



## Capítulo 3.

### Modelos Existentes de Confort Térmico.

### 3.0. Introducción.

A continuación se describen algunos de los principales modelos de confort, estrés térmico y zonas de confort que se han desarrollado hasta ahora y que interesan como referencia teórica para el desarrollo y comprensión del modelo de zona de confort que se propone plantear en este trabajo.

Además de que estudiando estos modelos y teniéndolos como referencia se podrá proponer un modelo más amplio que represente más fielmente las características del ambiente térmico y la interacción entre éste y el ocupante.

### 3.1. Modelos Teóricos.

#### 3.1.1. PMV-PPD

El PMV (Fanger 1970, ASHRAE) [12] representa el “voto medio previsto” (en la escala de sensación térmica) de un grupo de personas expuestas a cierto ambiente. Este método se deriva de la física de transferencia de calor combinada con una adaptación empírica para la sensación. El PMV establece una tensión térmica basada en la transferencia de calor en estado estacionario entre el cuerpo y el ambiente, y asigna un voto de confort a esa cantidad de tensión. PPD es el porcentaje previsto de personas insatisfechas en cada PMV. Como el PMV cambia siempre de cero a cualquier dirección positiva o negativa, el PPD incrementa.

La ecuación del PMV para el confort térmico es un modelo en estado estacionario. Esta es una ecuación empírica para predecir el voto medio en una escala de valores de tipo ordinal de confort térmico de un grupo de personas. La ecuación usa un balance térmico en estado estacionario para el cuerpo humano y asume un vínculo entre la desviación de la acumulación mínima en el mecanismo ejecutor del balance térmico, por ejemplo, sudoración, vaso constricción, vaso dilatación, y el voto de confort térmico.

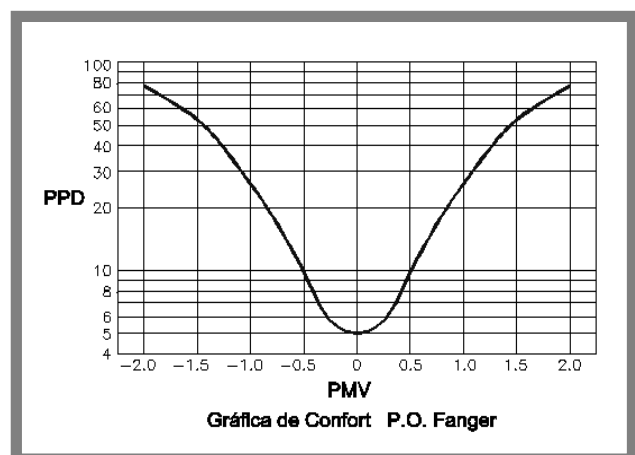


Figura 25. Gráfica PMV-PPD, Fanger.

La ecuación PMV solo se aplica a humanos expuestos a un largo periodo en condiciones constantes y con una tasa metabólica constante. La conservación de la energía conduce a la ecuación de balance térmico siguiente:

$$H - Ed - E_{sw} - E_{re} - L = R + C$$

En donde:

$H$	producción interna de calor.
$Ed$	pérdidas de calor por la difusión de vapor de agua por la piel.
$E_{sw}$	pérdidas de calor debidas a la sudoración .
$E_{re}$	pérdidas de calor latente debidas a la respiración.
$L$	pérdidas de calor por respiración seca.
$R$	pérdidas de calor por radiación de la superficie del cuerpo vestido.
$C$	pérdidas de calor por convección de la superficie del cuerpo vestido.

La ecuación se extiende al sustituir cada componente con una función derivada de la física básica. Todas las funciones tienen valores mensurables con excepción de la temperatura superficial de la vestimenta y el coeficiente de transferencia de calor por convección los cuales están en función uno del otro. Para resolver la ecuación, un valor inicial de temperatura de la ropa es estimado, el coeficiente de transferencia de calor por convección es calculado, una nueva temperatura de la ropa calculada etc., por interacción hasta que ambos son conocidos en un grado satisfactorio.

Si se asume que el cuerpo no está en balance se escribe la ecuación de calor como:

$$Lo = H - Ed - E_{sw} - E_{re} - L - R - C$$

Donde:

$Lo$  = acumulación térmica en el cuerpo

Para calcular el voto medio previsto podemos usar la siguiente expresión simplificada:

$$PMV = \exp[met] \cdot L$$

Donde:

$$L = F(Pa, Ta, Tmrt, Tcl)$$

El PMV está escalado para los votos predichos de sensación térmica en una escala de siete. La mayor limitación del modelo PMV es la restricción explícita de la temperatura de la piel y la pérdida de calor por evaporación en valores para confort y sensación "neutral" en un nivel dado de actividad.

Escala PMV	
<i>hot</i>	sofocante
<i>warm</i>	caliente
<i>slightly warm</i>	ligeramente caliente
<i>neutral</i>	neutral
<i>slightly cool</i>	ligeramente fresco
<i>cool</i>	fresco
<i>cold</i>	frío

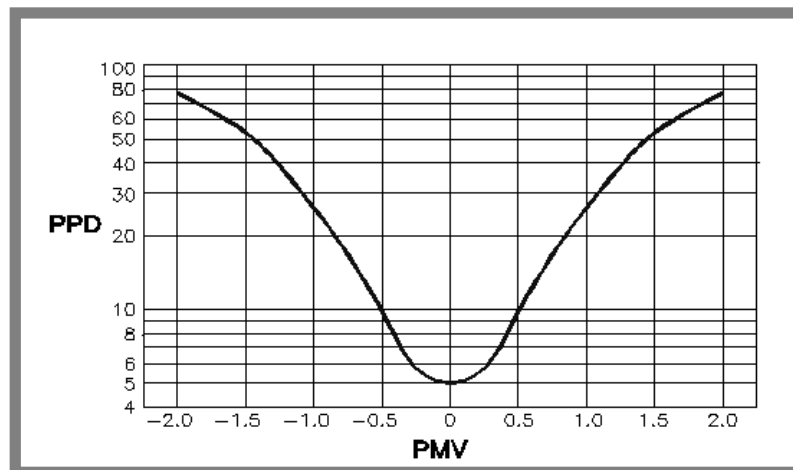


Figura 26. Gráfica PMV-PPD, Fanger.

### 3.1.2. ET-DISC.

El ET-DISC (ASHRAE) [2] también usa un modelo de balance térmico para predecir el confort térmico, pero el modelo evoluciona con el tiempo en lugar de ser en estado estacionario como el PMV. Este modelo considera para Temperatura Efectiva Nueva "la temperatura efectiva" que es un índice de temperatura que toma en cuenta la transferencia radiante y latente de calor.

El *ET* puede ser calculado usando el modelo "2-Node". El modelo "2-Node" determina el flujo de calor entre el ambiente, las áreas de piel y núcleo del cuerpo en principio de minuto a minuto. Comenzando de una condición inicial de tiempo = 0, el modelo

interactúa hasta que el equilibrio ha sido alcanzado (60 minutos es un tiempo típico)

La temperatura de piel media final y humedad de la piel también esta asociada con una temperatura efectiva. DISC predice el disconfort usando la temperatura de la piel y la humedad de la piel.

El modelo "2-Node" fue introducido en 1970 específicamente para formular una escala nueva de temperatura efectiva. El propósito fue determinar combinaciones particulares de condiciones físicas produciendo igual tensión fisiológica. Apoyada por un gran numero de datos de experimentos en cámara climática, esto determinó que mientras la temperatura de piel es un buen indicador de la sensación de confort térmico en ambientes fríos, la humedad de la piel es muy buen indicador en ambientes cálidos donde el sudor se produce porque los cambios de temperatura de la piel son pequeños en comparación.

El modelo representa el cuerpo humano como dos cilindros concéntricos, un cilindro central y un cilindro delgado a manera de piel alrededor del primero. La vestimenta y el sudor son asumidos como distribuidos uniformemente sobre la superficie de la piel. En el momento "cero", el cilindro es expuesto a un ambiente uniforme, y el modelo produce minuto a minuto simulaciones del sistema termorregulador humano.

Después de que el periodo de tiempo especificado para el usuario se ha cumplido, la temperatura final de superficie y la superficie de piel humedecida del cilindro son usadas para calcular *ET*, *SET*, y otros índices. *ET* es la temperatura de un ambiente con 50% HR en el que una persona experimenta la misma cantidad de pérdidas que en el ambiente actual.

### 3.1.3. SET.

El *SET* (Nishi, Gagge 1977) [3] representa numéricamente la tensión térmica experimentada por el cilindro relativo a una persona estándar en un ambiente estándar. El *SET* tiene la ventaja de permitir comparaciones térmicas entre ambientes con cualquier combinación de las variables físicas introducidas, pero la desventaja de requerir personas "estándar".

Basado en un estudio de laboratorio con sujetos, fueron desarrolladas funciones empíricas entre dos índices de confort, y temperatura de piel y de piel humedecida. Estas funciones (ambas lineales) son usadas en el modelo 2-Node para producir valores predichos de los votos de personas expuestas a las mismas condiciones que el cilindro.

## 3.2. Modelos Empíricos.

Aparte de los modelos de confort térmico descritos arriba, hay muchos más modelos teóricos, así como deterministas y empíricos. Algunos modelos empíricos con aplicaciones para el diseño de edificios y/o ingeniería ambiental están bosquejados a continuación.

### 3.2.1. PD.

PD o ("*predicted percent dissatisfied due to draft*"), "porcentaje de insatisfacción debido al movimiento del aire" esto es un ajuste a los datos de personas que expresan disconfort térmico debido a las corrientes de aire. Los datos a introducir para el PD son: temperatura del aire, velocidad del aire, e intensidad de la turbulencia. PS es una adecuación de los datos de personas confortables eligiendo niveles de velocidad del aire. Los datos para el PS son temperatura operativa y velocidad del aire. *TS* es un ajuste de los datos de sensación térmica como una función lineal de la temperatura del aire y la presión de vapor parcial.

Una corriente de aire es un enfriamiento local no deseado (*draft*). La ecuación de riesgo de *draft* es:

$$PD = 3,413 \cdot (34 - Ta) \cdot (v - 0,05)^{0,622} + 0,369 \cdot v \cdot Tu \cdot (34 - Ta) \cdot (v - 0,05)^{0,622}$$

*Tu* es la intensidad de turbulencia expresada como un porcentaje. 0 representa el flujo laminar y 100% significa que la desviación estándar de la velocidad del aire sobre un cierto periodo es del mismo orden de magnitud que la velocidad del aire media. *v* es la velocidad del aire (en metros por segundo) y *Ta* es la temperatura del aire en grados Celsius. La ecuación PD se origina de dos estudios en los cuales 100 personas estuvieron expuestas a varias combinaciones de temperatura del aire, velocidad del aire, e intensidad de turbulencia. De cada combinación de condiciones, la gente fue cuestionada sobre si sentía una corriente de aire. PD

representa el porcentaje de sujetos que votaron que ellos sentían una corriente de aire en las condiciones elegidas.

### 3.2.2. PS.

La ecuación del PS predice la velocidad del aire que puede ser elegida por la persona expuesta a cierta temperatura del aire cuando la persona tiene control de la fuente de velocidad del aire. La ecuación del PS es:

$$PS = 1,13 \cdot (Top)^2 - 0,24 \cdot Top + 2,7 \cdot (v)^2 - 0,99 \cdot v$$

$Top$  es la temperatura operativa (en grados Celsius) y  $v$  es la velocidad del aire en metros por segundo. La ecuación del PS proviene de un estudio en el que 50 personas fueron cuestionadas sobre el ajustar una fuente de velocidad del aire como ellos prefieran cuando se exponen a una temperatura del aire específica. PS representa el porcentaje acumulativo de gente eligiendo una velocidad del aire particular a las temperaturas específicas probadas en el experimento.

### 3.2.3. TS.

El TS es una ecuación que predice el voto de sensación térmica usando una función lineal de la temperatura del aire y la presión parcial de vapor. La ecuación del TS es:

$$TS = 0,245 \cdot Ta + 0,248 \cdot p - 6,475$$

$Ta$  es la temperatura del aire en grados Celsius y  $p$  es la presión parcial de vapor en kilo-pascales. La ecuación de TS deriva de un estudio similar al del PMV-PPD descrito arriba.

## 3.3. Modelos Adaptativos.

Los modelos adaptativos incluyen en cierta manera las variaciones en el clima exterior para determinar las preferencias térmicas en el interior. Por lo contrario, los índices de confort térmico anteriores fueron establecidos por medio de estudios en cámaras controladas, con personas jóvenes, en reposo y de origen

norteamericano o europeo. Así que se estableció con esto valores óptimos que han sido asumidos para aplicarlos a todas las personas.

Fanger afirmó que su ecuación de confort y el índice PMV (voto medio predicho) son válidos para todos los humanos y que las preferencias térmicas eran iguales a pesar de la ubicación geográfica y el clima.

No obstante, investigaciones de campo, usando personas "reales" realizando actividades "reales" en ambientes interiores "reales" han producido observaciones que sugieren que las preferencias térmicas de las personas también tienen una componente geográfica.

### 3.3.1. Humphreys.

Humphreys (1975) [3], hizo una revisión de los datos de estudios de campo en la que encontró una fuerte dependencia estadística de las neutralidades térmicas ( $T_n$ ) o temperaturas en las que un mínimo estrés fue reportado en escalas verbales en niveles medios de temperatura del aire o temperatura de globo ( $T_i$ ) experimentadas por los encuestados (en interior o exterior) en un periodo de aproximadamente un mes. Se encontró que el valor de  $T_n$  varía unos 13 °C, esto es, entre 17 °C y 30 °C:

$$T_n = 2.56 + 0.83 \cdot T_i$$

Un posterior análisis realizado por Humphreys (1976) sustituyendo la temperatura interior por la media exterior, produce resultados similares en edificios sin sistemas de acondicionamiento mecánico del aire:

$$T_n = 11,9 + 0,534 \cdot T_m$$

La siguiente ecuación de Humphreys es una adaptación basada en una amplia base de datos de edificios con clima controlado y no controlado:

$$T_n = 23,9 + \frac{0,295(T_{m,m} - 22)}{\exp\left[\frac{(T_{m,m} - 22)^2}{24 \cdot \sqrt{2}}\right]}$$



### 3.3.2. Auliciems.

Correlaciones muy similares fueron encontradas posteriormente por Auliciems (1981) [3] usando una extensa base de datos, incluyendo ambos tipos de edificios, con sistemas mecánicos de acondicionamiento de aire y sin él, se encontró la siguiente expresión para  $T_n$  que es válida entre 18 °C y 28°C:

$$T_n = 17,6 + 0,31 \cdot T_m$$

### 3.3.3. Griffiths.

Basado en el estudio de Griffiths (1990) [3] de edificios europeos con sistemas pasivos la regresión fue prácticamente la misma que la de Humphreys:

$$T_n = 12,1 + 0,534 \cdot T_m$$

### 3.3.4. Nicol.

En estudios mas recientes en Pakistán, Nicol y Roaf (1996) [3] encontraron:

$$T_n = 17,0 + 0,38 \cdot T_m$$

Nicol transforma a regresión lineal en exponencial con una considerable pérdida en capacidad de predicción cuando se aplica a edificios con sistemas mecánicos de aclimatación:

$$T_n = 23,9 + 0,295(T_m - 22) \cdot \exp\left[-\left(\frac{T_m - 22}{24\sqrt{2}}\right)^2\right]$$

Las aparentes inconsistencias con predicciones termofisiológicas permiten a Auliciems (1981) formular un modelo adaptativo de termorregulación, con el cual la preferencia térmica es vista como el resultado de ambas respuestas fisiológicas a los parámetros interiores inmediatos (los medidos por los índices) y las expectativas basadas en determinantes climáticas y culturales, o sea experiencias pasadas.

Ha habido posteriormente sobre el modelo adaptativo considerables investigaciones y verificaciones en varias locaciones. Éstas incluyen Melbourne, Brisbane, Darwin, San Francisco Bay, Bangkok, Singapur y Townsville. Siguiendo una variedad de discusiones teóricas se ha vuelto evidente que la noción de un ambiente óptimo constante o estático no es más una hipótesis aceptable.

Un modelo adaptativo desarrollado por Auliciems adapta los datos de sensación basados en investigaciones de campo de confort térmico en Australia abarcando distintos climas, usando la siguiente ecuación:

$$T_n = 9,22 + 0,48 \cdot T_a + 0,14 \cdot T_{mno}$$

### 3.3.5. ITS.

El ITS (índice de estrés térmico, Givoni 1963) [13] es un modelo biofísico que describe el mecanismo de intercambio de calor entre el cuerpo y el ambiente, de lo que se puede calcular el estrés total del cuerpo.

Este modelo esta basado en la asunción de que en el rango de condiciones en las que es posible mantener un equilibrio térmico, el sudor se secreta a una tasa suficiente para obtener el enfriamiento evaporativo requerido para balancear la producción de calor por metabolismo y el intercambio de calor con el ambiente.

La relación entre la secreción de sudor y el enfriamiento evaporativo requerido da la eficiencia de enfriamiento de la sudoración. Cuando hay una reducción de la eficiencia de enfriamiento de la sudoración, el cuerpo secreta sudor a una tasa lo suficientemente alta que es equivalente al calor latente del enfriamiento requerido, con objeto de obtener el enfriamiento necesario pese a la reducción de la eficiencia.

$$S = [(M - W) \pm C \pm R] \cdot (1/f)$$

en donde:

$S$  = tasa de sudoración requerida, en Kcal/h

$M$  = tasa de metabolismo, en Kcal/h

$W$  = trabajo mecánico por unidad de tiempo

$C$  = intercambio de calor por convección, Kcal/h

$R$  = intercambio de calor por radiación, Kcal/h

$f$  = eficiencia de enfriamiento por sudoración, adimensional

### 3.4. Zona de Confort.

Olgay [18] define una zona de confort entre los 21,1 y los 27,5°C aproximadamente y entre 30% y 65% de humedad relativa que puede ser ampliada para zonas con baja y alta humedad, también tiene una variación para el invierno, da una relación para corregir la gráfica con respecto a latitudes menores de 40°.

Esta gráfica es aplicable directamente sólo para habitantes de la zona templada de Estados Unidos, en altitudes cercanas a los 1000 m., en interiores con vestimenta normal y con actividad sedentaria. En esta gráfica también se indican las correcciones a realizar en ambiente para llevarlo a la zona de confort.

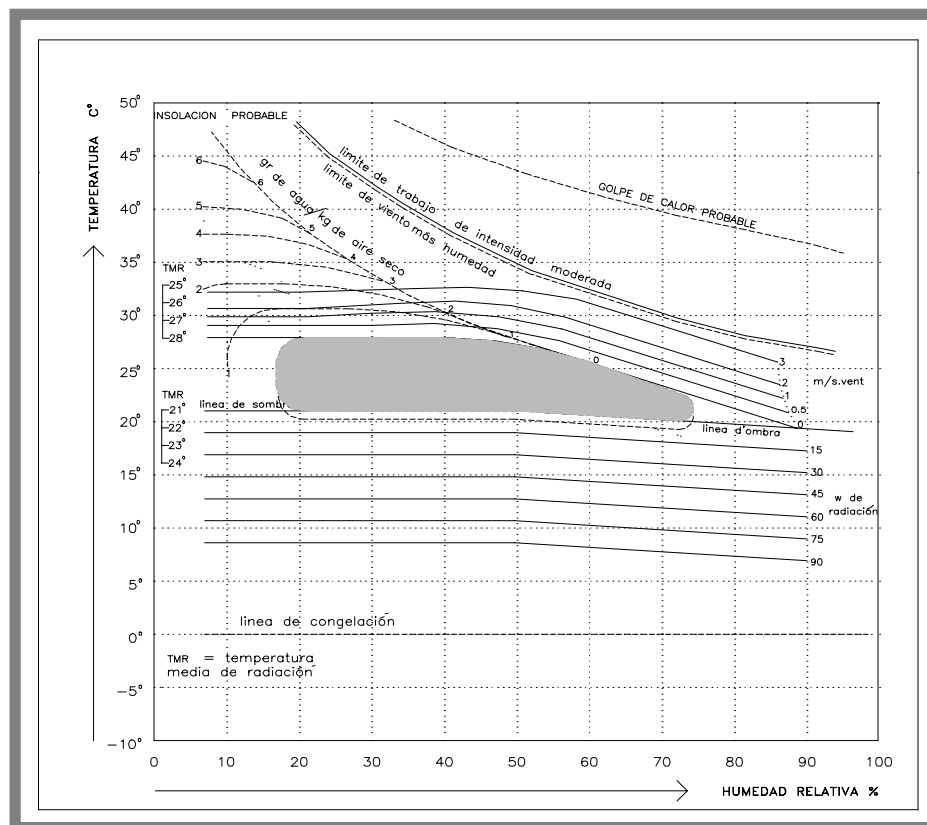


Figura 27. Carta Bioclimática, Victor Olgay.

La zona de confort de la ASHRAE [3] esta dibujada sobre un diagrama psicrométrico convencional. Ésta especifica unos límites de temperatura del aire y humedad del clima interior, para personas con actividad sedentaria, que tienen que ser mantenidos por el sistema mecánico de acondicionamiento de aire.

Ésta fue hecha principalmente para ser usada en edificios de oficinas con acondicionamiento de aire, pero es también usada para evaluar el clima interior en edificios residenciales. Esta zona de confort se usa también como base para cartas bioclimáticas.

Está entre dos niveles de contenido de vapor, entre 4 y 12 gr/Kg. Se dan diferentes rangos de temperatura para el verano, cuando los edificios son mecánicamente enfriados y para invierno, cuando los edificios son calentados, tomando en cuenta los hábitos estacionales en la vestimenta. El límite superior de la temperatura decrece linealmente con la humedad alta y se incrementa con velocidad del aire alta.

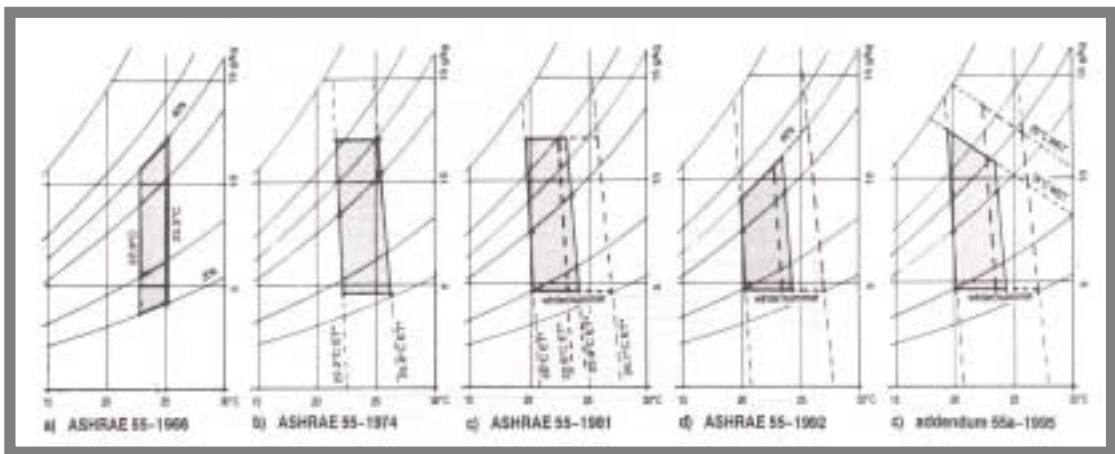


Figura 28. Desarrollo Histórico de la Zona de Confort del ASHRAE.

### 3.5. Comentario General.

Como hemos visto hay una amplia variedad de modelos para evaluar el confort térmico que consideran distintos parámetros y factores del ambiente referentes al ocupante del espacio, aquí se han descrito los que hemos considerado más importantes.

Estos modelos han representado en su momento una gran aportación para la comprensión y evaluación del ambiente y el confort térmico; Principalmente el modelo de Fanger que sentó las bases para el estudio del comportamiento térmico y la interacción del cuerpo humano con el ambiente.

Otro de los modelos importantes desde el enfoque de este trabajo es la zona de confort de Olgyay por su presentación gráfica de las correcciones deseables en el ambiente para ubicar las condiciones de éste dentro de la zona de confort propuesta por él.

Pese al gran valor de estos modelos, en este trabajo se considera que un modelo para analizar y evaluar el ambiente y el confort térmico, debería incluir el mayor número posible de las variantes relacionadas con el ambiente y el confort térmico, es decir, de los parámetros y factores ambientales y personales. Lo que se desarrollará en los siguientes capítulos.