo	Spin coating	Cut-and-paste	Transferencia húmeda
Choi et al. 2018	S	Oro y plata (nanotubo)	VHB film	-	Colado en seco y secado de disolvente	-	-
Chung et al. 2019	X	Cobre (lámina)	Elastómero de silicona y canal de microfluidos (PDMS)	Elastómero de silicona	Laminado, transferencia de impresión, colocación de chip y soldadura		Adhesivo
Ergen 2021	Q	Grafeno y nitruro de boro (tintas)	EC	n/a	n/a	n/a	Impresión en el cuerpo
Ferrari et al. 2020	T	PEDOT:PSS (tinta)	PEN	Papel de tattoo	Impresión con inyección de tinta	-	Transferencia húmeda
Gong et al. 2019	AD	Oro (nanotubo) y plata (tinta)	PDMS	-	Spin coating	Corte con bisturí	Transferencia
Jeong et al. 2017	AB	Cobre (lámina)	Tegaderm	Tegaderm	n/a	Cut-and-paste	Laminación
Jeong et al. 2019	Y	Cobre y oro (láminas)	Tegaderm	Tegaderm	n/a	Cut-solder-paste	Laminación
Ha et al. 2019	J	Oro (lámina)	Tegaderm	Tegaderm	n/a	Cut-and-paste	Laminación
Inzelberg et al. 2018	M	Carbono (tinta)	n/a	n/a	n/a	n/a	Serigrafía (lavado y exfoliación previa de la piel)
Ki Wang et al. 2019	K	Grafeno (tinta)	Membrana de fibroína de seda y cationes de calcio	n/a	Serigrafía	n/a	Transferencia húmeda o escritura directa
Koo et al. 2017	L	Carbono (nanotubo)	Lámina de vidrio cubierta en una cara por Indium Tin Oxide (ITO), líquido conductivo	-	Serigrafía	Láser	Adhesivo
Li et al. 2020	O	Grafeno (tinta)	PDMS	Cinta soluble en agua	Inmersión con una máscara aplicada		Adhesivo
Sempionatto et al. 2020	V	Plata y carbono (tintas)	Poliuretano	Cinta adhesiva	Serigrafía	n/a	Adhesivo
Williams et al. 2019	N	Plata (tinta)	Poliamida Kapton	n/a	n/a	n/a	Impresión en el cuerpo
Yao et al. 2017	AA	Plata (tinta)	PDMS	Piel artificial	Introducción de la solución de plata en una máscara modelada previamente		-
Yin et al. 2019	AC	Oro (nanopartícula)	PET	Papel de tatto	Deposición mediante evaporador térmico	Corte láser	Transferencia húmeda
Yong et al. 2020	U	Grafeno (lámina)	Poliamida	-	Recocido	Grabado con iones reactivos	-
Youhua Wang et al. 2018	R	Oro (nanopartícula)	PET	Tegaderm	Deposición mediante evaporador térmico	Cut-and-paste	Transferencia húmeda

Tabla 4.2. Tabla de clasificación en materiales y procesos para tatuajes efímeros (estudio del 2017 al 2020). Elaboración propia.

Detallar que, cuando se habla de los materiales en la casilla de circuito (tabla 4.2), se tratan de materiales compuestos, en mayoría compuestos poliméricos, de base carbono, plata, grafeno, oro, entre otros.

Para este caso se expresa el material con el que se definió el compuesto en su correspondiente publicación.

En la tabla 4.2 se observa que hay un criterio común en la selección de materiales compuestos en las tintas del sistema conductor en tatuajes temporales, así como de en las técnicas de los procesos aplicados.

Como parte de este análisis se define el material base del compuesto usado en los circuitos de cada caso de estudio. Se centra especial atención en los relacionados con tintas (figura 4.7) y se observa que tienen como base materiales conductores, de los cuales destacan el polímero compuesto de base grafeno, plata y carbono por este orden.

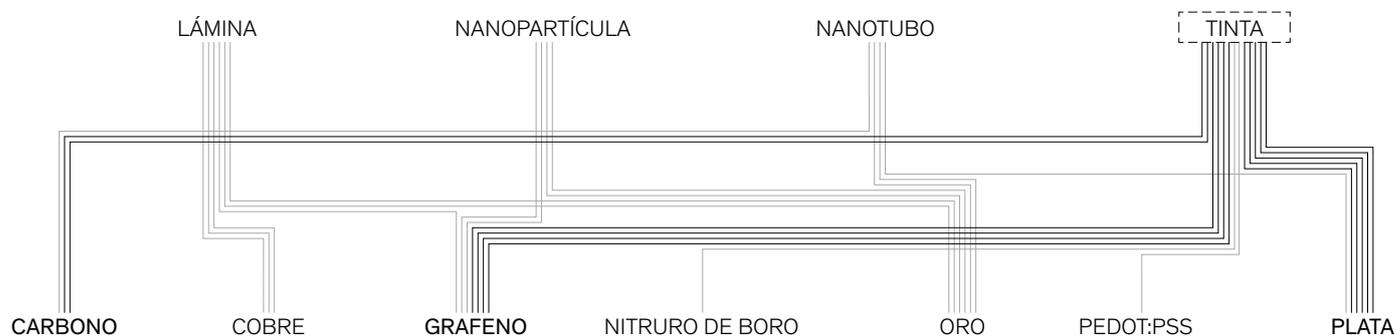


Figura 4.7. Gráfico de materiales base en circuitos de tatuajes temporales. Elaboración propia.

El grafeno es una alternativa para reemplazar muchos materiales tradicionales, particularmente en el ámbito de las tintas conductoras para la fabricación de componentes electrónicos flexibles. Durante los últimos 10 años, se han realizado numerosos estudios sobre el uso de tinta conductora de grafeno en impresión sobre sustratos flexibles con diversas aplicaciones electrónicas (Saidina et al. 2019). Las tintas conductoras de grafeno han permitido recientemente la mejora dramática de la electrónica flexible impresa debido a su bajo costo, facilidad de procesamiento, mayor conductividad y flexibilidad. A su vez, las técnicas de impresión consideradas son serigrafía, la impresión en huecograbado, la impresión por inyección de tinta y otras tecnologías de impresión emergentes (Tran, Dutta y Choudhury 2018).

Los materiales de base carbono, incluidos el grafito, el grafeno, los nanotubos de carbono (CNT) y sus materiales derivados, se han empleado ampliamente como materiales biosensores, conductores y capacitivos debido a su elevada conductividad (Wang y Liu 2019).

Tomando como base el estudio realizado de Jessica Rocha et al.²⁷ sobre tintas conductoras que estudia sus propiedades, comportamiento electroquímico, morfológico y técnicas gráficas aplicadas para la obtención de los resultados más favorables, se extrae que la mayoría de los trabajos encontrados en la literatura desde 2018 hasta la actualidad proponen el desarrollo y uso de una tinta conductora novedosa mediante técnicas de serigrafado, destacando principalmente por su sencillez (Rocha Camargo et al. 2021).

La técnica de serigrafía es un método de preparación integrado eficiente para la fabricación de sistemas de electrónica flexible. Destaca de forma diferenciada respecto al resto por ser un técnica que (Chu, Peng y Jin 2017):

²⁷ Ver tabla 2 del artículo de referenciado (Rocha Camargo et al. 2021).

- Permite aplicar tintas en sustratos mas delgados y delicados (similar a la piel), evitando aplicar presión sobre este.
- Permite trabajar con tintas de características técnicas más complejas (composición, viscosidad...)
- No limita las propiedades de las tintas técnicas, mientras que otros sistemas generan muchos errores en el proceso.
- Permite el control de la sección para el cálculo de propiedades eléctricas y magnéticas con mayor precisión que otros sistemas.
- Al ser un sistema por deposición permite mayor definición en el diseño geométrico, evitando la dispersión de la tinta.
- Se considera una técnica versátil, reutilizarse y sostenible.
- Bajo coste de producción y elevada producción.

Debido al rápido desarrollo de la ciencia de los nanomateriales, se han introducido cada vez más nanomateriales en la fabricación de dispositivos serigrafiados.

Por otro lado afianzar que la electrónica impresa presenta una serie de ventajas sobresalientes: (1) la producción a gran escala, (2) bajo coste y (3) son respetuosos con el medio ambiente, estos se debe principalmente a su proceso industrial simplificado y ahorro de material (Chen y Liu 2021).

Aparte de para los tatuajes temporales, se han formulado múltiples tipos de tintas conductoras para circuitos flexibles impresos que incluyen compuestos de materiales base de metales o derivados del carbono debido a su alta conductividad.

Esta última década ha vivido una transición respecto a lo que la electrónica de consumo se refiere, se ha experimentado mejoras en las técnicas de producción masiva, se ha mejorado su eficiencia y se ha reducido su tamaño. Los circuitos electrónicos son cada vez más delgados, flexibles y portables. Esto es debido al desarrollo de técnicas de impresión gráfica creadas para trabajar con tintas conductoras en sustratos flexibles (Tran, Dutta y Choudhury 2018), esto ha permitido una aproximación más fiable en el diseño de tatuajes electrónicos.

4.2. Exploración científica. Experimental (Scientific Exploration).

La exploración científica de este estudio requiere de una parte experimental que consolide, defina y concrete lo enmarcado en la parte teórica de la literatura científica. Cuando se trata de materiales avanzados en una etapa incipiente, de la cual se esta en un proceso de transferencia tecnológica, el proceso experimental es significativo para la correcta selección de los materiales finales en un diseño de producto de características disruptivas.

Este apartado de investigación se centra el estudio de los materiales óptimos en la electrónica epidérmica y las tintas conductoras adecuadas en tatuajes temporales. Se considera necesario aclarar que se diferencian las tintas y los sustratos como partes matéricas esenciales en el desarrollo de estas tecnologías.

La metodología de investigación realizada será un ensayo de laboratorio en el que de forma empírica se parametrizarán los objetivos e indicadores de evaluación. El ensayo experimental se ha definido en tres principales partes. Primero se definen los materiales de estudio. En segundo lugar, se definen las condiciones del estudio en el proceso de trabajo del ensayo, las técnicas y las herramientas necesarias. Por último, se determinan los indicadores de medición que permiten el análisis y evaluación del ensayo realizado.

Se ha considerado objetivos principales los siguientes:

1. Definir qué material conductor en estado líquido (tinta) es más adecuada para ser aplicado en el caso de estudio de esta tesis: Tatuaje electrónico efímero.
2. Estudiar y caracterizar las tintas de grafeno para la integración en electrónica epidérmica.

A continuación, se describen los detalles del ensayo realizado.

4.2.1. Alcance del ensayo y procedimiento metodológico.

Para esta experimentación en laboratorio se definen las etapas metodológicas para el ensayo que permitirá acotar los ítems a evaluar y delimitar el alcance del mismo. A su vez, se definir la relación entre la investigación teórica y práctica.

Las etapas del procedimiento de este estudio son las siguientes:

1. Definir los materiales compuestos poliméricos del ensayo: 3 tintas comerciales que tengan cada una un material base: grafeno, plata y carbono (materiales definidos por el estudio realizado en el apartado 4.1).
2. Determinar el sustrato adecuado²⁸ para los ensayos.
3. Diseñar el experimento y procedimiento del ensayo para la producción de probetas: técnicas, herramientas y proceso.
4. Realizar la producción de las probetas de análisis. Proceso: Serigrafía.
5. Post-procesado: Curado de los materiales según especificaciones técnicas.
6. Realizar las mediciones de los ítems de evaluación: Multímetro, perfilómetro y microscopio electrónico de barrido (SEM).
7. Obtener resultados.

El reto de esta exploración experimental recae en la evaluación del comportamiento de distintas tintas conductoras usadas en la electrónica epidérmica para tatuajes temporales. Anteriormente se ha hecho un estudio para determinar qué tintas son las más aplicadas en este tipo de tatuajes (apartado 4.1.3). A parte de las de grafeno, se han destacado las de plata y carbono.

A continuación, se busca clasificar las propiedades de las tintas seleccionadas para comprender y definir los parámetros de diseño de esta smart ink con propiedades conductoras, se realiza mediante una serie de ensayos de laboratorio que se mostrará a continuación.

4.2.2. Condiciones de estudio. Materiales, técnica e ítems de evaluación.

Para garantizar una estabilidad en los datos de la experimentación, se decide usar tintas conductoras, resistivas o capacitivas comerciales y patentadas por la industria.

MATERIALES

Siguiendo las tendencias detectadas en apartado 4.1, las tintas seleccionadas son una de un compuesto polimérico de base carbono, una de base plata y otra de base grafeno. Se han extraído de sus fichas técnicas las propiedades y condiciones necesarias de procesamiento en el ensayo (tabla 4.3).

²⁸ Los sustratos se someten a una caracterización teórica ponderada desarrollada en un punto más avanzado del caso de estudio.

MATERIAL	CÓDIGO	REFERENCIA	PROVEEDOR	COLOR	VISCOSIDAD (Pa-s)	DENSIDAD (g/ml)	CONDICIONES DE CURADO (°C)	SECADO (min)	LIMPIEZA	IMPACTO AMBIENTAL (kg CO ₂ eq)
Compuesto polimérico de carbón	MAT-C1	Bare Conductive	Electric Paint	Negro	Alta	1,16	Temperatura ambiente	5 - 15	Agua	9,02
Compuesto polimérico de plata	MAT-S1	ELECTRODAG 725A (6S-54)	Henkel	Plata	0,011 - 0,014	2,14	120	15	MEK	577
Compuesto polimérico de grafeno	MAT-G1	CamInK SPI	Cambridge Nanosystems	Negro	5 - 30	0,9 - 1	140	45	Disolvente	0,0757

Tabla 4.3.

Datos de los materiales usados en el ensayo. Fuente Fichas técnicas de los materiales. Elaboración propia.

SUSTRATO

Para el ensayo de determina como variable fija el sustrato que permita evaluar las tres tintas por igual. Por tanto, este sustrato es común para la evaluación de las tres tipologías de tinta.

Dado que el procesado de las tintas y el curado de estas para el estudio requiere de unas condiciones definidas en las fichas técnicas y detalladas en la tabla 4.3, se determina que las propiedades principales en la selección del material para el sustrato deben contemplar los siguientes requerimientos:

- Grosor del Film: Se requiere que sea lo más delgado posible para evaluar la integración de las tintas en la superficie de la piel. Para contemplar el menor uso de material por superficie usada. Se busca delgadez para estudiar su posible aproximación a la estética de una piel electrónica.
- Propiedades Ópticas: Se requiere de un sustrato de elevada transparencia para determinar el acabado del diseño sobre la piel.
- Propiedades térmicas: Para el curado de las tintas, en el caso máximo, se requiere un sustrato en el que su temperatura de servicio sea igual o superior de 140°C.

Se determina la ponderación de las propiedades de mayor a menor importancia de la siguiente forma:

	GROSOR	TRANSPARENCIA	TEMPERATURA	TOTAL
GROSOR	-	0	0	0
TRANSPARENCIA	1	-	0	1
TEMPERATURA	1	1	-	2

Tabla 4.4.

Criterio de ponderación de propiedades técnicas de la selección. Elaboración propia.

Para aplicar la ponderación se seleccionan tres sustratos de diferentes tipologías que cumplen con las propiedades establecidas con anterioridad y se analizan para seleccionar el material que presente el mejor rendimiento (Tabla 4.5 y 4.6).

	GROSOR g/m ³	TRANSPARENCIA %	TEMPERATURA °C
PP Clear TC 30 / RP74 / PET30	28	TRANSPARENTE	0 a 120
PET Clear TC 36 / RP37 / HD 70	36	ULTRA TRANSPARENTE	-20 a 100
PE MATT 80/ RC12	80	TRANSPARENTE	120 a 200

Tabla 4.5.
Datos de los requerimientos a ponderar. Elaboración Propia

		PP Clear TC 30 / RP74 / PET30	PET Clear TC 36 / RP37 / HD 70	PE MATT 80/ RC12
GROSOR g/m ³	0,5	28 3*0,5	36 2*0,5	80 1*0,5
TRANSPARENCIA %	0,5	TRANSP. 2*0,5	ULTRA- TRANSP. 3*0,5	TRANSP. 2*0,5
TEMPERATURA °C	1	0 a 120 3*1	-20 a 100 2*1	120 a 200 2*1
TOTAL		5,5	4,5	3,5

Tabla 4.6.
Resultados de la ponderación en la selección de sustrato. Elaboración propia.

El criterio de selección aplicado, en primera instancia es, que sean materiales estandarizados en formato film y que correspondan a requerimientos que favorezcan la adhesión entre láminas, resistencia a la humedad y económico en costes. Los más favorables son los Polipropilenos (PP), los Polietilenos (PE) y los Tereftalatos de Polietileno (PET).

UPM Raflatac de referencia comercial: PP Clear TC 30 RP 74 PET 30. Se elige como base sobre la que experimentar porque presenta un buen rendimiento frente a los variantes procesos de integración que cada tipología de tinta requiere y procesado.

DISEÑO DE LAS PROBETAS

El ensayo está dimensionado para producir 40 probetas de cada tipología de tinta. Es decir, 120 probetas totales que conforman una muestra. Se realizan 2 muestras del ensayo. De entre las probetas, se diferencian 4 formas de probeta con variabilidad de longitud (100mm y 150mm) y grosor (0,423mm y 0,705mm). Para las 4 formas de probeta, se producen 10 repeticiones de cada para cada tinta (tabla 4.7 y figura 4.8).

Por lo tanto, se detalla de la siguiente forma para cada material:

MUESTRA 1	PROBETA TIPO	LONGITUD (mm)	GROSOR (mm)	PROBETA (ud.)
MAT-C1	TIPO A	100	0,423	10
	TIPO B	150	0,423	10
	TIPO C	100	0,705	10
	TIPO D	150	0,705	10

MUESTRA 1	PROBETA TIPO	LONGITUD (mm)	GROSOR (mm)	PROBETA (ud.)
MAT-S1	TIPO A	100	0,423	10
	TIPO B	150	0,423	10
	TIPO C	100	0,705	10
	TIPO D	150	0,705	10

MUESTRA 1	PROBETA TIPO	LONGITUD (mm)	GROSOR (mm)	PROBETA (ud.)
MAT-G1	TIPO A	100	0,423	10
	TIPO B	150	0,423	10
	TIPO C	100	0,705	10
	TIPO D	150	0,705	10

El grosor de las probetas está dimensionado a partir del hilado de la malla seleccionada, es la que determina la geometría estandarizada. A su vez se ha definido la distancia entre ellas en 10mm, medida adecuada para que una probeta no contamine a la otra.

Tabla 4.7. Dimensiones de las probetas en el ensayo. Elaboración propia.

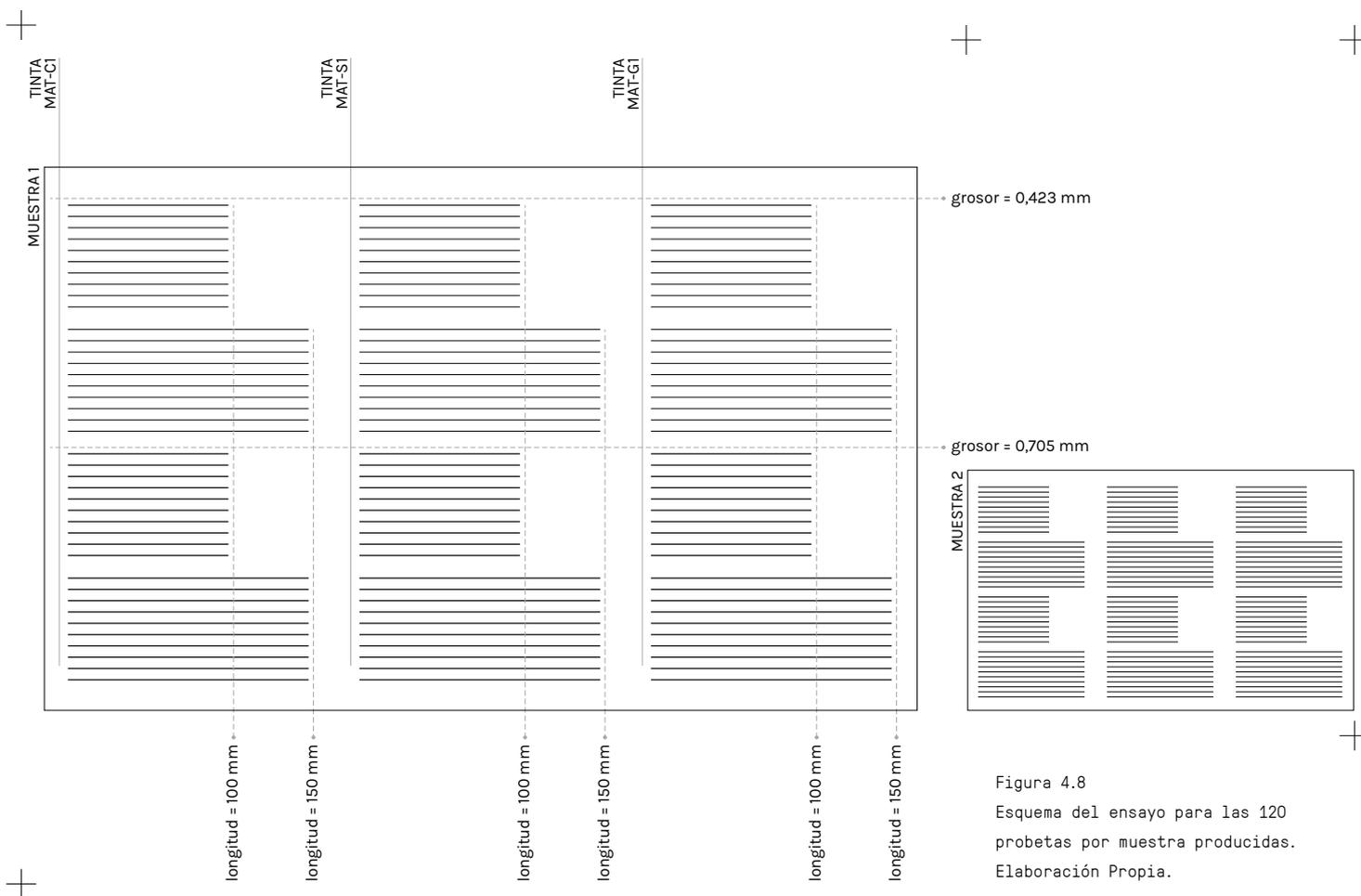


Figura 4.8 Esquema del ensayo para las 120 probetas por muestra producidas. Elaboración Propia.

TÉCNICAS DE PRODUCCIÓN

La técnica gráfica aplicada para la producción de las probetas sobre los sustratos poliméricos es la serigrafía. Una técnica de impresión que consiste en transferir una tinta a través de una malla de seda tensada sobre un marco. A la que previamente se coloca un bloqueador (resina, emulsión o barniz), sobre el área inversa a la geometría de la probeta. De ese modo se garantiza la definición de la probeta. Una vez definida esta parte, se puede posteriormente transferir un material con esta geometría a una superficie con el sustrato seleccionado. Se ha escogido esta técnica de impresión ya que es la recomendada desde la investigación realizada sobre este tipo de tecnologías (Rocha Camargo et al. 2021).

Una vez terminado el proceso requiere de una limpieza específica. En el caso de la tinta de grafeno, debe limpiarse con disolvente y en el caso de la tinta de carbono, puede limpiarse con agua y jabón.

Herramientas necesarias para este proceso serán:

- Mesa de serigrafía
- Pantalla de serigrafía de malla en seda M77 (77 hilos en trama).
- Brida de fijación componentes
- Rasero o regleta de aplicación tintas
- Fotolito
- Celo
- Productos de limpieza: Disolvente, jabón y estropajo.
- Productos de protección personal: Bata, mascarilla FFP2 y guantes de latex.

Para este estudio se han realizados 5 pruebas en los que se han testeado las tres tintas y los resultados más favorables han sido para la trama de tejido en seda en 77 hilos/cm².

Pantalla (hilos/cm ²)	MAT-C1	MAT-S1	MAT-G1	Resultado
120	Probeta incompleta	Probeta incompleta	Probeta incompleta.	Descartada
94	Correcto	Obstrucción de la pantalla	Correcto	Descartada
77	Correcto	Correcto	Correcto	Seleccionada
64	Poca definición geométrica	Poca definición geométrica	Correcto	Descartada
35	Poca definición geométrica	Poca definición geométrica	Poca definición geométrica	Descartada

Tabla 4.8.
Resultados de las pruebas en pantallas de serigrafía. Elaboración propia.

MEDICIÓN Y DOCUMENTACIÓN DEL ENSAYO

Cada probeta recibe un código que permite consultar en cada momento los datos de esta y detalles del proceso a la que ha sido sometida, también permite su identificación entre todas las realizadas (figura 4.9). Dicho código tendrá la información del proceso, material compuesto, posición en las muestras y nº de probeta en el ensayo.

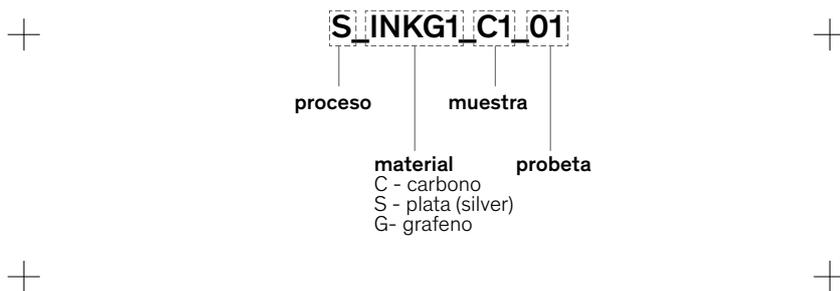


Figura 4.9. Descripción del código de las probetas. Elaboración propia

Para este ensayo se deben tener en cuenta que tanto la tinta de grafeno como de plata, requieren de un post-proceso de curado en el que las probetas son expuestas a una fuente de calor. En la figura 4.10 se explica de forma genérica la metodología seguida para la producción de cada probeta. También, las mediciones a las que se someten las probetas para conocer su resistencia, sección conductora y estructura, para posteriormente poder conocer la resistividad, rugosidad y durabilidad de cada tinta. Toda esta información está documentada en el fichero de datos.

APLICACIÓN DE TINTAS		CURADO DE TINTAS		MEDICIÓN DE PROBETAS			
<ul style="list-style-type: none"> Colocación de la placha y la tinta. Colocación de los soportes. Uso de las regletas. Limpieza y secado de los utensilios en cada aplicación. 		<ul style="list-style-type: none"> Control de la temperatura y manipulado del horno. Curado de los soportes con control de tiempo. 		RESISTENCIA		PERFILÓMETRO	SEM
				<ul style="list-style-type: none"> Realización de 5 mediciones de cada probeta y cálculo de la media. Control de temperatura y humedad. 		<ul style="list-style-type: none"> Realización de mediciones de área y rugosidad de 5 secciones de probetas seleccionadas y cálculo de área y rugosidad media. 	<ul style="list-style-type: none"> Captura de 5 imágenes a escala nano de 5 probetas seleccionadas.
<ul style="list-style-type: none"> Plancha de serigrafía con malla de 77 hilos 		<ul style="list-style-type: none"> Horno SEVERIN TO 2041 		<ul style="list-style-type: none"> Multímetro PROMAX PD-693 		<ul style="list-style-type: none"> Perfilómetro Dektak 150 Stylus profiler-VEECO 	<ul style="list-style-type: none"> JEOL JSM-7001F
Capas		Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Probeta	Probeta
Carbono	1	15	T ambiente	27	23,3	S_INKC1_1_26; S_INKC1_2_26	S_INKC1_1_30
Plata	1	15	120	16,6	23,4	S_INKS1_1_26; S_INKS1_2_26	S_INKS1_1_30
Grafeno	1	45	140	4	23	S_INKG1_1_26; S_INKG1_2_26	S_INKG1_1_30
RESISTIVIDAD / CONDUCTIVIDAD DE LAS TINTAS							
CALIDAD / DURABILIDAD DE LAS TINTAS							

Figura 4.10. Resumen de la metodología en el ensayo.

Una vez definidos los procedimientos del estudio, se procede a la medición de los datos para obtener resultados evaluables en la toma de decisiones.

Para los resultados de determinan tres ítems variables importantes a documentar y evaluar.

1. La resistencia (kΩ): Se medirá mediante un multímetro referencia PROMAX PD-693 para poder posteriormente determinar la conductividad de la tinta.
2. La sección y rugosidad: se medirá con un perfilómetro de contacto que proporcionará el área de la sección (referencia Dektak 150 Stylus profiler – VEECO).
3. La calidad superficial del material y si hay fractura en el material: se observará mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM - Scanning Electron Microscopy referencia JEOL JSM-7001F). Para este caso se observará con aumentos de 240x, 1000x, 2000x y 5000x.

4.2.3. Resultados del estudio y caracterización de los materiales en tinta.

Una vez realizadas todas las probetas se procede a la medición y procesamiento de estas para la selección de las más favorables de estudio. Con la finalidad de obtener una ordenación en los resultados, se ha elaborado un documento de cálculo en Microsoft Excel que hace posible la recopilación de las mediciones correspondientes al ensayo que facilitará los cálculos posteriores.

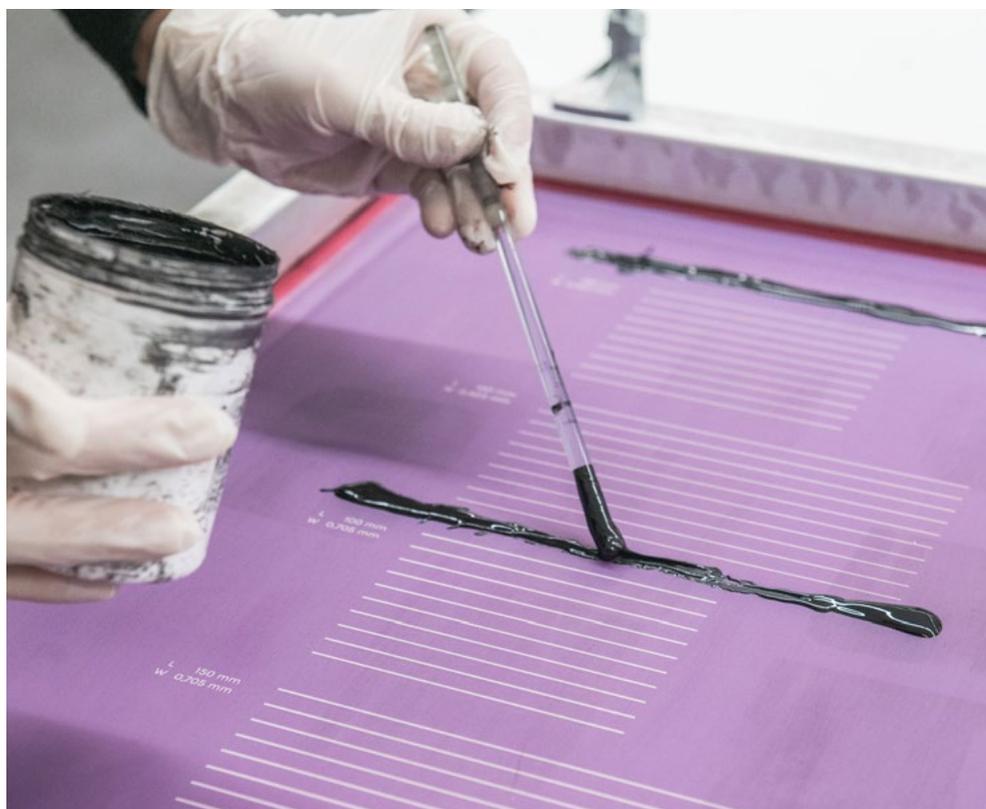




Figura 4.11.
Procedimiento de producción de las
probetas en serigrafía.
Imágenes propias.

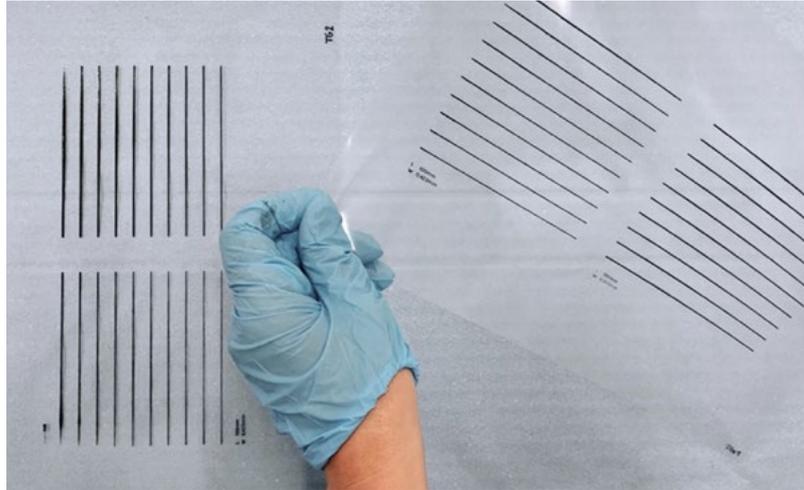


Figura 4.12.
Algunos resultados de las pruebas realizadas. Imagen propia.

Una vez realizada esta producción se obtienen 240 probetas, 80 por cada material de estudio.

Para seleccionar las probetas en mejores condiciones, primero se procede a hacer una medición inicial de la resistencia del material mediante un multímetro. Para garantizar que la lectura sea estable se realizan 5 mediciones por cada una de ellas. En segundo lugar, se comprueba si a distintos tramos de la probeta los valores de medición son correlativos, se estima distancias de 20mm y 50mm.

Por último, se procede a una observación visual de la morfología de las probetas mediante una lupa analógica y un microscopio (BioBlue de Euromex). Se analiza cualitativamente el desgaste superficial, la adhesión de la tinta al sustrato, la calidad de definición en el contorno de la geometría, así como si el material se ha dispuesto homogéneamente.

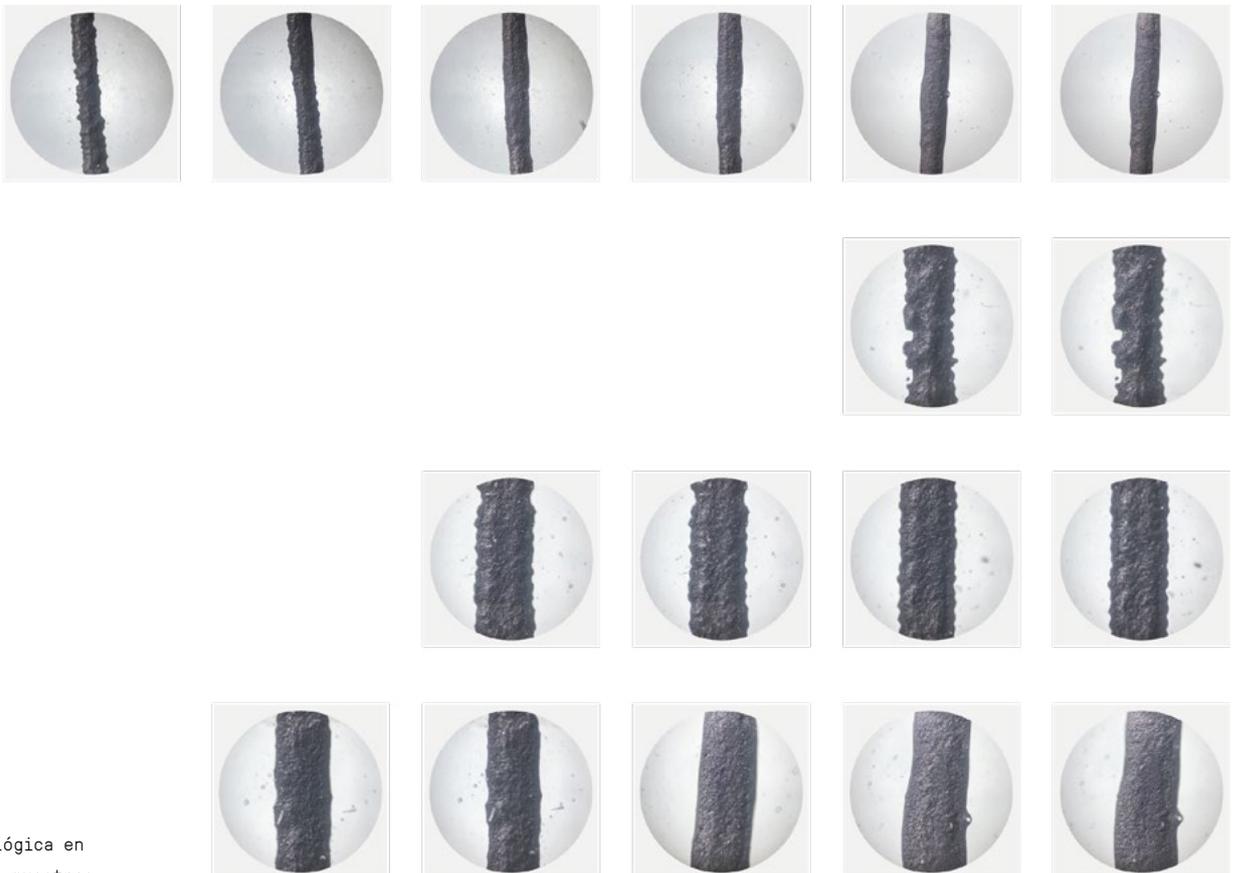


Figura 4.13.
Observación morfológica en microscopio de las muestras. Imagen propia.

Una vez obtenidos los resultados comentados, se procede a una selección de probetas, con el siguiente criterio:

1. La observación se inicia por las probetas de MAT-G1, que son las de principal interés para esta tesis.
2. Se marcan todas las que no tienen ningún desperfecto, incluyendo en la observación MAT-C1, MAT-S1 y MAT-G1.
3. Se localizan todas las probetas que están en buen estado correspondiente a los tres materiales y que se encuentran ubicadas en la misma posición de la muestra (selección cualitativa).
4. Se calcula el coeficiente de variación de las repeticiones de medición de resistencia realizadas por cada probeta de cada muestra. Se inicia por las de MAT-G1. Se hace la media de los 2 coeficientes obtenidos por cada probeta (teniendo en cuenta que existen dos probetas iguales: una en la muestra 1 y otra en la muestra 2).
5. Se eligen aquellas probetas que presentan una media del coeficiente de variación menor (selección cuantitativa).
6. Y la selección final corresponde al resultado de análisis cualitativo y cuantitativo de este proceso mencionado.

De este modo quedan definidas 9 probetas de 240 realizadas, 3 por material de exploración y ubicadas en la misma posición de la muestra (tabla 4.9).

PROBETA	MUESTRA	MATERIAL	POSICIÓN
S_INKC1_1_26	1	MAT-C1	26
S_INKC1_1_30	1	MAT-C1	30
S_INKC1_2_26	2	MAT-C1	26
S_INKS1_1_26	1	MAT-S1	26
S_INKS1_1_30	1	MAT-S1	30
S_INKS1_2_26	2	MAT-S1	26
S_INKG1_1_26	1	MAT-G1	26
S_INKG1_1_30	1	MAT-G1	30
S_INKG1_2_26	2	MAT-G1	26

Tabla 4.9.
Probetas seleccionadas.
Elaboración propia.

Se detalla un esquema gráfico para mayor comprensión de lo explicado previamente. Se muestran las probetas seleccionadas en la ubicación de su proceso de producción por material (figura 4.14)

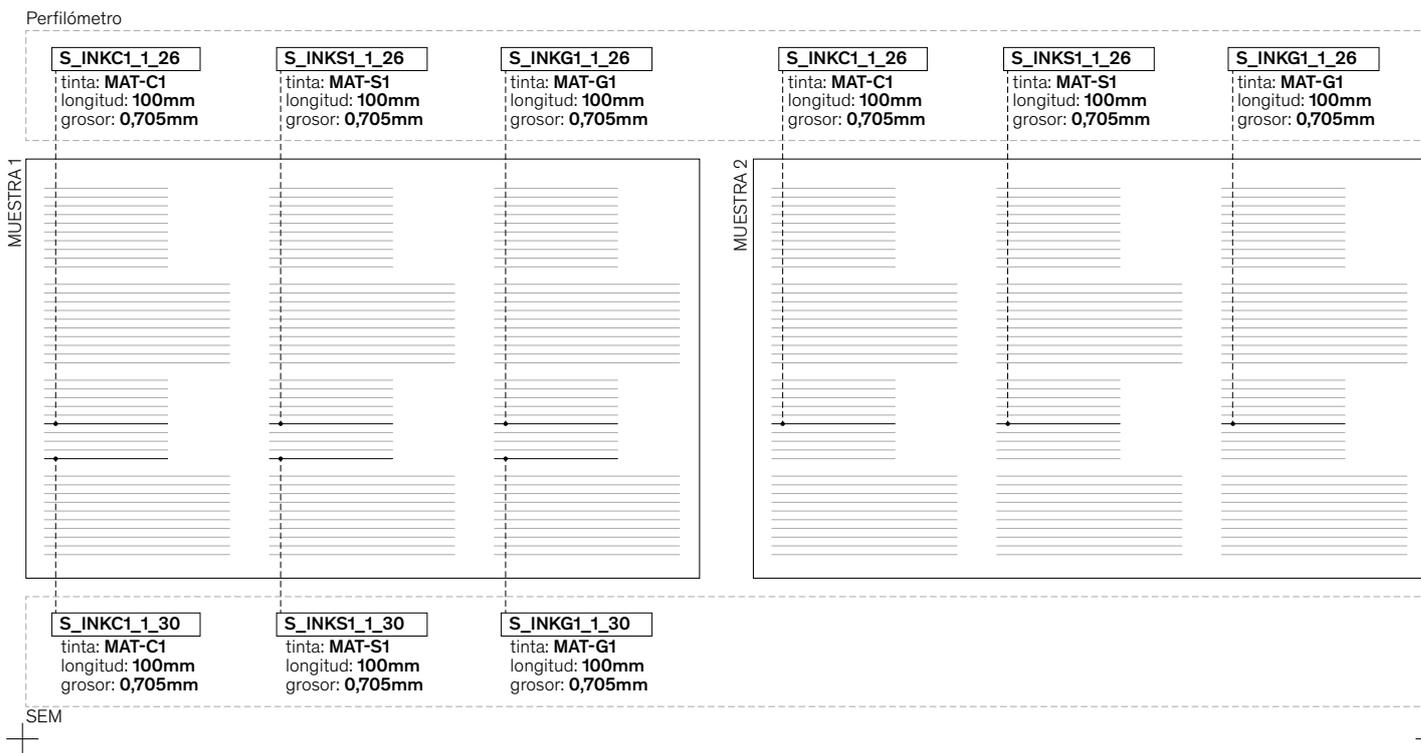


Figura 4.14. Posición de las probetas seleccionadas para el análisis. Elaboración propia.

Para analizar estas probetas en el perfilómetro se toman como adecuadas las que son de mismos valores de calidad y misma posición en la muestra 1 y 2. Dado que solo es favorable las de la posición 26 en las dos muestras y en los 3 materiales, esta es la que se procede a medir en el perfilómetro:

- MAT-C1: S_INKC1_1_26 y S_INKC1_2_26
- MAT-S1: S_INKS1_1_26 y S_INKS1_2_26
- MAT-G1: S_INKG1_1_26 y S_INKG1_2_26

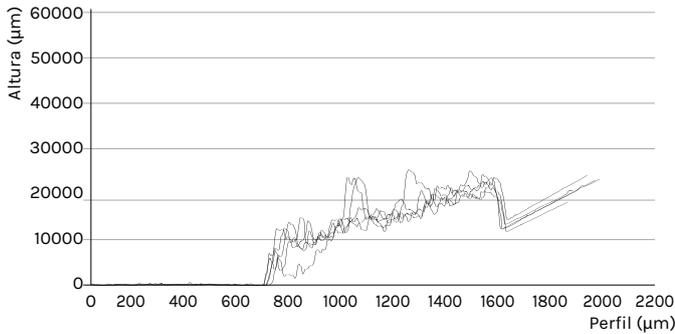
Los resultados cuantitativos del ensayo desarrollado hasta este punto se presentan en la tabla 4.10. Para cada muestra valorada en la tabla se han tenido como base de cálculo las proporcionadas por el multímetro y el perfilómetro.

PROBETA	RESISTENCIA (Ω)	ÁREA DEL PERFIL (μm ²)	RUGOSIDAD (nm)	RESISTIVIDAD (Ωm)	MASA (g)
S_INKC1_1_26	1,34·10 ⁴	14207,20	1876,42	1,90·10 ⁻³	1,65·10 ⁻³
S_INKC1_2_26	1,06·10 ⁵	10452,80	2086,48	1,11·10 ⁻²	1,21·10 ⁻³
S_INKS1_1_26	3,06	10086,40	2662,41	3,09·10 ⁻⁴	2,16·10 ⁻³
S_INKS1_2_26	5,64	10658,60	2716,21	6,01·10 ⁻⁴	2,28·10 ⁻³
S_INKG1_1_26	7,22·10 ³	20481,20	7355,17	1,48	2,05·10 ⁻³
S_INKG1_2_26	8,36·10 ³	28575,50	9272,50	2,39	2,86·10 ⁻³

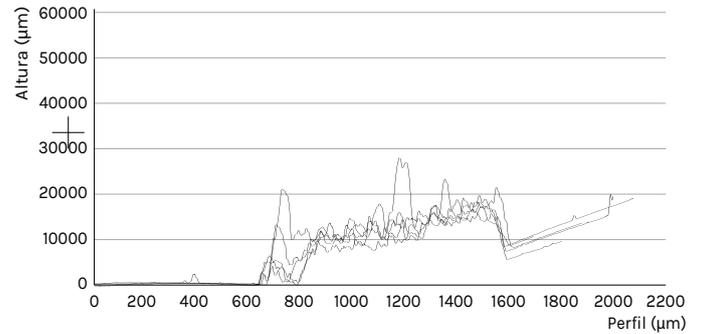
Tabla 4.10. Resultados obtenidos al someter las probetas a distintos tests en laboratorio. Elaboración propia.

Una vez valorados los cálculos realizados en esta investigación, se procesan las gráficas extraídas desde los datos generados por la perfilometría, obteniendo una gráfica de puntos que muestra la rugosidad superficial de la probeta. Se procede a realizar con las 5 secciones y se comparan para ver si hay correlación (Figura 4.15).

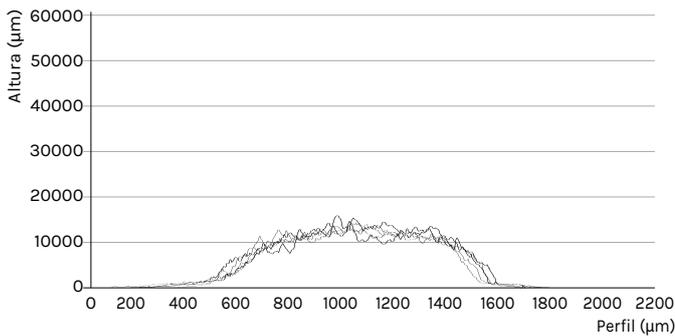
Probeta: S_INKC1_1_26
Comparativa perfiles geométricos: rugosidad



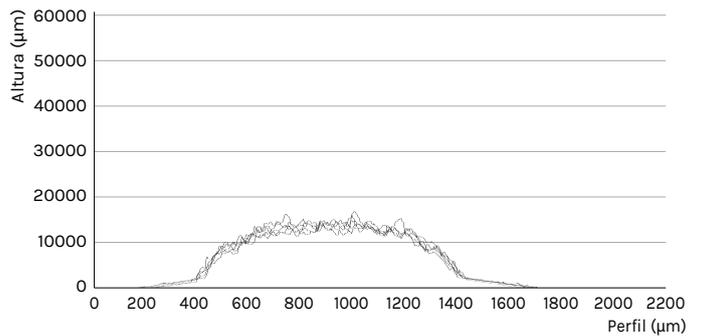
Probeta: S_INKC1_2_26
Comparativa perfiles geométricos: rugosidad



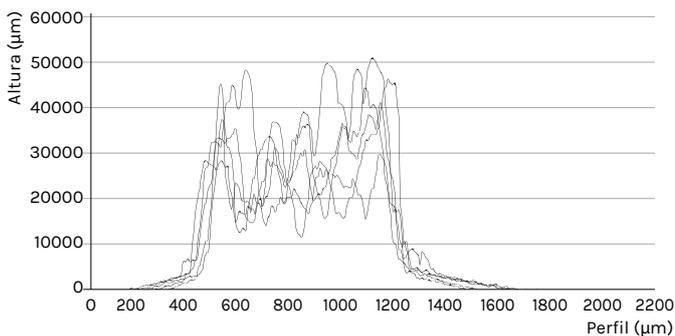
Probeta: S_INKS1_1_26
Comparativa perfiles geométricos: rugosidad



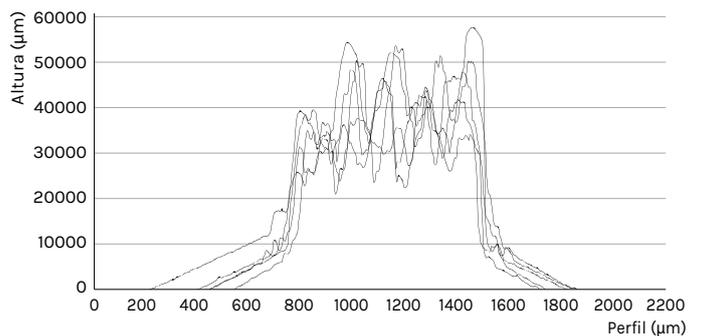
Probeta: S_INKS1_2_26
Comparativa perfiles geométricos: rugosidad



Probeta: S_INKG1_1_26
Comparativa perfiles geométricos: rugosidad



Probeta: S_INKG1_2_26
Comparativa perfiles geométricos: rugosidad



La elección de las pruebas a analizar con el Microscopio electrónico de barrido (SEM) se hace contemplando a cualquier probeta como buena para ser estudiada. Pero finalmente se realizan con las que forman parte de la selección hecha en la tabla 4.9, la de posición 30 en la muestra. Las imágenes resultantes se muestran en la figura 4.16, realizada a 240x, 1000x, 2000x y 5000x aumentos respectivamente.

- MAT-C1: S_INKC1_1_30
- MAT-S1: S_INKS1_1_30
- MAT-G1: S_INKG1_1_30

Figura 4.15.
Rugosidad de cinco secciones de cada probeta analizada con el perfilómetro.
Elaboración propia.

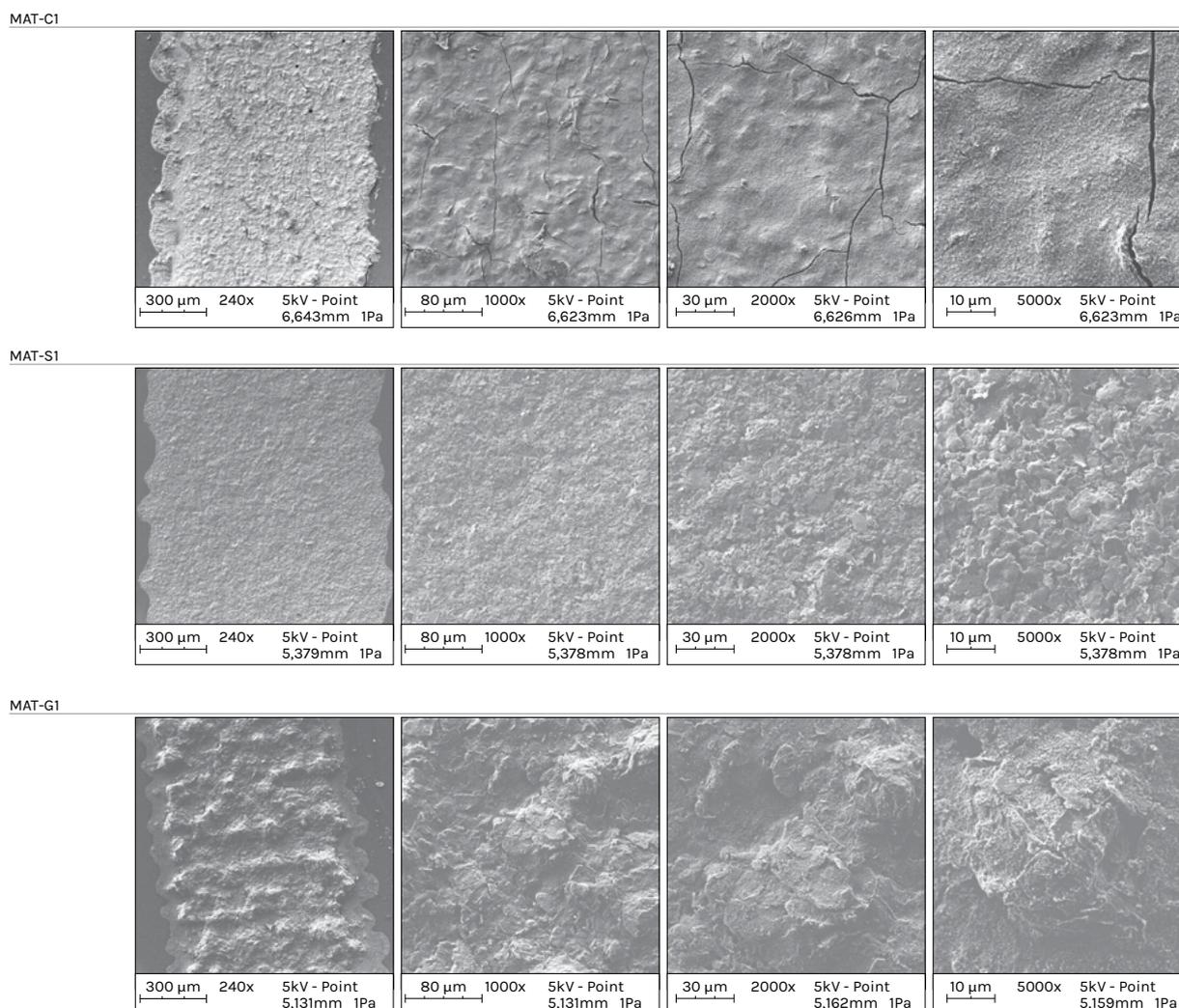


Figura 4.16.
Imágenes del análisis y comparación de materiales en SEM. Elaboración propia.

4.2.4. Consideraciones del estudio.

Una vez obtenidos los resultados es esta explosión práctica en laboratorio se observa una serie de consideraciones.

El proceso realizado y las técnicas expuestas han permitido generar los datos necesarios para poder valorar las 9 probetas seleccionadas según 4 ítems de evaluación:

1. Conductividad eléctrica: evaluada a través de la resistividad de la muestra, que viene definida por la resistencia, el área de la sección transversal y la longitud de cada muestra. También se tienen en cuenta criterios de estabilidad de la resistencia durante la medición.
2. Cantidad: evaluada a través de los datos proporcionados por el perfilómetro. Definida por el área de la sección transversal y la longitud de cada muestra.
3. Calidad: evaluada mediante los datos de rugosidad proporcionados por el perfilómetro. También se tienen en cuenta criterios cualitativos de facilidad / adecuación / eficacia del proceso de aplicación / impresión y el buen resultado físico / de acabados obtenido.
4. Durabilidad: evaluada cualitativamente en función de fracturas, desprendimientos y/o desconchados de tinta en la muestra notadas por las imágenes proporcionadas por el SEM.

En la figura 4.17 se ilustra la valoración comentada fruto del ensayo desarrollado, según los 4 ítems de evaluación.

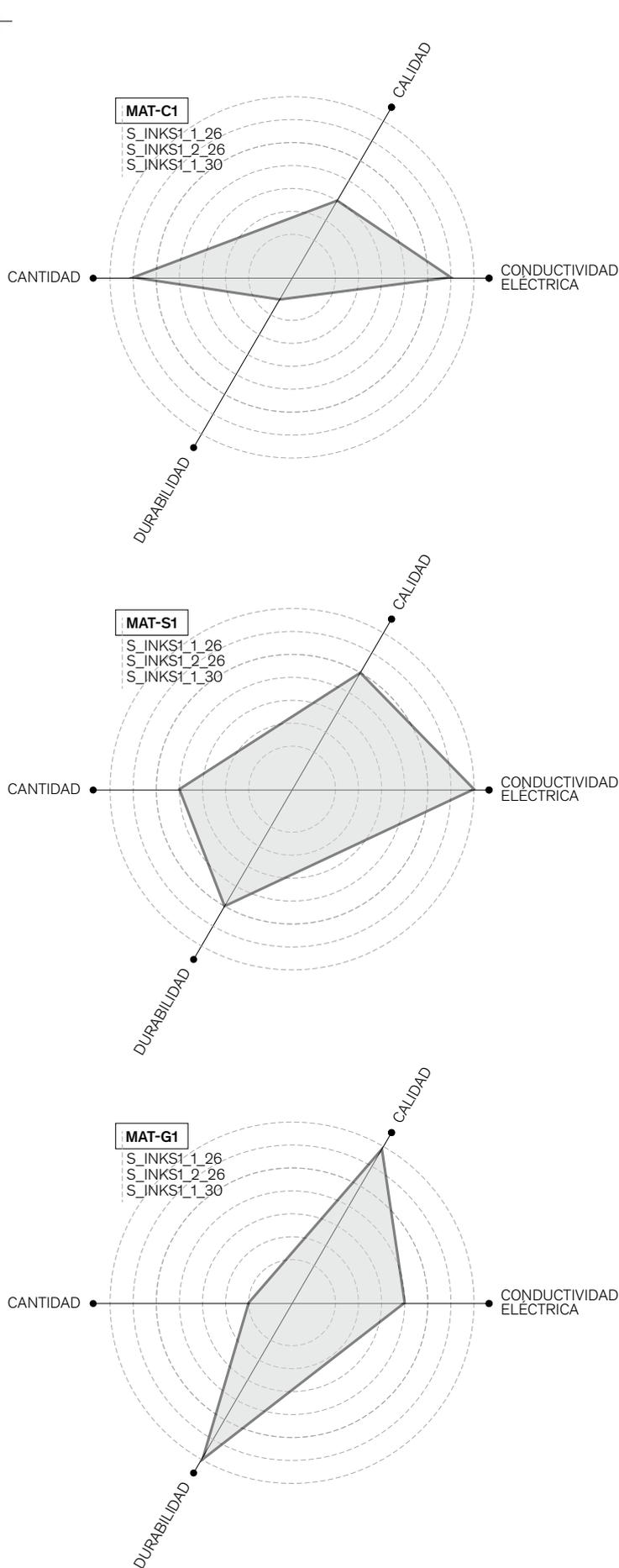


Figura 4.17. Representación de resultados y valoración de las tintas individualmente según los 4 ítems de evaluación. Elaboración propia.

Conductividad de las tintas

- La tinta de base plata es la que presenta una muy menor resistencia, hecho que se traduce a la menor resistividad, por lo tanto, es la tinta más conductora.
- Si se comparan las tintas de base grafeno y de base carbono, la de grafeno tiene una menor resistencia, hecho que podría hacerla más conductora que la de carbono. Sin embargo, la resistividad es directamente proporcional al área de la sección de la probeta. Y la probeta de grafeno presenta un área muy grande de tinta, esto influye a la hora de clasificarlo como el material menos conductor de los 3 según estos resultados.
- Por tanto, la conductividad de los materiales estudiados son de más favorable a menos por el siguiente orden: MAT-S1 MAT-C1 y MAT-G1.

Sin embargo, el estudio previo realizado en esta tesis en la exploración teórica, se muestran evidencias de que el grafeno es un material prometedor en esta propiedad de los materiales, lo que hace replantearse el por qué de estos resultados. Si que se considera relevante el que el área de la sección es mayor respecto a los otros materiales y que el uso de una mayor cantidad de tinta en las probetas haga que reduzca la conductividad, por ello sería interesante realizar un nuevo ensayo en el que se puedan equiparar las secciones de las probetas de estudio o centrado solo en las tintas de grafeno reducir el mallaado de la pantalla de serigrafía, eso reduciría la cantidad depositada.

Sección y acabados

El área de material en cada probeta, es la media logarítmica contemplando la rugosidad media que presentan las probetas. Al observar las imágenes proporcionadas por el SEM, se muestra claramente como la probeta de MAT-G1 tiene muchas protuberancias, pero es la más homogénea de todas. La figura 4.15 gráfica la rugosidad de las probetas analizadas con el perfilómetro, ilustrando perfectamente la gran rugosidad de las probetas de MAT-G1, que convierte el área de la sección en la más grande y variante en comparación con las otras dos tintas.

Por otro lado, también hay que comentar la poca durabilidad que tiene la tinta de MAT-C1, la cual se ve fracturada en toda su superficie, es una tinta frágil. No es la más adecuada para ser usada sobre sustratos flexibles.

Otra de las observaciones que con el material MAT-G1, el proceso de serigrafiado es más fácil de ejecutar, las pruebas son más fiables en su totalidad y ninguna de ellas presenta fractura. A su vez, en el proceso de medición es el material más estable en los datos extraídos.

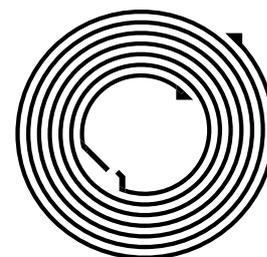
Sostenibilidad

Si se tiene presente el impacto ambiental de estos materiales y su toxicidad en ciertos ecosistemas, la más desfavorable es la MAT-S1.

4.3. Propuesta de Valor (Value Proposal).

Smart Skin Tattoo es un dispositivo electrónico epidérmico, un ultrawearable, que permite gestionar y almacenar distintos datos del usuario. Estos datos permiten interactuar con el entorno de diversas formas en función del servicio deseado. Es una propuesta adaptativa, cómoda, no invasiva, multifuncional, facilitadora de acciones, gestiones y datos. Es un elemento personal y diferenciador. Esta tecnología se aplica directamente en la piel de las personas, es hipoalérgica y no es invasiva, se puede extraerse con facilidad si se desea.

Smart Skin Tattoo es un ultrawearable de electrónica epidérmica, no invasivo y efímero que permite almacenar y generar datos personales de un modo sencillo. Todo ello sin necesidad de incorporar sistemas de alimentación energética.



Desde el conocimiento e investigación realizada se ha creado una propuesta de integración tecnológica que permite el desarrollo para la implementación de un tatuaje electrónico temporal de grafeno. Este se adhiere a la piel de forma inocua, facilitando la interacción entre persona y sistema global de datos generados por la sociedad.

Este avance en la electrónica epidérmica portátil podría ofrecer una gran cantidad de aplicaciones dinámicas, como la gestión de datos personales, el control de los accesos, los pagos desde una cuenta bancaria personal, entre otros. El prototipo de este producto, se puso a prueba el pasado 2018. Se hizo una primera prueba masiva en los usuarios de "OFFF Festival", en su edición de Barcelona. Para este caso la aplicación que se utiliza es la relacionada al acceso a los espacios y la movilidad de las personas por el festival.

Una vez realizada la primera aproximación al uso y aplicación de la tecnología, esta permite plantear otros campos de futuro en el uso privado, lúdico o de calidad de vida de las personas.

- Uso privado: Almacenar información personal, documento DNI o pasaporte, currículum vitae, tarjetas de embarque, alarmas (casa, coche...), la llave digital de acceso a tu casa, tarjetas de pago, llavero de contraseñas digitales (Passwords).
- Uso lúdico: Guardar recuerdos, tarjetas de fidelización, Playlist musical, acceso personalizado a plataformas (Netflix, HBO, Amazon...), experiencias dinámicas en entornos digitales.

Figura 4.18.
Diseño gráfico de la tecnología *Smart Skin Tattoo* (derecha). Imagen propia.

Figura 4.19.
Implementación del prototipo con la capa de comunicación personalizada (izquierda). Imagen propia.

- Calidad de vida: Información personal para personas mayores con alzheimer o gestión pacientes hospital. Abrir nuestro coche, activar luces de casa, llamar a alguien, botón de pánico, enviar una localización en caso de peligro, acceder al transporte público/metro/autobús.

Este proyecto es una propuesta de integración tecnológica en el cuerpo. Los materiales flexibles se vuelven cada vez más importantes en las aplicaciones electrónicas emergentes.

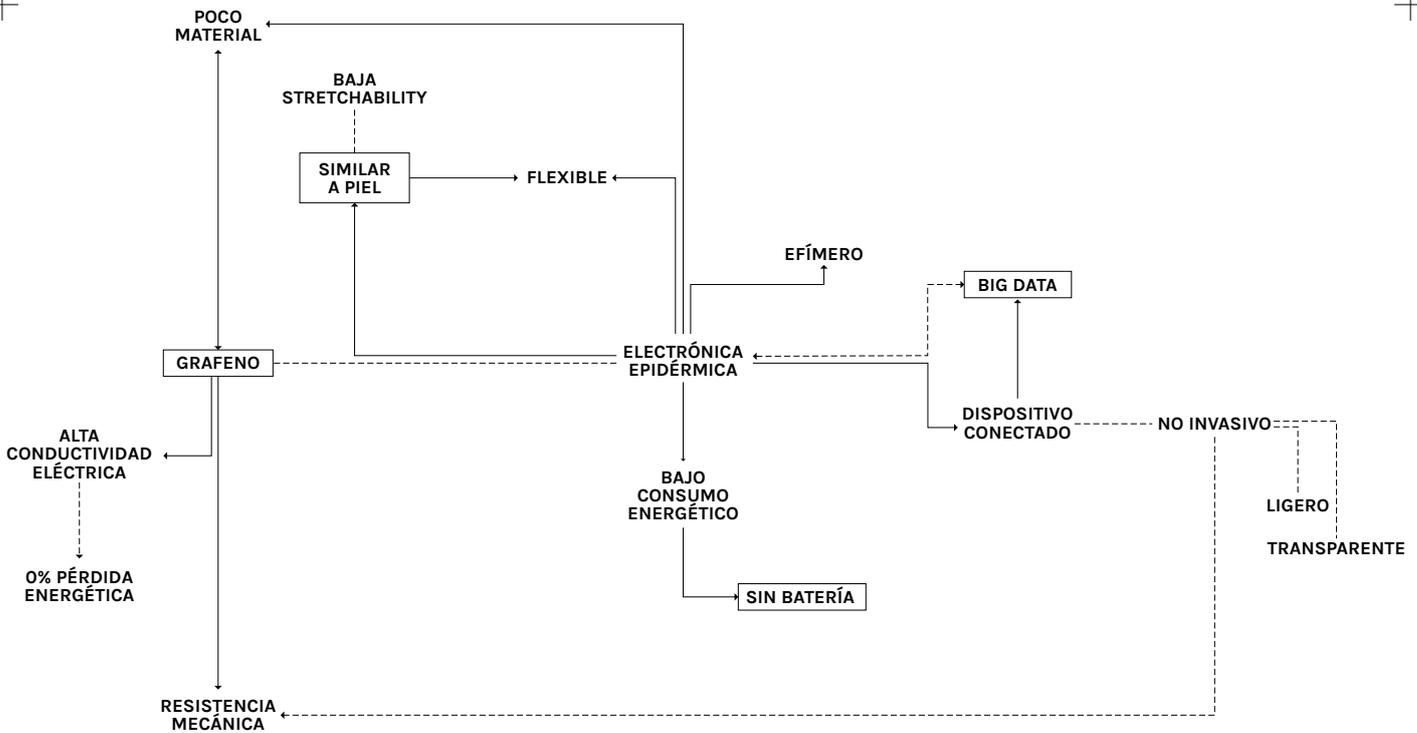


Figura 4.20.
Esquema conceptual de la propuesta de valor para *Smart Skin Tattoo*.
Elaboración propia.

Los esfuerzos para investigar y desarrollar electrónica epidérmica, tatuajes inteligentes, parches u otros biosensores portátiles se han incrementado tanto en la academia como en la industria. Estas tecnologías continúan avanzando y generan oportunidades significativas para mejorar el bienestar de las personas, no solo de forma general sino muy personalizada. Las tintas de grafeno han permitido recientemente una mejora espectacular de la electrónica flexible impresa debido a el bajo coste, la facilidad de procesamiento, mayor conductividad y flexibilidad (Kamyshny, Steinke y Magdassi 2011).

4.4. Arquitectura de la propuesta (Architecture of the proposal).

4.4.1. Viabilidad industrial.

La investigación para la viabilidad industrial de *Smart Skin*, se basa en un procedimiento no solo teórico, sino también práctico-experimental en el laboratorio y talleres especializados en las técnicas necesarias de trabajo.

Una vez entendido el comportamiento de los materiales de trabajo y de las tintas caracterizadas en apartado 4.2, se procede a definir una segunda fase experimental aplicada a un producto, en este caso para *Smart Skin Tattoo*. El objetivo de esta etapa consiste en poder desarrollar 100 prototipos funcionales en seis meses.

Para ellos se define una línea de trabajo en el tiempo con sus correspondientes actividades (Figura 4.21).

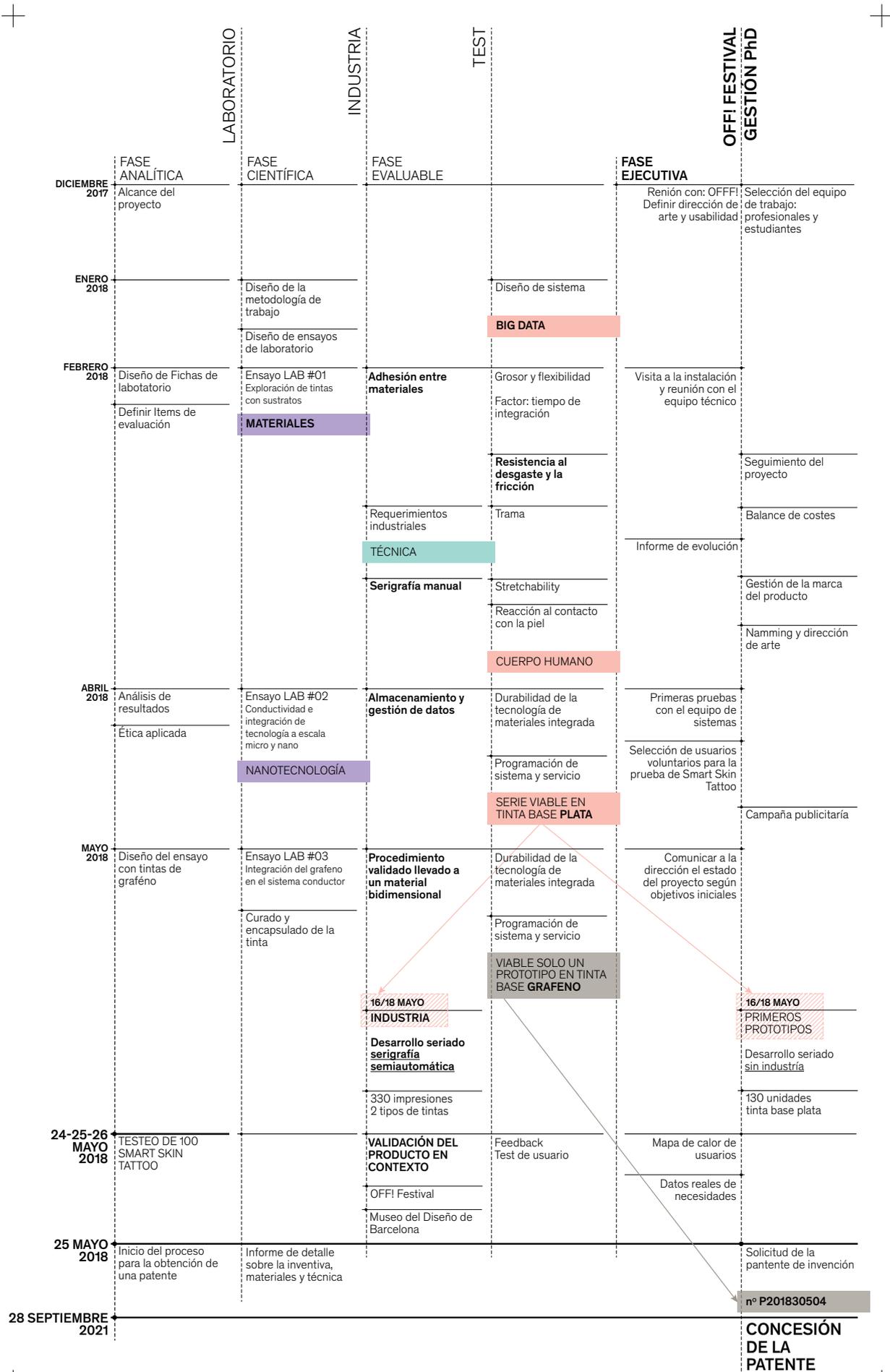


Figura 4.21. Tiempos de trabajo para el desarrollo de los primeros prototipos viables. Elaboración propia.

Se describen los ítems en base a cuatro fases principales de trabajo: analítica, científica, evaluable y ejecutiva. Se posicionan las acciones en referencia a los ámbitos/lugares de trabajo: Laboratorio, implantación industrial, Test, Off Festival y Gestión del proyecto frente a la tesis doctoral.

La investigación en el laboratorio permitió concretar los materiales, tintas, sustratos y procesos específicos que favorecerían más al funcionamiento del producto. Ese proceso tuvo lugar en el taller de ciencias y el taller gráfico de la escuela ELISAVA. También se pudo trabajar en los talleres de serigrafía ArtPlus de Poblenou (Barcelona).

Esta etapa de definición de viabilidad industrial se estructuró en un conjunto de tres ensayos principales (figura 4.21) en los que se valoraron los materiales y diseño gráfico de la tecnología, para continuar con una fase de validación y finalmente entrar en la etapa de producción.

Para todo este proceso, se ha realizado el diseño de unas fichas de estudio que permiten documentar los distintos ensayos de esta etapa (figura 4.22).



Figura 4.22.
Fichas de trabajo y análisis de las muestras realizadas en laboratorio.
Imágenes propias.

Ensayo #01 Exploración de las tintas sobre sustratos (febrero 2018).

Se realizaron 48 muestras, 9 sustratos, 3 pantallas, 5 tintas.

En este ensayo se definen los siguientes parámetros de diseño a considerar:

- Comportamiento y adhesión entre materiales seleccionados.
- Resistencia al desgaste: tiempo de permanencia en la piel.
- Flexibilidad de la piel diseñada y su stretchability.
- Relación entre cuerpo y tecnología.
- Definir los parámetros de la técnica aplicada.
- Posibles alergias en la piel.

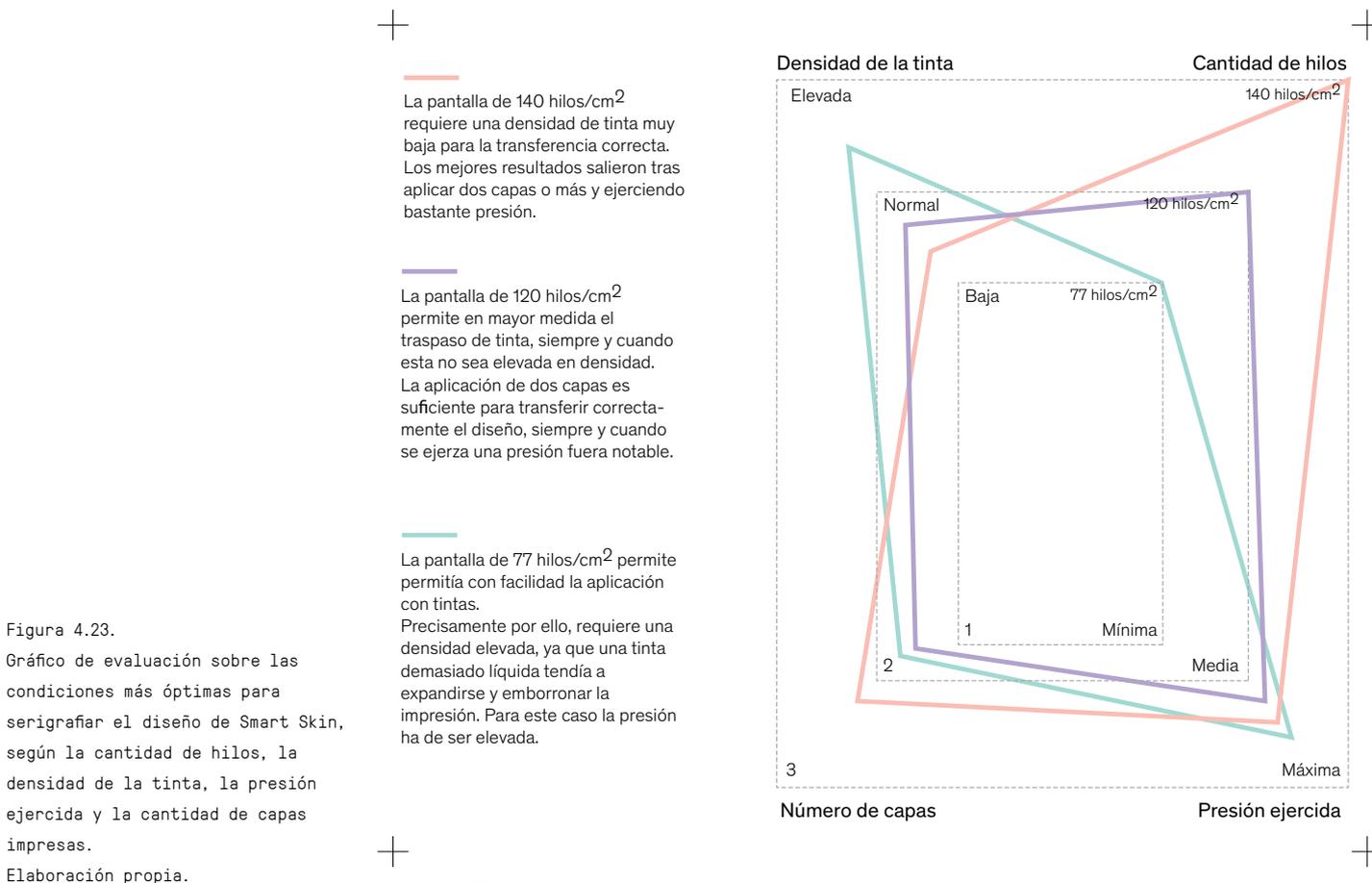
Las primeras pruebas de serigrafía tenían como objetivo explorar el comportamiento de las tintas con los sustratos de aplicación seleccionados. Se buscó combinar las propiedades de las tintas con los sustratos de diferentes gramajes y propiedades técnicas. A su vez, valorar la técnica aplicada y definir los mallados de las pantallas para la obtención de los resultados más óptimos.

Se usaron tres pantallas de serigrafía distintas, de 140, 120 y 77 hilos/cm² de tamaño 380x480mm. Son diversos los factores que pueden influir en el resultado de la impresión, es por ellos que se determina una serie de consideraciones en el ensayo a tener en cuenta en el proceso.

En la figura 4.23 se recogen los cuatro factores más representativos en relación con la tinta y se evalúan frente a la calidad y definición gráfica obtenida.

- Cantidad de hilos: a mayor cantidad de hilos, más líquida debía ser la tinta, ya que sino la impresión no quedaba completa.
- Densidad de la tinta: a mayor densidad más dificultad de traspasar la pantalla de hilos, por ello se estudia la relación entre cantidad de hilos respecto a la densidad y viscosidad de la tinta a aplicar en el proceso.
- La presión ejercida: una presión excesiva sobre una tinta muy líquida provocaría la expansión de la tinta, por consecuencia el gráfico aplicado quedaría indefinido.
- La cantidad de capas requeridas: Lo ideal sería una capa por tinta, si se ha de repasar con una segunda capa, la definición y calidad de las propiedades disminuyen.

Para este estudio los mejores resultados obtenidos han sido claramente la impresión en la pantalla de 77 hilos/cm² con la aplicación de la tinta más viscosa de las aplicadas, ofreciendo unos acabados de mayor definición gráfica, compactos y con un grosor equilibrado.



Tan importantes como las tintas son los sustratos en los que se imprime. Es por ello que, en el Ensayo #01, se presta especial atención en descubrir cuáles son aquellos materiales que mejor reciben esa impresión con tintas avanzadas.

Una vez definidas las necesidades de diseño, se determinan los siguientes factores para la selección de materiales en el sustrato:

Doble cara: algunos materiales presentan características diferentes según el lado que se esté utilizando. Por ello, al imprimir fue necesario probar como reaccionaba cada lado del material con la tinta.

Porosidad: los materiales más porosos mostraban mejores resultados a la hora de imprimir, pero se determinaron no aptos para la configuración del tatuaje dado que dificultan la adhesión entre capas. Por ello, hubo que observar con detalle por qué funcionaban mejor e imitar esos aspectos en otros sustratos de soporte.

Resistencia al calor: algunas de las tintas utilizadas requerían un curado en el horno a temperatura elevada. Lo que supone una limitación a la hora de probar materiales con un criterio unificado, ya que había algunos sustratos no resistían las altas temperaturas y se deformaban.

Grosor: los materiales que se determinaron para este proyecto tenían un requerimiento claro, deben ser tipo film y finos. La razón es que, al ser un producto aplicado directamente a la piel, su grosor debía ser mínimo, para así no perjudicar la ergonomía del producto.

Arrugas: el objetivo de todo el proceso era sacar conclusiones útiles para la producción de los tatuajes. En ocasiones, un material que reaccionaba bien a elevadas temperaturas, la adhesión de las tintas era buena e incluso se consideraba suficientemente fino se daba la dificultad de ser un sustrato muy costoso y poco manipulable. Otros materiales que no reaccionaron bien a las temperaturas aplicadas tuvieron que ser descartados.

En el proceso experimental hubo algunos imprevistos que sirvieron de ayudar en la selección final de materiales, para determinar el tiempo de secado de una tinta antes de que se obstruya la pantalla de serigrafía y la importancia de la viscosidad de la tinta para obtener un acabado de mayor definición.

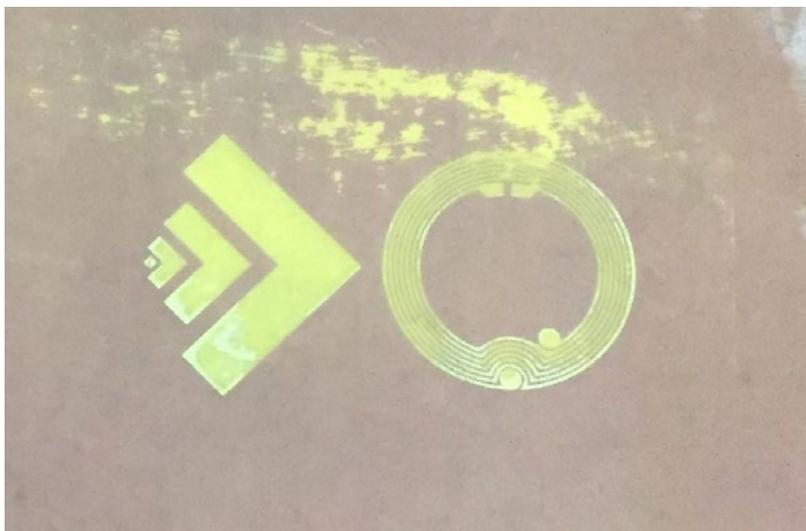


Figura 4.24.
Pantalla dañada tras quedarse pegado un soporte. Imágenes propias.



Figura 4.25.
Ensayos que, al pasar por el horno, se arrugaron o quedaron inutilizables. Imágenes propias.

Los resultados del Ensayo #01 fueron tres prototipos iniciales, estos fueron aplicados y testeados por tres de los miembros del equipo.



Figura 4.26.
Primera secuencia de aplicación en piel. Imágenes propias.

Los adhesivos se mantuvieron en la piel hasta que entraron en contacto con el agua o sudor. En dos de los tres casos, al cabo de 8h, los tatuajes se despegaron y la tinta se desbordó al entrar el contacto con el sudor. En el tercer caso paso algo similar pero cuando entró en contacto con el agua y jabón de la ducha.

La permanencia y adhesión de los prototipos a la piel respondieron bien entre 4 y 8 horas si no había aproximación al agua.



Figura 4.27.
Primeros tatuajes aplicados. Imágenes
propias.

De este estudio se concluye que los sustratos empleados seguían siendo demasiado gruesos como para ser aplicados y cómodos en la piel. Por lo tanto, se decide que en el siguiente ensayo se apliquen materiales de un gramaje inferior.

En cuanto al diseño formal se observa que el espacio entre líneas es demasiado estrecho y para conseguir mejores resultados se replantea el diseño de la electrónica del tatuaje.

Por último, se concluye que la de más fácil procesado es la tinta de compuestos poliméricos de base carbono.

Ensayo #02. Estudio de conductividad e integración tecnológica (abril 2018). Se realizaron 15 muestras, 7 sustratos, 2 pantallas, 3 tintas.

En este ensayo se definen los siguientes parámetros de diseño a considerar, incluyendo los definidos en el ensayo #01:

- Mejora de la técnica de fabricación.
- Durabilidad de la tecnología integrada.
- Tiempos de fabricación.
- Almacenamiento y gestión de los datos.

Para este ensayo se decidió elaborar prototipos de tatuaje aplicables en dos etapas. Una en la que permitiera que se valoraran los requerimientos del ensayo anterior, pero con prototipos mejorados en base a las conclusiones extraídas. Otra en la se incluyera la integración tecnológica y diseño formal.

En los primeros resultados de este ensayo, la capa superior del tatuaje se desprendió dejando una capa de adhesivo al descubierto lo cual hizo que se ensuciara enseguida y diera un mal efecto estético. En este caso ocurrió unos minutos después de estar en contacto con el agua. Aún así, el tatuaje no se despegó de la piel en 3 días.

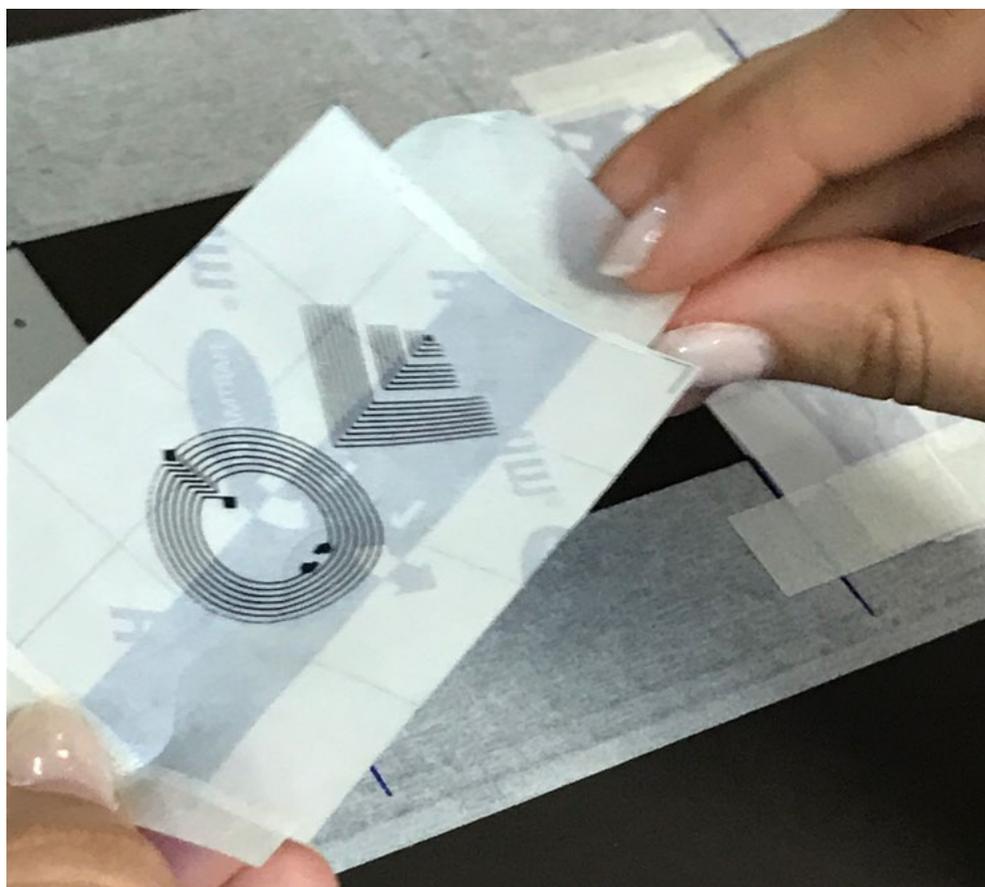


Figura 4.28.
Muestras sobre sustratos adhesivos
hipoalergénicos. Imágenes propias.

Las siguientes muestras se realizan sobre un sustrato de material adhesivo hipoalergénico mucho más ligero que los anteriores y de uso farmacéutico para la piel distribuido por laboratorios Hartmann. En este caso se aplica la pantalla de 77 hilos/cm² y un nuevo diseño. Se hicieron pruebas de técnica, adhesión y resistencia térmica.

En este caso ya se hizo el montaje de todas las capas necesarias para la funcionalidad del tatuaje electrónico y se aplico en la piel para ver sus resultados.

En este caso la adhesión mejoro y el tiempo de duración pasó a 7 días, aunque el estado del tatuaje se deterioraba a partir de los 4 días de uso.

La media de durabilidad de los testeos de esta etapa fue de 2,5 días, lo cual se consideró favorable frente a los realizados el ensayo anterior.

En la etapa de integración tecnológica se determina que el diseño trabajado hasta el momento se debería volver a redimensionar en función de las necesidades eléctricas y magnéticas. Teniendo presente el dimensionado de los microchips usados finalmente.

Para evaluar la integración tecnológica y el comportamiento de las tintas se procede a realizar un nuevo diseño de la forma y se hacen muestras a diferentes tamaños y grosores para evaluar conductividad, consumos y eficiencia de cada uno de ellos.

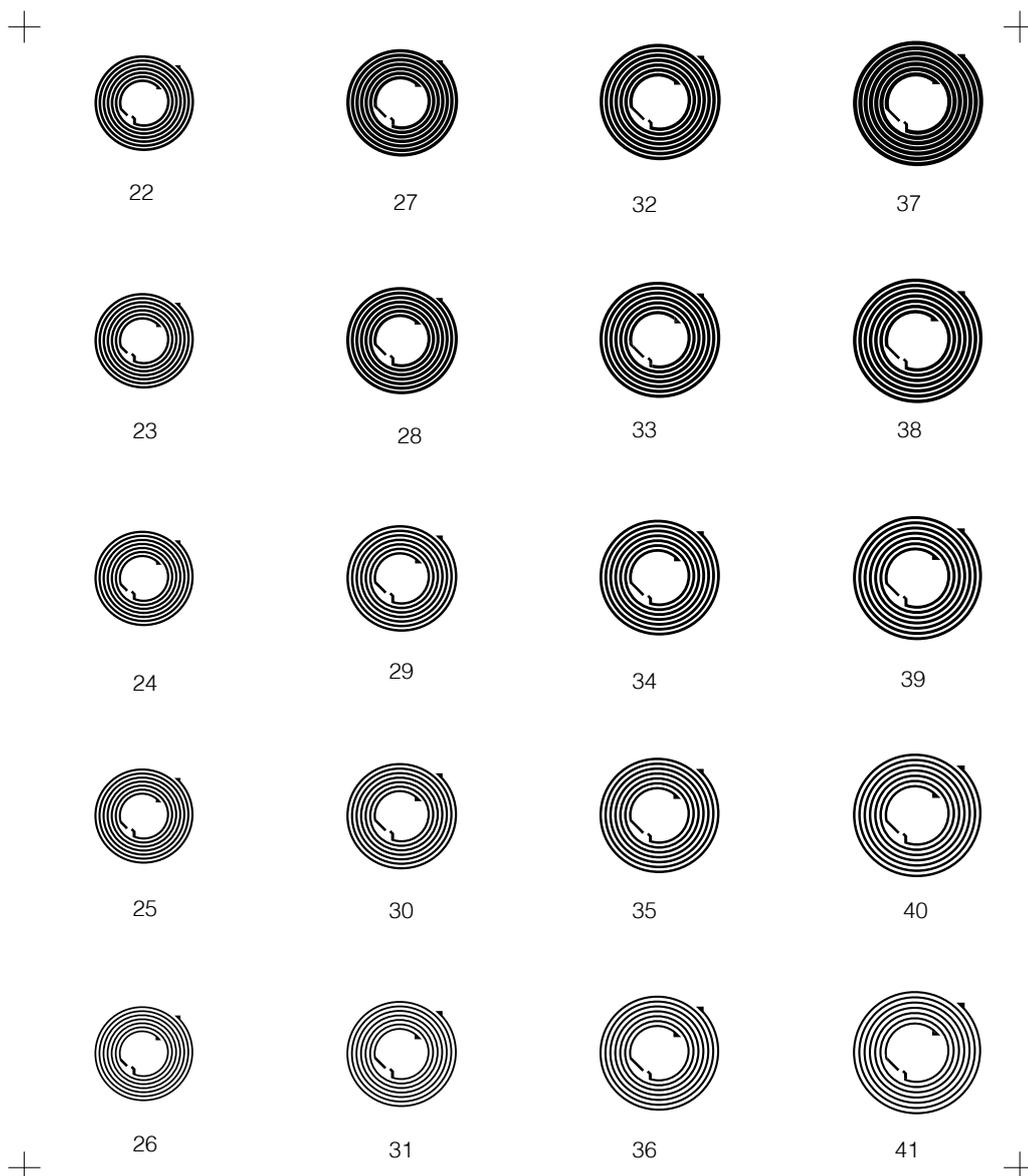


Figura 4.29.
Diseño gráfico de la tecnología.
Elaboración propia.

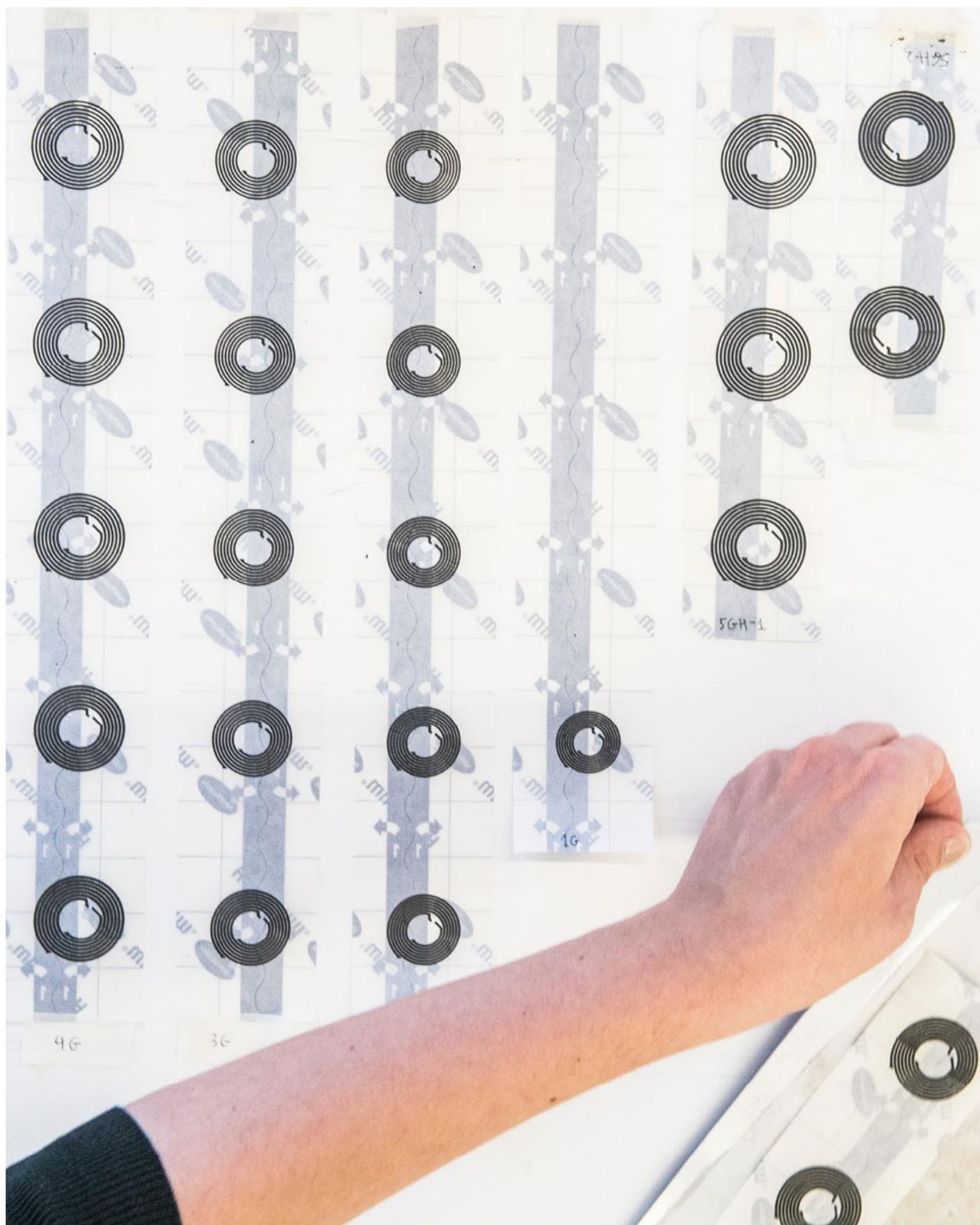


Figura 4.30.
Muestra finales sobre el sustrato
hipoalergénico. Imágenes propias.



Figura 4.31.
Curado de las muestras.
Imágenes propias.

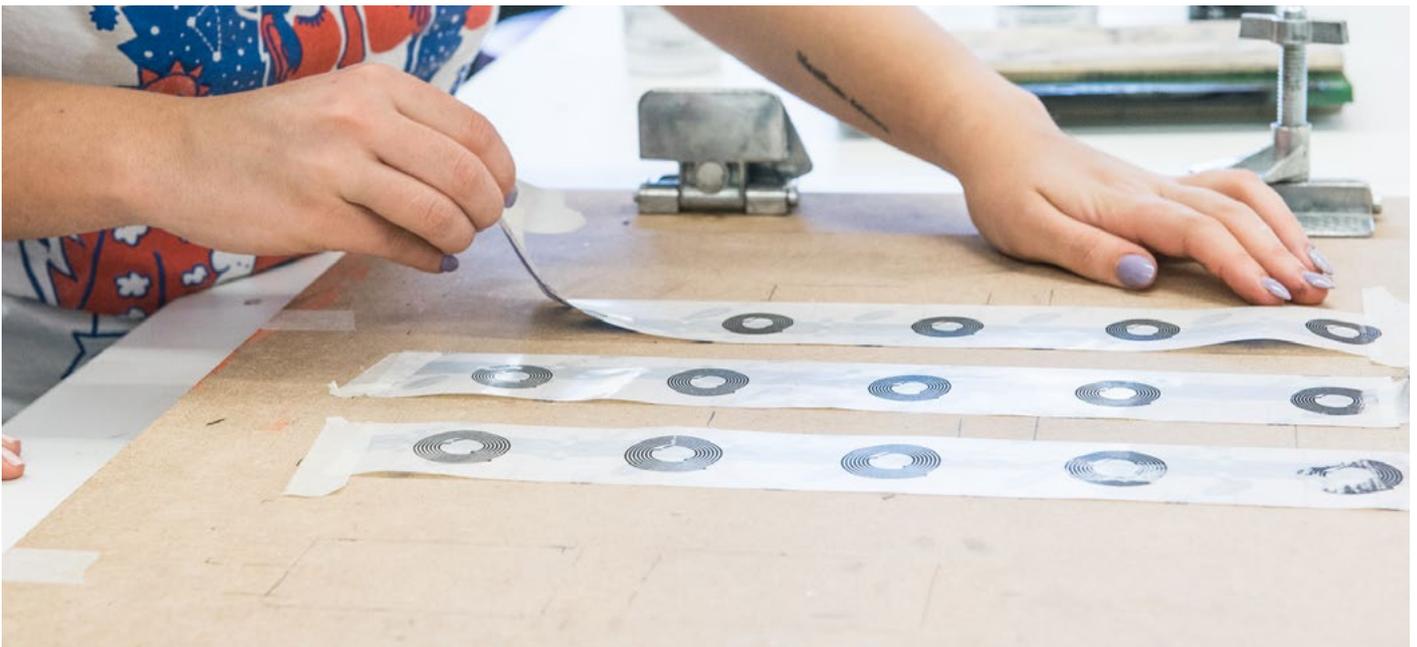


Figura 4.32.
Clasificación de las muestras después
de la impresión. Imágenes propias.



Figura 4.33.
Medición de las muestras.
Imágenes propias.

Las observaciones obtenidas de este ensayo determinan el diseño final para el testeo en beta del tatuaje electrónico con personas ajenas al proyecto. Dado que el periodo para este testeo está previsto para el OFFF festival los días 24, 25 y 26 de mayo 2018 y en base a el corto tiempo de producción, se determinan unas series de condiciones que no son las más óptimas pero sí las más viables de para alcanzar el objetivo en la fecha indicada.

Por tanto, se determina que para el prototipo de testeo:

- El sustrato base será el de material adhesivo hipoalergénico de uso farmacéutico, testado por la FDA.
- La tinta compuesta de materiales poliméricos será la de base Plata MAT-S1 (tabla 4.3).
- El proceso industrial será serigrafía manual.
- Se harán un máximo de 100 unidades.
- La capa de imagen será en negra y se integrará el logodel evento.

Se trabaja en paralelo la programación de los microchips y de los sensores de lectura, así como el sistema informático necesario para extraer los datos de la prueba.

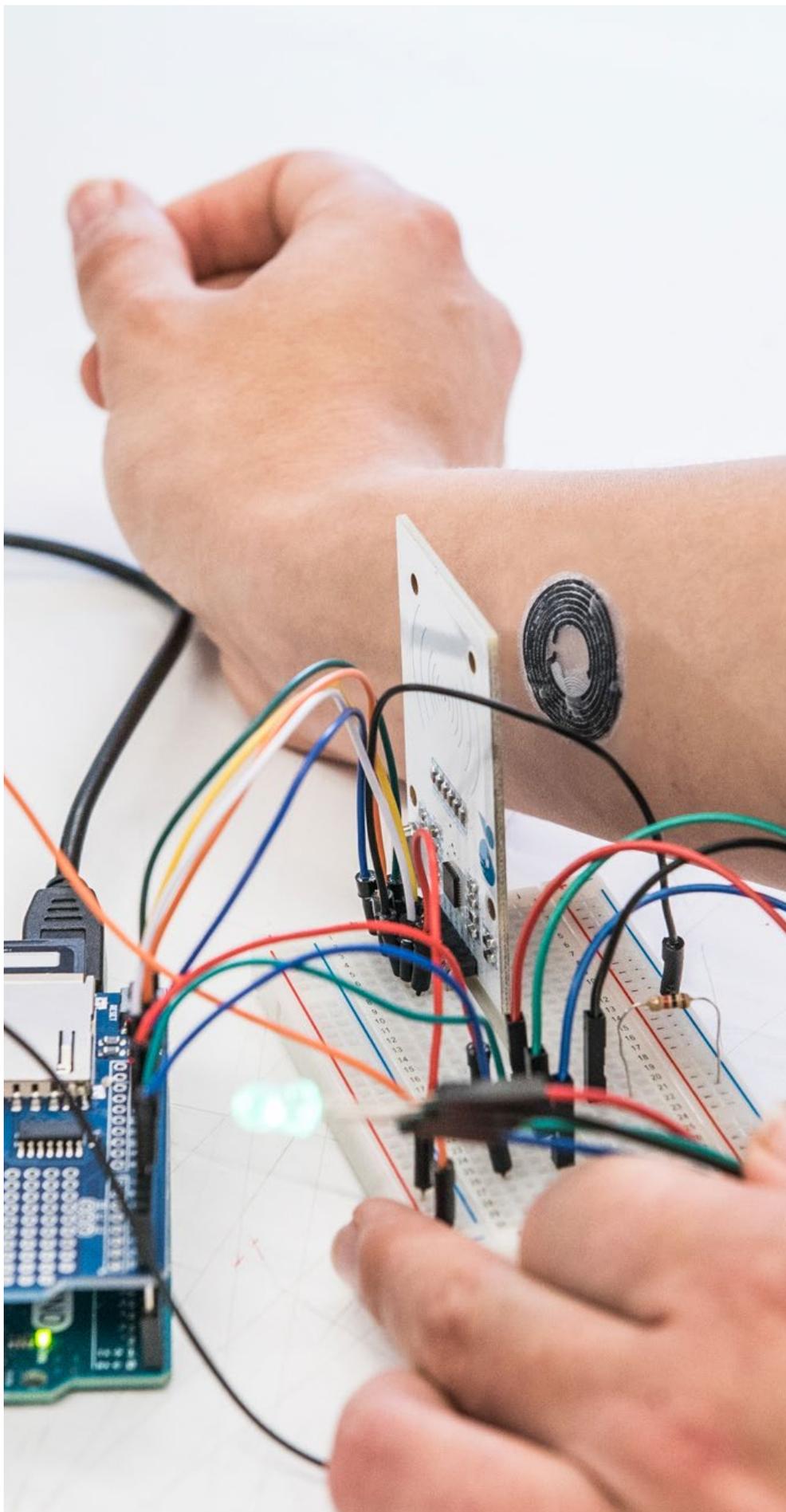


Figura 4.34.
Smart Skin Tattoo. Integración
tecnológica. Imágenes propias.

Ensayo #03. Diseño aplicado a tintas gráficas (mayo 2018).

En las pruebas realizadas hasta el momento el material más adecuado para el desarrollo de la tecnología son los de base gráficas, para este estudio se ha escogido el MAT-G1 (tabla 4.3). En los tres meses de desarrollo para los ensayos #01 y #02 no se ha conseguido estabilizar este material en el sistema tecnológico diseñado, aunque si se han conseguido resultados importantes en conductividad, eficiencia y conexión a la electrónica.

Es por ello que se propone trabajar ambos materiales en paralelo, el MAT-S1 para hacer el test masivo de la tecnología diseñada y el MAT-G1 para desarrollar esta tecnología con materiales avanzados, obteniendo así las muestras necesarias y pruebas requeridas para hacer un prototipo estable con materiales que proporcionan un salto para la innovación nanotecnológica.

Por tanto, se detalla a continuación el esquema de la tecnología que se implementa en el test del 24/26 de mayo y que paralelamente da lugar al diseño de base gráfica (figura 4.35).

Diseño por componentes de la tecnología desarrollada:

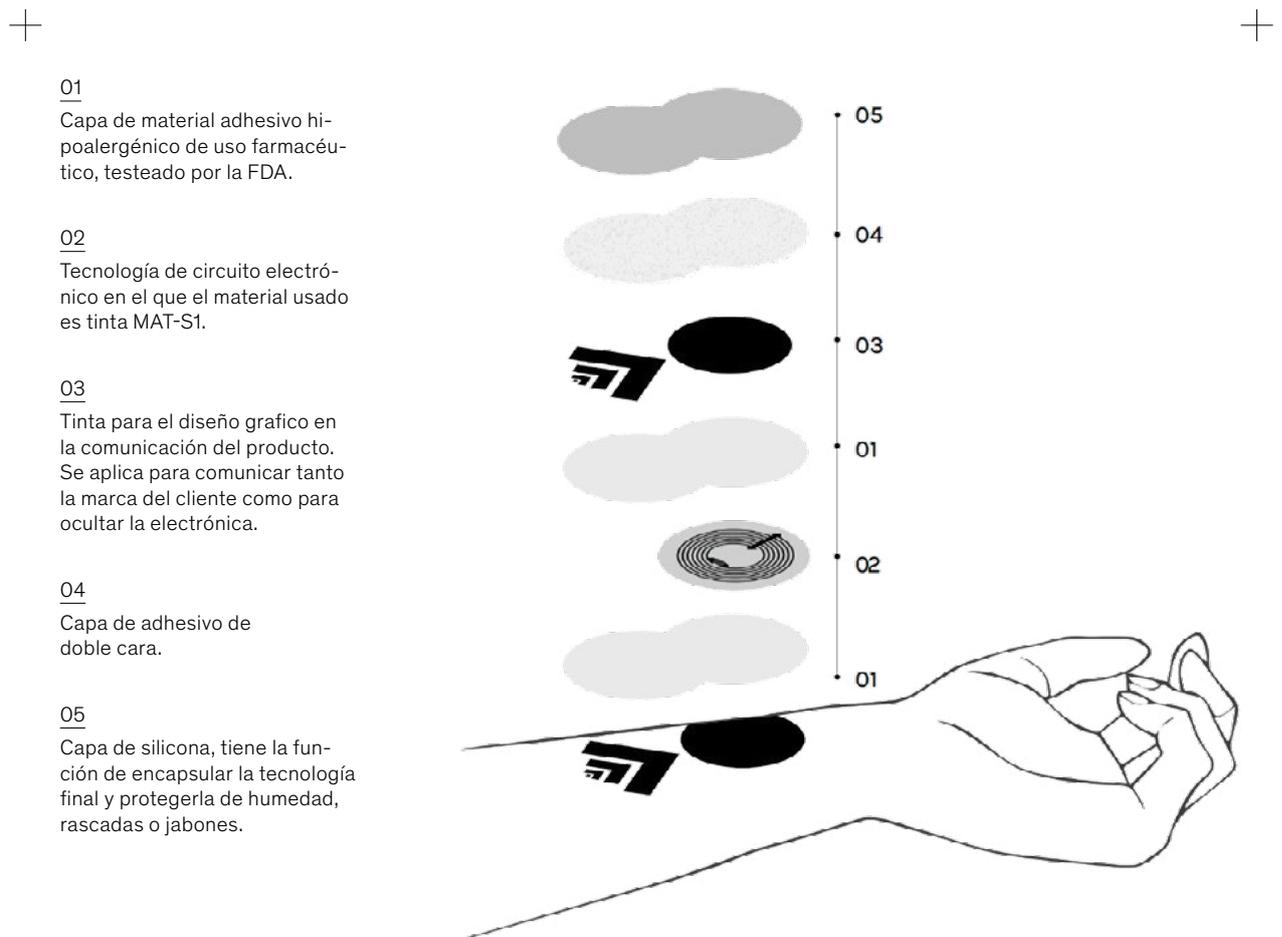


Figura 4.35.

Esquema de componentes del producto.

Aplicación para OFF! festival.

Elaboración propia.

4.4.2. Usabilidad Producto, Servicio y Sistema.

Los tatuajes *Smart Skin* tienen la capacidad de generar y almacenar información. Además, pueden ser leídos o detectados por otros dispositivos, por lo que también funcionan como transmisores. Este avance en la electrónica epidérmica portátil podría ofrecer una gran cantidad de aplicaciones dinámicas, como gestión de datos personales, control de los accesos, pagos desde tu cuenta bancaria, entre otros.

A continuación se detalla el esquema básico de uso (figura 4.36):

1. Colocar *Smart Skin Tattoo* en el antebrazo por la parte adhesiva.
2. Aplicar un poco de agua durante unos 40 segundos.
3. Frotar suavemente para que la capa protectora de papel se separe de la capa electrónica.
4. Activar el tatuaje acercándolo a uno de los lectores.
5. El *Smart Skin Tattoo* inicia el proceso de recogida y almacenamiento de datos para que el usuario pueda disfrutar de la experiencia

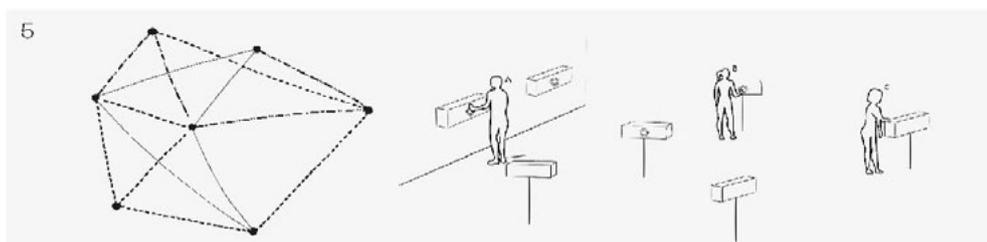
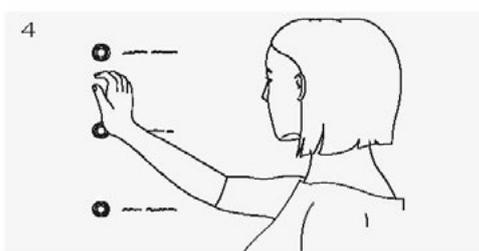


Figura 4.36.
Secuencia básica de uso.
Elaborado por el equipo de
trabajo OFFF! festival.



Para conseguir ese efecto que llamamos “segunda piel tecnológica”, la composición del producto debe cumplir con una serie de requisitos:

Ligereza: *Smart Skin* va aplicado sobre la piel, debe ser delgado y ligero, de modo que el usuario no note su presencia o incomodidad durante su uso.

Maleabilidad: El tatuaje debe adaptarse a múltiples superficies cutáneas, por lo que debe tener una cierta capacidad maleable. En este primer testeo, se recomienda aplicarlo en el antebrazo del usuario. Es una área de cuerpo lisa sin demasiado vello ni pliegues. Según la piel de cada usuario o su cantidad de vello, la adhesión del adhesivo a la piel podría resultar más favorable o menos.

Hipoalergénico: Dado que es un producto adhesivo directamente en la epidermis, se requiere que la capa que esta en contacto directo con la piel cumpla esta garantía. A su vez debería haber una selección de materiales compatibles con nuestro cuerpo.

Impermeabilidad: El tatuaje debe ser resistente a las acciones diarias de los usuarios que los lleven. Así, los cuidados de higiene y limpieza no deben ser un impedimento para llevarlo puesto. Por ello, la impermeabilidad de *Smart Skin* esta preparada para resistir temperaturas hasta 30°C.

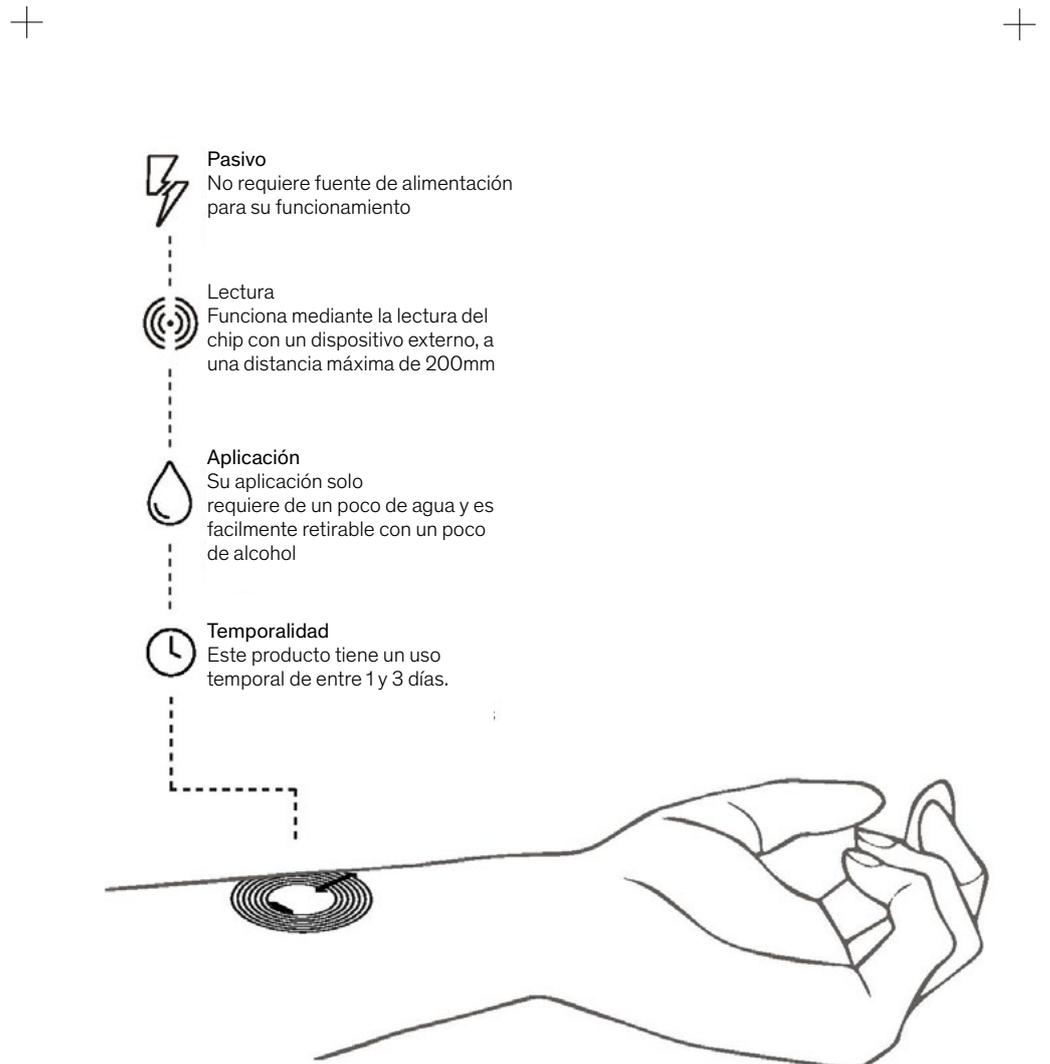


Figura 4.37.
Características principales de la tecnología. Elaboración propia.

4.4.3. Solicitud de la patente de invención P201830504.

Los resultados obtenidos durante el ensayo #03 fueron favorables y por tanto se procede a solicitar la patente inventiva, en fecha 25 mayo 2018, con la intención de poder implementar esta tecnología en la industria una vez finalizada la tesis doctoral.

La concesión de dicha patente ha llevado un proceso largo. Tras el último informe enviado de evidencias sobre la capacidad inventiva de la tecnología, se ha obtenido la concesión de la patente en fecha 28 de septiembre 2021. Esta concesión viene dada sin alegaciones por partes del ministerio de industria español y con la resolución de un veredicto favorable en unanimidad de todos los evaluadores.

La patente P201830504 tiene como título: Dispositivo de comunicación previsto para disponerse sobre la piel de un usuario.



Figura 4.38.
Dispositivo de comunicación previsto para disponerse sobre la piel de un usuario. Imagen propia.

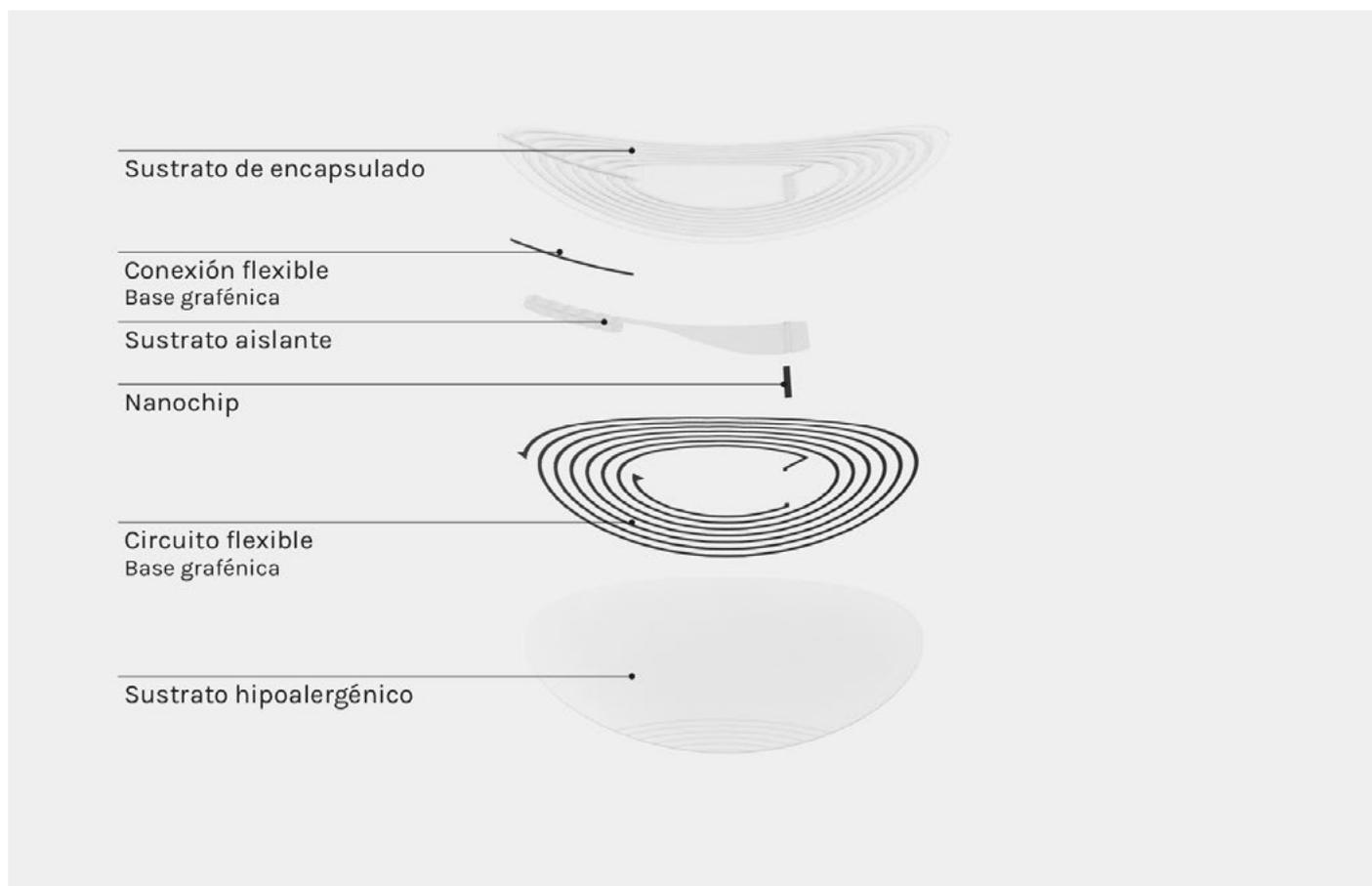


Figura 4.39.
 Detalles de Smart Skin Tattoo,
 diseño patentado P201830504.
 Imagen propia.

4.5. Innovación Avanzada (Improved innovation).

Para la implementación de la tecnología desarrollada y el testeo de la misma se ha escogido OFFF es un festival.



Figura 4.40.
 Implemmentación del diseño para OFFF!
 Festival. Testeo con usuarios.
 Imagen propia.

OFFF es un festival internacional sobre las disciplinas que principalmente involucran a la creatividad, la intuición, el talento, y la cultura en un mismo punto y entorno, dándole paso al diseño cómo base de fundamento. OFFF es un festival multidisciplinario que se define como “algo más que un Festival de hosting innovador y oradores internacionales, más que un punto de encuentro para que todos los talentos de todo el mundo colaboren en un mismo espacio, es más que alimentar el futuro”. OFFF es una comunidad que invita a diferentes profesionales a aprender,

a participar e inspirarse en un contexto multidisciplinar y enriquecido de tres días, con diferentes conferencias, talleres, actividades y actuaciones. Así definimos este festival como una combinación de animadores, artistas, estudiantes, marketing, desarrolladores, transmisión, directores de cine, diseñadores game / gráficos / interactivos / web educadores, emprendedores, fotógrafos, ilustradores, narradores, pensadores, anunciantes, medios de comunicación, agencias corporativas que se juntan para enseñar y compartir todos sus conocimientos.

Este festival lleva celebrándose en los últimos 17 años. Se ha convertido en un gran referente, escaparate y ventana de la contemporánea creatividad digital. OFFF tiene un formato de conferencia e híbridos conceptos en su contenido muy destacado actualmente.

Cada año, hace una edición en la ciudad de Barcelona. También se involucra con algunos de los más reconocidos estudios en el mundo sobre la creación de los créditos del evento final (los nombres de los hablantes y participantes). Algunos de los participantes han sido Kyle Cooper, Ash Thorp, Aardman Animations, Mucho, Hello Hikimori, Territory studio y muchos más. Muchos de estos han sido presentados, nominados y han ganado Vimeo. La edición 2017 tuvo más de 30,000 visitas, creadas por Vallee.

- Evento de Creatividad. Duración 3 días.
- Experiencia del formato: 17 ediciones.
- Asistentes: más de 3300 personas.
- Diversidad cultural: 25 países representados.
- Contenido: 80 conferencias.
- Actividades: 10 talleres.
- Alcance profesional: 25 mercados creativos.

OFFF se ha convertido en un observatorio privilegiado de las tendencias en el campo de la creación artística y las nuevas tecnologías. Esto es conocido y disfrutado por su fiel público que viaja de todas partes del mundo a donde se celebra el festival, donde cada año las entradas se agotan meses antes del día de la inauguración.

Para el test de la tecnología se definen unos objetivos que se llevarán validarán durante el festival OFFF. Se detallan a continuación:

1. Control de acceso al festival.
2. Extraer los datos del mapa de calor de las personas asistente. Análisis de estos para la comprensión de necesidades de estas.
3. Prever aglomeraciones por seguridad del evento.
4. Validar la efectividad de la tecnología en distintos perfiles de personas, pieles y hábitos de uso.

Desde el festival, se propone el reto de poder programar el acceso y la salida de los usuarios que llevaban los tatuajes. Por seguridad proponen poder hacer un mapa de calor (con información no personal) poder estudiar el flujo del movimiento de las personas dentro del recinto, valorar la capacidad y la comodidad dentro del festival. Todo esto para poder mejorar la experiencia de usuario de cara a los años siguientes y poder desarrollar una dinámica capaz de albergar todas las personas que están por el espacio.

Lo que se pretende en primera estancia que *Smart Skin Tattoo* sea una nueva vía de acceso al festival y de información para la organización.

4.5.1. Contexto de implementación en OFFF Festival Barcelona 2018.

Una vez desarrollados los prototipos y determinado el sistema de datos se pasa a integrar en el espacio en donde se hará el test de prototipos.

La ubicación del lugar donde se va a desarrollar la experiencia de *Smart Skin* está entre múltiples posibilidades. Entre las zonas del museo reservadas para el festival, hay cuatro zonas interiores principales: el hall, el market, la zona de conferencias y el auditorio. El siguiente diagrama da una idea de la relación entre esos tres espacios ocupables.

El hall es uno de los espacios potenciales donde situar la instalación de *Smart Skin*. Es un espacio compartido, es una zona pública de paso. Al ser un espacio de transición proporciona los momentos para entender los flujos de personas en esta zona, algo que ayudará a diseñar la experiencia de interacción de la manera más óptima.



Figura 4.41.
Localización del hall del Design Hub
(zona naranja). Imagen propia.

4.5.2. Experiencia de usuario.

La experiencia de usuario en este proyecto, tiene una estrecha relación entre los tiempos de actividades y la tecnología implementada. El festival dura 3 días, el horario de apertura e uso de *Smart Skin Tattoo* es de 11:00h a. 18:00h.

Timing en el OFFF:

- Apertura de puertas: Al iniciarse el festival, los asistentes, que ya llevan rato esperando, entran rápidamente llenando el hall del museo Design Hub.
- Momentos de espera: En ocasiones la principal de OFFF tiene el aforo completo. En esos momentos se genera una larga cola en el hall, a la espera de que se vacíe.
- Momentos de paso: Durante todo el día va pasando gente por el hall, aunque no mucha, ya que la mayoría de asistentes se mueven por dentro de la Sala A o por la zona de los food trucks.
- Descanso del mediodía: A la hora de comer, como es natural, todo el mundo se desplaza a la zona de la terraza y los food trucks, dejando la Sala A del Hub más bien vacía, así como el hall.
- Durante las conferencias: Las conferencias, lógicamente, aglomeran a gran parte del público asistente, por lo que el resto de zonas quedan más libres. El Market cuenta con un público permanente, de modo que la zona del hall sería la más afectada.
- Final de las conferencias: A la salida, todos los espacios alrededor de la zona de conferencias vuelven a llenarse. Así, aunque sea solo como zona de paso, es un momento de tránsito más abundante.



Figura 4.42.
Secuencia de uso en OFFF festival.
Imágenes propias.





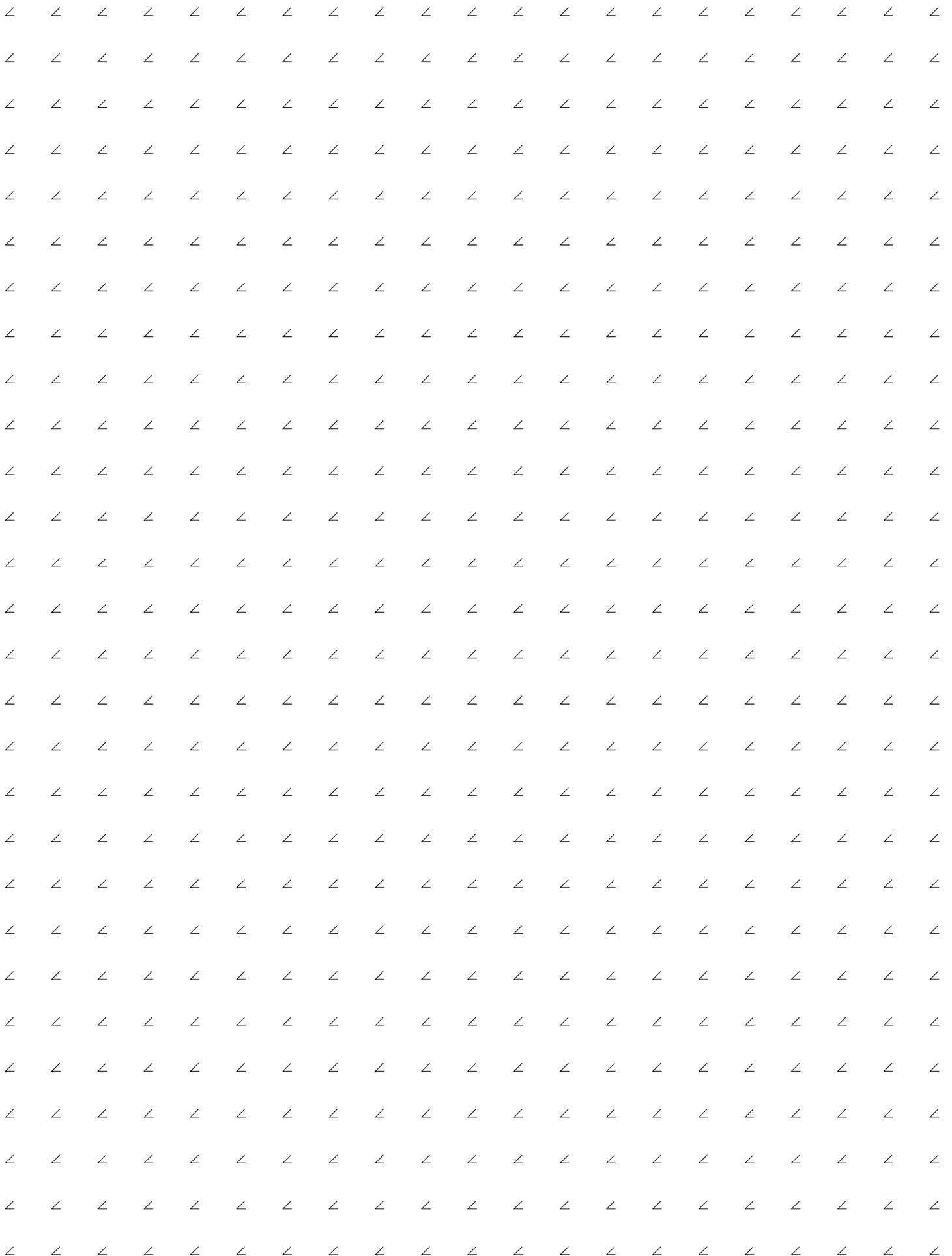


Figura 4.43.
Imágenes de Smart Skin Tattoo durante
el testeo. Elaboración propia.

Por último agradecer al equipo que ha participado desde Elisava en el proceso de implementación del proyecto en OFFF festival Barcelona. Desde el área de diseño gráfico agradecer a Dr. Francesc Ribot y a la profesora Silvia Escursell, junto a las estudiantes Carla Calomardo, Mar Martín, Laia Sunyer, Eva Vázquez y Marta Vives el trabajo realizado referente a la comunicación gráfica del proyecto y el diseño de experiencia en el festival. Desde el área de ingeniería de producto agradecer la colaboración de la Alumna Marian Brea y del estudiante Àlex Ribes en la excelente formalización del tótem de lectura de datos de *Smart Skin Tattoo* para los días del OFFF festival Barcelona.

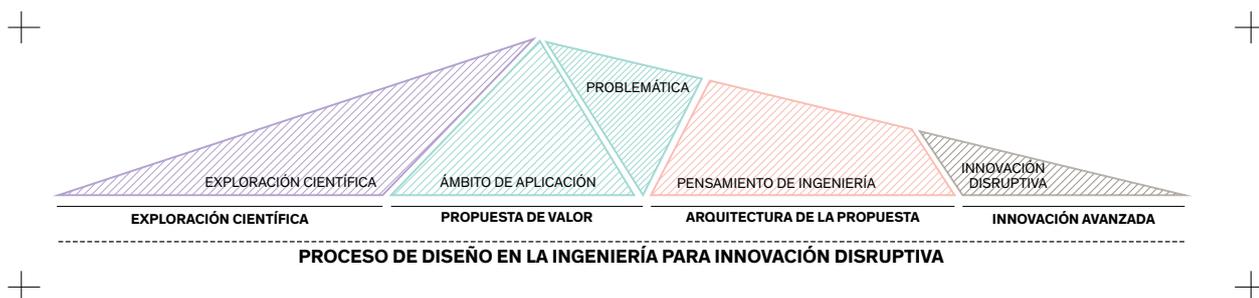


5. Implementación de materiales avanzados en el ámbito de las tintas



Desde esta tesis doctoral se ha realizado una transferencia de conocimiento en el contexto académico y empresarial. En el ámbito académico se ha propuesto una línea de investigación incipiente bajo el nombre de Smart Ink. A su vez, en el ámbito empresarial se está trabajando la transferencia de conocimiento teniendo como vehículo la patente obtenida.

El objetivo principal de este capítulo es mapear, mostrar y validar, si es el caso, mediante proyectos ejecutados siguiendo el proceso propuesto en la figura 5.1, qué representa el modelo sistémico definido en el ámbito de las tintas inteligentes, las cuales tienen como base en su composición pigmentos de materiales avanzados. A su vez, se detallan las técnicas y herramientas realizadas en cada etapa del proyecto con el objetivo de valorar su intensidad en cada proyecto a fin de demostrar su validez.



A continuación se explica, en primer lugar, el contexto de investigación que actuará como reto en el proceso de diseño en la ingeniería. Seguidamente se mostrará una selección de los resultados obtenidos en formato pictorial, narrativamente centrado en las 4 etapas principales del proceso sistémico definido en la investigación de esta tesis.

Figura 5.1. Gráfico del proceso de diseño en ingeniería para innovación avanzada. Elaboración propia.

5.1. Materiales avanzados en la formulación de tintas inteligentes.

Los materiales avanzados o materiales inteligentes se definen de forma genérica como: “actuaciones y mecanismos de control incorporados o intrínsecos mediante los cuales se detecta un estímulo, responderá a él de una manera y extensión predeterminada, en un tiempo corto y apropiado, volviendo a su estado original tan pronto como se elimina el estímulo”. Existen dos claras tipologías (1) Materiales de cambio de propiedad y (2) Materiales de intercambio de energía. (Mohammadhosseini 2020).

Los materiales inteligentes han sido un tema de gran interés por parte de muchos investigadores, puesto que presentan multitud de aplicaciones. Estos materiales pueden ser utilizados para el diseño y desarrollo de sensores, actuadores y productos multifuncionales, así como poder llegar a configurar estructuras y sistemas inteligentes que sean capaces de auto diagnosticar y modificarse para adaptarse a las condiciones que se les ha marcado como óptimas o correctas (Peña Andrés 2016).

Los materiales se comportan de distinta forma en función del estado en el que se encuentran: sólido, líquido o gaseoso. El interés inicial de este bloque de investigación se centra en cómo los materiales avanzados forman parte de compuestos poliméricos en un estado fluido. A este tipo de formulación se le atribuye el término de tinta inteligente o Smart Ink.

La tinta inteligente normalmente contiene disolventes, materiales inteligentes, tintes, resina, estabilizadores, tensioactivos, entre otros posibles elementos. A su vez puede responder a su entorno mostrando un cambio dinámico como el color, la intensidad Raman, la intensidad de los rayos UV y la intensidad de la luminiscencia (Wang et al. 2020)

Por tanto, en esta investigación, se considerará tinta inteligente cualquier composición en estado fluido con variedad de propiedades reológicas que presente las propiedades inteligentes de los materiales avanzados.

Hay diversas descripciones atribuidas a la definición de tinta inteligente, pero se toma como referencia las descripciones definidas desde los materiales avanzados.

A continuación, se muestra un esquema descriptivo para este término (figura 5.2). En este se muestra como una Smart Ink (tinta inteligente) está formada por dos partes principales (1) la capacidad de mostrar una reacción de cambio (output) ante un estímulo externo y (2) el estado del material fluido que se compone de una proporción de pigmento o tinte.

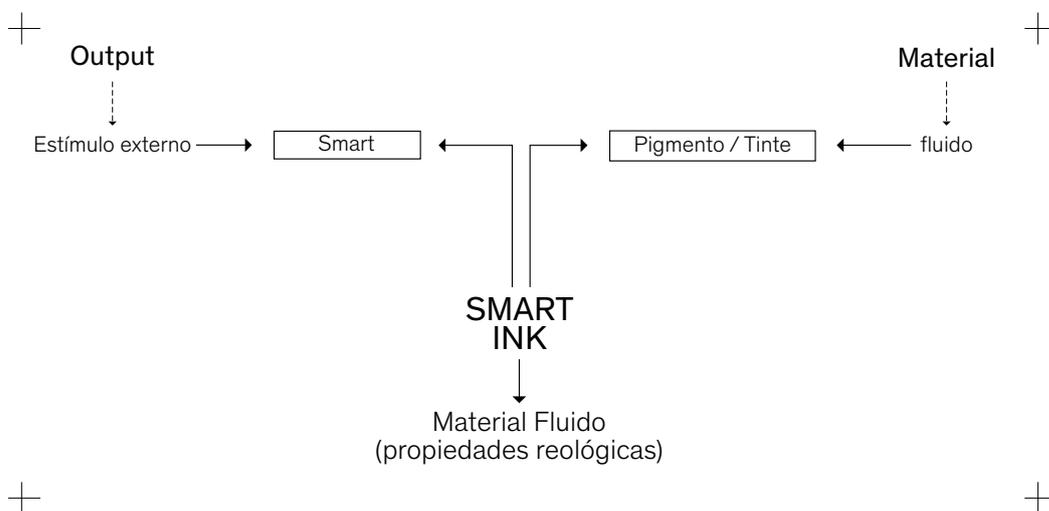
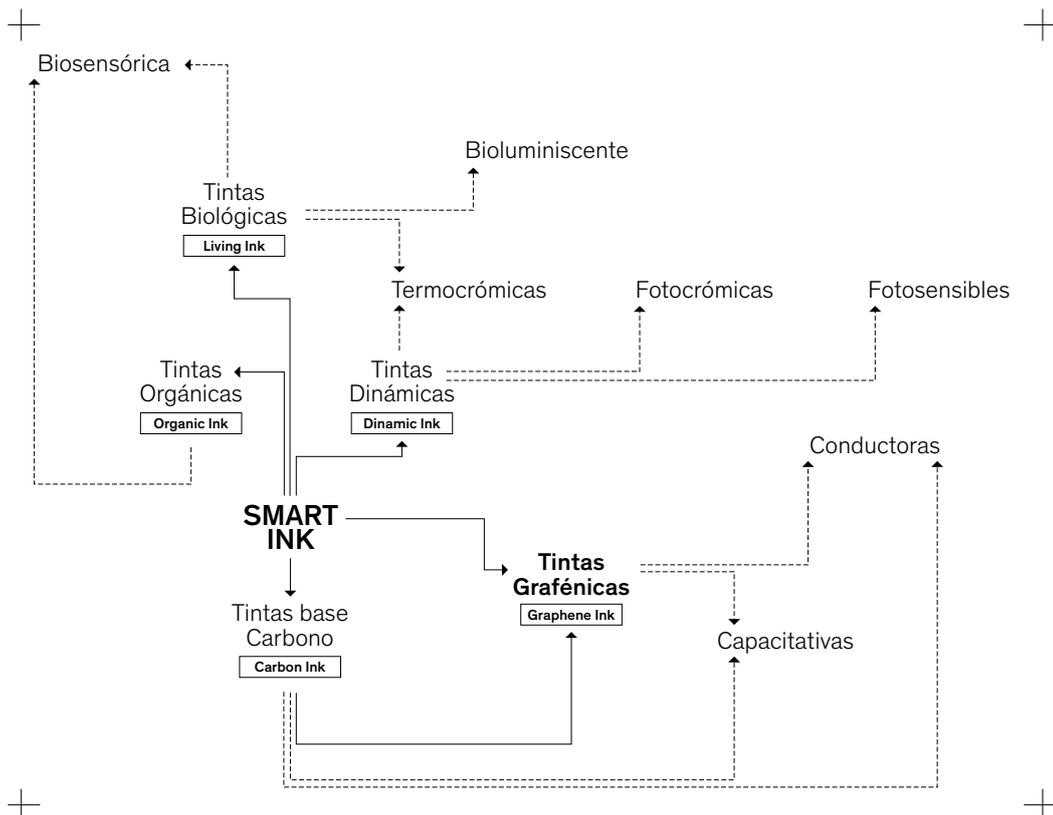


Figura 5.2.
Esquema descriptivo para la definición de tinta inteligente. Elaboración propia.

El ámbito de Investigación Smart Ink (tintas inteligentes), ha tenido una clara y normal evolución durante todos los últimos años incluidos los del desarrollo de la presente tesis. Este proyecto de investigación se inicia en 2015 y da origen a la tesis en 2016. Esto ha permitido ir clasificando y definiendo las subáreas de interés de forma sistémica, permitiendo relacionar las propiedades que proporcionan los materiales avanzados con las formulaciones finales, materiales compuestos en estado fluido.

A continuación, se define el posicionamiento de una tipología de materiales específicos que permiten el desarrollo de tecnología en la ingeniería que diseña desde materiales avanzados (figura 5.3).



Las clasificaciones realizadas y que han dado base a una serie de proyectos desde el 2015 al 2021 son las siguientes: Tintas Dinámicas, Tintas base Carbono, Tintas Grafénicas, Tintas Orgánicas y Tintas Biológicas. Las propiedades escogidas, reversibles o no, son: conductoras, capacitativas, fotocrómicas, fotosensibles, termocrómicas y bioluminiscente.

Figura 5.3. Trabajo de investigación Smart Ink. Elaboración propia.

- Tintas Dinámicas. Son aquellas que sus propiedades Smart vienen propiciadas por materiales inteligentes sintetizados.
- Tintas base Carbono. Son aquellas que sus propiedades Smart vienen dadas por las distintas variables del carbono y que tienen este material como base en la formulación de estas.
- Tintas Grafénicas. Son aquellas que sus propiedades Smart son consecuencia del uso de partículas de grafeno en su formulación. Son consideradas de la familia del carbono pero para este caso se genera una categoría individual dada su particularidad como material bidimensional.
- Tintas Orgánicas. Son todas aquellas que su base proviene de un material biológico pero se procesa sin vida en la materia. Por ejemplo: plantas, frutas, verduras, desechos orgánicos o similar.
- Tintas Biológicas. Se consideran todas las tintas en estado fluido que contienen agentes vivos y generan una propiedad Smart. Por ejemplo: microorganismos, bacterias, hongos o similar.

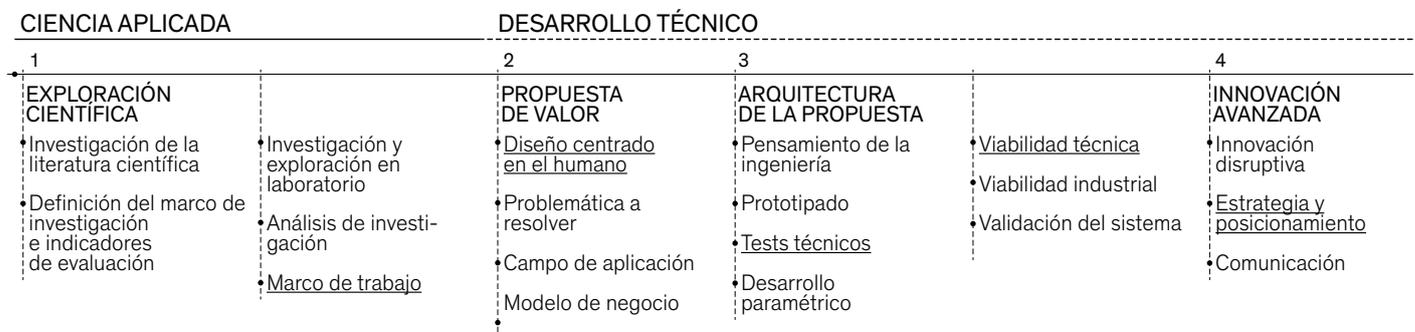
Una vez definido el contexto, se determina que en esta la tesis doctoral, la principal clasificación de interés es la relacionada con tintas grafénicas de base carbono. Las propiedades estudiadas en esta investigación han sido las conductoras y las capacitativas. Aun así, durante el periodo de tiempo que abarca esta tesis doctoral, se han trabajado proyectos de todas las clasificaciones expuestas en la figura 5.3. Comentar que el objetivo de plantear un ámbito viene dado por la necesidad de explorar, definir y mostrar resultados más específicos en la investigación Smart Ink.

5.2. Procedimiento aplicado para el proceso de innovación.

A lo largo de esta tesis doctoral se ha consolidado una propuesta de proceso de diseño en la ingeniería para la innovación avanzada. Este proceso se describe mediante cuatro etapas principales: (1) Exploración científica; (2) Propuesta de Valor; (3) Arquitectura de la propuesta e (4) Innovación avanzada.

Como recordatorio se describen de forma breve los objetivos principales de cada etapa (figura 5.4):

1. Exploración Científica. El objetivo es iniciar con la exploración teórica desde la literatura científica publicada para posteriormente desarrollar una investigación práctica en laboratorio que lleve a descubrimientos concretos.
2. Propuesta de Valor. El objetivo es definir desde la investigación donde existe una oportunidad de implementación para resolver un problema no resuelto desde el diseño en ese momento.
3. Arquitectura de la Propuesta. El objetivo es proporcionar una viabilidad proyectual a la propuesta mediante técnicas y herramientas del ingeniero o ingeniera para construir, validar, verificar y confirmar que la propuesta puede ser realizada.
4. Innovación Avanzada. Tiene el objetivo de mostrar e interpretar el resultado de una propuesta de innovación disruptiva.



Proceso de diseño en la ingeniería para la innovación avanzada

Figura 5.4.
Etapas del proceso de diseño en la ingeniería para la innovación avanzada. Elaboración propia.

Para este apartado se considera interesante hacer una descripción gráfica sobre los resultados obtenidos en este ámbito explicado en el apartado 5.1 y figura 5.3, las Smart Ink, y aplicando el proceso de diseño definido para una ingeniería que diseña desde materiales avanzados (figura 5.1).

El ámbito, Smart Ink, ha dado forma a una estructura de información y a la consolidación de un equipo de investigadores e investigadoras docentes, ubicados en el grupo de investigación emergente HIMTS de Elisava Research, en ELISAVA facultad de diseño e ingeniería de Barcelona. A su vez, se ha implementado en proyectos de grado y máster en ingeniería de diseño industrial, de la misma facultad, tutorizados y tutorizadas por un equipo de asesores y especialistas de distintas disciplinas: materiales, química, biología, filosofía y técnicas gráficas.

Para exponer en detalle los resultados se hace una selección de 40 proyectos individuales (40 personas) realizados en el contexto de

proyectos finales de grado o máster en Elisava durante el periodo que abarca desde el 2015 a 2021. Para la selección, se han evaluado sus capacidades de integración y profundidad en el desarrollo de cada una de las etapas definidas. Todos estos proyectos se han realizado en un contexto académico y en un periodo no superior a 7 meses de trabajo.

Para estos casos el reto inicial o el punto de partida definido es una propiedad inusual de un material avanzado que se dé en su estado fluido, en una Smart Ink. Todas las personas que han participado en el proceso han superado las etapas del proceso con éxito, pero en la gráfica se destaca la excelencia de estas, de ese modo se valora hasta que punto es efectivo o no dicho proceso.

Por tanto, se propone investigar, explorar, analizar y caracterizar para definir qué materiales son los óptimos en la selección y que permiten generar propuesta de valor en escenarios futuros.

En la tabla 5.1 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en cada una de las etapas del proceso desarrollado. En esta se ha detallado anónimamente el autor o autora, el año de finalización del proyecto, el ámbito de Smart Ink escogido, la propiedad funcional que se toma como punto de inicio en la investigación, la valoración de cada etapa del proceso y finalmente a qué estudios corresponde.

De los 40 proyectos resultantes se escogen 5 de ellos que permiten describir con más precisión cada una de las etapas del proceso descrito: Exploración científica, Propuesta de Valor, Arquitectura de la propuesta e Innovación avanzada.

Los proyectos escogidos para mostrar el procedimiento aplicado son los siguientes:

PIELVIVA. Marta Gomez, 2021. Tintas Grafénicas (P01_TG).

Descripción: Un ultrawearable adhesivado a la piel, capaz de revertir la funcionalidad muscular en un caso de disfunción parcial mediante una matriz biopolimérica conductora activada por un sistema de base grafénica.

Es un proyecto relevante dado que la investigación científica realizada es de una exploración profunda tanto de la literatura científica como de la experimentación en laboratorio, así como la cuidadosa caracterización la formulación de materiales fluidos desarrollada. Consiguiendo finalizar una propuesta innovadora de un biomaterial con efecto de memoria de forma aplicado al sector médico, lo cual genera un nuevo campo a explorar científicamente (Proyecto Ganador del Premio Ei, 2021 – categoría Material).

INK.24V. Damià Cusí, 2020. Tintas de base carbono (P02_TBC).

Descripción: Espacio expositivo que genera una experiencia interactiva nacida para la reflexión hacia una sociedad tecnológicamente dependiente usando la tinta conductiva como vínculo de expresión entre el humano y la máquina.

El resultado obtenido frente a otros sistemas interactivos, ha hecho de este proyecto una propuesta en la que reduce los materiales de una instalación con sensores, cables y electrónica, proponiendo una alternativa sostenibles mediante el uso de tintas capacitativas y conductoras de base carbono (Proyecto Nominado a Premio Ei, 2020).

AÑO	TINTA	FUNCIONALIDAD	PROCESO				ESTUDIOS	
			MATERIAL BASE	PROPIEDAD Y SISTEMA	EXPLORACIÓN CIENTÍFICA TEÓRICA - PRÁCTICA	PROPUESTA DE VALOR		ARQUITECTURA DE LA PROPUESTA
1	2021	Carbono	Electrónica impresa	●				MEDI - TFG
2	2021	Grafeno	Electrónica impresa*	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
3	2021	Living	Bioluminiscente	● ●	●	●	●	PES - TFG
4	2021	Living	Termoactiva	●		●		GEDI - TFG
5	2021	Living	Anti-radiación	●	●		●	GEDI - TFG
6	2021	Living	Cromoactiva	●				GEDI - TFG
7	2021	Living	Bioluminiscente	●		●		PES - TFG
8	2021	Living	Bio-sensor	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
9	2021	Orgánica	Fotovoltaica					PES - TFG
10	2021	Orgánica	Bio-sensor (pH)	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
11	2021	Orgánica	Residuo - circularidad	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
12	2020	Carbono	Electrónica impresa	●	●	●	●	MEDI - TFM
13	2020	Carbono	Capacitativa / conductiva	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
14	2020	Carbono	Electrónica impresa	●		●		GEDI - TFG
15	2020	Dinámica	Fotocrómica	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
16	2020	Living	Cromoactiva	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
17	2020	Living	Bioluminiscente	● ●	●		●	GEDI - TFG
18	2020	Orgánica	Fotovoltaica	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
19	2019	Carbono	Conductiva					GDIS - TFG
20	2019	Carbono	Capacitativa	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
21	2019	Carbono	Conductiva	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
22	2019	Carbono	Conductiva	● ●	●	●	●	PES - TFG
23	2019	Carbono	Capacitativa / conductiva	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
24	2019	Dinamic	Fotocrómica	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
25	2019	Dinamic	Termocrómica	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
26	2019	Living	Bioluminiscente	● ●	●		●	GEDI - TFG
27	2019	-	-	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
28	2018	Carbono	Capacitativa / conductiva	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
29	2018	Grafeno	Anti-radiación	●	●	●	●	PES - TFG
30	2018	Grafeno	Conductiva	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
31	2018	Grafeno	Conductiva	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
32	2018	Grafeno	Conductiva	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
33	2018	Grafeno	Conductiva	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
34	2018	Grafeno	Conductiva	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
35	2018	Grafeno	Conductiva	● ●	●	●	●	GDIS - TFG
36	2017	Carbono	Termoactiva	● ●		●	●	GEDI - TFG
37	2017	Plata	Electrónica impresa	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
38	2016	Carbono	Conductiva	● ●	●	●	●	GEDI - TFG
39	2015	Dinámica	Bio-sensor (Ébola)	●	●	●	●	GEDI - TFG
40	2015	Grafeno	Bio-sensor (glucosa)	●	●	●	●	GEDI - TFG

*Efecto de memoria forma

Estudios en Elisava:
 GEDI - Grado en Ingeniería de Diseño Industrial
 GDIS - Grado en Diseño de Elisava
 PES - Programa de Estudios Simuláneos
 MEDI - Máster en Ingeniería de Diseño Industrial

Tipología de proyecto:
 TFG - Trabajo de Fin de Grado
 TFM - Trabajo de Fin de Máster (del Máster de Ingeniería de Elisava)

●●●● Etapa superada al 100%

Tabla 5.1. Resumen de los resultados obtenidos en cada una de las etapas de proceso desarrollado. Elaboración propia

TERRA FOR MARS. Martí Capdevila, 2021. Tintas Biológicas (P03_TB).

Descripción: Un traje espacial para vivir en Marte basado en una fina capa autogenerada de hongos radiotróficos que convierte la radiación ionizante en calor, protegiendo al usuario de la exposición excesiva a los rayos cósmicos.

El resultado obtenido en un tema tan complejo de validar, como es el espacio exterior, hace que este proyecto sea considerado como uno de los que su propuesta es planteada desde la especulación científica y estudiado para la viabilidad del mismo. La investigación científica realizada es extensa, rigurosa y los ensayos para simular el medio han sido reales y documentados con criterio como para dar base a futuras investigaciones en este campo.

HYDRIO. Marta Tudurí, 2021. Tintas Biológicas (P04_TB).

Descripción: Producto expositivo que visibiliza la acidificación oceánica producida por las emisiones antropogénicas, a partir del cambio de color generado por una molécula halocrómica de origen bacteriano.

Se considera un proyecto de gran alcance en la investigación científica teórica y práctica. El resultado obtenido es un proyecto real e integral en la disciplina de ingeniería de diseño (Proyecto Nominado a Premio Ei, 2021).

PHOTODERMIS. Gemma Delgado, 2020. Tintas Orgánicas (P05_TO).

Descripción: Sistema energético renovable biodegradable, local y autónomo. El estudio se centra en el área de investigación de las tintas inteligentes, usándolas con el objetivo de crear una piel fotosintética para el cuerpo humano, que genera energía a partir de la captación de luz.

Se considera relevante que la investigación científica teórica y práctica realizada ha llevado a una propuesta de una tinta foto-voltaica que puede ser depositada sobre sustratos biodegradables flexibles (Proyecto Ganador del Premio Ei 2020 en la categoría de Material, Preseleccionado a los premios Red Dot-2021, Mención especial Premios Catalunya Ecodisseny-2021).

5.2.1. Exploración científica.

La exploración científica tiene en consideración tanto la exploración teórica como la exploración práctica.

Exploración teórica. Es aquella que considera la revisión de literatura científica para entender y comprender el reto, de ese modo poder definir el marco de investigación a alcanzar. Se plantean los objetivos e indicadores de evaluación de la investigación a realizar.

Para ejemplificar este apartado se muestra la la investigación realizada en el proyecto *HYDRIO de Marta Tudurí, 2021 (P04-TB)*. Este proyecto tiene como objetivo principal entender el comportamiento de algunos microorganismos de carácter sensorio y que cambian de color ante un input preocupante en la sociedad, como es la toxicidad en el aire. Esta investigación se inicia con una búsqueda de literatura publicada y artículos en buscadores como Science Direct, google Scholar y otros similares.

En este proyecto se decide trabajar desde las propiedades cromáticas y activas que ofrece el *Streptomyces coelicolor*, es una especie dentro del género *Streptomyces* más caracterizada y de la que se dispone de gran cantidad de herramientas genéticas y bioquímicas que facilitan su estudio (Comba 2015). De sus metabolitos secundarios sintetizados por la bacteria se selecciona la Actinorrodina (pigmento halocrómico).

Para ellos se intenta estudiar desde las publicaciones científicas la literatura referente al comportamiento y ciclo de vida de la género *Streptomyces*, como se reproduce y como es el proceso de extracción

de la Actinorrodina (figura 5.6), la información es extraída de los artículos siguientes:

- a) Sporulation-specific cell division defects in *ylmE* mutants of *Streptomyces coelicolor* are rescued by additional deletion of *ylmD* (Zhang et al. 2018).
- b) The formation of the rodlet layer of streptomycetes is the result of the interplay between rodlines and chaplins (Claessen et al. 2004)
- c) Branching of sporogenic aerial hyphae in *slfA* and *slfB* mutants of *Streptomyces coelicolor* correlates to ectopic localization of *DivIVA* and *FtsZ* in time and space (Zhang et al. 2020).

Dado que se está estudiando una materia viva se estudia y en el área de la microbiología, se investiga teóricamente y se detalla todo lo relevante a este campo para comprender su comportamiento (Willey, Sherwood y Woolverton 2009) (figura 5.7).

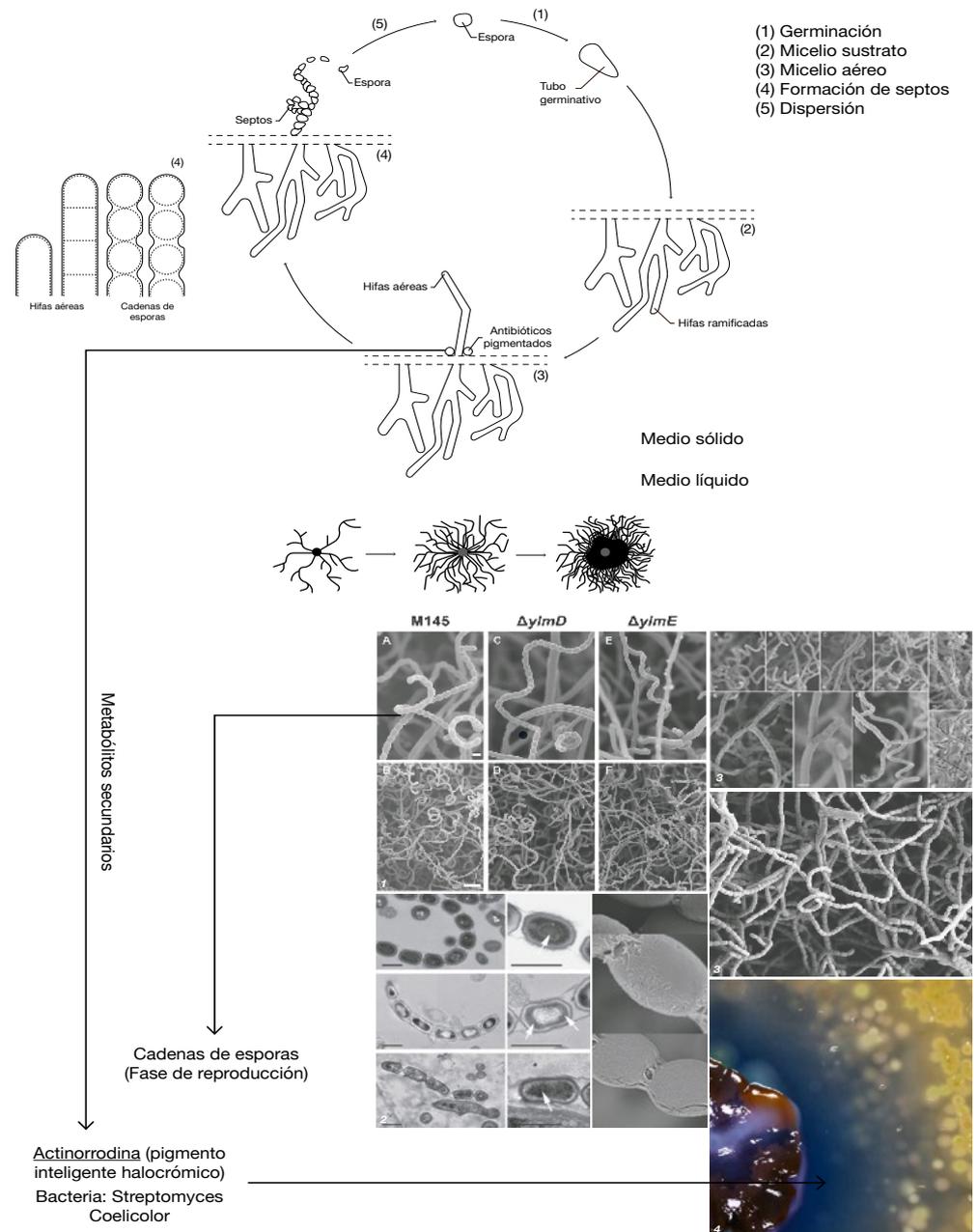


Figura 5.6.
 Proyecto P04-TB Exploración teórico-científica.
 Elaboración: Marta Tudurí 2021.

Figura 33. Ciclo de vida de la género *Streptomyces*

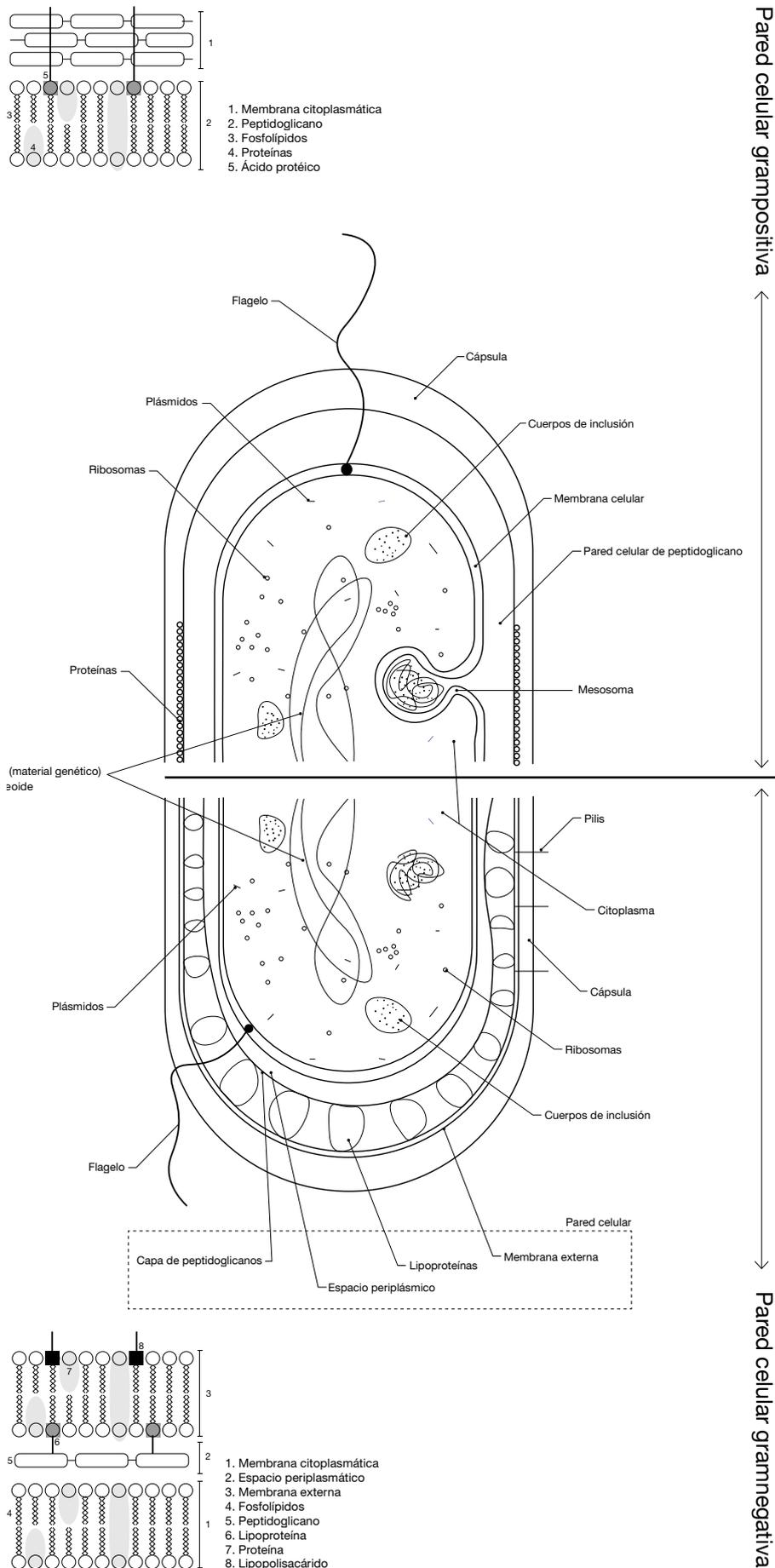


Figura 5.7. Proyecto P04-TB. Estructura de la célula procariota con pared celular grampositiva y gramnegativa. Elaboración: Marta Tudurí 2021.

Una vez comprendida la parte teórica, se determinan unas bases para la investigación experimental, proceder al diseño de la metodología, determinar los ítems a considerar y definir las variables del ensayo.

Exploración práctica. Es la que permite explorar de forma práctica en un laboratorio lo aprendido y definido en la literatura científica. Permite comprender el funcionamiento de la materia y experimentar algunas de las posibles evoluciones consolidadas en la teoría. Una vez realizado el análisis de la investigación se procede a detallar el marco de trabajo específico del proyecto.

A continuación se muestran un par de ejemplos del proceso de investigación en laboratorio, estos corresponden a los proyectos PHOTO-DERMIS de Gemma Delgado, 2020 (P05-TO) y el mencionado anteriormente HYDRIO de Marta Tudurí, 2021 (P04-TB). En primer lugar se diseña el ensayo a realizar en el laboratorio previendo: materiales, herramientas y metodología (figura 5.8). En primer lugar se diseña el ensayo a realizar en el laboratorio previendo: materiales, herramientas y metodología (figura 5.8). Para el caso de P05-TO el objetivo es extraer los pigmentos del poso de café para generar tintes cuyas propiedades fotovoltaicas puedan ser evaluadas y comparadas al aplicarlos en la estructura de la celda Grätzel³⁰. Se desarrolla todo el procedimiento paso a paso y se toman los datos necesarios de medición (figura 5.9), a su vez se documentan las muestras realizadas en los resultados finales (figura 5.10, figura 5.11).

En la figura 5.10, el objetivo era analizar el crecimiento de la bacteria *Streptomyces Coelicolor* y el pigmento que sintetiza a lo largo de 240 horas en sus condiciones óptimas. Los resultados mostraron como a partir de las 48 horas de crecimiento la bacteria sintetiza Actinorrodina y cambia de coloración de rojo a azul, indicando un cambio de pH en el medio de cultivo.

³⁰ Celda solar creada por Michael Grätzel

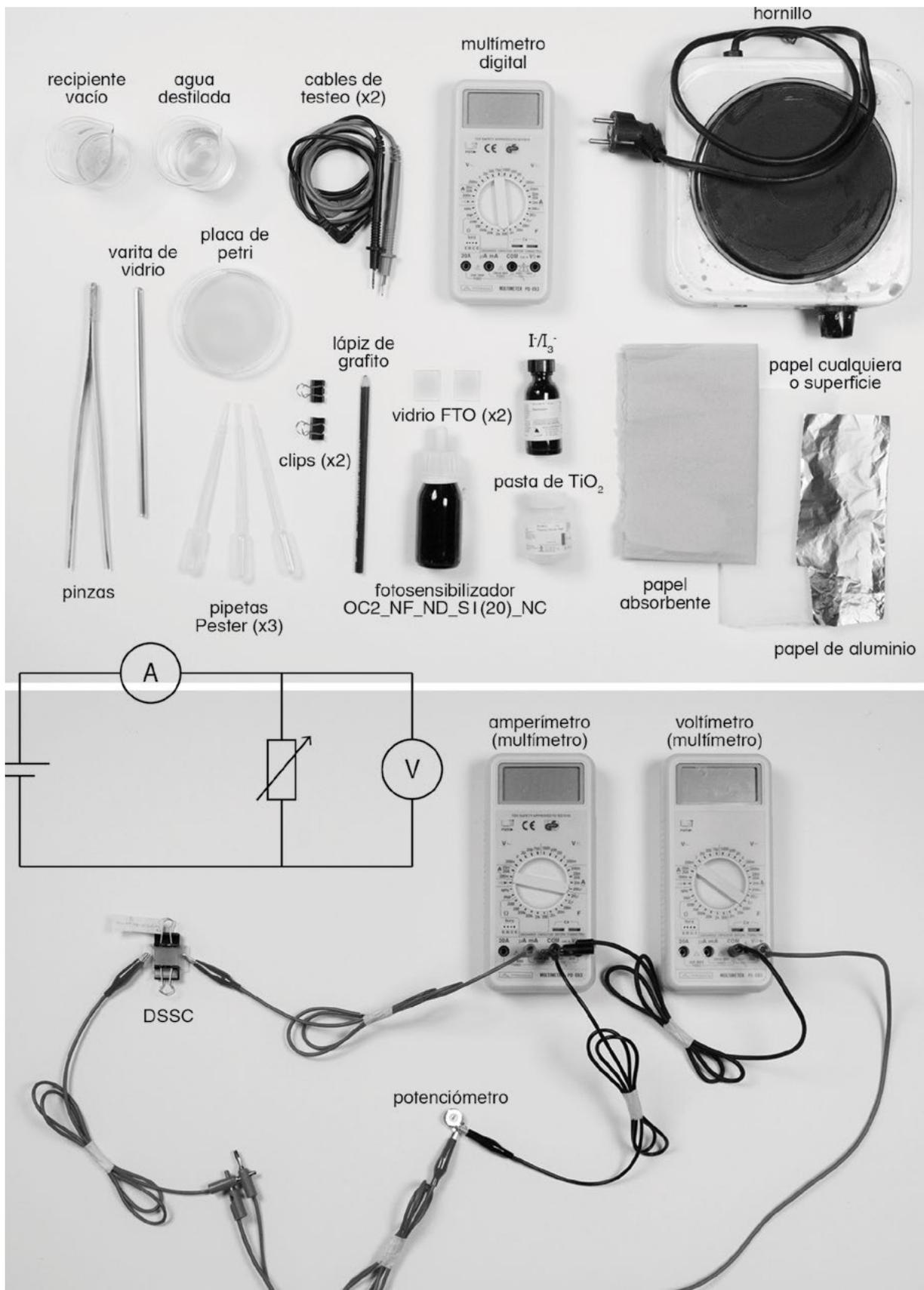


Figura 5.8. Proyecto P05-T0. Materiales y herramientas del ensayo. Elaboración: Gemma Delgado, 2020.

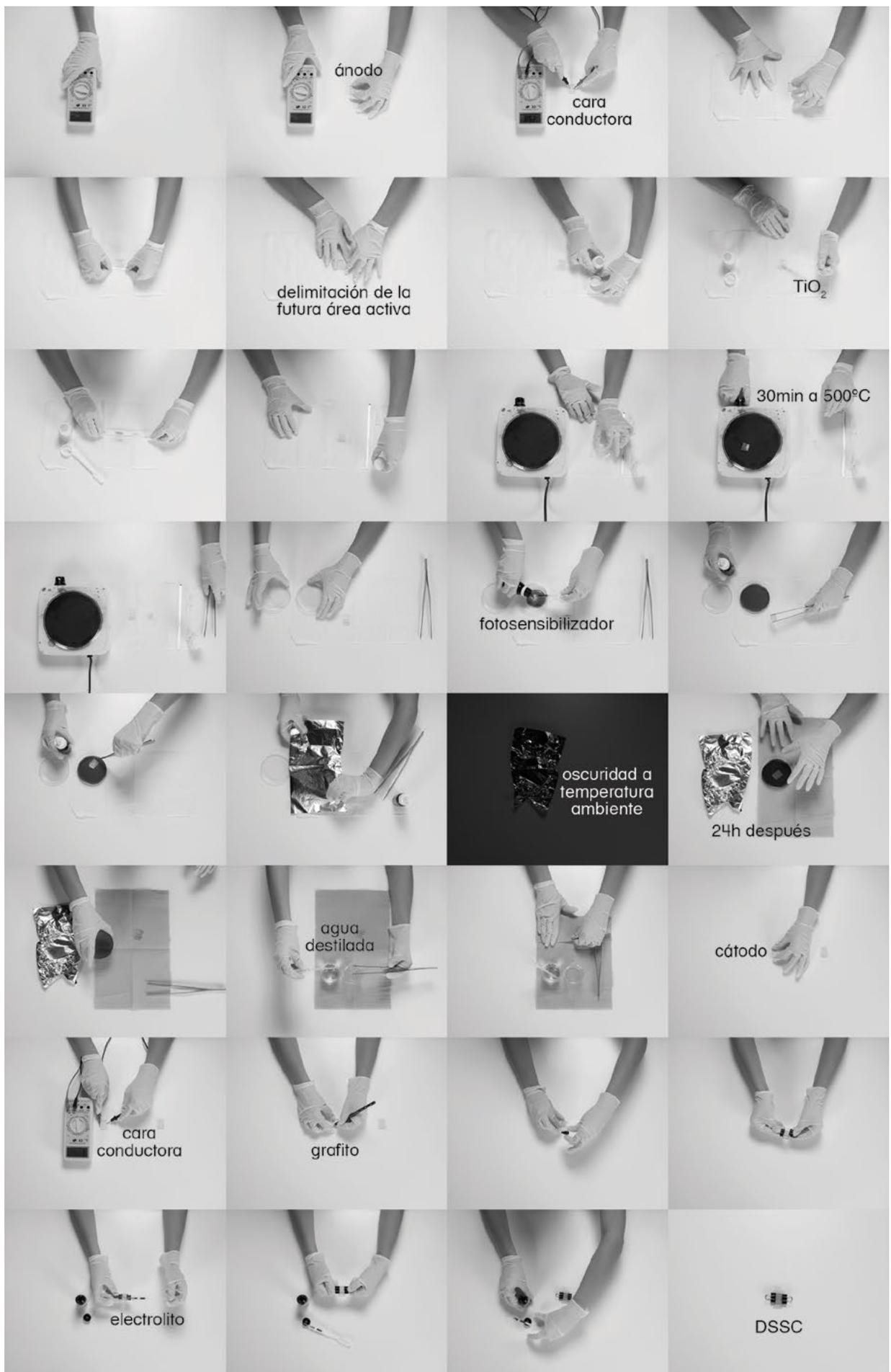


Figura 5.9.
 Proyecto P05-T0.
 Proceso en el
 laboratorio.
 Gemma Delgado,
 2020.

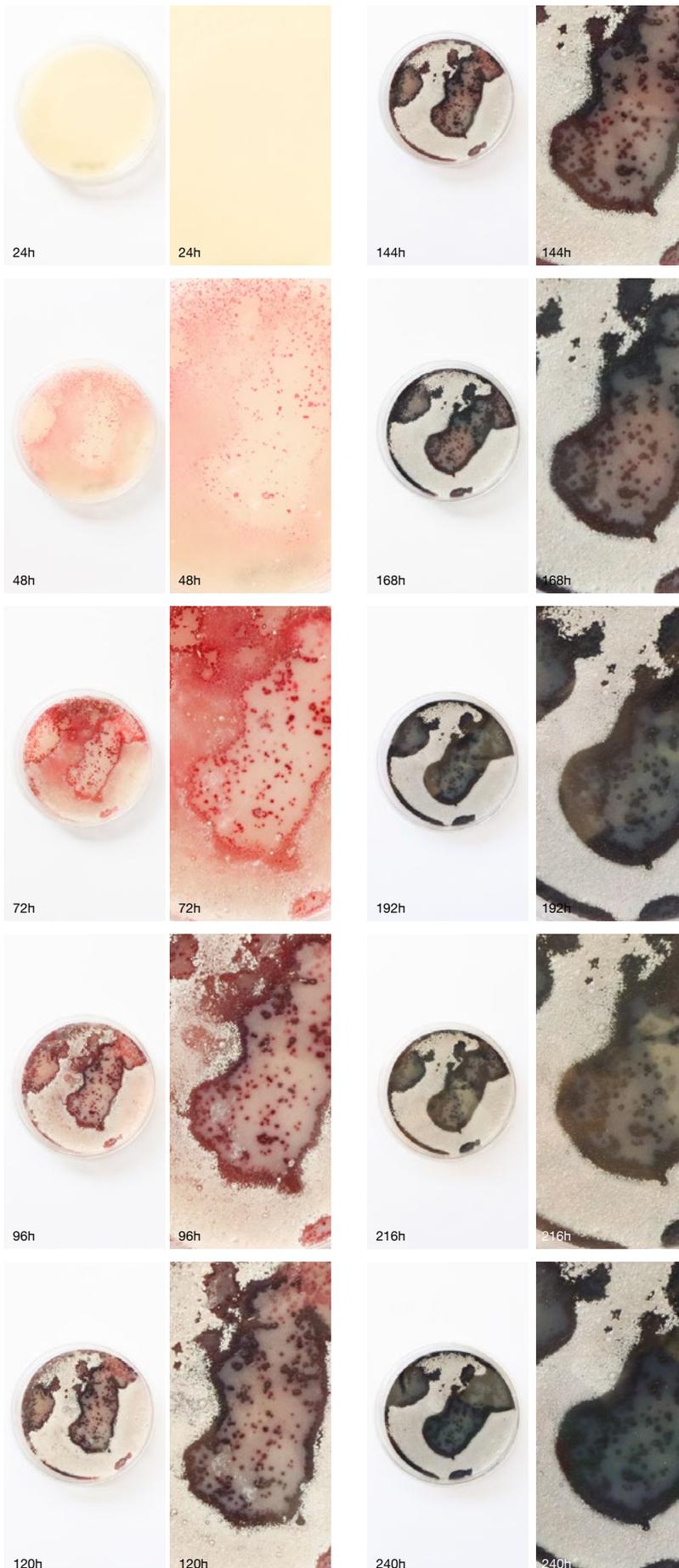


Figura 5.10.
Proyecto P04-T0. Células analizadas.
Elaboración: Marta Tudurí, 2021.



Muestra #E01.0115 (96h)



Muestra #E01.0115 (216h)



Figura 5.11
Proyecto P04-T0. Células analizadas.
Elaboración: Marta Tudurí, 2021.

Una vez realizado el ensayo, se miden y recogen los resultados de la espectrofotometría obtenidos del se presentan en la muestra y se detalla la longitud de onda exacta del pico de absorción de cada tinte (figura 5.11). Se realizan las gráficas comparativas y se extraen las conclusiones.

Se concluye este apartado con una imagen resumen que engloba el trabajo hecho de forma teórica y práctica (figura 5.12).

Fotosensibilizador	η (%)	Abs _{max}	λ (nm)
OC2_NF_ND_S1(20)_NC:R1	3,29	1,864	326
OC2_NF_ND_S1(20)_NC:R2	3,76	1,892	326
OC2_NF_ND_S1(20)_C:R1	n/a	3,688	325
OC2_NF_ND_S2(20)_NC:R1	1,06	1,610	281 - 282
OC2_NF_ND_S2(20)_C:R1	1,29	1,844	281
OC2_NF_ND_S3(20)_NC:R1	0,10	1,708	323 - 324
OC2_NF_ND_S4(8)_NC:R1	1,83	0,643	273 - 275
OC2_NF_ND_S4(8)_NC:R2	n/a	0,880	282 - 283
OC2_NF_ND_S4(20)_NC:R1	3,57	0,848	286
OC2_NF_ND_S5(20)_NC:R1	1,80	0,282	325
OC2_NF_ND_S5(20)_NC:R2	1,07	0,199	323 - 325

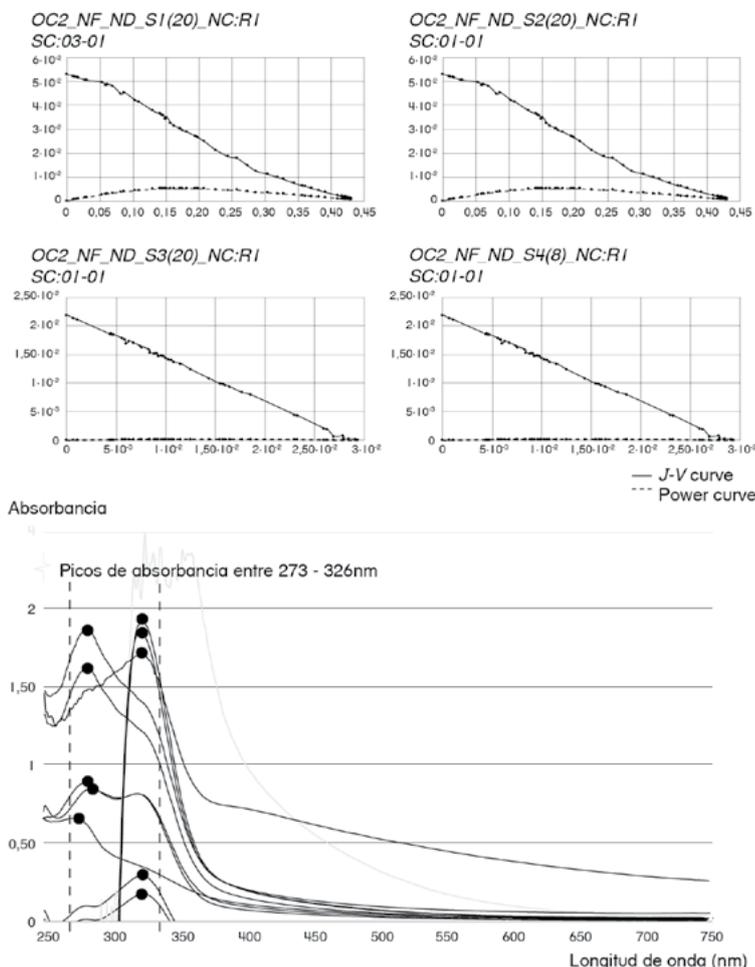


Figura 5.12. Proyecto P05-T0. Datos extraídos y comparación de los espectros de absorción de todas las muestras. Gemma Delgado, 2020.

5.2.2.Propuesta de Valor.

En la etapa de propuesta de valor se define la propuesta de diseño que resuelva un problema, un dilema o una necesidad. Se decide el campo de aplicación e incluso se plantea la oportunidad empresarial. Otra de las acciones que se consolidan es la relación entre propuesta, material y persona.

Para este apartado se muestra la problemática a resolver y el campo de aplicación. Eso permite proponer una solución de valor desde la investigación científica inicial.

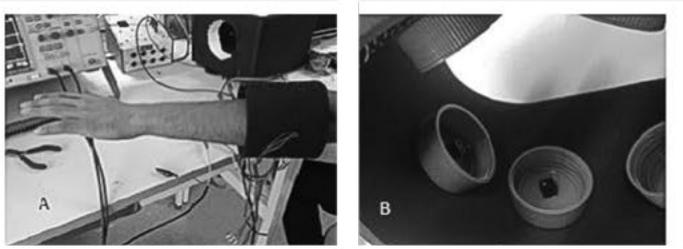
Para esta ocasión se hace referencia al proyecto PIELVIVA de Marta Gomez, 2021 (P01-TG). Cabe destacar que durante esta etapa del proceso se trabaja con un médico especializado el caso en el que se desea implementar lo descubierto etapa previa. La problemática encontrada se describe en el siguiente caso clínico

+ CASO CLÍNICO. Se determina que cada 10.000 nacidos con vida, aparecen entre 3'4 y 16 casos de niños con ausencia parcial o total del dedo pulgar, las incidencias en las malformaciones congénitas de la mano son variables, variando del Tipo 1 cómo la más débil al Tipo 5 la más severa. Estos casos, ya sean hipoplasia del pulgar o agenesia del músculo, son detectados en niños cuando empiezan sus primeras etapas de colegio y deben aprender ciertas técnicas de sujeción, así como ejercicios psicomotrices. En esta fase los padres presentan gran ansia cuando acuden a la consulta por su carga de culpabilidad y difícil adaptabilidad social del niño o niña en sus primeras etapas de colegio (Vergara Amador 2008).

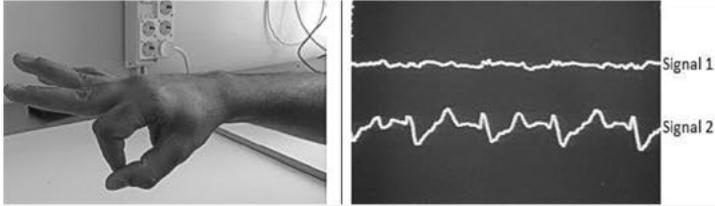
+ +

A continuación se muestra los datos antropométricos y fisiológicos necesarios que se disponen para la propuesta de valor, para este caso se evalúan lecturas de electromiografía (registro gráfico de la actividad eléctrica producida por los músculos esqueléticos), comportamiento mecánico de articulaciones y sus movimientos frente a los grados de libertad ósea (figura 5.13).

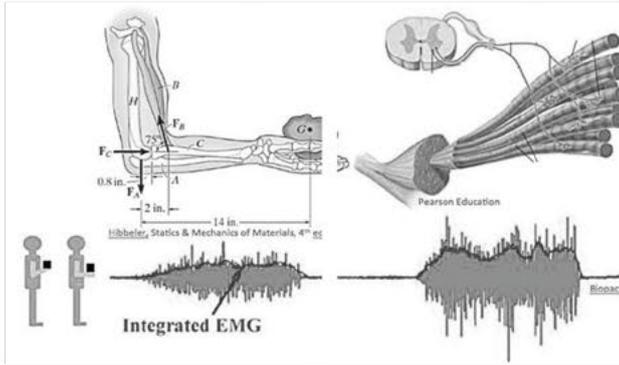
En segunda instancia diseño con la persona para determinar la forma más óptima entre propiedades técnicas, requerimientos de diseño y persona. La validación formal viene dada por prototiparla de forma ágil en primera persona (uno/una mismo/a), es segunda persona (con la persona afectada al caso) o de forma masiva (grupo de personas de distintos perfiles pero próximos al caso a resolver). Para el proyecto mostrado se considera hacerlo en primera y segunda persona (figura 5.14).



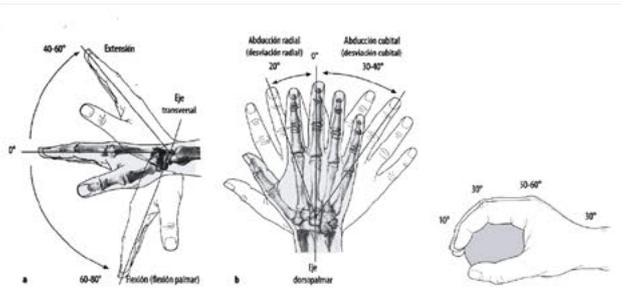
Prototipo del brazalete con los sensores RPR-220. Conectado a un circuito PCB (Stockholm 2014).



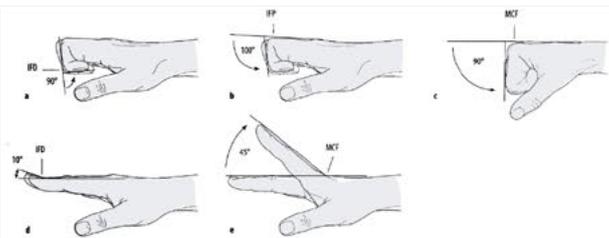
Señal recibida en presencia de movimiento muscular. Colector de data programable (Stockholm 2014).



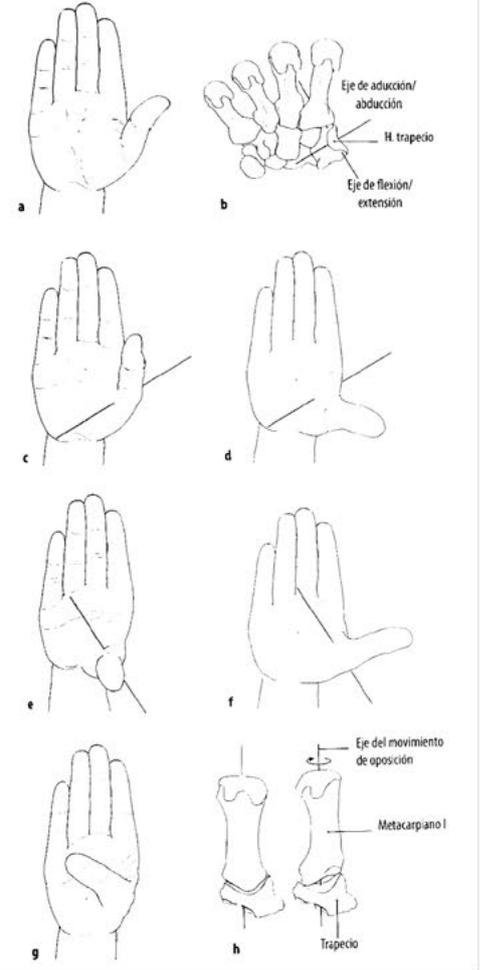
Representación del sistema EMG de Myoware (DataSheet).



Movimientos y ejes de movimiento de las articulaciones proximal y distal de la muñeca. Flexión y extensión en eje transversal (a) y desviación radial o cubital en un eje dorso-palmar (b) (Schünke et al. 2009). Posición funcional de la mano (Schünke et al. 2009).



Amplitud de movimiento de las articulaciones de los dedos. Flexión en la articulación interfalángica distal (a), flexión en la articulación interfalángica proximal (b), flexión en la articulación metacarpofalángica distal (c), extensión en la articulación interfalángica distal (d), extensión en la articulación metacarpofalángica (e) (Schünke et al. 2009).



Movimientos de articulación en silla de montar de montar del pulgar. Visión palmar mano derecha. Posición neutra (a), Ejes de movimientos de articulación sellar del pulgar (b), aducción (c), abducción (d), flexión (e), extensión (f), oposición (g) y ejes de movimientos de oposición (h) (Schünke et al. 2009).

Vista arteroposterior dorsal. Se aprecia atrofia de la región tenar, marcada en la mano derecha (Morales et al. 1996).



Figura 5.13. Proyecto P01-TG. Antropometría y comportamiento del cuerpo. Elaboración: Marta Gomez, 2021.



Figura 5.14. Proyecto P01-TG. Antropometría y comportamiento del cuerpo. Elaboración: Marta Gomez, 2021.

Otra forma de trabajar en esta etapa, es la que se muestra desde el proyecto PHOTODERMIS de Gemma Delgado, 2020 en la figura 5.15 y figura 5.16. En el que se itera entre diseño teórico y experimental en personas.

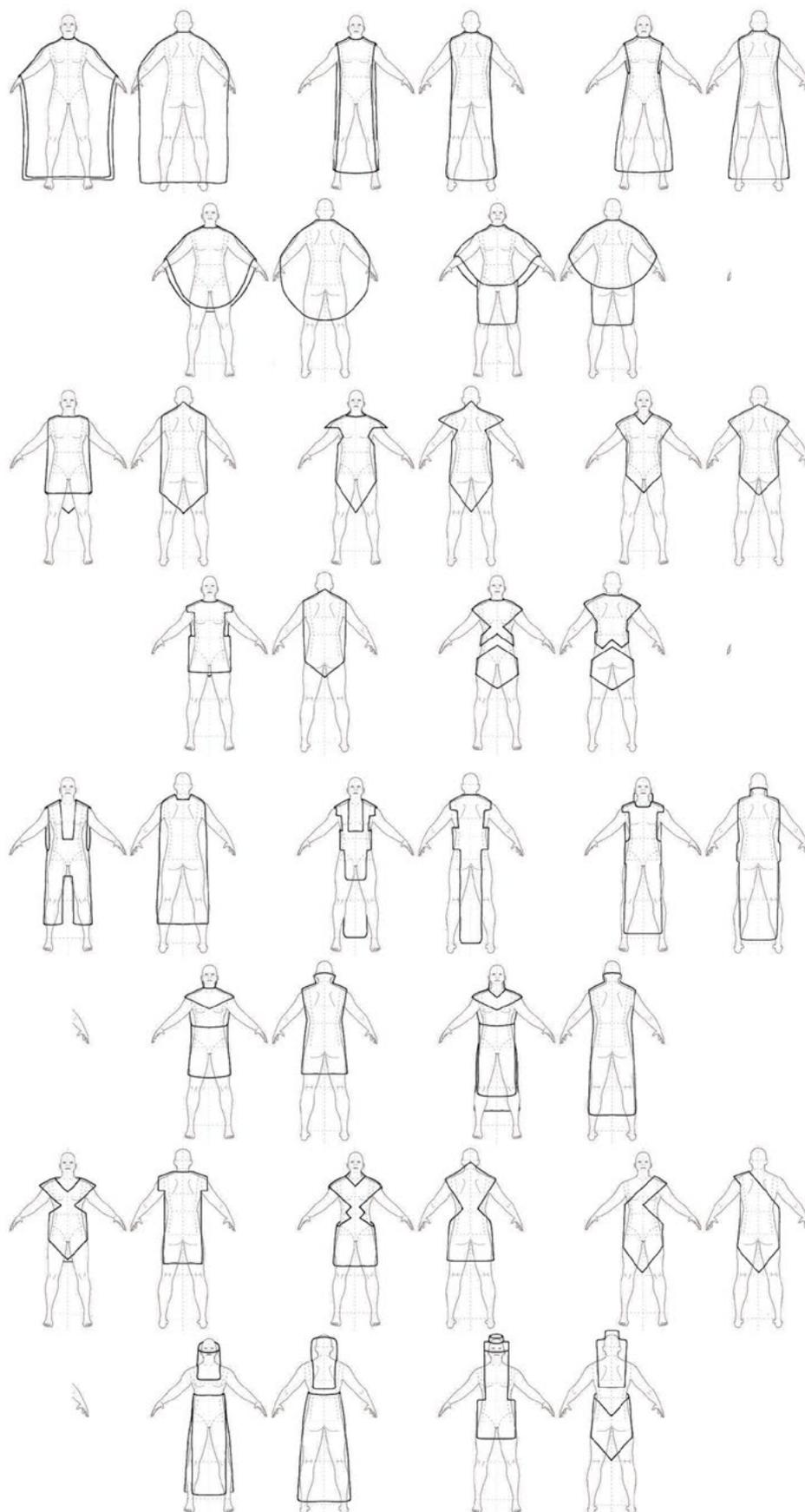


Figura 5.15.
Proyecto P05-T0. Proceso de Sketching
formal de una idea.
Elaboración: Gemma Delgado, 2020.



Figura 5.16. Proyecto P05-T0.
Prototipos ágiles y pruebas de
movimiento de una posible configuración
básica de la propuesta.
Elaboración: Gemma Delgado, 2020.

5.2.3.Arquitectura de la propuesta.

En esta etapa se realizan todas las metodologías y técnicas propias de las ingenierías, se realiza todo lo necesario para la viabilidad industrial del proyecto, tanto en diseño de producto, diseño de sistema-servicio, costes y experiencia de usuario.

Para que esto sea posible se realizan todos los test de evaluación para la implementación industrial, se realizan prototipos, cálculos de resistencia mecánica, cálculos paramétricos y simulaciones mecánicas. También se realizan las selecciones de materiales de cada uno de los componentes de la propuesta. Se evalúan consumos y recursos necesarios. Se realiza la programación del sistema si fuera necesario. En esta etapa se realiza toda la documentación técnica necesaria para la fabricación de la propuesta.

Desde el proyecto PIELVIVA de Marta Gomez, 2021 se muestra el detalle de componentes para la viabilidad del proyecto, orden y uniones del desarrollo técnico por capa de material, tinta electrónica y funcionalidad (figura 5.17). Representación del circuito electrónico con tintas de grafeno aplicado en los sustratos y uniones con los componentes del conjunto (figura 5.18) así como los detalles constructivos de la propuesta (figura 5.19).

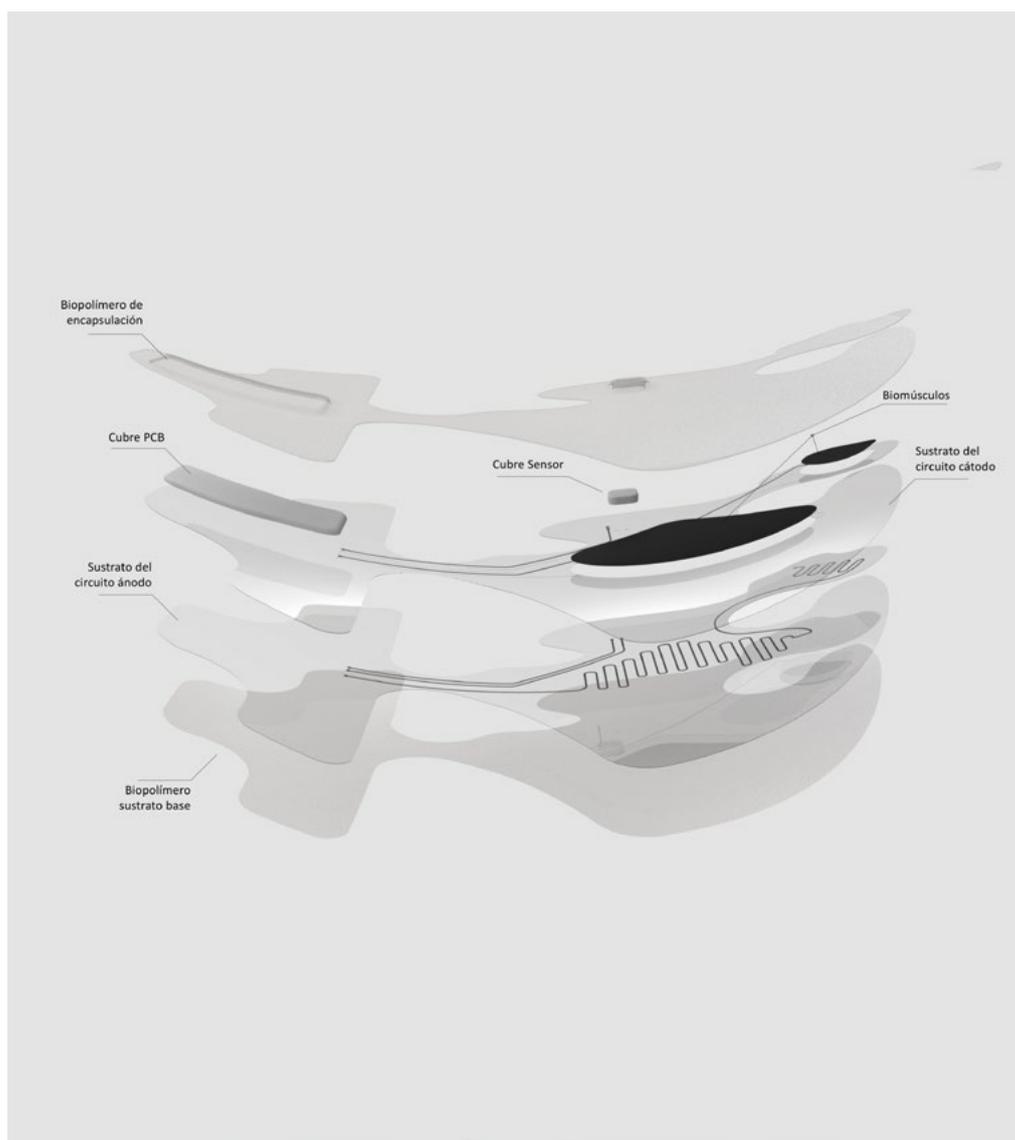


Figura 5.17.
Proyecto P01-TG. Detalle de
componentes.
Elaboración: Marta Gomez, 2021.

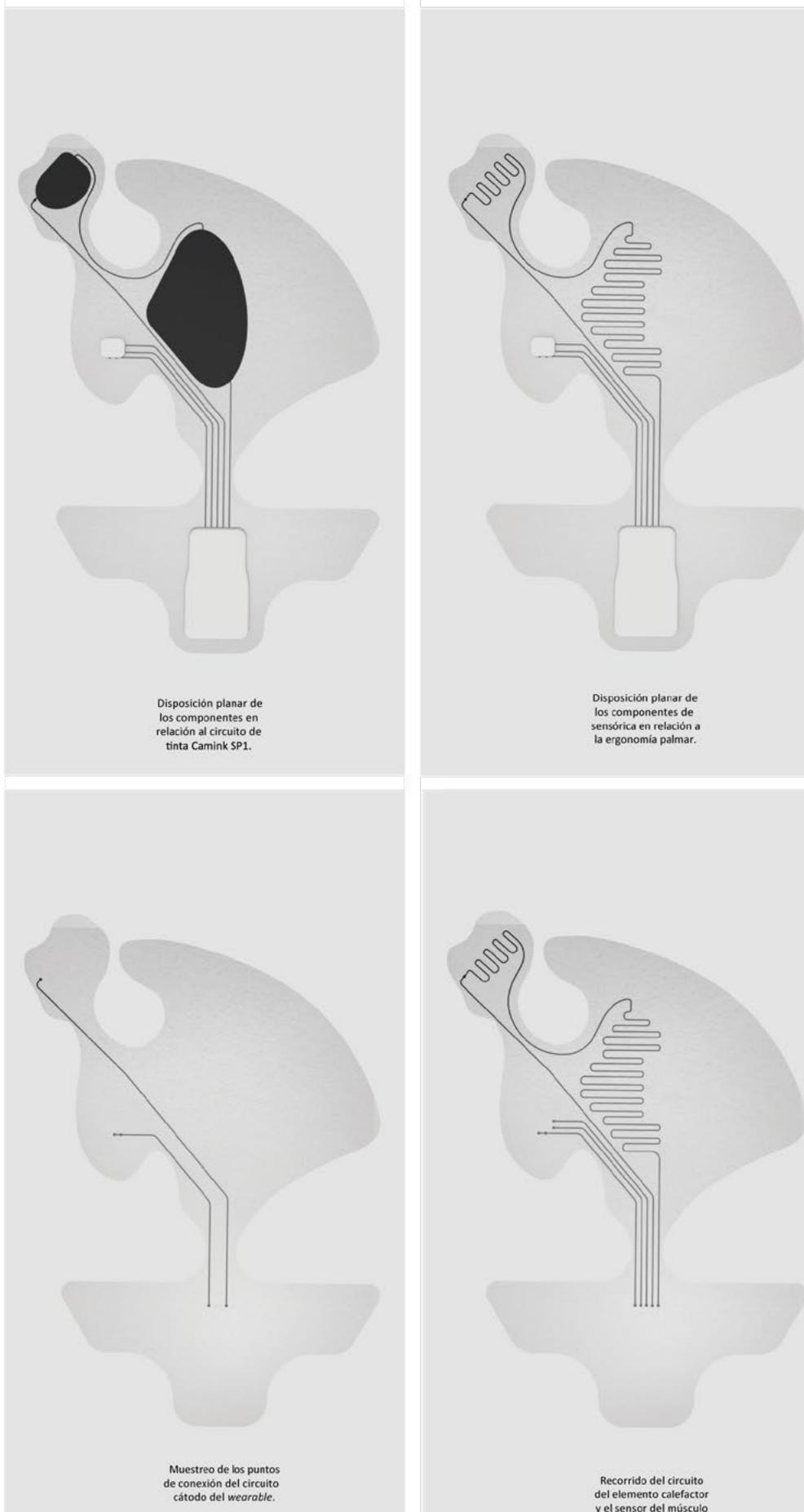


Figura 5.18. PIELVIVA. Marta Gomez, 2021. Representación del circuito electrónico con tintas de grafeno. Elaboración: Marta Gomez, 2021.

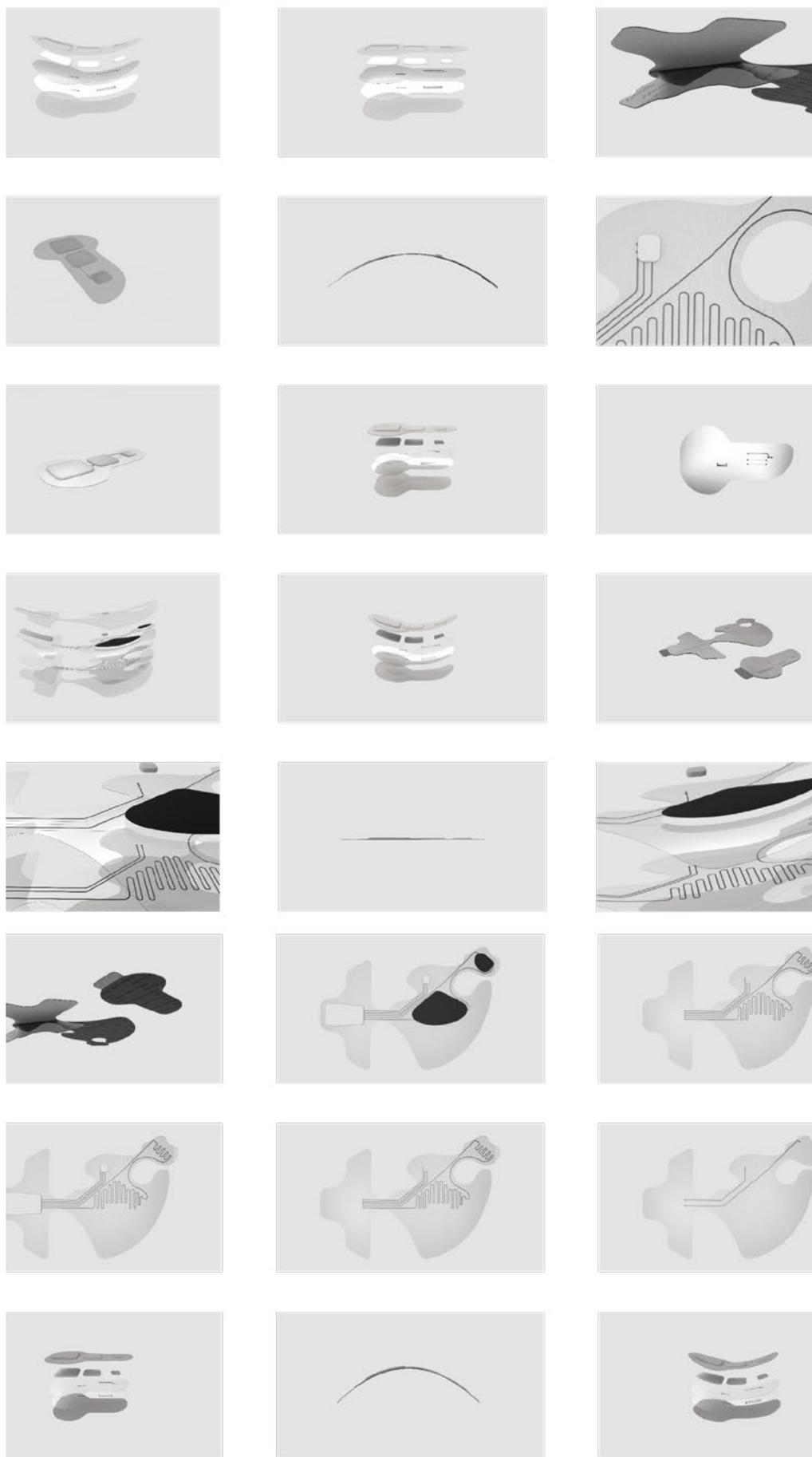


Figura 5.19.
Proyecto P01-TG. Diseño de detalles
constructivos. Elaboración:
Marta Gomez, 2021.

Otros de los ejemplos a mostrar en la fase de arquitectura de la propuesta es el de INK.24V de Damià Cusí, 2020. El cual detalla a una escala macro como será el diseño gráfico de las tintas de base carbono en la instalación arquitectónica seleccionada, de documentan componentes mecánicos y electrónicos, se detallan los consumos y se realiza la programación para posteriormente generar la experiencia inmersiva en el espacio (figura 5.20 y figura 5.21).

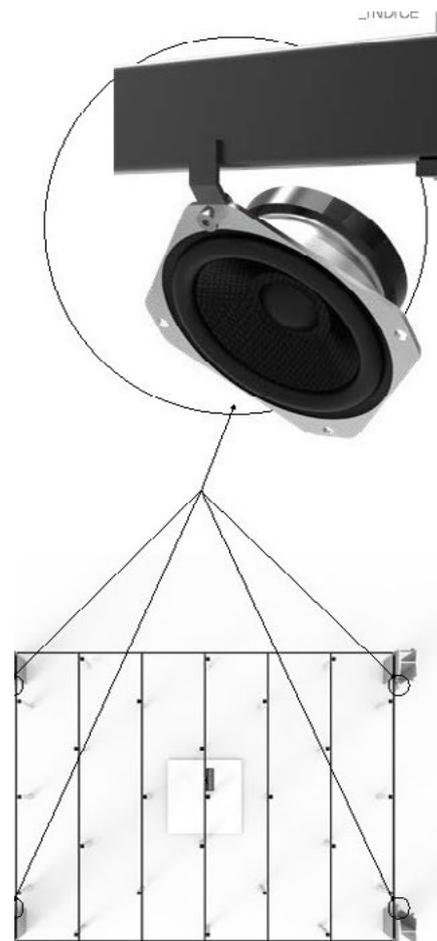
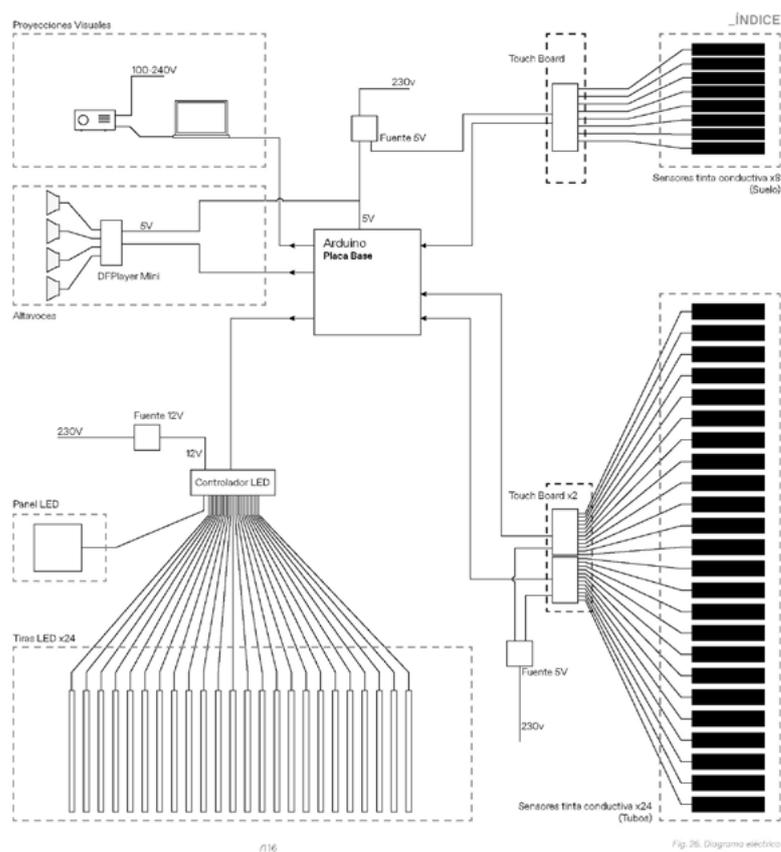


Figura 5.20.INK.24V.
Esquema de instalación eléctrica.
Elaboración: Damià Cusí, 2020.



Figura 5.21.INK.24V.
Damià Cusí, 2020. Diseño de
la instalación completa.
Elaboración: Damià Cusí, 2020.

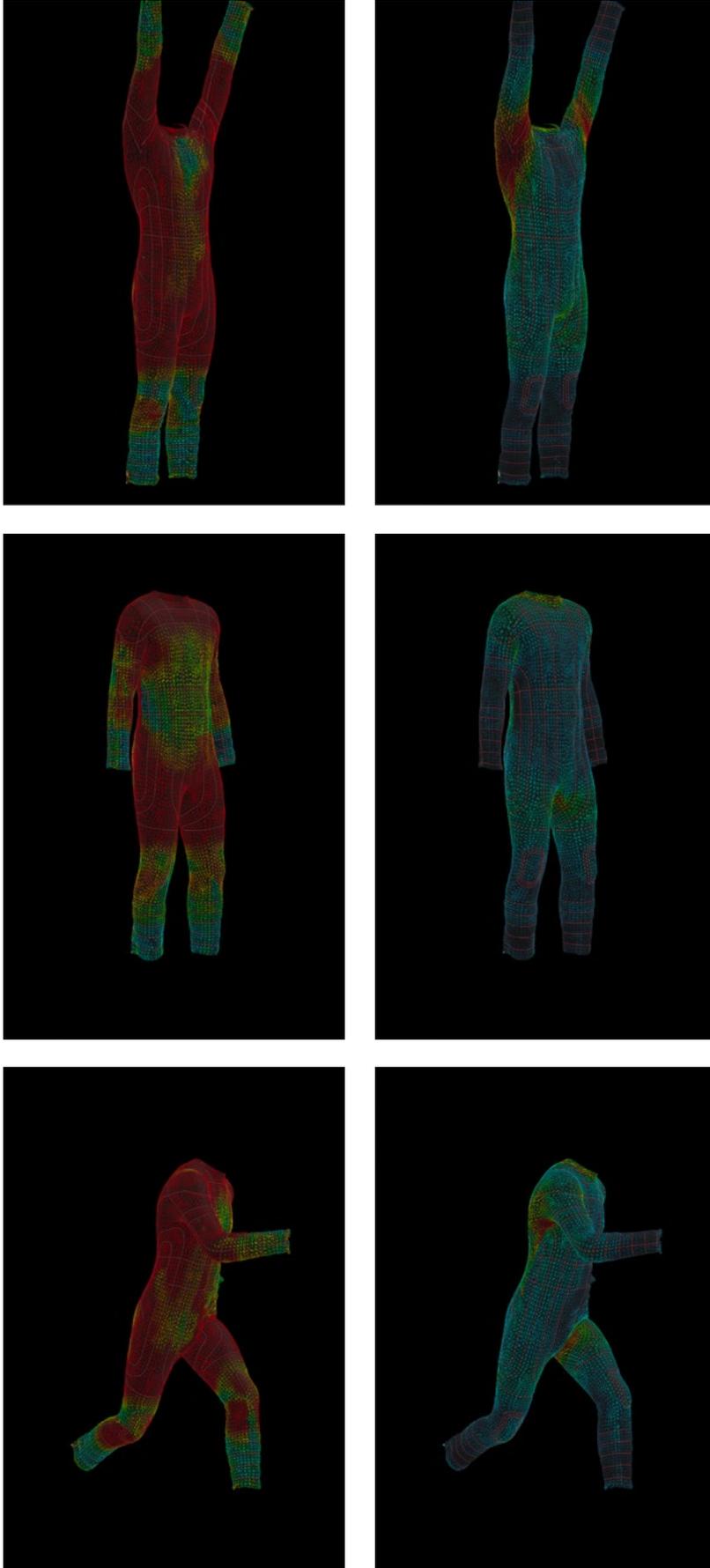


Figura 5.22. Proyecto P03-TB. Estudio paramétrico de resistencia de materiales textiles, considerando el encapsulado de hongos y simulando especulativamente las restricciones que se conocen de Marte. Elaboración: Martí Capdevila, 2021.

5.2.4. Innovación Avanzada

En esta cuarta y última etapa se presenta el resultado de una propuesta mejorada. Se decide una estrategia de comunicación y se realiza el diseño de marca. Se muestran las posibilidades de aplicación y variables de la propuesta.

Para este perfil de proyectos, en los cuales la mayoría son propuestas con visión y necesidades futuras, no se considera indispensable que la propuesta esté implementada en el mercado. Lo que se considera relevante es que la comunicación del proyecto sea óptima. Se ha de entender el rango de innovación avanzada que se presenta, el aporte de valor desde el conocimiento científico y la aproximación de la propuesta al usuario.

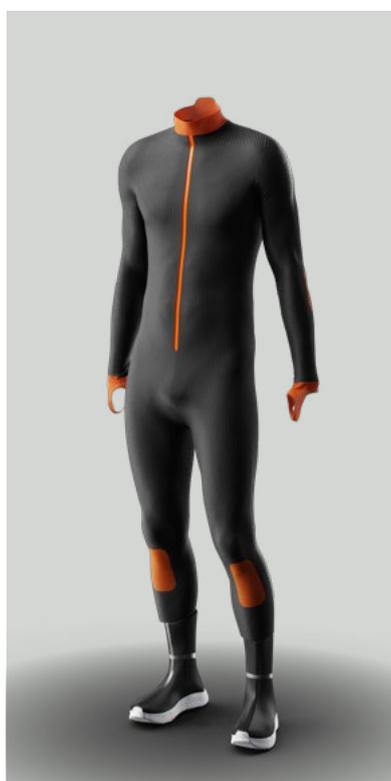
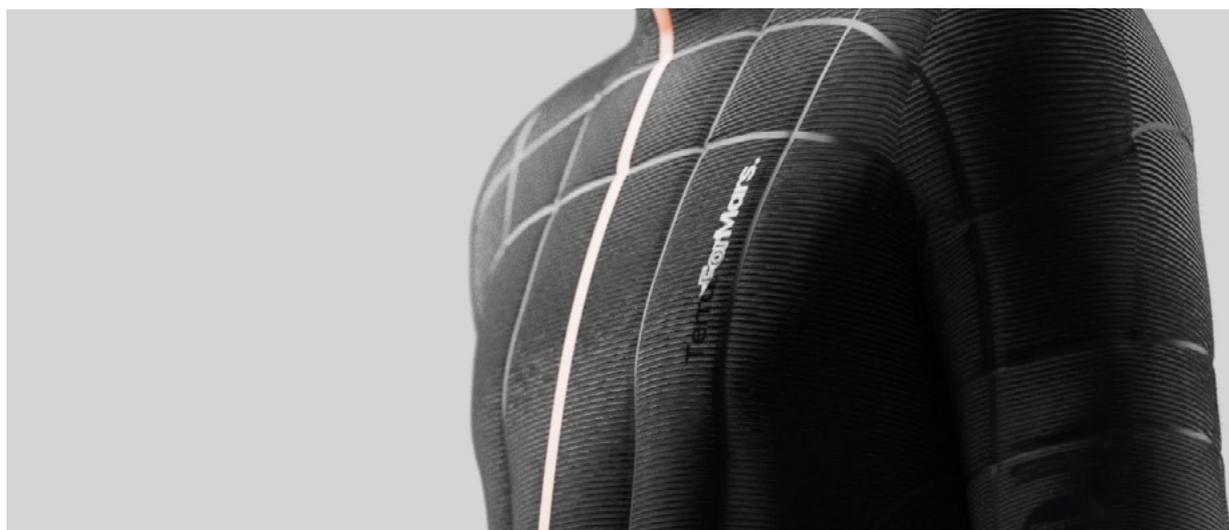
Este proceso puede tener como resultados tres tipologías distintas:

- Propuesta disruptiva. Será aquella propuesta que mediante el proceso aplicado se obtiene un resultado diferenciado, funcional e implementable en el mercado actual. Se considera disruptiva si la propuesta cambia una problemática real haciendo prescindible el uso de los elementos previo a esta. De no ser así, se considerará solo una propuesta de carácter innovador.
- Propuesta especulativa³⁰. Será la que, una vez consolidada la viabilidad científica de la propuesta, presenta una línea de interés sobre la que se especula sobre un aporte de valor en un futuro posible de las sociedades humanas. Se considera una propuesta teórica y crítica que requiere de unos años para su puesta en mercado industrial.
- Propuesta prospectiva³¹. Este proceso de diseño requiere de una etapa de investigación extensa, en el cual se debe explorar las nuevas posibilidades de los materiales y tecnologías derivadas de estos. En este proceso es probable que uno de los resultados innovadores sea un nuevo material, una nueva tecnología o una investigación nueva a explorar. Es estos casos se considera innovación en el descubrimiento científico, pero requiere de inversión económica para la investigación y una segunda fase de desarrollo para nuevas propuestas de aplicación. Se podría decir que el valor de la propuesta no está en donde se aplica o que producto se desarrolla, sino en definir y caracterizar técnicamente un nuevo material o tecnología de implementación futura.

Para ejemplificar este apartado se muestra la parte resultados realizada para el proyecto TERRA FOR MARS de Martí Capdevila, 2021. Una propuesta especulativa que tiene como objetivo principal diseñar desde la resistencia que tienen algunos hongos a la radiación y qué medio necesita para que sea efectivo.

³⁰ El diseño como herramienta para crear no solo cosas sino ideas e imaginar cómo podrían ser las cosas: imaginar futuros posibles. Plantea un debate y la discusión sobre el tipo de futuro que la gente quiere (y no quiere). Se basan en la teoría política, la filosofía de la tecnología y la ficción literaria. Las ideas liberadas por el diseño especulativo aumentan las probabilidades de lograr futuros deseables (Dunne y Raby 2013).

³¹ Ciencia que se dedica al estudio de las causas técnicas, científicas, económicas y sociales que aceleran la evolución del mundo moderno, y la previsión de las situaciones que podrían derivarse de sus influencias conjugadas («Oxford Dictionary»2021). Conjunto de análisis y estudios realizados con el fin de explorar o de predecir el futuro en una determinada materia («Real Academia Española»2021)



Interfaz
[capa interna]

Confortable por su diseño, sirve de interfaz entre la cápsula Fungus y la piel del usuario, manteniéndolo seco y equilibrado térmicamente. La independencia de esta capa permite el uso modular del traje para IVA, EVA e IEVA.

Hongo encapsulado
[capa intermedia]

Una capa intermedia sin precedentes para un concepto de traje espacial sin precedentes. Especializada contra la radiación cósmica, está rellena de agua marciana para que el hongo radiotrófico que la habita pueda desarrollarse con normalidad independientemente de los suministros terrestres.

TMG
[capa exterior]

La capa más externa, que protege al usuario de los riesgos más frecuentes: radiaciones ionizantes, cambios de temperatura, impactos de micrometeoritos y despresurización, en una envoltura extremadamente fina según las normas actuales de los trajes espaciales.

Figura 5.23.
Proyecto P03-TB. Propuesta final
de un traje espacial para Marte
ante radiación. Elaboración: Martí
Capdevila, 2021.

5.3. Conclusiones del capítulo

La conclusión general de este apartado requiere de matizar algunos detalles importantes. Para ellos se ha realizado una serie de gráficas resúmenes que ayudan a visualizar los resultados finales.

A su vez se propone una comparativa ponderada, en orden cronológico, la cual muestra la evaluación del proceso frente a el transcurso del tiempo y consolidación de las prácticas (figura 5.23). También se visualiza las preferencias por categoría.

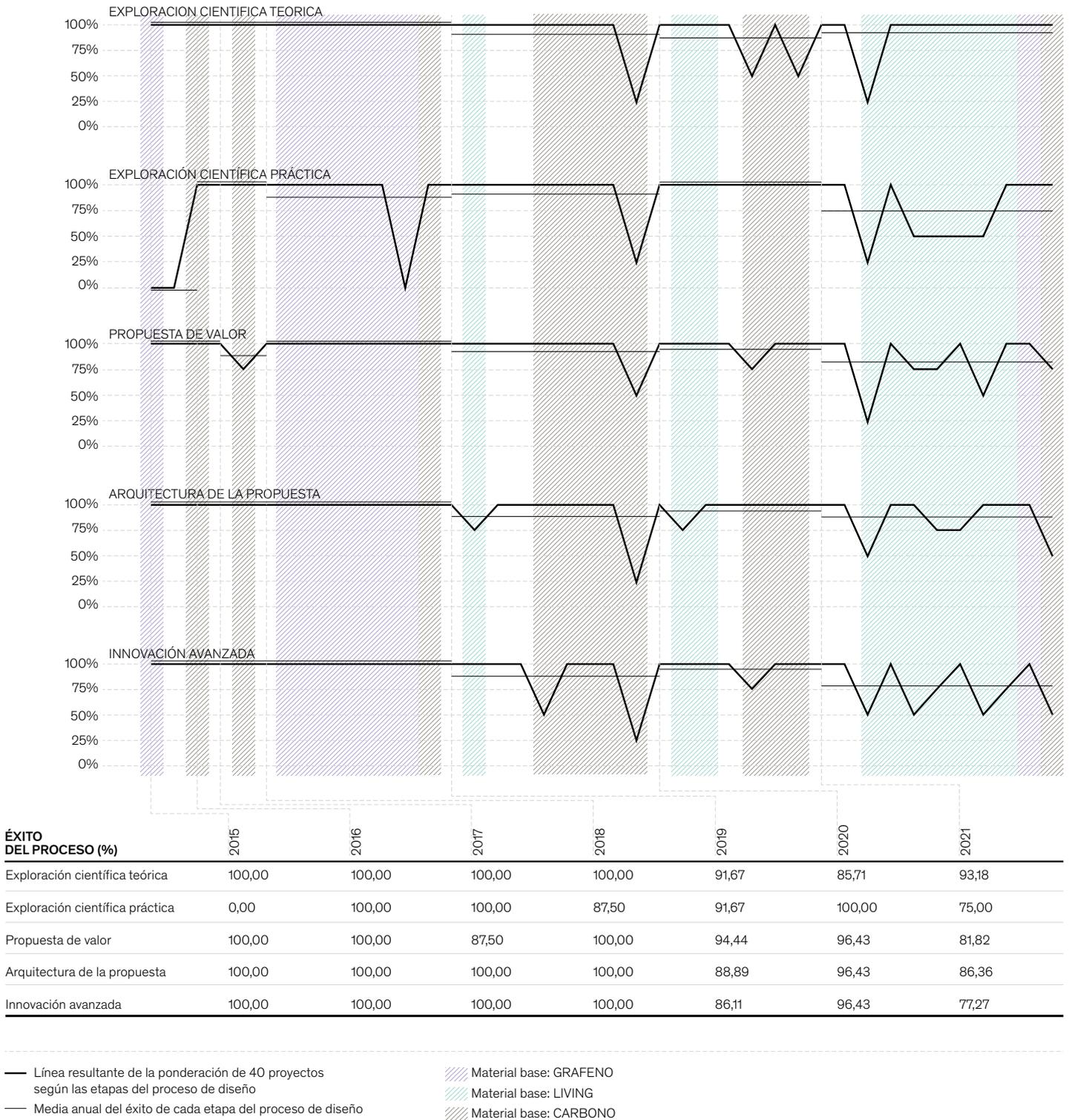


Figura 5.23. Comparativa y ponderación de los resultados obtenidos. Elaboración propia.

Observando los resultados se puede determinar que la tendencia de las tintas utilizadas en los distintos proyectos ha ido evolucionando a lo largo de los años y que existe una estrecha relación con la investigación realizada en esta tesis.

En 2018 predominaron las tintas grafénicas dada la necesidad de transferencia de conocimiento resultado de la investigación en esta tesis doctoral. En 2019 y 2020 se trabajó con otras categorías del mismo ámbito, en este tiempo la variedad con tintas dinámicas, orgánicas y sobre todo de carbono fue más diversa. En 2021 se considera una excepción ya que se propuso añadir e implementar una nueva categoría de forma consolidada, las tintas biológicas (living ink).

En general, el resultado de la aplicación del proceso es de éxito, con un 93,75% en la etapa de exploración científica teórica; 83,75% en la parte práctica; 92,5% en la propuesta de valor; 93,13% en la arquitectura de a propuesta i 90% de innovación avanzada. Todas las etapas reciben un resultado excelente (>90% de éxito), excepto la exploración científica práctica. La exploración científica práctica tiene un resultado inferior principalmente debido a los proyectos de 2015. En aquel entonces existía una dificultad en el acceso a la maquinaria de laboratorio necesaria, este campo de investigación era incipiente y el acceso a los materiales era complicado y costoso, eso dificulta la exploración científico-práctica.

Aún y así, se detecta una mayor excelencia en el proceso en los proyectos desarrollados entre 2015 y 2018 en contraposición a los de 2021. Eso no ejemplifica que el nivel haya bajado. Ya que el porcentaje de éxito sigue siendo alto en 2021. Sin embargo, existe un factor que ha producido estos resultados. El tipo de tinta utilizada para el desarrollo de proyectos. Mientras en el período de 2015-2018 la principal eran tintas grafénicas, en 2021, la principal ha sido la living ink, una categoría que se encuentra en nueva exploración y que se equipara a los inicios teóricos de las tintas grafénicas en su momento.

Los proyectos con tintas grafénicas fueron tutorizados por una persona experta en el proceso de diseño, pero también en la materia, tratándose esta de un material avanzado pero estático y bidimensional. Los proyectos living ink también han sido tutorizados por una persona experta en el proceso de diseño, pero en el estudio del material biológico ha sido un reto mayor para los autores, ya que cada uno ha trabajado con distintos microorganismos individualmente y eso ha dificultado el proceso de investigación científica. Al ser un tipo de materia incipiente y viva, en algunos casos no se ha podido conseguir el material con el que experimentar (dificultad similar a cuando se trabaja con tintas grafénicas). Esto es lo que hace que en la evaluación del proceso, el porcentaje de éxito de la etapa de exploración científica práctica sea menor a años anteriores, aun siendo excelente la investigación científico-teórica.

La no experimentación en laboratorio ha supuesto un mayor grado de especulación en los proyectos, lo que ha podido repercutir a otras etapas del proceso.

Como conclusión general, la aplicación del proceso en 40 proyectos ha sido un caso de éxito dado que las propuestas finales superan las expectativas en grado de investigación, inventiva, desarrollo y propuestas innovadoras. A su vez destacar que la mayoría de estos resultados han sido premiados y preseleccionados por instituciones nacionales e internacionales en el entorno del diseño y la sostenibilidad industrial.

A continuación se resume las principales aportaciones de esta tesis doctoral relativas a la aplicación teórica y experimental del modelo sistémico en un proceso de proyecto para una ingeniería que diseña mediante materiales avanzados, concretamente en la exploración científica de Smart Ink.

Esta investigación se ha consolidado de forma natural en cuatro principales bloques de contenido, que a su vez están relacionados con las etapas del proceso propuesto en esta investigación.

Dado que el principal objetivo en esta investigación era definir un modelo sistémico para un proceso de diseño en la ingeniería que permitiera poner en valor a los materiales avanzados desde el inicio.

De forma genérica se resume que los principales resultados obtenidos son que, por un lado se ha consolidado un modelo sistémico transdisciplinar en el proceso de diseño en la ingeniería, original de esta la tesis doctoral, que una vez implementado ha proporcionado resultados claramente disruptivos. Por otro lado resaltar que, en consecuencia a aplicar este proceso definido, se ha obtenido una patente de invención para Smart Skin Tattoo con referencia P201830504.

Para detallar los resultados específicos de esta tesis doctoral se plantea un proceso de investigación desde una perspectiva científica que busca comprender las posibilidades innovadoras de los materiales para generar futuras propuestas.

Los primeros resultados obtenidos surgen de una exploración científica. Es por ello que dentro del marco teórico expuesto en el capítulo 2, se muestra el análisis de la literatura científica y la selección de la información de rigor que da base al enfoque planteado en los objetivos de esta tesis doctoral distribuidos a lo largo de la misma. A su vez, se busca entender el proceso de diseño en la ingeniería para valorar como los materiales avanzados son un elemento de innovación disruptiva; y valorar si el proceso de diseño puede comenzar desde la propiedad diferenciadora de un material avanzado.

En este caso, los resultados se configuran en una serie de análisis que ha permitido, posteriormente, definir con rigor científico un modelo sistémico transversal en la Ingeniería de Diseño Industrial. A su vez, se ha asentado las bases del pensamiento sistémico en la ingeniería, los procesos unificados en la ingeniería de diseño y el papel de los materiales avanzados, en especial los de base carbono y bidimensionales.

Una vez determinada la base teórica, se realizó una exploración e investigación práctica que converge en una propuesta de valor para esta investigación. En el capítulo 3 se expone la exploración práctica mediante diseñar desde los materiales avanzados como proceso de innovación, se ha determinado objetivos tales como los de definir un modelo sistémico predecible para el proceso del ingeniero de diseño industrial, facilitando la búsqueda de la eficiencia durante el proceso creativo desde el conocimiento científico; y consolidar los parámetros de valor (las variables del modelo) para la definición de un modelo sistémico predecible desde el análisis en estudios de casos.

Respecto a los resultados obtenidos en esta investigación práctica, se destaca que el proceso de diseño desarrollado ha tenido unos

resultados que muestran una diferenciación significativa respecto a los procesos cotidianos precedentes. Uno de los factores más significativos del estudio realizado es que al aplicar el proceso desde las propiedades inusuales de un material avanzado desde el inicio, en este caso gráficos, ha permitido elevar la capacidad de investigación en ámbitos con necesidades no resueltas por los materiales actuales, se determina entre un 50% y 71% superior. Para estos casos se ha tenido en cuenta lo significativo de la calidad de la revista del artículo de referencia científica y se puede decir que es un parámetro claro al obtener una propuesta diferenciadora.

Este estudio ha permitido afianzar las bases de un modelo específico que permite poner en valor las posibilidades de los materiales avanzados encontrando una oportunidad de mercado y proporcionando propuestas viables industrialmente en un 30% superior a los procesos cotidianos. Los resultados demuestran que el proceso facilita la capacidad de innovación disruptiva al proporcionar propuestas que se alejan de resultados obvios en un 51,6% superior. Esto es debido a que el proceso propuesto facilita el conocimiento que permite tener como punto de partida un material avanzado.

A su vez, en el uso del proceso propuesto se percibe que el 65,7% de los resultados permiten la integración de diferentes campos de la ingeniería con una visión mayor del conocimiento científico-técnico. El que la diferencia de comprensión entre el proceso conocido y proceso propuesto en el estudio sea inapreciable (3,68%) es muy favorable para la implementación del mismo. En este estudio los usuarios han adquirido el proceso de forma natural, sistémica y lógica obteniendo unos resultados claramente significativos, diferenciadores e innovadores.

Esto es concluyente para determinar que se ha proporcionado un proceso de diseño que permita definir un perfil de diseñador futuro con habilidades para explorar diferentes campos de la ingeniería mediante la visión de las posibilidades científico-técnicas que se trabajan desde los laboratorios científicos.

Dado que el proceso de diseño ha sido asumido sin dificultad, se puede decir que cambiar el proceso de diseño en la ingeniería con los objetivos definidos en este estudio no altera la comprensión del proceso de trabajo ni requiere de formación específica adicional. Lo cual valida los resultados obtenidos en ambos procesos ya que elimina la variable de comprensión del proceso.

Para consolidar esta propuesta de valor, se realiza mediante un caso de estudio resultante del proceso aplicado propio de la tesis, el cual consiste en construir la arquitectura de la propuesta para la viabilidad de la misma. Los resultados de esta etapa se muestran en el capítulo 4 y se destacan tres resultados relevantes:

- En primer lugar, el desarrollo de Smart Skin Tattoo, un ultraweable de electrónica epidérmica, no invasivo y efímero que permite almacenar y generar datos personales de un modo no invasivo. Todo ello sin necesidad de incorporar sistemas de alimentación energética.
- En segundo lugar la implementación de forma real de Smart Skin Tattoo en su primera prueba masiva con un grupo seleccionado y diverso entre los usuarios y usuarias de "OFFF Festival", en su edición de Barcelona. Un evento con más de 3300 Asistentes personas de 25 países representados.
- Tercero y último lugar la concesión de una patente relacionada al diseño de la tecnología Smart Skin Tattoo, en fecha 28 de septiembre 2021, con referencia P201830504 y con título de "Dispositivo de comunicación previsto para disponerse sobre la piel de un usuario".

Este capítulo es el resultado de una investigación teórica-científica y práctico-experimental que ha permitido proponer el diseño de una tecnología disruptiva y no invasiva en el cuerpo humano, esta permite la gestión de datos personalizados como si de una huella dactilar se tratara.

Una de las etapas finales de esta investigación proporciona resultado en innovación avanzada, estos se muestran en el capítulo 5 mediante la aplicación del modelo sistémico del proceso proyectual para una ingeniería que diseña mediante materiales avanzados, propio de esta tesis doctoral, en el campo de exploración científica en tintas inteligentes. Estos resultados validan el modelo sistémico del proceso expuesto en esta tesis doctoral.

Paralelamente se ha trabajado para definir una línea concreta de investigación incipiente bajo el nombre de Smart Ink en el ámbito académico. La tendencia de exploración de las tintas utilizadas en los distintos proyectos ha ido evolucionando a lo largo de los años generando una estrecha relación con la investigación realizada en esta tesis.

La aplicación del proceso en los 40 proyectos seleccionados ha sido un caso de éxito dado que las propuestas finales superan las expectativas en grado de investigación, inventiva, desarrollo y propuestas innovadoras. Destacar que un porcentaje elevado de estos proyectos han sido premiados y preseleccionados por instituciones nacionales e internacionales.

Del trabajo realizado también se han obtenido una serie de resultados relacionados con la comunicación científica y divulgación del conocimiento en diferentes contextos representativos:

Publicaciones industriales

- + Jessica Fernández, and Javier Peña. 2021. Concedida la patente de invención con referencia P201830504: "Dispositivo de comunicación previsto para disponerse sobre la piel de un usuario".

Publicaciones científicas

- + Llorach-Massana, Pere, and Jessica Fernández. 2018. "La Economía Circular En El Proceso de Diseño de Un Ingeniero." CONOMA Congreso Nacional de Medioambiente 1.
- + Fernández Cano, Jessica, Francisco Javier Gil Mur, Jose M. Manero Planella, and F. Javier Peña Andrés. 2017. Materiales Grafénicos: Catalizador En El Proceso Creativo de Los Nuevos Ingenieros En Diseño Industrial. Edited by Escuelas de Ingenierias Industriales. 25 Congreso de Innovación Educativa En Las Enseñanzas Técnicas. Badajoz.
- + Guasch, Blanca, Marta González, Jessica Fernández, and F. Javier Peña. 2017. "Design and Development of Smart Nearable and Wearable Health-Friendly Products Based on Graphene, through Material-Centered Design." In .
- + González, Marta, Jessica Fernández, and Javier Peña. 2015. "Technological and Project Competencies for Design Engineers Driven by Nearable and Wearable Systems." In LearnxDesign Proceedings of the 3rd International Conference for Design Education Researchers, edited by DESIGN-ED Coalition, 4:1381–96. Chicago. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2642.5440>.

Otras publicaciones

- + Corral, Anna Ma del, Jessica Fernández, Marta González, and Xavier Riudor. 2016. "A Look at ELISAVA's Industrial Design Engineering. Engineering That Interprets, Projects, Represents and Builds." *Temas de Disseny*, no. 32: 80–97.

Divulgación científica

- + "Design Engineering: Dystopian thinking for a posthuman life in space". La bionanotecnología y la materia dinámica o funcional como marco que ha generado un reto evolucionista, en el que las propuestas desde las diferentes especialidades de la ingeniería y el diseño requieren un aumento de responsabilidad en la integración social, en el pensamiento sobre la forma de habitar, en la definición de interacción entre humanos vs soft tecnologías y en escenarios nuevos de cómo socializar desde otros hábitos de vida a otros planetas. Ponencia CCCB. *Marte: la otra Tierra*. Barcelona, 2019.
- + "Innovación, nanotecnología y cuerpo humano". Posicionamiento de la investigación industrial de los materiales bidimensionales en el proceso de diseño mediante un nuevo biodata generado por el ser humano. Ponencia en Guatemala Innovation Forum. Guatemala, 2018.
- + "El futuro de los wearables dinámicos". Se presenta parte de la investigación realizada en la tesis doctoral. Ponencia en el Mobile Week Barcelona. Barcelona, 2018.
- + "Materiales avanzados: nuevo paradigma del diseño sin límite creativo". Se presenta parte de la investigación realizada en la tesis doctoral y resultados. Ponencia en la jornada "Diseño e Investigación para la Salud - Cluster Diseño" de la Barcelona Design Week. Barcelona, 2017

Workshop

- + "El futuro de los wearables dinámicos". Se pone en práctica el modelo propio definido en la tesis doctoral y se obtienen resultados. Durante la Mobile Week Barcelona. Barcelona, 2018.
- + "Hábitos saludables: tecnología para vivir mejor hoy y mañana". Se presenta un marco de posicionamiento en relación a las nuevas tecnologías sostenibles con el potencial que determinan los materiales avanzados en el contexto e-health. Durante la Mobile Week Barcelona, 2018.
- + "Dystopian Thinking for Disruptive Innovation in Business". Formación en el Master en gestión de proyectos de Ingeniería en la EAN Universidad para 54 estudiantes durante 8 días hábiles. Bogotá – Colombia. 2019.
- + "Design for performance change". Formación ROYAL ACADEMY OF ART THE HAGUE (KABK) para 30 estudiantes durante 4 días hábiles. The Hague – Holanda, 2018.

Para concluir, me gustaría transmitir un resultado personal. El proceso de investigación llevado a cabo en esta tesis doctoral ha sido un gran aprendizaje, no solo científico sino personal y emocional. Me ha ayudado a ser más objetiva, analítica y efectiva en mi proceso de trabajo. Me ha generado una pasión por la investigación y me ha hecho entender la

importancia de ser rigurosa, de definir claros los objetivos en cualquier planteamiento y determinar objetivamente el alcance del trabajo a realizar para obtener resultados claros y que aporten valor.

Como siguientes pasos a seguir, manifestar mi interés en una vez obtenidos los derechos inventivos y la concesión de una patente industrial sobre el diseño de la tecnología Smart Skin Tattoo, con referencia P201830504 y con título de “Dispositivo de comunicación previsto para disponerse sobre la piel de un usuario” y habiendo podido validada su viabilidad, se plantea abrir el proceso de licencias industriales y desarrollo de la misma, si el caso fuera posible.

Por último, me encantaría dar la continuidad y ampliar mi experiencia en el campo de las Smart Ink con la intención de definir un marco amplio de acción sobre que posibilidades de los materiales avanzados generan un valor diferenciador en ellas.

7. Bibliografía

- ADAMS, R.S., TURNS, J. y ATMAN, C.J., 2003. Educating effective engineering designers: the role of reflective practice. *Design Studies*, vol. 24, no. 3, pp. 275-294. ISSN 0142694X. DOI 10.1016/S0142-694X(02)00056-X.
- AGRAWAL, S.K. y VISHAL, K., 2016. Existence of Chaos, dynamical behaviour with fractional order derivatives and modified adaptive function projective synchronization with uncertain parameters of a chaotic system. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 131, pp. 89-103. ISSN 00304026. DOI 10.1016/j.ijleo.2016.11.070.
- AKGÜN, A.E., KESKIN, H. y BYRNE, J.C., 2014. Complex adaptive systems theory and firm product innovativeness. *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 31, pp. 21-42. ISSN 09234748. DOI 10.1016/j.jengtecman.2013.09.003.
- AKHAVAN, O. y GHADERI, E., 2012. Escherichia coli bacteria reduce graphene oxide to bactericidal graphene in a self-limiting manner. *Carbon*, vol. 50, no. 5, pp. 1853-1860. ISSN 00086223. DOI 10.1016/j.carbon.2011.12.035.
- AKILI, W., 2015. Perspectives on engineering design learning: Realities, challenges, and recommendations. *2015 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)* [en línea]. S.l.: IEEE, pp. 1-7. [Consulta: 15 mayo 2016]. ISBN 978-1-4799-8454-1. DOI 10.1109/FIE.2015.7344190. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7344190>.
- ALBERTO, J., LEAL, C., FERNANDES, C., LOPES, P.A., PAISANA, H., ALMEIDA, A.T. de y TAVAKOLI, M., 2020. Fully Untethered Battery-free Biomonitoring Electronic Tattoo with Wireless Energy Harvesting. *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1-11. ISSN 2045-2322. DOI 10.1038/s41598-020-62097-6.
- AMENDOLA, S., OCCHIUZZI, C., MIOZZI, C., NAPPI, S., AMATO, F., CAMERA, F. y MARROCCO, G., 2021. UHF epidermal sensors: Technology and applications. *Wearable Sensors* [en línea], pp. 133-161. [Consulta: 14 marzo 2021]. DOI 10.1016/B978-0-12-819246-7.00005-X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012819246700005X>.
- AMERI, S.K., HO, R., JANG, H., TAO, L., WANG, Y., WANG, L., SCHNYER, D.M., AKINWANDE, D. y LU, N., 2017. Graphene Electronic Tattoo Sensors. *ACS Nano*, vol. 11, no. 8, pp. 7634-7641. DOI 10.1021/ACSNA-NO.7B02182.
- AMERI, S.K., KIM, M., KUANG, I.A., PERERA, W.K., ALSHIEKH, M., JEONG, H., TOPCU, U., AKINWANDE, D. y LU, N., 2018. Imperceptible electrooculography graphene sensor system for human–robot interface. *npj 2D Materials and Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 19. ISSN 2397-7132. DOI 10.1038/s41699-018-0064-4.
- AMERI, S.K. y WANG, L., 2020. Graphene electronic tattoo sensors for point-of-care personal health monitoring and human–machine interfaces. *Emerging 2D Materials and Devices for the Internet of Things*, pp. 59-86. DOI 10.1016/B978-0-12-818386-1.00003-5.
- ANÉS, J., ASTIER, A., BASTIEN, J., BERGER, R., BIANCHI, F., BLUMEN, G., BBRANDIMI, L.P., BRITO, J., CAHEN-MOREL, J., CAMUS, M., CASTEL BRANCO, A., CAZABAN, C., CERRATO, L., COSTA DE BEAUREGARD, O., COUQUIAUD, M., D'AMBROSIO, U., DA COSTA LOBO, M., DALCIN, A., DALLAPORTA, N., DE BEAUGRANDE, R., DEBONO, M.W., DE CARVARHOVIEIRA, I.M., DEL RE, G., DE MESONE, J., DUCLOS, M., DURAND, G., ESCOBAR, R., FERNÁNDEZ, M., GONÇALVES, R., GUELFAND, G., HARTVIG DE FREITAS, H., HARTVIG DE FREITAS, J., HATTORI, E., HAWES, P., JACOB, A., JUARROZ, R., JUDGE, A., KELEN, J., LAFAIT, J., LAFAIT-HÉMARD, G., MARCUS, S., MATHIN, M., MORIN, E., NICOLAU, R., MOTTA, D., NOCOLAU, E., NICOLESCU, B., ORIOL, A., PAUL, P., PÉTREQUIN, O., PHILIPPE, J.-M., PROUS-LAABEYRIE, P., QUÉAU, P., RABY, D., RANDOM, M., SANTAELLA-BRAGA, L., SAPORITI, E., SECCO, L., SIX, J., SOUSA RIBEIRO, L., TEMPLE, D. y VIEIRA, A.M., 1994. *Charte de la Transdisciplinarité* [en línea]. 1994. Portugal: s.n. Disponible en: <http://ciret-transdisciplinarity.org/chart.php#es>.
- ANTONELLI, P. y BURCKHARDT, A., 2020. *The Neri Oxman Material Ecology Catalogue*. MoMA. New York City: The Museum of Modern Art. ISBN 978-1-63345-105-6.
- ARNOLD, R.D. y WADE, J.P., 2015. A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science*, vol. 44, pp. 669-678. ISSN 18770509. DOI 10.1016/j.procs.2015.03.050.
- ARSHINOV, V. y BUDANOV, V., 2016. Paradigm of Complexity and Socio-Humanitarian Projections of Convergent Technologies. *Voprosy Filosofii*, vol. 1.
- ASHBY, M.F., FERREIRA, P. y SCHODEK, D.L., 2009. *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design. An Introduction for Engineers and Architects*. 1a. S.l.: Elsevier Ltd. ISBN 978-0-7506-8149-0.
- AYAS, M.B. y SAK, U., 2014. Objective measure of scientific creativity: Psychometric validity of the Creative Scientific Ability Test. *Thinking Skills and Creativity* [en línea], vol. 13, pp. 195-205. ISSN 18711871. DOI 10.1016/j.tsc.2014.06.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsc.2014.06.001>.
- BASALLA, G., 1991. *La evolución de la tecnología*. 1a. Barcelona: s.n. ISBN 84-7 423-481-6.
- BERTALANFFY, L., 1968. *General System Theory*. S.l.: s.n. ISBN 0807604534.
- BERTALANFFY, L., 1989. Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones. *Teoría general de los sistemas* [en línea], pp. 311. Disponible en: http://cienciasyparadigmas.files.wordpress.com/2012/06/teoria-general-de-los-sistemas-_fundamentos-desarrollo-aplicacionesludwig-von-bertalanffy.pdf.
- BIHAR, E., ROBERTS, T., ZHANG, Y., ISMAILOVA, E., HERVÉ, T., MALLIARAS, G.G., GRAAF, J.B. De, INAL, S. y SAADAQUI, M., 2018. Fully printed all-polymer tattoo/textile electronics for electromyography. *Flexible and Printed Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 034004. ISSN 2058-8585. DOI 10.1088/2058-8585/AADB56.

- BLEUZÉ, T., CIOCCI, M.-C., DETAND, J. y DE BAETS, P., 2014. Engineering meets creativity: a study on a creative tool to design new connections. *International Journal of Design Creativity and Innovation* [en línea], vol. 2, no. 4, pp. 203-223. [Consulta: 29 diciembre 2016]. ISSN 2165-0349. DOI 10.1080/21650349.2014.892217. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21650349.2014.892217>.
- BOHÓRQUEZ ARÉVALO, L.E. y ESPINOSA, A., 2015. Theoretical approaches to managing complexity in organizations: A comparative analysis. *Estudios Gerenciales*, vol. 31, no. 134, pp. 20-29. ISSN 01235923. DOI 10.1016/j.estger.2014.10.001.
- BOLAND, C.S., KHAN, U., BACKES, C., O'NEILL, A., MCCAULEY, J., DUANE, S., SHANKER, R., LIU, Y., JUREWICZ, I., DALTON, A.B. y COLEMAN, J.N., 2014. Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites. *ACS Nano*, vol. 8, no. 9, pp. 8819-8830. ISSN 1936086X. DOI 10.1021/nn503454h.
- BORRELL, M.A. y SALVADOR, M.D., 2015. *Materiales de carbono: del grafito al grafeno (TAU Textos académicos universitarios)*. 1A. Barcelona: Reverté UPV. ISBN 978-8429147520.
- Boston University: Physics Department. [en línea], 2016. Disponible en: <http://physics.bu.edu/>.
- BRAD, S., MURAR, M. y BRAD, E., 2016. Methodology for Lean Design of Disruptive Innovations. *Procedia CIRP* [en línea], vol. 50, pp. 153-159. ISSN 22128271. DOI 10.1016/j.procir.2016.04.204. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.204>.
- BROWN, B.T. y WYATT, J., 2010. Design Thinking for Social Innovation. *Stanford Social Innovation Review* [en línea], vol. Winter, no. Winter 2010, pp. 30-35. ISSN 10878572. DOI 10.1108/10878571011042050. Disponible en: http://www.ssireview.org/images/articles/2010WI_Features_DesignThinking.pdf.
- BROWN, T., 2008. Design thinking. *Harvard Business Review*, vol. 86, no. 6.
- BUTT, M., SHARUNOVA, A., STORGA, M., KHAN, Y.I. y QURESHI, A.J., 2018. Transdisciplinary Engineering Design Education: Ontology for a Generic Product Design Process. *Procedia CIRP* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 338-343. [Consulta: 5 abril 2021]. DOI 10.1016/j.procir.2018.02.019. Disponible en: www.sciencedirect.com/AvailableOnlineAtScienceDirect.com/locate/procedia2212-8271.
- CAMARGO, J.R., ORZARI, L.O., ARAÚJO, D.A.G., DE OLIVEIRA, P.R., KALINKE, C., ROCHA, D.P., LUIZ DOS SANTOS, A., TAKEUCHI, R.M., MUNOZ, R.A.A., BONACIN, J.A. y JANEGITZ, B.C., 2021. Development of conductive inks for electrochemical sensors and biosensors. *Microchemical Journal*, vol. 164, pp. 105998. ISSN 0026-265X. DOI 10.1016/J.MICROC.2021.105998.
- CAO, S., ZHANG, L., CHAI, Y. y YUAN, R., 2013. An integrated sensing system for detection of cholesterol based on TiO₂-graphene-Pt-Pd hybrid nanocomposites. *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 42, no. 1, pp. 532-538. ISSN 09565663. DOI 10.1016/j.bios.2012.10.048.
- CASTILLO, E.V., 1981. General systems theory in the conscious evolution of mankind. *The Quality of Life: Systems Approaches*. S.l.: s.n., pp. 129-130. ISBN 9780080271989.
- CASTRO NETO, A.H., 2010. The carbon new age. *Materials Today*, vol. 13, no. 3, pp. 12-17. ISSN 13697021. DOI 10.1016/S1369-7021(10)70029-8.
- CATULLI, M., COOK, M. y POTTER, S., 2017. Consuming use orientated product service systems: A consumer culture theory perspective. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 141, pp. 1186-1193. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.09.187. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.187>.
- CELA-CONDE, C.J. y AYALA, F.J., 2017. Science and Technology in Human Societies: From Tool Making to Technology. *On Human Nature* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 729-755. [Consulta: 11 abril 2017]. ISBN 9780124201903. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/recursos.biblioteca.upc.edu/science/article/pii/B9780124201903000442>.
- Centre International de Recherches et Études Transdisciplinaires CIRET. [en línea], 2021. Disponible en: <https://ciret-transdisciplinarity.org/transdisciplinarity.php>.
- CES selector. [en línea], 2021. Disponible en: <https://www.grantadesign.com/es/products/ces/>.
- CHAKRABARTI, A., 2013. Understanding influences on engineering creativity and innovation: a biographical study of 12 outstanding engineering designers and innovators. *International Journal of Design Creativity and Innovation* [en línea], vol. 1, no. 1, pp. 56-68. [Consulta: 29 diciembre 2016]. ISSN 2165-0349. DOI 10.1080/21650349.2013.754643. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21650349.2013.754643>.
- CHEN, S. y LIU, J., 2021. Pervasive liquid metal printed electronics: From concept incubation to industry. *iScience* [en línea], vol. 24, no. 1, pp. 102026. [Consulta: 27 julio 2021]. ISSN 2589-0042. DOI 10.1016/J.ISCI.2020.102026. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004220312232>.
- CHENG, Y., HUANG, L., RAMLOGAN, R. y LI, X., 2016. Forecasting of potential impacts of disruptive technology in promising technological areas: Elaborating the SIRS epidemic model in RFID technology. *Technological Forecasting and Social Change*, ISSN 00401625. DOI 10.1016/j.techfore.2016.12.003.
- CHENG, Y.T. y VAN DE VEN, A.H., 1996. Learning the Innovation Journey: Order out of Chaos? *Organization Science* [en línea], vol. 7, no. 6, pp. 593-614. [Consulta: 6 diciembre 2016]. ISSN 10477039. Disponible en: <https://www-scopus-com.recursos.biblioteca.upc.edu/record/display.uri?eid=2-s2.0-0030375320&origin=inward&txGid=15A2102852C3804D778D743330B06548.wsnAw8kcdt7IPYLOOV48gA%3A2#>.

- CHOI, S., HAN, S.I., JUNG, D., HWANG, H.J., LIM, C., BAE, S., PARK, O.K., TSCHABRUNN, K.M., LEE, M., BAE, S.Y., YU, J.W., RYU, J.H., LEE, S.-H., PARK, K., KANG, P.M., LEE, W.B., NEZAFAT, R., HYEON, T. y KIM, D.-H., 2018. Highly conductive, stretchable and biocompatible Ag-Au core-sheath nanowire composite for wearable and implantable bioelectronics. *Nature nanotechnology*, vol. 13, no. 11, pp. 1048-1056. ISSN 1748-3395. DOI 10.1038/S41565-018-0226-8.
- CHORTOS, A. y BAO, Z., 2014. Skin-inspired electronic devices. *Materials Today* [en línea], vol. 17, no. 7, pp. 321-331. ISSN 18734103. DOI 10.1016/j.mattod.2014.05.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2014.05.006>.
- CHRISTENSEN, C.M., RAYNOR, M.E. y MCDONALD, R., 2015. What Is Disruptive Innovation? *Harvard Business Review* [en línea], no. DESEMBER, pp. 44-53. [Consulta: 7 enero 2017]. Disponible en: <https://hbr.org/2015/12/what-is-disruptive-innovation>.
- CHU, Z., PENG, J. y JIN, W., 2017. Advanced nanomaterial inks for screen-printed chemical sensors. *Sensors and Actuators, B: Chemical* [en línea], vol. 243, pp. 919-926. ISSN 09254005. DOI 10.1016/j.snb.2016.12.022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2016.12.022>.
- CHUNG, H.U., KIM, B.H., LEE, J.Y., LEE, J., XIE, Z., IBLER, E.M., LEE, K., BANKS, A., JEONG, J.Y., KIM, J., OGLE, C., GRANDE, D., YU, Y., JANG, H., ASSEM, P., RYU, D., KWAK, J.W., NAMKOONG, M., PARK, J. Bin, LEE, Y., KIM, D.H., RYU, A., JEONG, J., YOU, K., JI, B., LIU, Z., HUO, Q., FENG, X., DENG, Y., XU, Y., JANG, K.-I., KIM, J., ZHANG, Y., GHAFARI, R., RAND, C.M., SCHAU, M., HAMVAS, A., WEESE-MAYER, D.E., HUANG, Y., LEE, S.M., LEE, C.H., SHANBHAG, N.R., PALLER, A.S., XU, S. y ROGERS, J.A., 2019. Binodal, wireless epidermal electronic systems with in-sensor analytics for neonatal intensive care. *Science*, vol. 363, no. 6430. ISSN 0036-8075. DOI 10.1126/SCIENCE.AAU0780.
- CLAESSEN, D., STOKROOS, I., DEELSTRA, H.J., PENNINGA, N.A., BORMANN, C., SALAS, J.A., DIJKHUIZEN, L. y WÖSTEN, H.A.B., 2004. The formation of the rodlet layer of streptomycetes is the result of the interplay between rodlets and chaplins. *Molecular microbiology* [en línea], vol. 53, no. 2, pp. 433-43. [Consulta: 11 octubre 2021]. ISSN 0950-382X. DOI 10.1111/j.1365-2958.2004.04143.x. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15228525>.
- CLAUSSEN, J.C., KUMAR, A., JARROCH, D.B., KHAWAJA, M.H., HIBBARD, A.B., PORTERFIELD, D.M. y FISHER, T.S., 2012. Nanostructuring platinum nanoparticles on multilayered graphene petal nanosheets for electrochemical biosensing. *Advanced Functional Materials*, vol. 22, no. 16, pp. 3399-3405. ISSN 1616301X. DOI 10.1002/adfm.201200551.
- COPPO, J., 2010. Teoría del caos y método científico. *Revista Veterinaria*, vol. 21, no. 2, pp. 157-167.
- CORRAL, A.M. del, FERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ, M. y RIUDOR, X., 2016. Una mirada a la Ingeniería de Diseño Industrial de ELISAVA. Una ingeniería que interpreta, proyecta, representa y construye. *Elisava TdD*, vol. 0, no. 32, pp. 80-97. ISSN 2385-7951.
- CROPLEY, D.H., 2016. Creativity in Engineering. [en línea]. S.l.: Springer Singapore, pp. 155-173. [Consulta: 29 diciembre 2016]. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-981-287-618-8_10.
- CROSS, N., 2008. *Engineering design methods: strategies for product design*. S.l.: J. Wiley. ISBN 9780470519264.
- CROSS, N., 2021. *Engineering design methods : strategies for product design*. 5th. S.l.: s.n. ISBN 9781119724407.
- CROSS, N., NAUGHTON, J. y WALKER, D., 1981. Design method and scientific method. *Design Studies* [en línea], vol. 2, no. 4, pp. 195-201. [Consulta: 16 mayo 2016]. ISSN 0142694X. DOI 10.1016/0142-694X(81)90050-8. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0142694X81900508>.
- CUI, Y., LI, Y. y XING, Y., 2018. Sweat effects on the thermal analysis of epidermal electronic devices integrated with human skin. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [en línea], vol. 127, pp. 97-104. ISSN 00179310. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.105. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.105>.
- DAY, R.H., 1983. The Emergence of Chaos from Classical Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics* [en línea], vol. 98, no. 2, pp. 201. [Consulta: 31 diciembre 2016]. ISSN 00335533. DOI 10.2307/1885621. Disponible en: <http://qje.oxfordjournals.org/lookup/doi/10.2307/1885621>.
- DEL CORRAL, A.M., FERNÁNDEZ, J., GONZÁLEZ, M. y RIUDOR, X., 2016. Una mirada a la Ingeniería de Diseño Industrial de ELISAVA. *Temas de disseny*. S.l.:
- Developing Effective Messages for Improving Public Understanding of Engineering. [en línea], 2021. Disponible en: <https://www.nae.edu/Projects/20760.aspx>.
- DIAMOND, D., 2016. Fundamental Materials Science. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [en línea]. S.l.: s.n., [Consulta: 11 abril 2017]. ISBN 9780128035818. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/recursos.biblioteca.upc.edu/science/article/pii/B9780128035818041059>.
- Dictionary. , 2021.
- DILMAÇÚNAL, T., 2017. Intelligent Systems in the Food Packaging Industry: Contaminant Sensors and Security/Anticounterfeiting Devices. *Nanotechnology Applications in Food* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 287-306. [Consulta: 7 agosto 2017]. ISBN 9780128119426. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128119426000145>.
- DÖSCHER, H. y REISS, T., 2021. Graphene Roadmap Briefs (No. 1):Innovation interfaces of the Graphene Flagship. *2D Materials*, ISSN 2053-1583. DOI 10.1088/2053-1583/abddcc.

- DÖSCHER, H., SCHMALTZ, T., NEEF, C., THIELMANN, A. y REISS, T., 2021. Graphene Roadmap Briefs (No. 2): Industrialization status and prospects 2020. *2D Materials*, ISSN 2053-1583. DOI 10.1088/2053-1583/abddcd.
- DOWLING, A., CLIFT, R., GROBERT, N., HUTTON, D., OLIVER, R., O'NEILL, O., PETHICA, J., PIDGEON, N., PORRITT, J., RYAN, J. y AL., E., 2004. Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. *London The Royal Society The Royal Academy of Engineering Report* [en línea], vol. 46, no. July, pp. 618-618. ISSN 15260046. DOI 10.1007/s00234-004-1255-6. Disponible en: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Nanoscience+and+nanotechnologies+:+opportunities+and+uncertainties#0>.
- DRACK, M. y SCHWARZ, G., 2010. Recent Developments in General System Theory. *Systems Research and Behavioral Science*, ISSN 1094-429X. DOI 10.1002/sres.2013.
- DUBBERLY, H., 2008. How do you design? *A Compendium of Models*, pp. 147. ISSN 01674889. DOI 10.1016/j.bbamcr.2006.09.022.
- DUMAS, D., SCHMIDT, L.C. y ALEXANDER, P.A., 2016. Predicting creative problem solving in engineering design. *Thinking Skills and Creativity*, vol. 21, pp. 50-66. ISSN 18711871. DOI 10.1016/j.tsc.2016.05.002.
- DUNNE, A. y RABY, F., 2013. *Speculative everything : design, fiction, and social dreaming* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 28 julio 2017]. ISBN 9780262019842. Disponible en: <https://readings.design/PDF/speculative-everything.pdf>.
- DYM, C.L., 2006. Engineering Design: So Much to Learn*. , pp. 422-428.
- DYM, C.L., AGOGINO, A.M., ERIS, O., FREY, D.D. y LEIFER, L.J., 2005. Engineering design thinking, teaching, and learning. *JEE Journal of Engineering Education*, vol. 94, no. 1, pp. 103-120. ISSN 0360-8581. DOI 10.1109/EMR.2006.1679078.
- EDITORIAL BOARD OF IJDCI, E. board of, 2013. Perspectives on design creativity and innovation research. *International Journal of Design Creativity and Innovation* [en línea], vol. 1, no. 1, pp. 1-42. [Consulta: 29 diciembre 2016]. ISSN 2165-0349. DOI 10.1080/21650349.2013.754657. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21650349.2013.754657>.
- EL-ZEIN, A.H. y HEDEMANN, C., 2016. Beyond problem solving: Engineering and the public good in the 21st century. *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 692-700. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.07.129.
- ERGEN, O., 2021. Robust atrial fibrillation monitoring utilizing graphene aerogel-based nano-tattoo. *Materials Letters*, vol. 291, pp. 129525. ISSN 0167-577X. DOI 10.1016/J.MATLET.2021.129525.
- ERTAS, A. y JONES, J.C., 1996. *The Engineering Design Process*. 2. S.l.: Wiley. ISBN 978-0471136996.
- EUROPEAN COMMISSION, 2016. Horizon 2020 - Monitoring Report 2015. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020>.
- European Commission. [en línea], 2021. [Consulta: 4 noviembre 2018]. Disponible en: http://ec.europa.eu/growth/industry/policy/key-enabling-technologies_en.
- FAJARDO-ORTIZ, G., FERNÁNDEZ-ORTEGA, M.Á., ORTIZ-MONTALVO, A. y OLIVARES-SANTOS, R.A., 2014. The dimension of the paradigm of complexity in health systems. *Cirugía y Cirujanos (English Edition)* [en línea], vol. 83, no. 1, pp. 81-86. ISSN 2444-0507. DOI 10.1016/j.circen.2014.03.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.circen.2014.03.001>.
- FERNÁNDEZ CANO, J., GIL MUR, F.J., MANERO PLANELLA, J.M. y PEÑA ANDRÉS, F.J., 2017. *Materiales gráficos: catalizador en el proceso creativo de los nuevos ingenieros en diseño industrial*. Badajoz: s.n. ISBN 978-84-697-6395-7.
- FERRARI, A.C., BONACCORSO, F., FAL'KO, V., NOVOSELOV, K.S., ROCHE, S., BØGGILD, P., BORINI, S., KOPPENS, F.H.L., PALERMO, V., PUGNO, N., GARRIDO, J.A., SORDAN, R., BIANCO, A., BALLERINI, L., PRATO, M., LIDORIKIS, E., KIVIOJA, J., MARINELLI, C., RYHÄNEN, T., MORPURGO, A., COLEMAN, J.N., NICOLOSI, V., COLOMBO, L., FERT, A., GARCIA-HERNANDEZ, M., BACHTOLD, A., SCHNEIDER, G.F., GUINEA, F., DEKKER, C., BARBONE, M., SUN, Z., GALIOTIS, C., GRIGORENKO, A.N., KONSTANTATOS, G., KIS, A., KATSNELSON, M., VANDERSYPEN, L., LOISEAU, A., MORANDI, V., NEUMAIER, D., TREOSI, E., PELLEGRINI, V., POLINI, M., TREDICUCCI, A., WILLIAMS, G.M., HEE HONG, B., AHN, J.-H., MIN KIM, J., ZIRATH, H., VAN WEES, B.J., VAN DER ZANT, H., OCCHIPINTI, L., DI MATTEO, A., KINLOCH, I.A., SEYLLER, T., QUESNEL, E., FENG, X., TEO, K., RUPESINGHE, N., HAKONEN, P., NEIL, S.R.T., TANNOCK, Q., LÖFWANDER, T. y KINARET, J., 2015. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems. *Nanoscale* [en línea], vol. 7, no. 11, pp. 4598-4810. [Consulta: 28 agosto 2018]. ISSN 2040-3364. DOI 10.1039/C4NR01600A. Disponible en: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4NR01600A>.
- FERRARI, L.M., ISMAILOV, U., BADIÉ, J.-M., GRECO, F. y ISMAILOVA, E., 2020. Conducting polymer tattoo electrodes in clinical electro- and magneto-encephalography. *npj Flexible Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 1-9. ISSN 2397-4621. DOI 10.1038/s41528-020-0067-z.
- FEYNMAN, R.P., 1959. Plenty of Room at the Bottom. *American Physical Society*, no. December. ISSN 0022-3875. DOI 10.1007/s12045-011-0109-x.
- FOGARTY, L., CREANZA, N. y FELDMAN, M.W., 2015. Cultural Evolutionary Perspectives on Creativity and Human Innovation. *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 30, no. 12, pp. 736-754. ISSN 01695347. DOI 10.1016/j.tree.2015.10.004.
- FRENCH, M.J., 1985. *Conceptual Design for Engineers* [en línea]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [Consulta: 14 mayo 2016]. ISBN 978-3-662-11366-0. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-11366-0>.

- FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA, 2009. *Nanociencia y nanotecnología: Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro* [en línea]. MADRID: s.n. ISBN 9788469172667. Disponible en: <http://www.fecyt.es/es/node/2175/pdf-viewer>.
- G.PONCE, A., F.AYALA-ZAVALA, J., E.MARCOVICH, N., J.VÁZQUEZ, F. y MARÍA, R.A., 2018. Nanotechnology Trends in the Food Industry: Recent Developments, Risks, and Regulation. En: A.M.G. & A.M. HOLBAN (ed.), *Impact of Nanoscience in the Food Industry. Handbook of Food Bioengineering*. S.l.: s.n., pp. 113-141. ISBN 978-0-12-811441-4.
- GARCIA NAUMIS, G., 2010. Grafeno, Premio Nobel 2010: el descubrimiento del. *el Gullon. Las grandes preguntas de la física. Publicación del Instituto de Física, UNAM*, no. 14, pp. 2-3.
- GARIMELLA, R. y ELTORAI, A.E.M., 2017. *Nanotechnology in orthopedics* [en línea]. marzo 2017. S.l.: s.n. [Consulta: 7 agosto 2017]. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0972978X16301659>.
- GATES, E.F., 2016. Making sense of the emerging conversation in evaluation about systems thinking and complexity science. *Evaluation and Program Planning* [en línea], vol. 59, pp. 62-73. ISSN 01497189. DOI 10.1016/j.evalprogplan.2016.08.004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2016.08.004>.
- GAY, A., 2016. La ciencia, la técnica y la tecnología. *TecnoRed educativa*,
- GEIM, A.K. y NOVOSELOV, K.S., 2007. The rise of graphene. *Nature Materials* [en línea], vol. 6, no. 3, pp. 183-191. [Consulta: 24 abril 2016]. ISSN 1476-1122. DOI 10.1038/nmat1849. Disponible en: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nmat1849>.
- GHASSEMI, M. y SHAHIDIAN, A., 2017. History of Bio-Nano Fluid Flow. *Nano and Bio Heat Transfer and Fluid Flow*. S.l.: s.n., pp. 1-8. ISBN 978-0-12-803779-9.
- GLEICK, J., 1987. *Chaos: making a new science*. S.l.: enguin Books. ISBN 9780140092509.
- GONG, S., YAP, L.W., ZHU, B., ZHAI, Q., LIU, Y., LYU, Q., WANG, K., YANG, M., LING, Y., LAI, D.T.H., MARZBANRAD, F. y CHENG, W., 2019. Local Crack-Programmed Gold Nanowire Electronic Skin Tattoos for In-Plane Multisensor Integration. *Advanced Materials*, vol. 31, no. 41, pp. 1903789. ISSN 1521-4095. DOI 10.1002/ADMA.201903789.
- GONZÁLEZ, M., FERNÁNDEZ, J. y PEÑA, J., 2015. Technological and project competencies for design engineers driven by nearable and wearable systems. En: DESIGN-ED COALITION (ed.), *LearnxDesign Proceedings of the 3rd International Conference for Design Education Researchers* [en línea]. Chicago: s.n., pp. 1381-1396. DOI 10.13140/RG.2.1.2642.5440. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/303177052_Technological_and_project_competencies_for_design_engineers_driven_by_nearable_and_wearable_systems.
- GRAJEWSKI, D., DIAKUN, J., WICHNIAREK, R., DOSTATNI, E., BUŃ, P., GÓRSKI, F. y KARWASZ, A., 2015. Improving the Skills and Knowledge of Future Designers in the Field of Ecodesign Using Virtual Reality Technologies. *Procedia Computer Science* [en línea], vol. 75, pp. 348-358. [Consulta: 11 abril 2017]. ISSN 18770509. DOI 10.1016/j.procs.2015.12.257. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050915037187>.
- HA, T., TRAN, J., LIU, S., JANG, H., JEONG, H., MITBANDER, R., HUH, H., QIU, Y., DUONG, J., WANG, R.L., WANG, P., TANDON, A., SIROHI, J. y LU, N., 2019. A Chest-Laminated Ultrathin and Stretchable E-Tattoo for the Measurement of Electrocardiogram, Seismocardiogram, and Cardiac Time Intervals. *Advanced Science*, vol. 6, no. 14, pp. 1900290. ISSN 2198-3844. DOI 10.1002/ADVS.201900290.
- HELLER, K.A., 2007. Scientific ability and creativity. *High Ability Studies* [en línea], vol. 18, no. 2, pp. 209-234. [Consulta: 7 abril 2021]. ISSN 1359-8139. DOI 10.1080/13598130701709541. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13598130701709541>.
- HERNANDEZ, N.V., SHAH, J.J. y SMITH, S.M., 2010. Understanding design ideation mechanisms through multilevel aligned empirical studies. *Design Studies*, vol. 31, no. 4, pp. 382-410. ISSN 0142694X. DOI 10.1016/j.destud.2010.04.001.
- HERRERA JIMÉNEZ, R., 2007. Sistema y lo sistémico en el pensamiento contemporáneo. *Ingeniería - Revista semestral de la Universidad de Costa Rica* [en línea], vol. 17, no. 2, pp. 11-26. ISSN 1409-2441. Disponible en: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/viewFile/7745/7409>.
- HIERONYMI, A., 2013. Creativity from a systems perspective: bridging theory and practice. En: P. RANULPH GLANVILLE AND PROF DAVID GR (ed.), *Kybernetes* [en línea], vol. 42, no. 9/10, pp. 1413-1423. [Consulta: 31 diciembre 2016]. ISSN 0368-492X. DOI 10.1108/K-10-2012-0081. Disponible en: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/K-10-2012-0081>.
- HOFKIRCHNER, W. y SCHAFRANEK, M., 2011. General System Theory. *Philosophy of Complex Systems* [en línea]. S.l.: s.n., pp. 177-194. [Consulta: 16 mayo 2016]. ISBN 9780444520760. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=fSHsJbpZlxsC&oi=fnd&pg=PA177&dq=General+System+Theory+Hofkirchner&ots=9sBDKp7qN0&sig=o5cux7cC2aW-gdwHrHS-FiQp6tM#v=onepage&q=General+System+Theory+Hofkirchner&f=false>.
- HOSSAIN, M.F. y SLAUGHTER, G., 2020. PtNPs decorated chemically derived graphene and carbon nanotubes for sensitive and selective glucose biosensing. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 861, pp. 113990. ISSN 1572-6657. DOI 10.1016/J.JELECHEM.2020.113990.
- HOWARD, T.J., CULLEY, S.J. y DEKONINCK, E., 2008. Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies* [en línea], vol. 29, no. 2, pp. 160-180. [Consulta: 27 marzo 2016]. ISSN 0142694X. DOI 10.1016/j.destud.2008.01.001. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142694X08000173>.

- HUANG, Y., TAN, J., CUI, L., ZHOU, Z., ZHOU, S., ZHANG, Z., ZHENG, R., XUE, Y., ZHANG, M., LI, S., ZHU, N., LIANG, J., LI, G., ZHONG, L. y ZHAO, Y., 2018. Graphene and Au NPs co-mediated enzymatic silver deposition for the ultrasensitive electrochemical detection of cholesterol. *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 102, pp. 560-567. ISSN 0956-5663. DOI 10.1016/J.BIOS.2017.11.037.
- HUNG, S.-C. y LAI, J.-Y., 2016. When innovations meet chaos: Analyzing the technology development of printers in 1976–2012. *Journal of Engineering and Technology Management*, ISSN 09234748. DOI 10.1016/j.jengtecman.2016.09.001.
- HUNG, S.-C. y TU, M.-F., 2014. Is small actually big? The chaos of technological change. *Research Policy*, vol. 43, no. 7, pp. 1227-1238. ISSN 00487333. DOI 10.1016/j.respol.2014.03.003.
- International Society for the Systems Sciences. [en línea], 2021. [Consulta: 1 enero 2016]. Disponible en: <https://www.isss.org/about-issss/>.
- INZELBERG, L., RAND, D., STEINBERG, S., DAVID-PUR, M. y HANEIN, Y., 2018. A Wearable High-Resolution Facial Electromyography for Long Term Recordings in Freely Behaving Humans. *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 2058. ISSN 2045-2322. DOI 10.1038/s41598-018-20567-y.
- JEONG, H., HA, T., KUANG, I., SHEN, L., DAI, Z., SUN, N. y LU, N., 2017. NFC-enabled, tattoo-like stretchable biosensor manufactured by «cut-and-paste» method. *39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 4094-4097. DOI 10.1109/EMBC.2017.8037756.
- JEONG, H., WANG, L., HA, T., MITBANDER, R., YANG, X., DAI, Z., QIAO, S., SHEN, L., SUN, N. y LU, N., 2019. Modular and Reconfigurable Wireless E-Tattoos for Personalized Sensing. *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 8, pp. 1900117. ISSN 2365-709X. DOI 10.1002/ADMT.201900117.
- JOHANSEN BERTOGLIO, O., 2004. *Introducción a la teoría general de sistemas*. S.I.: Limusa. ISBN 968181567X.
- JUNG, J.-H. y CHANG, D.-R., 2016. Types of creativity. Fostering multiple intelligences in design convergence talents. *Thinking Skills and Creativity*, vol. 23, pp. 101-111. ISSN 18711871. DOI 10.1016/j.tsc.2016.12.001.
- KAMYSHNY, A., STEINKE, J. y MAGDASSI, S., 2011. Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics. *The Open Applied Physics Journal* [en línea]. S.I.: [Consulta: 28 diciembre 2018]. Disponible en: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOAPJ/TOAPJ-4-19.pdf>.
- KARANA, E., BARATI, B., ROGNOLI, V. y ZEEUW VAN DER LAAN, A., 2015. Material driven design (MDD): A method to design for material experiences. *International Journal of Design*, vol. 9, no. 2. ISSN 1994036X.
- KARANA, E., PEDGLEY, O., ROGNOLI, V. y KORSUNSKY, A., 2016. Emerging material experiences. *Materials & Design* [en línea], vol. 90, pp. 1248-1250. [Consulta: 15 abril 2016]. ISSN 02641275. DOI 10.1016/j.matdes.2015.07.042. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026412751500475X>.
- KEFALAS, A.G., 2011. On Systems Thinking and the Systems Approach. *World Futures* [en línea], vol. 67, no. 4-5, pp. 343-371. ISSN 0260-4027. DOI 10.1080/02604027.2011.585911. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02604027.2011.585911>.
- KESIĆ, S., 2015. Systems biology, emergence and antireductionism. *Saudi Journal of Biological Sciences*, ISSN 1319562X. DOI 10.1016/j.sjbs.2015.06.015.
- KIM, D.-H., LU, N., MA, R., KIM, Y.-S., KIM, R.-H., WANG, S., WU, J., WON, S.M., TAO, H., ISLAM, A., YU, K.J., KIM, T., CHOWDHURY, R., YING, M., XU, L., LI, M., CHUNG, H.-J., KEUM, H., MCCORMICK, M., LIU, P., ZHANG, Y.-W., OMENETTO, F.G., HUANG, Y., COLEMAN, T. y ROGERS, J.A., 2011. Epidermal electronics. *Science (New York, N.Y.)* [en línea], vol. 333, no. 6044, pp. 838-43. [Consulta: 28 diciembre 2018]. ISSN 1095-9203. DOI 10.1126/science.1206157. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21836009>.
- KIM, J., CAMPBELL, A.S. y WANG, J., 2018. Wearable non-invasive epidermal glucose sensors: A review. *Talanta* [en línea], vol. 177, no. July 2017, pp. 163-170. ISSN 00399140. DOI 10.1016/j.talanta.2017.08.077. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.077>.
- KIMURA, G., NUIDA, K. y IMAI, H., 2010. Distinguishability measures and entropies for general probabilistic theories. *Reports on Mathematical Physics*, vol. 66, no. 2, pp. 175-206. ISSN 00344877. DOI 10.1016/S0034-4877(10)00025-X.
- KINARET, J., 2018. GRAPHENE FLAGSHIP Annual Report 2018 Content. [en línea]. S.I.: [Consulta: 14 marzo 2021]. Disponible en: https://graphene-flagship.eu/media/8d8d1c7089af0c7/graphene_annual-report_2018.pdf.
- KOO, J.H., JEONG, S., SHIM, H.J., SON, D., KIM, J., KIM, D.C., CHOI, S., HONG, J.-I. y KIM, D.-H., 2017. Wearable Electrocardiogram Monitor Using Carbon Nanotube Electronics and Color-Tunable Organic Light-Emitting Diodes. *ACS nano*, vol. 11, no. 10, pp. 10032-10041. ISSN 1936-086X. DOI 10.1021/ACS.NANO.7B04292.
- KRANZBERG, M., PURSELL, C.W. y AUNSUATEGUI, I.P., 1981. *Historia de la Tecnología. La técnica en Occidente. De la Prehistoria al 1900*. 1a. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A. ISBN 84-252-1022-4.
- LAWRENCE, R.J., 2015. *Advances in transdisciplinarity: Epistemologies, methodologies and processes*. 2015. S.I.: s.n.
- LERNER, K.L. y LERNER, B.W., 2004. *The Gale Encyclopedia of Science Vol 1*. Canada: s.n. ISBN 0-7876-7555-5.
- LI, Z., GUO, W., HUANG, Y., ZHU, K., YI, H. y WU, H., 2020. On-skin graphene electrodes for large area electrophysiological monitoring and human-machine interfaces. *Carbon*, vol. 164, pp. 164-170. ISSN 0008-6223. DOI 10.1016/J.CARBON.2020.03.058.

- LIU, Y., PHARR, M. y SALVATORE, G.A., 2017. *Lab-on-Skin: A Review of Flexible and Stretchable Electronics for Wearable Health Monitoring*. 2017. S.l.: s.n.
- LLORACH-MASSANA, P. y FERNÁNDEZ, J., 2018. La economía circular en el proceso de diseño de un ingeniero. *CONOMA congreso nacional de medioambiente*, vol. 1.
- LOPREATO, J. y BERTALANFFY, L., 1970. Review: General System Theory: Foundations, Development, Applications. *American Sociological Review* [en línea], vol. 35, no. 3, pp. 543-545. [Consulta: 16 mayo 2016]. DOI 10.2307/2093003. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/2093003?origin=crossref>.
- LORENZ, E.N., 1972. *Predictability: Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?* 1972. S.l.: s.n. ISBN 978 87 7066 494 3.
- LORENZ, E.N. y LORENZ, E.N., 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences* [en línea], vol. 20, no. 2, pp. 130-141. [Consulta: 31 diciembre 2016]. ISSN 0022-4928. DOI 10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2. Disponible en: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281963%29020%3C0130%3ADNF%3E2.0.CO%3B2>.
- LOU, Z., CHEN, S., WANG, L., SHI, R., LI, L., JIANG, K., CHEN, D. y SHEN, G., 2017. Ultrasensitive and ultraflexible e-skins with dual functionalities for wearable electronics. *Nano Energy*, vol. 38, no. March, pp. 28-35. ISSN 22112855. DOI 10.1016/j.nanoen.2017.05.024.
- LUO, C., LI, T., CHEN, H., FUJITA, H. y YI, Z., 2016. Efficient updating of probabilistic approximations with incremental objects. *Knowledge-Based Systems*, vol. 109, pp. 71-83. ISSN 09507051. DOI 10.1016/j.knosys.2016.06.025.
- M. REYNOLDS, K. FORSS, R. HUMMELBRUNNER, M. MARRA, B.P., 2012. Complexity, systems thinking and evaluation – An emerging relationship? *Evaluation Connections: Newsletter of the European Evaluation Society*, pp. 7-9.
- MaDe. [en línea], 2021. [Consulta: 10 octubre 2021]. Disponible en: <http://materialdesigners.org/>.
- MAINE, E. y ASHBY, M.F., 2017. Materials Selection and Mechanical Design. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [en línea]. S.l.: s.n., [Consulta: 11 abril 2017]. ISBN 9780128035818. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/recursos.biblioteca.upc.edu/science/article/pii/B978012803581802110X>.
- MALDONADO-CASTAÑEDA, C.E., 2012. ¿Qué son las ciencias de la complejidad? Filosofía de la ciencia de la complejidad. *Derivas de Complejidad. Fundamentos científicos y filosóficos*. S.l.: s.n., pp. 1-102. ISBN ISBN 978-958-738-270-9.
- MALDONADO, C.E. y GÓMEZ-CRUZ, N.A., 2011. *El mundo de las ciencias de la complejidad: una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades*. S.l.: Universidad del Rosario.
- MARGOLIN, V. y BUCHANAN, R., 1995. The idea of design. *Heat Transfer Engineering* [en línea], vol. 16, no. 2, pp. 285. DOI 10.1080/01457639508939847. Disponible en: <http://books.google.com/books?id=F1SO2nXxh8C&pgis=1>.
- MARTÍNEZ, F., GONZÁLEZ, A. y BRITO, H., 2009. Antecedents, Initiators and Foundations for Studies of Complexity. *Quorum Academico* [en línea], vol. 6, no. 1, pp. 79-120. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=9_WNuQ4nRDIC&oi=fnd&pg=PA80&dq=sistemica+nuevos+utopistas+boguslaw&ots=V77Qyn8Pq1&sig=iCdceAfL7gsEapqgYeuz6bPFedl#v=onepage&q=sistemica+nuevos+utopistas+boguslaw&f=false.
- Materfad. [en línea], 2021. Disponible en: <http://es.materfad.com>.
- MATHEWS, K.M., WHITE, M.C. y LONG, R.G., 1999. Why Study the Complexity Sciences in the Social Sciences? *Human Relations* [en línea], vol. 52, no. 4, pp. 439-462. [Consulta: 12 noviembre 2016]. ISSN 00187267. DOI 10.1023/A:1016957424329. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1023/A:1016957424329>.
- MATSUJIMA, N., INOUE, D., ZALAR, P., JIN, H., MATSUBA, Y., ITOH, A., YOKOTA, T., HASHIZUME, D. y SOMEYA, T., 2017. Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes. *Nature Materials*, vol. 16, no. 8, pp. 834-840. ISSN 1476-1122. DOI 10.1038/nmat4904.
- MATTOS, S., DE VICENTE, L.E., PEREZ FILHO, A., PIQUEIRA, J.R.C., MATTOS, S.H.V.L. De, VICENTE, L.E., PEREZ FILHO, A. y PIQUEIRA, J.R.C., 2016. Contributions of the complexity paradigm to the understanding of Cerrado's organization and dynamics. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* [en línea], vol. 88, no. 4, pp. 2417-2427. [Consulta: 31 diciembre 2016]. ISSN 1678-2690. DOI 10.1590/0001-3765201620150747. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652016000602417&lng=en&nrm=iso&tlng=en.
- Matweb. [en línea], 2021. Disponible en: <http://www.matweb.com>.
- MEISTER, M., BRAUN, A., HÜSING, B., SCHMOCH, U. y REISS, T., 2017. Graphene and other 2D materials Technology and Innovation Roadmap Version 3. [en línea]. S.l.: Disponible en: www.isi.fraunhofer.de.
- MENÉNDEZ, R. y BLANCO, C., 2014. *¿Qué sabemos de? El grafeno*. 1a. Madrid: Catarata. ISBN 978-8483199596.
- Merriam-Webster Dictionary. [en línea], 2021. Disponible en: <http://www.merriam-webster.com/>.
- MICELI, J., GUERRERO, S.G., QUINTEROS, R. a., DÍAZ, D., JORDAN KRISTOFF, M. y CASTRO, M., 2005. Teorías de la Complejidad y el Caos en Ciencias Sociales. Modelos Basados en Agentes y Sociedades Artificiales. *1o Congreso Latinoamericano de Antropología* [en línea], pp. 1-17. [Consulta: 12 noviembre 2016]. Disponible en: <http://www.antropocaos.com.ar/articulos-cientificos/teorias-de-la-complejidad-y-el-caos-en-ciencias-sociales-modelos-basados-en-agentes-y-sociedades-artificiales-2005>.

- MIRON-SPEKTOR, E. y BEENEN, G., 2015. Motivating creativity: The effects of sequential and simultaneous learning and performance achievement goals on product novelty and usefulness. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 127, pp. 53-65. ISSN 07495978. DOI 10.1016/j.obhdp.2015.01.001.
- MOHAMMADHOSSEINI, Y., 2020. Smart Material Systems and Adaptiveness for Beauty of Modern Architecture. *International Journal of Architecture, Energy and Urbanism* [en línea]. S.l.: [Consulta: 6 octubre 2021]. Disponible en: <http://globalpublisher.org/journals-1004www.globalpublisher.org>.
- NAGY, D., SCHUESSLER, J. y DUBINSKY, A., 2015. Defining and identifying disruptive innovations. *Industrial Marketing Management*, vol. 57, pp. 119-126. ISSN 00198501. DOI 10.1016/j.indmarman.2015.11.017.
- NAKATA, S., SHIOMI, M., FUJITA, Y., ARIE, T., AKITA, S. y TAKEI, K., 2018. A wearable pH sensor with high sensitivity based on a flexible charge-coupled device. *Nature Electronics* 2018 1:11, vol. 1, no. 11, pp. 596-603. ISSN 2520-1131. DOI 10.1038/s41928-018-0162-5.
- NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL SUBCOMMITTEE ON NANOSCALE SCIENCE, ENGINEERING, and T.C. on T., 2011. National Nanotechnology Initiative Strategic Plan. . S.l.:
- NICOLESCU, B., 2013. La evolución transdisciplinaria del aprendizaje. *Trans-pasando Fronteras*, no. 4, pp. 40-50.
- NICOLESCU, B. y VALLEJO, M., 1996. *La transdisciplinarietà : manifiesto*. 1a. S.l.: Multiversidad Mundo Real Edgar Morín, A.C. ISBN 9786077715009.
- NIE, B., LIU, S., QU, Q., ZHANG, Y., ZHAO, M. y LIU, J., 2021. Bio-inspired Flexible Electronics for Smart E-skin. *Acta Biomaterialia*, no. xxxx. ISSN 17427061. DOI 10.1016/j.actbio.2021.06.018.
- NOOR, A., 2012. Emerging interdisciplinary fields in the coming intelligence/convergence era. *Open Engineering* [en línea], vol. 2, no. 3, pp. 315-324. [Consulta: 3 julio 2016]. ISSN 2391-5439. DOI 10.2478/s13531-012-0014-4. Disponible en: <http://www.degruyter.com/view/j/eng.2012.2.issue-3/s13531-012-0014-4/s13531-012-0014-4.xml>.
- O'CONNOR, J. y MCDERMOTT, I., 1998. *Introducción al pensamiento sistémico : recursos esenciales para la creatividad y la resolución de problemas*. 1a. S.l.: Ediciones Urano. ISBN 9788479532505.
- OMAN, S., GILCHRIST, B., TUMER, I.Y. y STONE, R., 2014. The development of a repository of innovative products (RIP) for inspiration in engineering design. *International Journal of Design Creativity and Innovation* [en línea], vol. 2, no. 4, pp. 186-202. [Consulta: 29 diciembre 2016]. ISSN 2165-0349. DOI 10.1080/21650349.2014.898810. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/21650349.2014.898810>.
- Oxford Dictionary. [en línea], 2021. [Consulta: 7 enero 2017]. Disponible en: <https://en.oxforddictionaries.com/>.
- OXMAN, N., 2016. Age of Entanglement. *Journal of Design and Science*, DOI 10.21428/7e0583ad.
- OYAMA, K., LEARMONTH, G. y CHAO, R., 2014. Applying complexity science to new product development: Modeling considerations, extensions, and implications. *Journal of Engineering and Technology Management* [en línea], ISSN 09234748. DOI 10.1016/j.jengtecman.2014.07.003. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923474814000423>.
- PÁEZ-AVILÉS, C., JUANOLA-FELIU, E. y SAMITIER, J., 2018. Cross-fertilization of Key Enabling Technologies: An empirical study of nanotechnology-related projects based on innovation management strategies. *Journal of Engineering and Technology Management - JET-M* [en línea], vol. 49, no. July, pp. 22-45. ISSN 16084799. DOI 10.1016/j.jengtecman.2018.05.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2018.05.001>.
- PAHL, G., BEITZ, W., SCHULZ, H.-J., JARECKI, U., WALLACE, K. y LUCIENNE, T., 2007. *Ingeniería de Diseño (Eds.): Un Enfoque sistemático*. SpringerVerlag,
- PARLAK, O., KEENE, S.T., MARAIS, A., CURTO, V.F. y SALLEO, A., 2018. Molecularly selective nanoporous membrane-based wearable organic electrochemical device for noninvasive cortisol sensing. *Science Advances*, vol. 4, no. 7, pp. eaar2904. ISSN 2375-2548. DOI 10.1126/SCIADV.AAR2904.
- PEÑA ANDRÉS, J., 2016. *Selección de materiales en el proceso de diseño*. 2. Barcelona: s.n. ISBN 8493132985.
- PEREDA FELIÚ, V., 2010. Reflexiones sobre la incidencia de la teoría general de los sistemas en el ámbito de la producción del saber y quehacer arquitectónico en el siglo XXI. *DU & P: revista de diseño urbano y paisaje*, vol. 12, no. 28, pp. 54-61.
- PÉREZ, C., 2003. Paradigma de la complejidad, modelos científicos y conocimiento educativo. *Agora digital* [en línea], pp. 1-10. [Consulta: 6 diciembre 2016]. ISSN 1577-9831. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=925254>.
- PÉREZ MATOS, N.E. y SETIÉN QUESADA, E., 2008. La interdisciplinarietà y la transdisciplinarietà en las ciencias: una mirada a la teoría bibliològico-informativa. *ACIMED*, vol. 18, no. 4. ISSN 10249435.
- PETRIȘOR, A., 2013. MULTI-, TRANS - AND INTER - DISCIPLINARITY, ESSENTIAL CONDITIONS FOR THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF HUMAN HABITAT. *Urbanism. Arhitectură.Construcții*, vol. 4, no. 2.
- PONTE, B., COSTAS, J., PUCHE, J., DE LA FUENTE, D. y PINO, R., 2016. Holism versus reductionism in supply chain management: An economic analysis. *Decision Support Systems*, vol. 86, pp. 83-94. ISSN 01679236. DOI 10.1016/j.dss.2016.03.010.
- PRAT BARTÉS, A., TORT-MARTORELL LLABRÉS, X., GRIMA CINTAS, P. y POZUETA FERNÁNDEZ, L., 1997. *Métodos estadísticos: control y mejora de la calidad* [en línea]. S.l.: Edicions UPC. ISBN 9788498802320. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36717>.

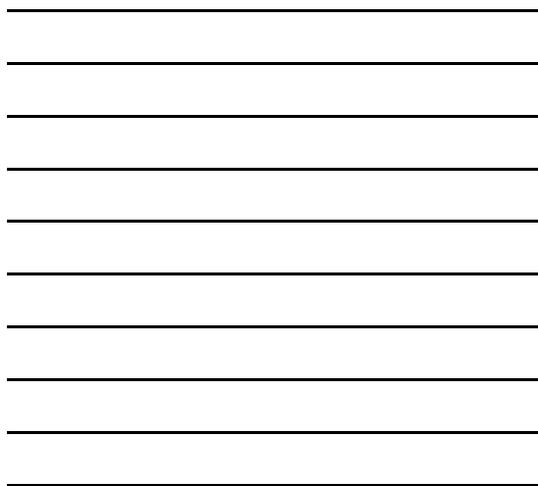
- QU, M., YU, S., CHEN, D., CHU, J. y TIAN, B., 2016. State-of-the-art of design, evaluation, and operation methodologies in product service systems. *Computers in Industry*, vol. 77, pp. 1-14. ISSN 01663615. DOI 10.1016/j.compind.2015.12.004.
- Real Academia Española. [en línea], 2021. [Consulta: 1 enero 2016]. Disponible en: <http://www.rae.es/>.
- ROCHA CAMARGO, J., ORZARI, O., GOUVEIA ARAÚJO, A., ROBERTO DE OLIVEIRA, P., KALINKE, C., ROCHA, D.P., LUIZ, A., SANTOS, D., TAKEUCHI, R.M., ALEJANDRO, R., MUNOZ, A., ALVES BONACIN, J. y CAMPOS JANEGITZ, B., 2021. Development of conductive inks for electrochemical sensors and biosensors. *Microchemical Journal*, vol. 164, pp. 105998. DOI 10.1016/j.microc.2021.105998.
- ROPER, S., MICHELI, P., LOVE, J.H. y VAHTER, P., 2016. The roles and effectiveness of design in new product development: A study of Irish manufacturers. *Research Policy*, vol. 45, no. 1, pp. 319-329. ISSN 00487333. DOI 10.1016/j.respol.2015.10.003.
- ROUSSEAU, D. y WILBY, J., 2014. Moving from Disciplinarity to Transdisciplinarity in the Service of Thrivable Systems. *Systems Research and Behavioral Science*, vol. 31, no. 5, pp. 666-677. ISSN 10991743. DOI 10.1002/sres.2314.
- ROUSSEAU, D., WILBY, J., BILLINGHAM, J. y BLACHFELLNER, S., 2018. *General Systemology Transdisciplinarity for Discovery, Insight and Innovation* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 5 abril 2021]. ISBN 978-981-10-0891-7. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-E5aDwAAQBA-J&oi=fnd&pg=PR5&dq=Transdisciplinarity+wilby&ots=kfdstRvqee&sig=yzK_IHkN1kfXECpknJihmeID-wZc#v=onepage&q=Transdisciplinarity+wilby&f=false.
- ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, 2016. The Royal Academy of Engineering. [en línea]. Disponible en: <http://www.raeng.org.uk/>.
- SAIDINA, D.S., EAWWIBOONTHANAKIT, N., MARIATTI, M., FONTANA, S. y HÉROLD, C., 2019. Recent Development of Graphene-Based Ink and Other Conductive Material-Based Inks for Flexible Electronics. *Journal of Electronic Materials*, vol. 48, no. 6, pp. 3428-3450. ISSN 03615235. DOI 10.1007/s11664-019-07183-w.
- SALMONS, J. y WILSON, L., 2007. Crossing a Line: An Interdisciplinary Conversation about Working Across Disciplines. [en línea]. [Consulta: 3 julio 2016]. Disponible en: <http://www.vision2lead.com>.
- SCHODERBEK, P., SCHODERBEK, C. y KEFALAS, A., 1990. *MANAGEMENT SYSTEMS: CONCEPTUAL CONSIDERATIONS*. 4a. Boston, MA: s.n.
- SCHULDBERG, D., 2011. Chaos Theory and Creativity. *Encyclopedia of Creativity*. S.l.: s.n., pp. 183-191. ISBN 9780123750389.
- ScienceDirect. [en línea], 2021. Disponible en: www.sciencedirect.com.
- SCOTT, R.J., CAVANA, R.Y. y CAMERON, D., 2016. Mechanisms for Understanding Mental Model Change in Group Model Building. *Systems Research and Behavioral Science* [en línea], vol. 33, no. 1, pp. 100-118. [Consulta: 3 julio 2016]. ISSN 10927026. DOI 10.1002/sres.2303. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/sres.2303>.
- SEMPIONATTO, J.R., KHORSHED, A.A., AHMED, A., SILVA, A.N.D.L. e, BARFIDOKHT, A., YIN, L., GOUD, K.Y., MOHAMED, M.A., BAILEY, E., MAY, J., AEBISCHER, C., CHATELLE, C. y WANG, J., 2020. Epidermal Enzymatic Biosensors for Sweat Vitamin C: Toward Personalized Nutrition. *ACS Sensors*, vol. 5, no. 6, pp. 1804-1813. DOI 10.1021/ACSSENSORS.OC00604.
- SEO, J.-W., KIM, H., KIM, K., CHOI, S.Q. y LEE, H.J., 2018. Calcium-Modified Silk as a Biocompatible and Strong Adhesive for Epidermal Electronics. *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 36, pp. 1800802. ISSN 1616301X. DOI 10.1002/adfm.201800802.
- SHEPPARD, S.D., 2003. A Description of Engineering: An Essential Backdrop for Interpreting Engineering Education. *Harvey Mudd College*,
- SINGER, C., HOLMYARD, E.J., HALL, A.R. y WILLIAMS, T.I., 1958. *A History of Technology. The industrial Revolution 1750 to 1850. Volume IV*. 1a. Oxford: Oxford University Press. ISBN 0-19-858108-4.
- SIVAKUMAR, B., 2017. Fundamentals of Chaos Theory. *Chaos in Hydrology* [en línea]. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 149-171. [Consulta: 14 abril 2017]. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-2552-4_5.
- STACEY, R., 1993. Strategy as order emerging from chaos. *Long Range Planning*, vol. 26, no. 1, pp. 10-17. ISSN 00246301. DOI 10.1016/0024-6301(93)90228-8.
- STARKEY, E., TOH, C.A. y MILLER, S.R., 2016. Abandoning creativity: The evolution of creative ideas in engineering design course projects. *Design Studies* [en línea], vol. 47, pp. 47-72. ISSN 0142694X. DOI 10.1016/j.destud.2016.08.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2016.08.003>.
- STERNBERG, R.J., 2012. The Assessment of Creativity: An Investment-Based Approach. , DOI 10.1080/10400419.2012.652925.
- SUN, M., WANG, M. y WEGERIF, R., 2020. Effects of divergent thinking training on students' scientific creativity: The impact of individual creative potential and domain knowledge. *Thinking Skills and Creativity*, ISSN 18711871. DOI 10.1016/j.tsc.2020.100682.
- SURAM, S. y BRYDEN, K.M., 2015. Integrating a reduced-order model server into the engineering design process. *Advances in Engineering Software*, vol. 90, pp. 169-182. ISSN 09659978. DOI 10.1016/j.advengsoft.2015.08.011.
- TARIQ, M., CHANI, S., KARIMOV, K.S., BUKHSH, E.M. y ASIRI, A.M., 2020. Fabrication and Investigation of Graphene-Rubber Nanocomposite Based Multifunctional Flexible Sensors. *Int. J. Electrochem. Sci* [en línea], vol. 15, pp. 5076-5088. [Consulta: 23 julio 2021]. DOI 10.20964/2020.06.64. Disponible en: www.electrochemsci.org.

- TAURA, T., 2016. *From Product Design to Technology Design (cap.12)* [en línea]. S.l.: Elsevier Inc. ISBN 9780128042267. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128042267000120>.
- The Nobel Prize. [en línea], 2018. [Consulta: 4 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>.
- THIÉTART, R.A. y FORGUES, B., 1995. Chaos Theory and Organization. *Organization Science* [en línea], vol. 6, no. 1, pp. 19-31. [Consulta: 31 diciembre 2016]. ISSN 1047-7039. DOI 10.1287/orsc.6.1.19. Disponible en: <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/orsc.6.1.19>.
- TORRISI, F. y CAREY, T., 2018. Graphene, related two-dimensional crystals and hybrid systems for printed and wearable electronics. *Nano Today* [en línea], vol. 23, pp. 73-96. [Consulta: 28 diciembre 2018]. ISSN 1748-0132. DOI 10.1016/J.NANTOD.2018.10.009. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1748013218303724>.
- TOUMEY, C., 2016. The philosopher and the engineer. *Nature Nanotechnology* [en línea], vol. 93, no. 6, pp. 607-607. [Consulta: 14 mayo 2016]. ISSN 1748-3387. DOI 10.1038/nnano.2016.56. Disponible en: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nnano.2016.56>.
- TRAN, T.S., DUTTA, N.K. y CHOUDHURY, N.R., 2018. Graphene inks for printed flexible electronics: Graphene dispersions, ink formulations, printing techniques and applications. *Advances in Colloid and Interface Science* [en línea], vol. 261, pp. 41-61. ISSN 00018686. DOI 10.1016/j.cis.2018.09.003. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.09.003>.
- USTA, E. y AKKANAT, Ç., 2015. Investigating Scientific Creativity Level of Seventh Grade Students. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [en línea], vol. 191, pp. 1408-1415. ISSN 18770428. DOI 10.1016/j.sbspro.2015.04.643. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042815029109>.
- UZER, T., CHIRIKOV, B., VIVALDI, F. y CASATI, G., 1995. Joseph Ford. *Physics Today* [en línea], vol. 48, no. 88. [Consulta: 6 diciembre 2016]. DOI 10.1063/1.2808223. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2808223>.
- VARIOS, 2018. *No Title*. Barcelona: ELISAVA. ISBN 978-84-09-01298-5.
- VECCHIATO, R., 2016. Disruptive innovation, managerial cognition, and technology competition outcomes. *Technological Forecasting and Social Change* [en línea], ISSN 00401625. DOI 10.1016/j.techfore.2016.10.068. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2016.10.068>.
- VIJAYA KUMAR, C. y PATTAMMATTEL, A., 2017. Future of graphene revolution and roadmap. *Introduction to Graphene: Chemical and Biochemical Applications*. S.l.: s.n., pp. 207-213. ISBN 9780128132708.
- VINIEGRA VELÁZQUEZ, L., 2014. El reduccionismo científico y el control de las conciencias. Parte II. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México* [en línea], vol. 71, no. 5, pp. 323-328. ISSN 16651146. DOI 10.1016/j.bmhmx.2014.05.003. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S166511461400032X>.
- WANG, H., LI, B., DING, F. y MA, T., 2020. Improvement of properties of smart ink via chitin nanofiber and application as freshness indicator. *Progress in Organic Coatings*, vol. 149, no. August, pp. 105921. ISSN 03009440. DOI 10.1016/j.porgcoat.2020.105921.
- WANG, L. y LIU, J., 2019. Advances in the Development of Liquid Metal-Based Printed Electronic Inks. *Frontiers in Materials* [en línea], vol. 6, pp. 303. [Consulta: 28 julio 2021]. ISSN 2296-8016. DOI 10.3389/fmats.2019.00303. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmats.2019.00303/full>.
- WANG, Q., LING, S., LIANG, X., WANG, H., LU, H. y ZHANG, Y., 2019. Self-Healable Multifunctional Electronic Tattoos Based on Silk and Graphene. *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 16, pp. 1808695. ISSN 1616-301X. DOI 10.1002/adfm.201808695.
- WANG, Y., QIU, Y., AMERI, S.K., JANG, H., DAI, Z., HUANG, Y. y LU, N., 2018. Low-cost, μm -thick, tape-free electronic tattoo sensors with minimized motion and sweat artifacts. *npj Flexible Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 1-7. ISSN 2397-4621. DOI 10.1038/s41528-017-0019-4.
- WANG, Y., ZHU, C., PFATTNER, R., YAN, H., JIN, L., SHUCHENG, C., MOLINA-LOPEZ, F., LISSEL, F., LIU, J., RABIAH, N.I., CHEN, Z., CHUNG, J.W., LINDER, C., TONEY, M.F., MURMANN, B. y BAO, Z., 2017. A highly stretchable, transparent, and conductive polymer. *Science advances*, vol. 3, no. 3. ISSN 2375-2548. DOI 10.1126/SCIADV.1602076.
- WIBOWO, K.M., SAHDAN, M.Z., RAMLI, N.I., MUSLIHATI, A., ROSNI, N., TSEN, V.H., SAIM, H., AHMAD, S.A., SARI, Y. y MANSOR, Z., 2018. Detection of Escherichia Coli Bacteria in Wastewater by using Graphene as a Sensing Material. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 995, no. 1. DOI 10.1088/1742-6596/995/1/012063.
- WIERZBICKI, A.P., 2015. Systems Theory, Theory of Chaos, Emergence. [en línea]. S.l.: Springer International Publishing, pp. 175-188. [Consulta: 30 mayo 2016]. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-09033-7_10.
- WILBY, J., 2011. A New Framework for Viewing the Philosophy, Principles and Practice of Systems Science. *Systems Research and Behavioral Science*, vol. 28, no. 5, pp. 437-442. ISSN 1094-429X. DOI 10.1002/sres.1135.
- WILLEY, J., SHERWOOD, L.M. y WOOLVERTON, C.J., 2009. Microbiología de Prescott, Harley y Klein. *Madrid: McGraw Hill Interamericana de España, SAU*. http://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/situa/1998_n11/pportadores.htm.
- WILLIAMS, N.X., NOYCE, S., CARDENAS, J.A., CATENACCI, M., WILEY, B.J. y FRANKLIN, A.D., 2019. Silver nanowire inks for direct-write electronic tattoo applications. *Nanoscale*, vol. 11, no. 30, pp. 14294-14302. ISSN 2040-3364. DOI 10.1039/C9NR03378E.

- YANG, K.-K., LIN, S.-F., HONG, Z.-R. y LIN, H., 2016. Exploring the Assessment of and Relationship Between Elementary Students' Scientific Creativity and Science Inquiry. *Creativity Research Journal* [en línea], vol. 28, no. 1, pp. 16-23. [Consulta: 7 abril 2021]. ISSN 1040-0419. DOI 10.1080/10400419.2016.1125270. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10400419.2016.1125270>.
- YANG, K.K., HONG, Z.R., LEE, L. y LIN, H.S., 2019. Exploring the significant predictors of convergent and divergent scientific creativities. *Thinking Skills and Creativity*, ISSN 18711871. DOI 10.1016/j.tsc.2019.01.002.
- YAO, S., MYERS, A., MALHOTRA, A., LIN, F., BOZKURT, A., MUTH, J.F. y ZHU, Y., 2017. A Wearable Hydration Sensor with Conformal Nanowire Electrodes. *Advanced Healthcare Materials*, vol. 6, no. 6, pp. 1601159. ISSN 2192-2659. DOI 10.1002/ADHM.201601159.
- YIN, L., DENG, P., MA, J., SHEN, Y., REN, J., ZHANG, S. y HUANG, Y., 2019. Large-area, fully conformable, μm -thick e-tattoo for high-fidelity in situ personal health monitoring. *Proceedings of the IEEE Conference on Nanotechnology*, vol. 2019-July, pp. 211-214. DOI 10.1109/NANO46743.2019.8993887.
- YIN, Y., LI, M., LI, Y. y SONG, J., 2020. Skin pain sensation of epidermal electronic device/skin system considering non-Fourier heat conduction. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [en línea], vol. 138, pp. 103927. ISSN 00225096. DOI 10.1016/j.jmps.2020.103927. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.103927>.
- YONG JU YUN, JONGIL JU, JOONG HOON LEE, SUNG-HWAN MOON, SOON-JUNG PARK, YOUNG HEON KIM, HONG, W.G., DONG HAN HA, HEEYEONG JANG, GEON HUI LEE, HYUNG-MIN CHUNG, JONGHYUN CHOI, SUNG WOO NAM, SANG-HOON LEE y YONGSEOK JUN, 2017. Highly Elastic Graphene-Based Electronics Toward Electronic Skin. *Advanced Functional Materials*, vol. 27, no. 33, pp. 1701513 (10 pp.). ISSN 1616-301X.
- YONG, K., DE, S., HSIEH, E.Y., LEEM, J., ALURU, N.R. y NAM, S.W., 2020. Kirigami-inspired strain-insensitive sensors based on atomically-thin materials. *Materials Today*, vol. 34, pp. 58-65. ISSN 1369-7021. DOI 10.1016/J.MATTOD.2019.08.013.
- YOON, J., JOO, Y., OH, E., LEE, B., KIM, D., LEE, S., KIM, T., BYUN, J. y HONG, Y., 2019. Soft Modular Electronic Blocks (SMEBs): A Strategy for Tailored Wearable Health-Monitoring Systems. *Advanced Science*, vol. 6, no. 5, pp. 1801682. ISSN 21983844. DOI 10.1002/advs.201801682.
- YUAN, H., LEI, T., QIN, Y. y YANG, R., 2019. Flexible electronic skins based on piezoelectric nanogenerators and piezotronics. *Nano Energy* [en línea], vol. 59, no. January, pp. 84-90. ISSN 22112855. DOI 10.1016/j.nanoen.2019.01.072. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.072>.
- ZHANG, L., WILLEMSE, J., HOSKISSON, P.A. y VAN WEZEL, G.P., 2018. Sporulation-specific cell division defects in ylmE mutants of *Streptomyces coelicolor* are rescued by additional deletion of ylmD. *Scientific Reports*, ISSN 20452322. DOI 10.1038/s41598-018-25782-1.
- ZHANG, L., WILLEMSE, J., YAGÜE, P., WAAL, E. de, CLAESSEN, D. y WEZEL, G.P. van, 2020. Branching of sporogenic aerial hyphae in sflA and sflB mutants of *Streptomyces coelicolor* correlates to ectopic localization of DivIVA and FtsZ in time and space. *bioRxiv* [en línea], pp. 2020.12.26.424426. [Consulta: 11 octubre 2021]. DOI 10.1101/2020.12.26.424426. Disponible en: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.12.26.424426v1>.
- ZHENG, J., SONG, Z. y GE, Z., 2016. Probabilistic learning of partial least squares regression model: Theory and industrial applications. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 158, pp. 80-90. ISSN 01697439. DOI 10.1016/j.chemolab.2016.08.014.
- ZHU, Z., GUO, S.-Z., HIRDLER, T., EIDE, C., FAN, X., TOLAR, J. y MCALPINE, M.C., 2018. 3D Printed Functional and Biological Materials on Moving Freeform Surfaces. *Advanced materials*, vol. 30, no. 23. ISSN 1521-4095. DOI 10.1002/ADMA.201707495.
- ZURUTUZA, A. y MARINELLI, C., 2014. Challenges and opportunities in graphene commercialization. *Nature Nanotechnology* [en línea], vol. 9, no. 10, pp. 730-734. [Consulta: 24 abril 2016]. ISSN 03617742. DOI 10.1038/nnano.2014.225. Disponible en: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nnano.2014.225>.



SMART INK



L 100mm
W 0,423mm



L 100mm
W 0,705mm

