

Evaluación del confort y disconfort térmico

Greta Marchante González, Ana Isabel González Santos

RESUMEN / ABSTRACT

Los principales modelos de confort, estrés térmico y zonas de confort que se han desarrollado a nivel internacional, son descritos en este trabajo. Estos modelos interesan como referencia teórica para el desarrollo y comprensión de un modelo de zona de confort más amplio. En cada modelo investigado se analiza la influencia de los factores y parámetros, tanto ambientales como personales, que inciden en la percepción confortable o no del ambiente térmico, haciendo énfasis en su modelo de disconfort correspondiente. Una aplicación informática visual sobre Matlab® fue desarrollada y agrupó los diferentes modelos estudiados. La aplicación informática permite establecer comparaciones entre los diferentes modelos y valorar que los sistemas de control monovariable, instalados en la mayoría de los edificios para garantizar confort, dándole importancia solo a la variable temperatura, limitan la influencia de otras variables que tienen incidencia en la satisfacción de los clientes. La presión, la humedad relativa, la velocidad del aire también afectan el confort y de cierta manera el consumo energético en el ámbito de la edificación.

Palabras claves: confort térmico, disconfort térmico, factores, parámetros, consumo energético

The main internationally comfort, thermal stress and comfort zones models that have been developed are described in this work. These models are of interest as a theoretical reference for the development and understanding of a broader comfort zone model. In each one, the influence of factors and parameters, both environmental and personal, that affect the comfortable or not perception of the thermal environment is analyzed, emphasizing for each model its corresponding discomfort model. Visual informatic application was developed on Matlab® that grouped the different models studied. The application allowed comparisons to be made between them and to demonstrate that the single-variable control, systems carried out in most buildings to guarantee comfort, giving importance only to the temperature variable, limit the influence of other variables that have an impact on customers' satisfaction. The pressure, relative humidity, and air speed also affects the comfort and energy consumption in a certain way in the building sector.

Key words: thermal comfort, thermal discomfort, factors, parameters, energy consumption

Thermal comfort and discomfort evaluation

1. - INTRODUCCIÓN

El confort térmico puede definirse como la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico de acuerdo con el estándar ASHRAE 55 [1]. El control de la temperatura en los edificios no es suficiente sino se consideran otros factores influyentes en la calidad del ambiente térmico y que han de ser tenidos en cuenta en el diseño de los sistemas de acondicionamiento y en la propia construcción del inmueble [2-4]. La Tabla 1 muestra una relación de factores y parámetros que influyen directamente en la calidad de un determinado ambiente interior, en inglés, *Indoor Environmental Quality (IEQ)*.

La regulación de algunos de los factores y parámetros reflejados en la Tabla 1 (tipo de vestimenta, expectativas de confort, contacto visual con el exterior, temperatura del aire interior, velocidad del aire interior, por solo mencionar los más relevantes), guarda una estrecha relación con el consumo de los recursos energéticos en el ámbito de la edificación.

Tabla 1
Factores y parámetros que determinan el confort térmico [5]

Factores			Parámetros	
Ambientales Exteriores	Personales		Ambientales Interiores	Arquitectónicos
	Fisiológicos y Contributivos	Socioculturales y Psicológicos		Adaptabilidad del espacio
Temperatura del aire Temperatura radiante Humedad relativa Velocidad del aire	Sexo Edad Peso Tasa de metabolismo: -Basal -Muscular (nivel de actividad) Estado de salud Intercambio de calor por ingestión de bebidas y alimentos Historial térmico: -Inmediato -Mediato Tiempo de permanencia Variabilidad temporal y espacial de los estímulos físicos ambientales	Tipo de vestimenta Expectativas de confort Contacto visual con el exterior	Temperatura del aire Temperatura radiante Humedad relativa Velocidad del aire	Movilidad del ocupante dentro del espacio Modificación de elementos y dispositivos de control ambiental

Aunque una persona tenga una sensación de neutralidad térmica, puede que algunas partes del cuerpo estén expuestas a condiciones que producen el desconfort térmico. Esta incomodidad térmica local no puede evitarse levantando o bajando la temperatura del recinto. Es necesario eliminar la causa del sobrecalentamiento o enfriamiento local. Generalmente el desconfort térmico local puede originarse debido a uno de los siguientes cuatro procesos [5]:

1. Enfriamiento convectivo local causado por una corriente de aire [6].
2. Enfriamiento o calentamiento de partes del cuerpo por la radiación (conocido como problema de asimetría de radiación).
3. Los pies fríos y una cabeza calurosa al mismo tiempo, causado por las grandes diferencias verticales de temperatura del aire.
4. Los pies calientes o fríos, causados por una temperatura del suelo incómoda, es decir, una temperatura de contraste demasiado diferente a la temperatura del cuerpo.

La combinación adecuada entre la estrategia de confort térmico elegida y la estrategia energética propia del edificio es una relación de compromiso y debe lograrse una gestión eficiente. La generación de estrategias combinadas de eficiencia energética y confort térmico implican un mejoramiento en la calidad de vida de los usuarios en los edificios (salud, rendimiento y productividad). Esto también conduce a importantes ahorros de energía y emisiones.

El objetivo general de la investigación fue evaluar los modelos existentes de confort térmico para establecer comparaciones entre los mismos, analizar posibles dependencias entre sus factores y parámetros y la influencia de los mismos en el índice de confort o estrés térmico. La Tabla 2 resume los modelos de confort analizados, destacando trabajos relevantes relacionados con los mismos [7]. Cabe resaltar que la clasificación reflejada en dicha tabla es excluyente.

Las contribuciones científicas fundamentales que se hacen en este trabajo son la evaluación de la gran mayoría de modelos que estiman o predicen el confort térmico, una variable de especial interés para la satisfacción del individuo con el medio ambiente exterior que le rodea y que ha sido investigada durante décadas. Como en la sensación psicológica del individuo tienen influencia variables ambientales y no ambientales fue muy retador el estudio realizado. Estos modelos tienen mucha influencia de otras variables aparte de la temperatura; en muchos casos magnitudes no medibles y parámetros que suelen ser asumidos empíricamente. Sobresale la presentación del binomio modelo de confort-modelo de desconfort en la investigación. Generalmente se han priorizado condiciones de satisfacción del individuo con el ambiente que le rodea y no de insatisfacción.

Como aporte práctico se comparte la creación de una aplicación informática visual para la informatización del análisis de la influencia de diferentes parámetros y variables en la valoración del confort y el desconfort térmico, una condición humana de percepción psicológica multicausal y multifactorial.

El artículo consta de tres secciones. En la introducción se realiza un breve estado del arte sobre el tema estudiado. En la segunda sección se reflejan las diferentes formalizaciones matemáticas de los modelos de confort y desconfort analizados: teóricos, empíricos, adaptativos y computacionales. En la tercera sección se describe la aplicación desarrollada donde aparecen la mayoría de estos modelos para su posterior comparación. Por último se expresan las conclusiones.

Tabla 2
Modelos para evaluar el confort térmico

Nombre del modelo y tipos	Referencia
TEÓRICOS	
PMV (<i>Predicted Mean Vote</i>)	[1,8,9-14]
PPD (<i>Predicted Percent Dissatisfied</i>)	[1,8]
TSENS (<i>Thermal Sensation</i>)	[1,5]
DISC (<i>Thermal Discomfort</i>)	[1,5]
ET* (<i>Effective Temperature</i>)	[1]
SET* (<i>Standard Effective Temperature</i>)	[1,15,16,17]
PET (<i>Physiological Equivalent Temperature</i>)	[18,19]
EMPIRICOS	
PD (<i>Percent Dissatisfied</i>)	[1,5]
PS (<i>Percent Satisfacción</i>)	[5]
TS (<i>Thermal Sensation</i>)	[5]
ADAPTATIVOS	
Humphreys (<i>Temperatura Neutral</i>)	[1,20]
Nicol (<i>Temperatura Neutral</i>)	[1,21,22]
Auliçiems (<i>Temperatura Neutral</i>)	[1,20]
Griffiths (<i>Temperatura de Confort</i>)	[1,23-25]
IIS (<i>Index of Thermal Stress</i>)	[1,26]
COMPUTACIONAL	
PMV Fuzzy (<i>Predicted Mean Vote Fuzzy</i>)	[27,28,29-30]
PMV Neuronal (<i>Predicted Mean Vote Neuronal</i>)	[31,32]

2.- MODELOS EXISTENTES DE CONFORT

En esta sección se describen diferentes modelos para la regulación del confort térmico. En estos modelos se tienen en cuenta variables, factores y parámetros que de una forma u otra influyen en la zona de confort térmico del ocupante. Una relación de toda la nomenclatura aparece en el Anexo 1. En diversas edificaciones solo se establece el control de la temperatura como estrategia extendida para garantizar el confort de sus huéspedes y se limita la influencia de otras variables que tienen incidencia en la satisfacción de los clientes.

2.1.- MODELOS TEÓRICOS

- **PMV-PPD**

El PMV representa, en la escala de sensación térmica, el voto medio previsto de un grupo de personas expuestas a un cierto ambiente [5]. Este método se deriva de la transferencia de calor combinada con una adaptación empírica para la sensación térmica. El PMV establece una sensación térmica basada en la transferencia de calor en estado estacionario entre el cuerpo y el ambiente, y asigna un voto de confort a esa sensación.

Aunque el índice PMV resuelve el problema de cuantificar el grado de confort de una situación dada, su utilidad práctica sería reducida si no fuera posible correlacionar sus valores con el porcentaje de personas que para cada valor del índice expresan su conformidad o disconformidad con el ambiente en cuestión. Tal correlación fue establecida por Fanger [1,8] a partir del estudio estadístico de los resultados obtenidos con 1296 personas expuestas durante tres horas a un ambiente determinado.

En la Fig. 1 se indican los resultados de Fanger [1,8] y que expresan el porcentaje de personas que se sienten insatisfechas para cada valor del índice. Como el PMV cambia siempre de cero a cualquier dirección positiva o negativa, el PPD incrementa. En ambientes neutros, donde el PMV es cero, existe aún un 5% de insatisfechos lo que confirma el hecho bien conocido de que en cualquier situación, por sofisticado que sea el sistema de acondicionamiento térmico del local, existe cierta proporción de insatisfechos.

La ecuación del PMV para el confort térmico es un modelo en estado estacionario. Es una ecuación para predecir el voto medio de confort térmico de un grupo de personas en una escala de valores de tipo ordinal. 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 [5].

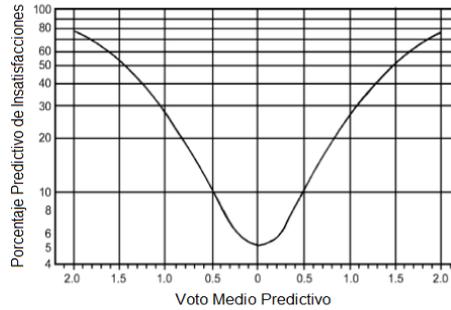


Figura 1
Gráfica PMV-PPD, [1]

La ecuación PMV solo se aplica a humanos expuestos a un largo período en condiciones constantes y con una tasa metabólica constante. La conservación de la energía conduce a la ecuación (1) de balance térmico.

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = R + C \quad (1)$$

Fanger [1,8] estableció el índice de confort (ecuación 2) reconocido internacionalmente por la norma ISO 7730-2005 [4] sobre la base de este equilibrio térmico.

$$PMV = (0.303 * e^{-0.036 * M} + 0.028) * \{ (M - W) - 3.05 * 10^{-3} * [5733 - 6.99 * (M - W) - P_v] - 0.42 * [(M - W) - 58.15] - 1.7 * 10^{-5} * M * (5867 - P_v) - 0.0014 * M * (34 - T_a) - 3.96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - T_a) \} \quad (2)$$

M y W están tabuladas, T_a , T_r , v y P_v son medidas directamente, t_{cl} y h_c se encuentran por (3) y (4) respectivamente. La resistencia térmica de la ropa también está tabulada en dependencia del tipo de vestuario y f_{cl} se halla en correspondencia con el aislamiento de la ropa (I_{cl}) mediante la ecuación 5 donde $R_{cl} = 0.155 * I_{cl}$.

$$t_{cl} = 35.7 - 0.0275 * (M - W) - R_{cl} * (3.96 * 10^{-8} * f_{cl} * ((t_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) + f_{cl} * h_c * (t_{cl} - T_a)) \quad (3)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 * (t_{cl} - T_a)^{0.25} & \text{para } 2.38 * (t_{cl} - T_a)^{0.25} > 12.1 * \sqrt{v} \\ 12.1 * \sqrt{v} & \text{para } 2.38 * (t_{cl} - T_a)^{0.25} < 12.1 * \sqrt{v} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0.2 * I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0.5 \text{ clo} \\ 1.05 + 0.1 * I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0.5 \text{ clo} \end{cases} \quad (5)$$

Para poder hacer uso práctico de este índice se presentan las siguientes dificultades [24]:

- El índice debe ser computado iterativamente pues es una función implícita de las variables que afectan la sensación térmica.
- Es necesario conocer con exactitud el valor de los parámetros de aislamiento de la ropa (I_{cl}) y la razón de producción de calor en el cuerpo (M) para calcular un estimado preciso del confort térmico.
- Las variables ambientales de temperatura ambiente (T_a), temperatura radiante (T_r), presión parcial de vapor de agua en el aire (P_v) y velocidad del aire (v) tienen que ser medidas en entornos adyacentes a la persona para asegurar la precisión.

Sherman introdujo un grupo de condiciones para simplificar el índice de confort de Fanger [1,8]. Por lo general las habitaciones o el área cerrada que se controla, es usada para un tipo de actividad específica, por lo que la producción de calor metabólica, el aislamiento de la ropa y el grado de actividad del organismo (W) no varían significativamente sugiriendo esto que pueden ser asumidas constantes tal y como se consideran en [33].

Dicho índice se expresa en la expresión 6, donde: θ_0 a θ_6 son combinaciones lineales de parámetros fisiológicos y que se obtienen del balance energético entre el individuo y el medio que le rodea, y se definen como muestran las ecuaciones de la (7) a la (13) respectivamente, donde α , P_s , T_s y E_{sw} se calculan por las expresiones de la (14) a la (17) respectivamente y h_{cn} según [1] debe estar entre 2 y 25 W/m²K.

$$V = \theta_0 + \theta_1 * P_v + \theta_2 * T_a + \theta_3 * T_r + \theta_4 * v^{0.67} + \theta_5 * P_v^{0.67} + \theta_6 * T_a * v^{0.67} \quad (6)$$

$$\theta_0 = \alpha * (1 + 0.155 * I_{cl} * (h_r + f_{cl} * h_{cn})) * (M * (1 - \eta) - \lambda * m * P_s * T_s - E_{sw} - \gamma * \beta * M * \lambda * p_{ex} - \beta * M * c_p * T_{ex} - T_s * (h_r + f_{cl} * h_{cn})) \quad (7)$$

$$\theta_1 = \alpha * \lambda * (1 + 0.155 * I_{cl} * (h_r + f_{cl} * h_{cn})) * (m + \gamma * \beta * M) \quad (8)$$

$$\theta_2 = \alpha * ((1 + 0.155 * I_{cl} * (h_r + f_{cl} * h_{cn})) * \beta * M * c_p + f_{cl} * h_{cn}) \quad (9)$$

$$\theta_3 = \alpha * h_r \quad (10)$$

$$\theta_4 = \alpha * ((0.155 * I_{cl} * f_{cl} * k) * (M * (1 - \eta) - \lambda * m * P_s * T_s - E_{sw} - \gamma * \beta * M * \lambda * p_{ex} - \beta * M * c_p * T_{ex} * k - T_s * f_{cl})) \quad (11)$$

$$\theta_5 = \alpha * \lambda * (0.155 * I_{cl} * f_{cl} * k) * (m + \gamma * \beta * M) \quad (12)$$

$$\theta_6 = \alpha * k * ((0.155 * I_{cl} * f_{cl} * \beta * M * c_p + f_{cl})) \quad (13)$$

$$\alpha = 0.303 * e^{-0.036 * M} + 0.028 \quad (14)$$

$$P_s = e^{[16.573 - (3988.842 / T_{aK} - 39.47)]} \quad (15)$$

$$T_s = 35.7 - 0.0275 * M * (1 - \eta) \quad (16)$$

$$E_{sw} = 0.42 * [M * (1 - \eta) - 58.2] \quad (17)$$

El parámetro k se calcula empleando las ecuaciones (18) y (19) para una postura de pie y para una postura sedentaria respectivamente [31].

$$k = 3.86 + 6.96 * v^{1.02} \quad (18)$$

$$k = 3.6 + 6.59 * v^{1.2} \quad (19)$$

Tanto este índice como el de Fanger [1,8] predicen la sensación térmica acorde a la escala internacional de la ASHRAE [1]. Una vez calculado el PMV modificado (ecuación 6) a través de la ecuación (20) se puede determinar el porcentaje de insatisfacción (PPD) [8].

$$PPD = 100 - 95 * e^{-(0.03353 * V^4 + 0.2179 * V^2)} \quad (20)$$

• TSENS-DISC

El índice TSENS también es un modelo de balance térmico para predecir el confort térmico. El modelo evoluciona con el tiempo en lugar de ser en estado estacionario como el PMV. Estos modelos pueden ser calculados usando el llamado modelo “2-Node”, el cual determina el flujo de calor en principio de minuto a minuto, entre el ambiente, las áreas de la piel y el núcleo del cuerpo.

El modelo representa el cuerpo humano como dos cilindros concéntricos, un cilindro central (núcleo) y un cilindro delgado a manera de piel alrededor del primero, aproximadamente de 1.6 mm de espesor. El cuerpo es representado por tres temperaturas: t_{sk} , t_{cr} y t_b como muestra la ecuación (21).

$$t_b = (1 - \alpha_{sk}) * t_{cr} + \alpha_{sk} * t_{sk} \quad (21)$$

En la expresión (21), α_{sk} se calcula por la expresión (22) donde Q_{bl} depende de las desviaciones de las temperaturas de la piel y del núcleo y se expresa según la ecuación (23).

$$\alpha_{sk} = 0.0418 + \frac{0.745}{Q_{bl} + 0.585} \quad (22)$$

$$Q_{bl} = \frac{6.3 + 50 * (t_{cr} - 37)}{1 + 0.5 * (34 - t_{sk})} \quad (23)$$

La vestimenta y el sudor se asumen distribuidos uniformemente sobre la superficie de la piel. La temperatura en cada compartimiento se asume uniforme para que solo exista un gradiente de esta entre los dos cilindros. En un ambiente frío, puede reducirse el flujo de sangre a las extremidades para conservar el calor de órganos vitales, resultando los gradientes de temperatura axial en los brazos, piernas, manos y pies. Hacer ejercicios con cierto grupo de músculos o condiciones medioambientales asimétricas pueden causar comportamientos de temperaturas no uniforme y pueden limitar la exactitud del modelo [1]. Comenzando de una condición nula inicial de tiempo, el modelo interactúa hasta que el equilibrio ha sido alcanzado (60 minutos es un tiempo típico). En el momento “cero” el cilindro es expuesto a un ambiente uniforme, y el modelo produce simulaciones del sistema termorregulador humano minuto a minuto [1].

La temperatura de la piel media final y la humedad de la piel también están asociadas con una temperatura efectiva, que es un índice de temperatura que toma en cuenta la transferencia radiante y latente de calor (en un ambiente de un 50% de humedad relativa) [5].

El modelo “2-Node” establece dos ecuaciones de balance de energía para el cilindro interno y para el cilindro externo que representaría la piel, obteniendo finalmente el modelo TSENS (ecuación 24) el cual usa expresiones empíricas para predecir la sensación térmica. Este modelo es definido en términos de desviación de la temperatura media del cuerpo para puntos de referencias fríos y calientes a través de $t_{b,c}$ y $t_{b,h}$ [1], calculados mediante las expresiones (25) y (26), donde el valor de η_{ev} es comúnmente 0,85.

$$TSENS = \left\{ \begin{array}{ll} 0.4685 * (t_b - t_{b,c}) & t_b < t_{b,c} \\ 4.7 * \eta_{ev} * (t_b - t_{b,c}) / (t_{b,h} - t_{b,c}) & t_{b,c} \leq t_b \leq t_{b,h} \\ 4.7 * \eta_{ev} + 0.4685 * (t_b - t_{b,h}) & t_{b,h} < t_b \end{array} \right\} \quad (24)$$

$$t_{b,c} = \frac{0.194}{58.15} * (M - W) + 36.301 \quad (25)$$

$$t_{b,h} = \frac{0.347}{58.15} * (M - W) + 36.669 \quad (26)$$

La contraparte *DISC* (ecuación 27) predice entonces el disconfort y es numéricamente igual a *TSENS* cuando t_b está por debajo del límite $t_{b,c}$ y es relacionada con la piel cuando la regulación es a través de la sudoración [1].

$$DISC = \left\{ \begin{array}{ll} 0.4685 * (t_b - t_{b,c}) & t_b < t_{b,c} \\ \frac{4.7 * (E_{rsw} - E_{rsw,req})}{E_{max} - E_{rsw,req} - E_{dif}} & t_{b,c} \leq t_b \end{array} \right\} \quad (27)$$

$$E_{rsw,req} = 0.42 * (M - W - 58.15) \quad (28)$$

$$E_{sk} = w * E_{max} = E_{rsw} + E_{dif} = \frac{w * (P_s - P_a)}{R_{e,cl} + 1 / (f_{cl} * h_e)} \quad (29)$$

$$E_{rsw} = m_{rsw} * \lambda \quad (30)$$

$$E_{dif} = (1 - w_{rsw}) * 0.06 * E_{max} \quad (31)$$

$$w_{rsw} = \frac{E_{rsw}}{E_{max}} \quad (32)$$

$$w = w_{rsw} + 0.06 * (1 - w_{rsw}) = 0.06 + 0.94 * \frac{E_{rsw}}{E_{max}} \quad (33)$$

$$LR = h_e / h_c \quad (34)$$

En caso de que la presión atmosférica sea significativamente diferente al valor de referencia (16.5 K/kPa) se realiza una corrección a través de la expresión (35) que depende de la presión total (p_t).

$$h_{ec} = h_e * (101.33 / p_t)^{0.45} \quad (35)$$

Para hallar $R_{e,cl}$ se emplea la ecuación (36) donde para zonas comunes de interiores, puede ser usado el valor de $i_{cl} = 0.34$ cuando otros datos no estén disponibles.

$$i_{cl} * LR = R_{cl} / R_{e,cl} \quad (36)$$

Estos índices se basan en 11 puntos de una escala numérica donde los valores positivos representan la zona caliente y la sensación neutral de confort y los valores negativos representan el lado frío. *TSENS* es basado en la misma escala del PMV pero con términos extras para ± 4 (muy caliente/frío) y ± 5 (intolerablemente caliente/frío).

DISC se define, reconociendo la misma convención positiva/negativa para el disconfort caliente/frío, como [1]: 5-intolerable; 4-límite de tolerancia; 3-muy incómodo; 2-incómodo y desagradable; 1-singularmente incómodo pero aceptable y 0-confortable.

• **ET***

El índice *ET** es determinado experimentalmente a través de varias combinaciones de la temperatura de bulbo seco, la humedad y la velocidad del aire que produce la misma sensación térmica. La temperatura de bulbo seco, es la temperatura de un gas o mezcla de gases tomada con un bulbo seco que está protegido de intercambio radiante. El termómetro de pared común registra la temperatura de bulbo seco del aire.

Este modelo, al igual que el anterior, utiliza el modelo “2-Node” para calcular la humedad de la piel w en la zona de regulación evaporativa. La humedad de la piel se obtiene de la relación entre la tasa de regulación de la sudoración (E_{rsw}) y la máxima evaporación (E_{max}). La expresión (37) permite calcular *ET** a una humedad relativa de 50% [1].

$$ET^* = t_o + w * i_m * LR * (P_v - 0.5 * p_{ET^*,s}) \quad (37)$$

Para calcular i_m es necesario conocer h_r el cual se calcula a través de (38). Un valor típico de ε es $9.5 \cdot 10^{-1}$ y si es significativamente menor que la unidad, el valor de $h_r = 4.7\varepsilon$.

$$h_r = 4 * \varepsilon * \sigma * \frac{A_r}{A_D} * (273.2 + \frac{t_{cl} + t_{mr}}{2})^3 \quad (38)$$

$$t_0 = (T_r * h_r + T_a * h_c) / (h_r + h_c) \quad (39)$$

Con este valor, i_m se halla utilizando las expresiones de la (40) a la (42) [1].

$$i_m = \frac{\frac{R_{cl} + R_{a,cl}}{i_{cl} + i_a}}{\frac{R_{cl} + R_{a,cl}}{i_{cl} + i_a}} \quad (40)$$

$$R_{a,cl} = \frac{R_a}{f_{cl}} = \frac{1}{h * f_{cl}} = \frac{1}{(h_c + h_r) * f_{cl}} \quad (41)$$

$$i_a = \frac{h_c}{h_c + h_r} \quad (42)$$

Considerando un conjunto de condiciones representativas de aplicaciones típicas en ambientes interiores se definió una alternativa a la utilización de la temperatura efectiva: la temperatura efectiva estándar (SET*-*Standard Effective Temperature* por sus siglas en inglés).

- **SET***

El indicador SET* se basa en el modelo del metabolismo humano, incluyendo los mecanismos de termorregulación causados por las condiciones ambientales o por los niveles de actividad (transpiración, sudoración, vasoconstricción o dilatación). La idea central de SET* es convertir las condiciones ambientales estudiadas en una sola temperatura para un caso de referencia: baja velocidad del aire (0.1 m/s), temperatura media radiante igual a la temperatura del aire y la humedad relativa del ambiente de un 50%. En estas condiciones el SET* es la temperatura operativa con las mismas reacciones fisiológicas que las condiciones del ambiente estudiado. Esto significa que después de un tiempo de exposición dado, la humedad y la temperatura de la piel del ambiente imaginario son iguales a las del ambiente real [1].

Cabe resaltar que se han realizado adaptaciones de este indicador para espacios abiertos o semi-abiertos denominado en este caso Out_SET*[15]. Para calcular el SET* se emplea la expresión (43) [16].

$$SET^* = \begin{cases} 34.95 * t_b - 1247.6 & \text{para } 36.27^\circ\text{C} < t_b < 36.97^\circ\text{C} \\ 23 - 6.13 * (36.4 - t_b)^{0.7} & \text{para } t_b \leq 36.27^\circ\text{C} \\ 41 + 5.58 * (t_b - 36.9)^{0.87} & \text{para } t_b \geq 36.97^\circ\text{C} \end{cases} \quad (43)$$

El disconfort térmico en la zona caliente (DISC_warm) es una función de la temperatura media del cuerpo (ecuación 44) y experimentalmente puede ser calculado como una función del SET* (ecuación 45), ambos con una desviación de ± 0.2 de unidad de sensación en la zona de regulación evaporativa [16].

$$DISC_{warm} = 10.16 * (t_b - 36.20)^{2.12} \quad (44)$$

$$DISC_{warm} = 0.00543 * (SET^* - 17.5)^{2.12} \quad (45)$$

La Tabla 3 muestra la escala psicológica y sensorial probable que relaciona a SET* con ET* de la ASHRAE, para diferentes niveles de condiciones con una actividad de 1.1met y un aislamiento de 0.6clo [16].

La combinación de índices SET*/Out_SET* son una herramienta para evaluar la calidad del ambiente sin ofrecer una escala de confort. La investigación realizada por [34] ha permitido solucionar este problema en la cual se toma como referencia el PMV en ambientes interiores para el cálculo del SET*. Esto permite una estimación cuantitativa de los niveles de confort equivalente a la temperatura dadas por SET*/Out_SET*, usando la escala clásica del PMV. En este caso el índice de confort se nombraría PMV* [16].

Tabla 3
Escalas de la temperatura efectiva estándar [16]

SET* (°C)	DISC	Sensación	Psicología
>37.5	<+3	Muy caliente, muy incomfortable	Falta creciente de regulación evaporativa
37.5 – 34.5	+2 a +3	Caliente, muy inacceptable	Fuerte sudoración
34.5 – 30	+1 a +2	Tibio, incomfortable, inacceptable	Sudoración
30 – 25.6	+0.5 a +1	Ligeramente tibio, ligeramente inacceptable	Sudoración ligera, vasodilatación aceptable
25.6 – 22.2	-0.5 a +0.5	Confortable y aceptable	Neutralidad psicológica térmica
17.5 – 22.2	-0.1 a -0.5	Ligeramente frío, ligeramente inacceptable	Inicio de la vasoconstricción
14.5 – 17.5	-2 a -1	Frío e inacceptable	Enfriamiento lento del cuerpo
10 – 14.5	-3 a -2	Muy frío, muy inacceptable	Empezando a estremecerse

*Ta a 50% de Hr

• PET

PET es un índice térmico que representa la temperatura psicológica equivalente, y al igual que el PMV, da una estimación de la componente térmica de un ambiente dado. Se basa en el MEMI (*Munich Energy-balance-Model for Individuals*, por sus siglas en inglés), un modelo “2-Node” que modela las condiciones térmicas del cuerpo humano de una forma fisiológicamente relevante, como muestra la ecuación 1 [18]. Las diferencias que presenta con el modelo “2-Node” son la forma de calcular la tasa de sudoración fisiológica y el cálculo separado de los flujos de calor de las partes de la superficie del cuerpo que están cubiertas o descubiertas por la ropa [35].

En la ecuación 46 algunos términos dependen de la temperatura media de la superficie de la ropa, la temperatura media de la piel o la tasa de sudor, todos los cuales se ven afectados por las condiciones ambientales – la tasa fisiológica del sudor (la base para el cálculo de E_{sw}) también es una función de la temperatura del núcleo, que depende tanto de las condiciones ambientales como de la actividad. Por lo tanto para resolver la ecuación 46, primero se deben evaluar las tres cantidades desconocidas, por ejemplo, t_{cl} , t_{sk} y t_{cr} . Para cuantificar estos parámetros desconocidos se hace necesario adicionar dos ecuaciones más a la 1, las ecuaciones (46) y (47) [35].

$$F_{cs} = v_b * \rho_b * c_b * (t_{cr} - t_{sk}) \quad (46)$$

$$F_{sc} = (1/R_{cl}) * (t_{sk} - t_{cl}) \quad (47)$$

La temperatura psicológica equivalente es definida como la temperatura del aire a la cual, en un ambiente interior típico (sin la influencia del viento y la radiación solar), el supuesto calor del cuerpo humano es balanceado con la misma temperatura del núcleo y de la piel bajo las condiciones exteriores complejas a ser evaluadas [18] [35].

Las siguientes suposiciones son hechas para el clima de referencia interior [35]:

- La temperatura media radiante igual a la temperatura del aire ($T_{mrt}=T_a$).
- La velocidad del aire de 0.1m/s.
- La presión del vapor de agua $P_a=12$ [hPa] (aproximadamente equivalente a una humedad relativa de 50% a $T_a=20$ °C).

El procedimiento para el cálculo del PET consiste en seguir los siguientes pasos [35]:

1. Calcular las condiciones térmicas del cuerpo con MEMI para una combinación dada de parámetros meteorológicos.
2. Insertar los valores calculados para la temperatura media de la piel y la temperatura del núcleo en el modelo MEMI y resolver las ecuaciones del sistema (1), (46) y (47) para una temperatura del aire T_a (con $v=0.1$ m/s, $P_a=12$ hPa y $T_{mrt}=T_a$). La temperatura del aire resultante es equivalente al PET.

La Tabla 4 muestra varios ejemplos donde el PET varía en dependencia de la diferencia del clima.

El PET es un índice que puede ser aplicado tanto para ambientes interiores como al aire libre, el cual puede ser calculado con el modelo bioclimático y de radiación de “RayMan” (Tabla 5). Esta herramienta calcula el flujo de radiación en ambientes simples y complejos en base a varios parámetros. La salida es el cálculo de la temperatura media radiante la cual es requerida en el modelo de balance de energía para humanos [19]. Cabe resaltar que con esta herramienta también se puede calcular el PMV y el SET*.

Tabla 4

Ejemplos de valores de la temperatura psicológica equivalente (PET) para diferentes escenarios donde varía el clima [35]

Escenarios	Ta (°C)	Tmrt (°C)	V (m/s)	Pa (hPa)	PET (°C)
Habitación típica	21	21	0.1	12	21
Invierno, soleado	-5	40	0.5	2	10
Invierno, nublado	-5	-5	5	2	-13
Verano, soleado	30	60	1	21	43
Verano, nublado	30	30	1	21	29

Tabla 5

Valores de PET para diferentes grados de sensación térmica y estrés psicológico en humanos bajo condiciones estándar [19]

PET (°C)	Sensación térmica	Nivel de estrés psicológico
< 4	Muy helado	Estrés helado extremo
4 - 8	Helado	Estrés helado fuerte
8 - 13	Frío	Estrés frío moderado
13 - 18	Ligeramente frío	Estrés frío ligero
18 - 23	Confortable	Sin estrés térmico
23 - 29	Ligeramente tibio	Estrés caliente ligero
29 - 35	Tibio	Estrés caliente moderado
35 - 41	Caliente	Estrés caliente fuerte
> 41	Muy caliente	Estrés caliente extremo

2.2. -MODELOS EMPÍRICOS

A continuación se describen algunos modelos empíricos con aplicaciones para el diseño de edificios y/o ingeniería ambiental [5].

- **PD**

El índice PD permite conocer el porcentaje de personas que expresan disconfort térmico debido a las corrientes de aire. Una corriente de aire es un enfriamiento local no deseado (*draft*). La expresión (48) muestra la ecuación de riesgo *draft* y 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, las personas fueron cuestionando sobre si sentían una corriente de aire [1,5]. T_u se calcula mediante la expresión (49), dependiendo de (V_{sd}) con una constante de tiempo del anemómetro de 0.2 segundos [1,5].

$$PD = (34 - T_a) * (v - 0.05)^{0.62} * (0.37 * v * T_u + 3.14) \quad (48)$$

$$T_u = 100 * \frac{V_{sd}}{v} \quad (49)$$

Una intensidad de turbulencia cero representa el flujo laminar y 100% significa que la desviación estándar de la velocidad del aire sobre un cierto período es del mismo orden de magnitud que la velocidad del aire media.

- **PS**

La ecuación del índice PS (ecuación 50) 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, o sea, es una adecuación de los datos de personas confortables eligiendo niveles de velocidad del aire [1]. PS representa el porcentaje acumulativo de personas eligiendo una velocidad del aire particular a las temperaturas específicas.

$$PS = 1.13 * t_o^2 - 0.24 * t_o + 2.7 * v^2 - 0.99 * v \quad (50)$$

- **TS**

El índice TS descrito en la ecuación (51) predice el voto de sensación térmica usando una función lineal de la temperatura del aire y la presión parcial del vapor en kPa [1].

$$TS = 0.245 * T_a + 0.248 * P_v - 6.475 \quad (51)$$

2.3.- MODELOS ADAPTATIVOS

Los modelos adaptativos incluyen en cierta manera las variaciones en el clima exterior para determinar las preferencias térmicas en el interior.

- **Humphreys**

Humphreys (1975) [20], 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 experimentadas por los encuestados (en interior o exterior) en un período de aproximadamente un mes [5]. En un posterior análisis de Humphreys realizado en 1976 se demostró que la sustitución de la temperatura interior por la temperatura media exterior produce resultados similares en edificios sin sistemas de acondicionamiento mecánico del aire. Es por ello que se realiza una adaptación a estos resultados basada en una amplia base de datos de edificios con clima controlado y no controlado (ecuación 52).

$$T_n = 23.9 + \frac{0.295*(T_{mmo}-22)}{e^{-[\frac{(T_{mmo}-22)}{24}]^2}} \quad (52)$$

- **Nicol**

Nicol transforma la regresión lineal en exponencial con una considerable pérdida de predicción cuando se aplica a edificios con sistemas mecánicos para la climatización (ecuación 53).

$$T_n = 23.9 + 0.0295 * (T_m - 22) * e^{-\left(\frac{T_m - 22}{24 * \sqrt{2}}\right)^2} \quad (53)$$

- **Auliciems**

Las aparentes inconsistencias con predicciones termo-fisiológicas permiten a Auliciems 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 y las expectativas basadas en experiencias pasadas [5].

Correlaciones similares a las de Humphreys fueron reportadas posteriormente por Auliciems en 1981[20], usando una extensa base de datos incluyendo varios tipos de edificios. La expresión (54) muestra el cálculo de la temperatura neutral pero tiene como deficiencia que solo es válida para valores de temperatura entre 18°C y 29 °C. El modelo, que adapta los datos de sensación basados en investigaciones de campo de confort térmico en Australia abarcando distintos climas, se describe en la ecuación (55).

$$T_n = 17.6 + 0.31 * T_m \quad (54)$$

$$T_n = 9.22 + 0.48 * T_a + 0.14 * T_{mmo} \quad (55)$$

- **Griffiths**

Basado en el estudio de Griffiths en 1990 [5],[24],[26],[36], de edificios europeos con sistemas pasivos, la regresión fue prácticamente la misma. Reescribiéndola de una forma más general quedaría como muestra la ecuación (56).

$$T_c = T_g + (4 - V_{st})/a \quad (56)$$

El parámetro V_{st} es calculado por un análisis de regresión lineal donde se relaciona la sensación térmica con la temperatura global [24]. Para ello se analizan los tres modos: FR (*free-running* por sus siglas en inglés) (ecuación 57), CL (*cooling mode* por sus siglas en inglés) (ecuación 58) y HT (*heating mode* por sus siglas en inglés) (ecuación 59).

$$V_{st} = 0.183 * T_g - 0.6 \quad (57)$$

$$V_{st} = 0.228 * T_g - 1.7 \quad (58)$$

$$V_{st} = 0.168 * T_g - 0.3 \quad (59)$$

Para el caso del parámetro a se han usado varias constantes en diversos estudios realizados [24] [26], por ejemplo 0.25, 0.33 y 0.5 para los siete puntos de la escala de sensación térmica. En [24] es usado un valor de $a=0.5$ para obtener el modelo que relaciona la temperatura de confort en el interior con la temperatura exterior obteniendo como resultado las ecuaciones (60)

y (61) para los modos FR y CL-HT respectivamente, donde T_{rm} se halla empleando la expresión (62) y en esta última α comúnmente es 0.8.

$$T_c = 0.206 * T_{rm} + 20.8 \quad (60)$$

$$T_c = 0.065 * T_{rm} + 23.9 \quad (61)$$

$$T_{rm} = \alpha * T_{rm-1} + (1 - \alpha) * T_{od-1} \quad (62)$$

- **ITS**

ITS es un modelo biofísico que describe el mecanismo de intercambio de calor entre el cuerpo y el ambiente, del que se puede calcular el estrés total del cuerpo [5]. Este modelo se basa en asumir 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 (ecuación 63).

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 el objetivo de obtener el enfriamiento necesario pese a la reducción de la eficiencia.

$$S = [(M - W) \pm C \pm R] * (1/f) \quad (63)$$

2.4.- MODELOS COMPUTACIONALES

El principal propósito de los sistemas HVAC (*Heating Ventilating and Air Conditioning*, por sus siglas en inglés) en espacios interiores es hacer sentir al ocupante confortable. Sin la determinación del confort térmico humano en tiempo real, no es factible para este tipo de sistemas tener condiciones controladas del aire para el bienestar humano todo el tiempo. Es por ello que se han propuesto índices de confort térmico en tiempo real vía computacional tales como el PMV basado en lógica difusa y en redes neuronales. Ambos índices toman como base el índice PMV de Fanger [1,8].

- **PMV Fuzzy**

Los niveles de confort en este caso dependen de los valores de las variables: T_a , T_{mrt} , Hr , v , nivel de actividad de los ocupantes ($MADu$, asociada a la tasa de metabolismo) y el aislamiento térmico de la ropa (I_{cl} , asociado al tipo de vestimenta). Éste nuevo índice de sensación térmica es calculado implícitamente como consecuencia de las reglas lingüísticas que describen los niveles de confort como el resultado de la interacción de las variables ambientales con los parámetros personales del ocupante. Cabe resaltar que el cálculo de este índice no requiere una solución iterativa y puede ser fácilmente ajustado dependiendo de la sensación térmica específica de los usuarios [28].

El PMV Fuzzy puede ser determinado si se extrae el conocimiento de las ecuaciones de confort de Fanger (ecuación 2) [1,34] y se transforma en reglas y funciones de membresía. La idea esencial es transformar todas las posibles combinaciones de las variables que afectan el confort térmico en implicaciones difusas lingüísticas que describan el índice de sensación térmica, o sea, que las relaciones entre la entrada y la salida sean transformadas en un juego de reglas difusas y la sensación térmica humana sea evaluada como un resultado de la evaluación difusa de los estados de las seis variables de entrada que afectan el confort térmico. Un ejemplo de una regla lingüística se muestra a continuación:

- IF T_a es *High*, AND v es *Very small*, AND T_{mrt} es *Close* para T_a , AND $MADu$ es *Low* AND I_{cl} es *Very light* THEN PMV es cercano a cero (el ambiente en el interior es confortable).

Cabe resaltar que la humedad relativa es asumida de 50%. Las combinaciones de cinco de las seis variables de entrada pueden dar como resultado un gran número de reglas lo que requeriría un gran tiempo de cálculo. Este número de reglas puede ser reducido significativamente considerando que el modelo PMV Fuzzy está compuesto por dos subsistemas: el modelo dependiente de los parámetros personales y el modelo ambiental. Esta interconexión es mostrada en la Fig. 2.

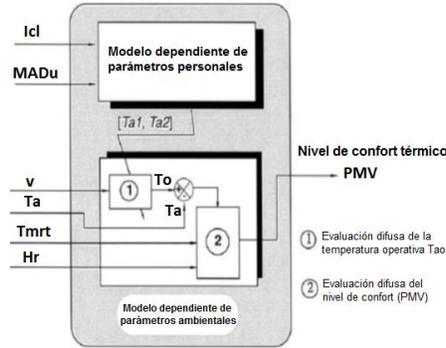


Figura 2
Arquitectura del Fuzzy PMV.

El diseño de la estrategia del PMV Fuzzy se logra con los siguientes pasos:

1. Selección de las variables de entrada y de salida.

Como muestra la Fig. 2 el modelo que depende de los parámetros personales, tiene como variables de entrada el nivel de actividad de los ocupantes y el aislamiento térmico de su vestimenta. La salida de este modelo es un rango de temperatura (variable lingüística “Rango_temperatura ambiente”) en el cual el PMV está cercano a cero. Por otro lado la salida del subsistema dependiente de los parámetros ambientales (variables de entrada) es el PMV Fuzzy.

2. Obtención de la base de reglas difusas que debe usarse para evaluar el PMV, dependiendo del estado de las variables de entrada antes descritas.

Para generar todas las reglas difusas que representan todas las posibles combinaciones de las cinco variables, cada una de las entradas y la salida son divididas en funciones de membresía triangulares simétricas exceptuando la de la variable que representa al rango $[Ta1-Ta2]$ como muestra la Fig. 3.

El nivel de actividad y el aislamiento térmico de la ropa son descritos por tres y cuatro funciones de membresía triangular respectivamente para una mayor exactitud. Para el caso de la humedad relativa y de la temperatura media radiante se asumen los valores de 50%, como se especificó anteriormente, e igual a la temperatura del aire, respectivamente.

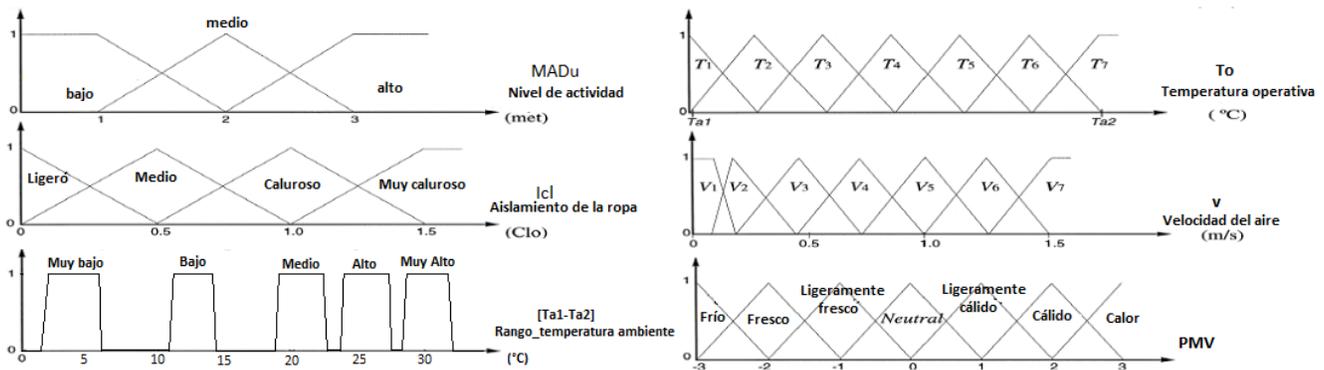


Figura 3
Funciones de membresía iniciales.

El confort térmico puede ser obtenido por muchas combinaciones diferentes de las seis variables antes mencionadas, por lo que surge un conflicto entre las reglas generadas. Esto es debido a la interdependencia entre el confort térmico que influye en los factores, como el efecto de cada uno de ellos dependiendo del nivel y de las condiciones de los otros factores. En aras de resolver esta problemática se asigna un grado a cada regla generada con el objetivo de mantener alejada solo la regla de un grupo de conflicto clasificado con el máximo grado. De esta manera no solo se resuelve el conflicto sino que es reducido el número de reglas.

Reglas para el modelo dependiente de los parámetros personales:

Realizando un razonamiento difuso con las funciones de membresías mostradas en la Fig. 3 para el nivel de actividad y el aislamiento térmico de la ropa se obtienen las siguientes reglas [24]:

- IF Icl es *Ligero* AND MADu es *bajo* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Muy alto* (en un rango de [28.2 °C –31.5 °C]).
- IF Icl es *Ligero* AND MADu es *medio* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Alto* (en un rango de [24 °C –28.5 °C]).
- IF Icl es *Ligero* AND MADu es *alto* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Medio* (en un rango de [19.5 °C –25.5 °C]).
- IF Icl es *Medio* AND MADu es *bajo* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Alto* (en un rango de [25.9 °C –28.0 °C]).
- IF Icl es *Medio* AND MADu es *medio* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Medio* (en un rango de [19.5 °C –23.5 °C]).
- IF Icl es *Medio* AND MADu es *alto* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Bajo* (en un rango de [13 °C –18.4 °C]).
- IF Icl es *Caluroso* AND MADu es *bajo* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Alto* (en un rango de [23 °C –28.0 °C]).
- IF Icl es *Caluroso* AND MADu es *medio* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Bajo* (en un rango de [15 °C –24 °C]).
- IF Icl es *Caluroso* AND MADu es *alto* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Muy bajo* (en un rango de [7.0 °C –12 °C]).
- IF Icl es *Muy Caluroso* AND MADu es *bajo* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Medio* (en un rango de [19.5 °C –23.5 °C]).
- IF Icl es *Muy Caluroso* AND MADu es *medio* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Bajo* (en un rango de [10.8 °C –14 °C]).
- IF Icl es *Muy Caluroso* AND MADu es *alto* THEN [Ta1-Ta2] puede ser *Muy Bajo* (en un rango de [1 °C –0.6 °C]).

Reglas para el modelo dependiente de los parámetros ambientales:

Un punto de vista práctico es usar el modelo dependiente de los parámetros personales para ajustar el modelo asociado a los parámetros ambientales, el cual inicia con la evaluación de la velocidad del aire para determinar la temperatura operativa que hace que el PMV esté cercano a cero. Para ello se usan siete funciones de membresía que describen el estado tanto de la velocidad del aire como de la temperatura operativa (T_o). Estas variables generan un máximo de siete reglas difusas como se muestran a continuación [24], donde (V1...V7) y (T1...T7) son términos difusos que describen la velocidad del aire y la temperatura operativa respectivamente, que corresponden a una sensación térmica óptima. Una vez que la temperatura del aire operativa es calculada es comparada con la temperatura aire medida para determinar el PMV. Es importante aclarar que la temperatura operativa es la temperatura del aire para la cual el índice PMV se acerca a cero cuando $H_r=50\%$ y $T_a=T_{mrt}$.

- IF v es V1 THEN T_o es T1.
- IF v es V2 THEN T_o es T2.
- ...
- IF v es V7 THEN T_o es T7.

• **PMV Neuronal**

Muchas aplicaciones computacionales de modelos de redes neuronales (NNM *Neural Network Models* por sus siglas en inglés) han sido aplicadas para la identificación y el control de los sistemas térmicos HVAC. También estos modelos han sido implementados para predecir las cargas de enfriamiento/calentamiento y el consumo de energía en edificios. Sin embargo, existen investigaciones que limitan su uso a la predicción del confort térmico para el control en tiempo real de los sistemas HVAC, como se mencionó en la descripción del PMV anteriormente [24], [31].

La red neuronal multicapa realimentada es ampliamente utilizada para mapear las relaciones cualitativas del par entrada/salida debido a la capacidad de aproximar modelos de funciones no lineales. Puede aproximar cualquier función no lineal continua dada con un número suficiente de neuronas en la capa oculta. La arquitectura estructural básica de la red neuronal es la secuencia de una capa de entrada, una capa oculta simple y una capa de salida. Sin embargo se puede añadir más capas ocultas para obtener el resultado deseado.

Para la obtención de este nuevo índice de forma computacional se emplea un modelo neuronal realimentado llamado en este caso PMV neuronal. Este modelo es una función dependiente de diversas variables que pueden ser medidas por instrumentos de medición convencionales de los sistemas HVAC: temperatura de bulbo húmedo, nivel de actividad, temperatura del aire (T_i), temperatura de globo, velocidad del aire, el aislamiento térmico de la ropa y la humedad relativa del aire (H_r). Este modelo, al igual que el anterior, toma como base el PMV de Fanger [1,8] y emplea la función descrita en la ecuación (64) [31].

$$PMV_{neuronal} = f(T_{wb}, M, T_i, T_g, v, I_{cl}) \quad (64)$$

La temperatura de globo es utilizada para determinar la temperatura media radiante (T_{mrt}) del modelo de Fanger [1,8] el cual es empleado en el modelo PMV neuronal siguiendo la ecuación (65) [31], donde D es el diámetro del globo en m y ε es la emisividad del globo (0.95 para globos negros). La T_g puede ser medida por un termómetro de globo, que consiste en una esfera negra con una capa, de 15.2 cm de diámetro, y un termómetro ubicado en el centro.

$$T_{mrt} = \frac{1}{1.8} * \sqrt[4]{((1.8 * T_i + 492)^4 + \frac{1.27 * 10^9 * v^{0.6} (T_g - T_i)}{\varepsilon * D^{0.4}})} - \frac{492}{1.8} \quad (65)$$

La humedad relativa del modelo de Fanger [1,8] se determina acorde a la ecuación 66, con sus respectivas variables relacionadas de la ecuación (67) a la (70).

$$Hr = \frac{100*101.325*w}{(w+0.622)*P_s} \quad (66)$$

$$P_s = 1000 * e^{(1.26*10^{-5}*T_i^2 - 1.93*10^{-2}*T_i + 2.71*10^1 - 6.34*10^3*T_i^{-1})} \quad (67)$$

$$W = \frac{(2501 - 2.381*T_{wb}) * w_s - (T_i - T_{wb})}{25.1 + 1.805*T_i - 4.186*T_{wb}} \quad (68)$$

$$W_s = \frac{0.622 * P_{s_wb}}{P - P_{s_wb}} \quad (69)$$

$$P_{s_wb} = 1000 * e^{(1.26*10^{-5}*T_{wb}^2 - 1.93*10^{-2}*T_{wb} + 2.71*10^1 - 6.34*10^3*T_{wb}^{-1})} \quad (70)$$

En [31] se propone una estructura neuronal de 6x8x4x1, o sea, 6 nodos en la capa de entrada, 8 en la primera capa oculta, 4 en la segunda capa oculta y un nodo en la capa de salida. Dicha salida de la red neuronal multicapa para determinar el confort se halla por la expresión (71) con l=1 y los pesos y los bias de cada neurona en las capas antes mencionadas se muestran en la Tabla 6.

$$y = f_y(\sum_{k=1}^{k=4} w_{lk} * h_k + d_l) \quad (71)$$

$$h_k = f_h(\sum_{j=1}^{j=8} w_{kj} * z_j + c_k) \quad (72)$$

$$z_j = f_z(\sum_{i=1}^{i=6} w_{ji} * x_i + b_j) \quad (73)$$

Los parámetros w_{lk} son los pesos de la neurona h_k con la neurona y , d_l es el bias para la neurona de salida y , w_{kj} son los pesos de la neurona z_j con la neurona h_k , c_k son los bias para la neurona de la segunda capa oculta (h_k), w_{ji} son los pesos de la neurona x_i con la neurona z_j y b_j son los bias para las neuronas de la primera capa oculta (z_j). La función de activación de forma sigmoidea es la empleada en este caso.

Tabla 6
Pesos y bias de cada neurona en el PMV neuronal

j	1	2	3	4	5	6	7	8
$w_{j,i=1}$	0.0071	0.0201	0.0015	-0.0595	0.0003	-1.026	0.0247	0.0272
$w_{j,i=2}$	-0.2289	-0.0518	-0.0028	0.0702	0.0634	0.1231	0.1279	0.0283
$w_{j,i=3}$	0.0059	-0.0115	-0.0630	0.0254	-0.0265	-0.0301	0.0465	0.0398
$w_{j,i=4}$	-0.3336	0.0309	0.0628	0.3145	0.3339	-0.1863	0.3139	0.0211
$w_{j,i=5}$	0.0110	0.0632	0.2644	-0.1194	0.1324	0.0230	-0.1397	-0.1441
$w_{j,i=6}$	-0.0481	-0.0657	0.0340	0.1361	0.0034	0.0064	0.2385	0.0066
$w_{k=1,j}$	2.2173	1.8035	1.9917	1.2985	-1.2473	-0.7558	3.2885	3.5544
$w_{k=2,j}$	3.4337	3.4547	1.6589	2.2633	-3.7654	0.0084	-0.1810	-1.1146
$w_{k=3,j}$	3.0024	-2.5622	1.2146	-1.7947	-3.3991	3.5818	2.8049	0.0973
$w_{k=4,j}$	-3.6406	-2.8807	2.4150	-0.7307	3.3411	-2.2524	0.2993	-2.6655
b_j	-2.9909	-1.2545	-0.9745	1.7851	-1.2667	2.7624	4.8852	-2.2233
k	1	2	3	4				
$w_{l=1,k}$	4.1527	-3.4950	-4.6522	1.3952				
c_k	-6.0585	-3.8090	-0.3387	4.5270				
l	1							
d_l	2.3058							

3.- APLICACIÓN VISUAL

- **Metodología computacional**

Para el desarrollo de la aplicación visual que evalúa los índices de confort y desconfort se utilizó la herramienta matemática Matlab® versión R2013a (8.1.0.604) y el software HelpNDoc Versión 4.9 para la creación de la ayuda de la aplicación visual. Las características de la computadora de desarrollo y prueba fueron las siguientes:

- Procesador AMD A8-7410 APU con AMD Radeon R5 y tarjeta gráfica de 2.20 GHz.
- Memoria RAM de 4.00 GB.
- Sistema operativo de 64 bits, Windows 10.

El uso del soporte informático permite dar una mayor versatilidad al estudio y evaluación de los modelos antes descritos, pues este permite modificar cualquiera de los parámetros y factores descritos en la Tabla 1 y ver inmediatamente los efectos y resultados de estas variaciones, lo que facilita la interpretación de los resultados. Además se emplea como una de las formas para validar un modelo de zona de confort propuesto por las autoras en otros trabajos [37].

Para el desarrollo de esta aplicación se empleó el GUIDE de Matlab® (*Graphical User Interface Development Environment* por sus siglas en inglés), el cual es un entorno de programación visual disponible en este asistente matemático que permite realizar y ejecutar programas visuales que necesiten ingreso continuo de datos.

3.1.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la ventana de presentación de la aplicación aparecen los datos del autor y un botón que permite pasar a la ventana principal. En esta última se pueden apreciar los diferentes factores y parámetros influyentes en los modelos de confort mencionados en la Tabla 1, además de alguno de los índices de confort y dis confort resumidos en la Tabla 2.

A través del *Menu Editor* del GUIDE se creó un menú compuesto por los siguientes campos: *Archivo*, *Editar*, *Ver*, *Ayuda* y *Buscador web*. La opción *Archivo* (Fig. 4a) permite abrir un fichero ya creado, cerrar la aplicación (en cuyo caso se muestra el cuadro de diálogo de la Fig. 4b), salvar los datos con extensión *.m* o con cualquier otro tipo de extensión de Matlab®, y también se puede cargar los datos de un ejemplo tipo.

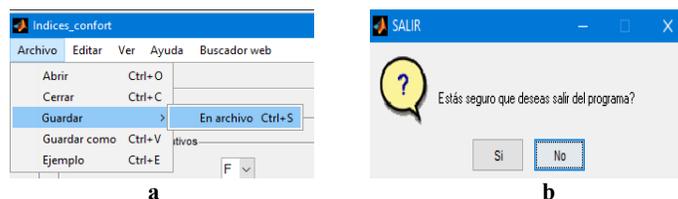


Figura 4
a-Opciones de menú *Archivo* b-Cuadro de diálogo para salir de la aplicación.

Es válido aclarar que la entrada de parámetros está validada, o sea, que ante la entrada de un valor nulo, menor que cero o una cadena de caracteres, la aplicación muestra un mensaje de error al usuario y hasta que este parámetro no es introducido de manera correcta no se puede introducir el siguiente parámetro. Por ejemplo, al escribir la cadena *mal* en el nivel de actividad (Fig. 5), se alerta al usuario de la siguiente forma:

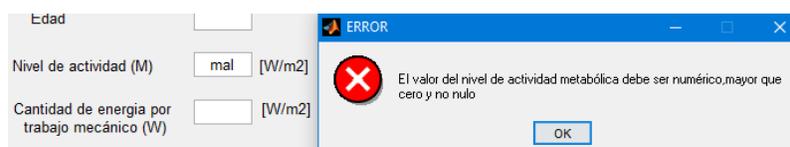


Figura 5
Validación de parámetros de entrada.

Para analizar la influencia de alguno de los factores y parámetros antes descritos se hicieron varios escenarios de simulación los cuales representan situaciones próximas a la realidad. Estos resultados se reflejan en la Tabla 7. La escala de sensación térmica para el caso de los índices PMV, PMV_simp y TS es de -3 a 3, TSENS y DISC de -5 a 5, ET* y SET* ofrecen un valor de temperatura efectiva y Humphreys, Nicol y Auliciems un valor de temperatura neutral.

En la Tabla 7 fueron resaltados en color rojo los parámetros que cambiaron al pasar de un escenario de simulación a otro. Se puede apreciar como al variar I_{cl} por uno mayor, en el caso de los dos primeros escenarios, se puede estar un poco más cercano a la zona de confort a pesar de que T_a sea de 8 °C.

Tabla 7
Escenarios de simulación

Factores y parámetros	Escenarios				
	1	2	3	4	5
M [W/m ²]	58,15	58,15	58,15	58,15	120
W [W/m ²]	29,08	29,08	29,08	29,08	20
Icl [clo]	0,6	1,37	0,6	0,6	0,6
Ta [°C]	8	8	24	38	38
Tmrt [°C]	9	9	22,5	38,5	38,5
v [m/s]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7
D.est_Va	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Hr [%]	70	70	70	70	80
Pv [kPa]	10	10	5	10	10
Tmmo [°C]	15	15	28	31	31
Ta_ext [°C]	10	10	22	39	39
Tm [°C]	12	12	24	32	32
Temp_nucleo[°C]	20	34	34	38	38
Temp_piel [°C]	10	10	15	28	28
Tasa de reg. Sudor (mrsw)[Kg/sm ²]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P.vapor sat. a ET [kPa]	10	10	10	10	10
Indices					
PMV (% disconfort) [escala]	-1,65 (59,17) [Fresco]	-1,27 (38,48) [Ligeramente frío]	0,43 (8,94) [Confortable]	2,88 (98,44) [Sofocante]	3 (99,20) [Sofocante]
PMV_simp (% disconfort) [escala]	-3 (100) [Frío]	-3 (99,99) [Frío]	-1,82 (67,86) [Fresco]	3 (99,88) [Sofocante]	3 (100) [Sofocante]
TSENS (% disconfort) [escala]	-2,25 (2,25) [Fresco]	-0,79 (0,79) [Ligeramente frío]	-0,99 (0,99) [Ligeramente frío]	4,08 (1,19) [Muy caliente]	2,78 (0,18) [Sofocante]
TS [escala]	-2,04 [Fresco]	-2,035 [Fresco]	0,65 [Confortable]	3 [Sofocante]	3 [Sofocante]
PD	47,59	47,59	18,31	7,32	10,75
ET*	3,88	-10,67	23,48	33,90	34,30
SET*	-2,54	17,85	16,99	41,97	41,97
Humphreys	21,65	21,65	25,78	26,96	26,96
Nicol	23,63	23,63	23,96	24,17	24,17
Auliciems	16,12	16,12	23,7	32,28	32,28

Para el caso de los escenarios 2 y 3 se aumentó T_a a 24 °C y se reduce P_v dando como resultado un ligero confort térmico. De igual forma se siguió aumentando la temperatura para los escenarios 3 y 4 pero manteniendo P_v lo que provocó un disconfort de casi el 100%. Por último se mantuvo alta la temperatura y se aumentó a un 80 % H_r y v a 0,7 m/s. Esta última variación también trajo como resultado un gran disconfort, apreciándose este resultado en la variación que tuvo el índice empírico PD.

Cabe resaltar que para el caso de los tres primeros escenarios de simulación, tanto el índice de sensación térmica TSSENS como el porcentaje de insatisfacción DISC, son modularmente iguales y eso es producto de que la temperatura media del cuerpo es menor que el límite inferior de la zona de regulación evaporativa (parámetros del modelo '2 Node').

La selección de un índice o de otro está en correspondencia con la manera que se desee regular el confort térmico pues unos dan valores dentro de una escala de sensación térmica (resultados similares en cada escenario) y otros valores de temperatura, ya sea efectiva, estándar o neutral.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la aplicación informática que se muestra como resultado en este trabajo junto a la investigación desarrollada en la temática de confort térmico ha permitido a las autoras de este trabajo arribar a las siguientes conclusiones:

- Existen disímiles modelos que predicen la temperatura de confort o arrojan un índice de satisfacción o insatisfacción en la escala de sensación térmica, pero entre ellos existen diferencias:
 - Algunos (como es el caso del PD, PS, TS, Humphreys, Nicol, Auliciems y Griffiths) reflejan parámetros ambientales o solamente la temperatura del aire, ya sea en el interior o en el exterior.
 - Otros (como es el caso del PMV-PPD, TSSENS-DISC, ET*, SET*, PET, ITS, PMV Fuzzy y PMV Neuronal) tienen variables referentes al individuo: nivel de actividad metabólica, aislamiento térmico de la ropa, entre otras; o una combinación de estas con los parámetros anteriores.

- Aunque alguno de los modelos son más amplios que otros, pues tienen en cuenta más parámetros y variables que los hacen teóricamente más concluyentes, en la práctica poseen menos aplicabilidad, no ocurriendo así con los adaptativos y los empíricos que dependen de variables que pueden ser medidas físicamente.
 - Aplicar en tiempo real estos índices supone a veces un reto pues, desde el más sencillo hasta el más complejo, requiere de mediciones de varias variables lo que implica tiempo de cómputo y una medición exacta para que el confort que se está ofreciendo no sea erróneo, lo que contribuye a un ahorro energético óptimo.
 - La selección del índice de confort/disconfort adecuado en la realidad, está en correspondencia con el desarrollo software y hardware que se disponga y con la forma en que se desee regular dicho confort.
 - En la actualidad en la mayoría de los edificios para garantizar confort, no se explotan las potencialidades tecnológicas y los recursos computacionales en las estrategias de control avanzadas de sistemas de calefacción ventilación y aire acondicionado (sistemas HVAC por sus siglas en inglés), sino que se realizan controles monovariantes dándole importancia a la variable temperatura y limitando la influencia de otras variables que tienen incidencia en la satisfacción de los clientes.
 - La aplicación informática visual es referencia de trabajos futuros y puede ser utilizada en aplicaciones de vigilancia energética con garantía de confort que forman parte de los sistemas de gestión de edificios y aplicaciones SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*, por sus siglas en inglés).

REFERENCIAS

1. American Society Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineering. ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS Atlanta (USA) SI ed. Atlanta: W. Stephen Comstock; ASHRAE; 2017.
2. Zhongjun Zhang YZ, Ling Jin Thermal comfort of rural residents in a hot-humid area. BUILDING RESEARCH & INFORMATION. 2017;45:209-221.
3. C.V.Subramanian NR, S.Senthamil Kumar. A review of passive cooling architectural design interventions for thermal comfort in residential buildings. Indian JSciRes. 2017;14(1):163-172.
4. Lin Duanmua XS, Quan Jinb , Zhiqiang Zhaia. Relationship between Human Thermal Comfort and Indoor Thermal Environment Parameters in Various Climatic Regions of China. ScienceDirect. 2017;205:2871-2878.
5. Valle FJ Cd. Zona Variable de Confort Térmico. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña; 2002. Disponible en: <https://www.tesisenred.net>.
6. Stefano Schiavon BY, Yoni Donner, Victor W.-C. Chang, William W Nazaroff. Thermal comfort, perceived air quality and cognitive performance when personally controlled air movement is used by tropically acclimatized persons. Building and Environment. 2016; 27 (3): 1-23. Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/7f01n291>.
7. Marc E. Fountain CH. A thermal sensation prediction software tool for use by the profession. ASHRAE Transaction. 1997; 103 (2): 130-136. Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/3g98q2vw>.
8. International Standard Organization. Ergonomía del entorno térmico: determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios locales de confort térmico: ISO 7730; 2005. Disponible en: www.iso.org/standard/39155.html.
9. YH Yau BC. A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. Building Services Engineering Research Technology. 2014;35(1):23-65.
10. Ekici C. A review of thermal comfort and method of using Fanger's PMV equation. 5TH International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, Vancouver, CANADA. 2013.
11. Haiyan Yana Z. Impacts of Different Climate in Northern and Southern Regions on People's Thermal comfort in Winter. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017; Jinan; China; 2017; 205:565-572. Disponible en: www.sciencedirect.com.
12. Zhaosong Fanga XF, Zhang Lin. Investigation of PMV Model for Evaluation of the Outdoor Thermal Comfort. 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017; Jinan; China; 2017; 205:2457-2462. Disponible en: www.sciencedirect.com.
13. Francesca Romana d'Ambrosio Alfano BIP, Giuseppe Riccio. Notes on the Calculation of the PMV index by means of Apps. 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2016; Turin; Italia; 2016; 101:249-256. Disponible en: www.sciencedirect.com.
14. Joyce Kim YZ, Stefano Schiavon, Paul Raftery, Gail Brager. Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning. Building and Environment. 2018; 129(1):2-18.
15. Mateusz Bogdan EW. Comfort modelling in semi-outdoor spaces. REHVA. 2017; 54 (1): 23-25. Disponible en: www.rehva.eu.

16. Yasunobu Nishi APG. Effective Temperature Scale Useful for Hypo- and Hyperbaric Environments. *Aviation Space and Environmental Medicine*. 1977;48(2): 97-107.
17. Jungsoo Kim RdD, et al. Field Study of Air Conditioning and Thermal Comfort in Residential Buildings. 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant. Windsor; Inglaterra; 2016:1-18. Disponible en: <http://nceub.org.uk>
18. Chirag Deb RA. The significance of Physiological Equivalent Temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010;2(7): 2825-2828.
19. Mohammad Reza Mansouri Daneshvar AB, Taghi Tavousi. Assessment of bioclimatic comfort conditions based on Physiologically Equivalent Temperature (PET) using the Raman Model in Iran. *Central European Journal of Geosciences*. 2013;5(1): 53-60.
20. Auliciems A, Szokolay, SV. Thermal comfort. 2nd ed. Passive and Low Energy Architecture International, University of Queensland and Oxford University editors. 2007.
21. Richa Tiwari MP, Anupama Sharma. An Approach to Human Adaptability towards its Built Environment: A Review. *Energy and Power Engineering*. 2010;2: 90-94.
22. S. Heidari MA. Evaluation of thermal comfort in urban areas. *Int J Urban Manage Energy Sustainability*. 2017;1(1):49-58.
23. Rubin A. Thermal Comfort in Passive Solar Buildings -- An Annotated Bibliography. Washington DC: NATIONAL BUREAU OF STANDARDS 1982. Disponible en: <https://www.govinfo.gov/app>.
24. Hom B. Rijal MAH, J. Fergus Nicol, editor Towards an adaptive model for thermal comfort in Japanese offices. *Making Comfort Relevant*;7-10 de Abril de 2016; Windsor,UK.
25. Mohd Sabri Mustapa SAZSS, Aya Hagishima, Mohamed Sukri Mat Ali. Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in university offices with cooling and free running modes. *International Joint Conference SENVAR-iNTA-AVAN*. Johor; Malasia; 2015. p. 4-43.
26. Hamidreza Joodaki HT. The Impact of Climate on Ecological Design of Semnan City in Iran. *Open Journal of Ecology*. 2018; 8:1-14.
27. József Menyhárt FK. Investigation of Thermal Comfort Responses with Fuzzy Logic. *Energies*. 2019; 12(1792): 1-13.
28. Sotirios D Kotsopoulos FC, Antoine Cuenin, editor Personalizing Thermal Comfort in a Prototype Indoor Space. *SIMUL: The Fifth International Conference on Advances in System Simulation*. Venecia; Italia; 2013: 178-186. Disponible en: <http://www.iaria.org/conferences2013/SIMUL13.html>
29. Antonino Marvuglia AM, Giuseppina Nicolosi Coupling a neural network temperature predictor and a fuzzy logic controller to perform thermal comfort regulation in an office building. *Building and Environment*. 2014; 72:287-99.
30. Lucio Ciabattini GC, Francesco Ferracuti, Massimo Grisostomi, Gianluca Ippoliti, Matteo Pirro. Indoor thermal comfort control through fuzzy logic PMV optimization. 2015 International Joint Conference on Neural Networks. Killarney; Irlanda; 2015:1-6. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp.jsp>.
31. S. Atthajariyakul TL. Neural computing thermal comfort index for HVAC systems. *Energy Conversion and Management*. 2005. 46 (15-16):2553-2565. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.007>.
32. Chengdong Li JY, Ming Wang, Guiqing Zhang. Prediction of Thermal Comfort Index Using Type-2 Fuzzy Neural Network. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. 2012; 7366:351-60.
33. Federspiel CC. User-Adaptable and Minimum-Power Thermal Comfort Control. Tesis Doctoral: Instituto de Tecnología de Massachusetts; 1992. Disponible en: <http://www.dspace.mit.edu>.
34. D. I-H. Thermal comfort calculations. A computer model. *ASHRAE Transactions* 1990;96(1):840-844.
35. Höpfe P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol*. 1999; 43:71-75.
36. Nicol, F and Roaf, S. Pioneering new indoor temperature standards the Pakistan project. *Energy and Buildings*. 1996; 23 (3):169-174. Available from: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\) 00941-8](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95) 00941-8)
37. Marchante G., González A.I. Aplicación informática sobre MATLAB® para la resolución de modelos de confort térmico. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas (RCCI)*. 2020. 14 (1):1-19. Disponible en : <http://rcci.uci.cu>.

ANEXOS

Anexo 1. Variables y parámetros

Nomenclatura	Significado	Unidad de medida
H	Producción interna de calor	W/m^2
E_d	Pérdidas de calor por la difusión de vapor de agua por la piel	W/m^2
E_{sw}	Pérdidas de calor debidas a la sudoración	W/m^2
E_{re}	Pérdidas de calor latentes debidas a la sudoración	W/m^2
L	Pérdidas de calor por respiración seca	W/m^2
R	Pérdidas de calor por radiación de la superficie del cuerpo vestido	W/m^2
C	Pérdidas de calor por convección de la superficie del cuerpo vestido	W/m^2
M	Cantidad de energía metabólica producida por el cuerpo humano	W/m^2
W	Cantidad de energía perdida por el trabajo mecánico realizado	W/m^2
P_v	Presión parcial del vapor de agua en el aire	kPa
T_a	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
f_{cl}	Relación entre el aire del cuerpo humano vestido y el aire del cuerpo humano desnudo	-
t_{cl}	Temperatura exterior en la superficie de la ropa	$^{\circ}C$
T_r	Temperatura radiante del medio	$^{\circ}C$
h_c	Coefficiente de transferencia de calor convectivo entre la superficie de la ropa y el aire	$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$
v	Velocidad del aire	m/s
I_{cl}	Aislamiento térmico de la ropa	clo
R_{cl}	Coefficiente de aislamiento de la ropa	$m^2 K/W$
α	Constante que normaliza a V entre los valores -3 y 3	$0.303 * e^{0.036 * M} + 0.028$
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación lineal	$W/m^2 K$
h_{en}	Coefficiente de transferencia convectiva natural de calor	$W/m^2 K$
η	Eficiencia mecánica del cuerpo humano	-
λ (constante)	Calor de vaporización del agua	$2.43 * 10^3$ [kJ/kg]
m (constante)	Coefficiente de permeabilidad del vapor en la piel	$4.7 * 10^{-3}$
P_s	Presión del vapor de agua saturado en el aire	kPa
T_s	Temperatura de la piel	$^{\circ}C$
γ (constante)	Constante de proporcionalidad que relaciona la presión de vapor con la humedad	$5.16 * 10^{-3}$
β (constante)	Constante de proporcionalidad que relaciona a M con la razón de ventilación pulmonar	$1.379 * 10^{-3}$
p_{ex} (constante)	Presión del vapor de agua en el aire expirado	5.867 Pa
c_p (constante)	Calor específico del aire	$2.713 * 10^{-1}$ [J/Kg $^{\circ}C$]
T_{ex} (constante)	Temperatura del aire expirado	34 $^{\circ}C$
k	Constante que relaciona el coeficiente de transferencia convectiva forzada de calor con la velocidad del aire	$W/m^2 K$
t_{sk}	Temperatura de la de la piel o cilindro exterior del modelo "2-Node"	$^{\circ}C$
t_{cr}	Temperatura del núcleo o cilindro interior del modelo "2-Node"	$^{\circ}C$
t_b	Temperatura media del cuerpo del modelo "2-Node"	$^{\circ}C$
α_{sk}	Fracción de la masa corporal total que se considera térmicamente en el compartimiento de la piel.	-
Q_{bl}	Flujo principal de sangre	$l/h * m^2$
$t_{b,c}$	Límite inferior de temperatura de la zona de regulación evaporativa	$^{\circ}C$
$t_{b,h}$	Límite superior de temperatura de la zona de regulación evaporativa	$^{\circ}C$
η_{ev}	Eficiencia evaporativa	-
w_{rsw}	Es el requerimiento para evaporar el calor regulado	-
E_{sk}	Pérdida de calor evaporado de la piel	W/m^2
$E_{rsw,req}$	Pérdida de calor evaporativo debido a la regulación del sudor, requerida para el confort	W/m^2
E_{max}	Pérdida de calor evaporado de la piel cuando $w=1$ (pérdida máxima posible de calor evaporativo)	W/m^2
E_{dif}	Pérdida del calor evaporativo debido a la difusión	W/m^2
i_{cl}	Eficiencia de permeabilidad al vapor de la ropa: relación entre la capacidad real de flujo de calor por evaporación a través de la ropa y la capacidad de flujo de calor sensible en comparación con la relación de Lewis	-
m_{rsw}	Tasa a la cual el sudor regulado es generado	$kg/(s * m^2)$
$R_{e,cl}$	Resistencia del calor evaporativo transferido por la capa vestida (análogo a R_{cl})	$m^2 * kPa/W$
h_e	Coefficiente de transferencia del calor evaporativo (análogo a h_c)	$W/m^2 * kPa$
t_0	Temperatura operativa	$^{\circ}C$
$p_{ET,s}$	Presión del vapor saturado a ET*	kPa

i_m	Relación entre la capacidad de evaporación del flujo de calor entre la piel y el ambiente y la capacidad del flujo de calor sensible comparado con la relación de Lewis	-
σ (constante)	Constante de Stefan-Boltzmann	$5.67 * 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 * \text{K}^4)$
A_r	Area del cuerpo de radiación efectiva	m^2
A_r/A_D	Razón que para personas sentadas es $7.0 * 10^{-1}$ y $7.3 * 10^{-1}$ para personas de pie	-
ε	Promedio de emisividad de la ropa o la superficie del cuerpo	-
$R_{a,cl}$	Límite exterior de resistencia térmica (de la piel o de la vestimenta)	$\text{m}^2 * \text{kPa}/\text{W}$
i_a	Relación entre la capacidad actual de evaporación del flujo de calor a través de la capa de aire exterior y la capacidad del flujo de calor sensible comparado con la relación de Lewis	-
F_{cs}	Calor que fluye desde el núcleo del cuerpo hasta la superficie de la piel	-
F_{sc}	Calor que fluye desde la superficie de la piel a través de la capa de la ropa hasta la superficie de la ropa	-
v_b	Flujo sanguíneo desde el núcleo del cuerpo hasta la piel (dependiendo del nivel de temperatura del núcleo y de la piel)	$l/(\text{s} * \text{m}^2)$
ρ_b	Densidad de sangre	kg/l
c_b (constante)	Capacidad específica de calor del cuerpo	$3490 (\text{W} * \text{s})/(\text{K} * \text{kg})$
T_u	Intensidad de la turbulencia	%
V_{sd}	Desviación estándar de la velocidad medida	-
T_n	Temperatura neutral	$^{\circ}\text{C}$
T_m	Temperatura media exterior	$^{\circ}\text{C}$
T_{mmo}	Temperatura media mensual exterior	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Temperatura de confort	$^{\circ}\text{C}$
T_g	Temperatura de globo	$^{\circ}\text{C}$
V_{st}	Voto de sensación térmica	-
a	Razón de cambio de la sensación térmica con la temperatura de la habitación	-
T_{rm}	Temperatura media radiante exterior	$^{\circ}\text{C}$
T_{rm-l}	Temperatura media radiante del día anterior	$^{\circ}\text{C}$
α (constante)	Constante que define la velocidad a la cual la T_{rm} cambia con relación a la temperatura del aire exterior	Entre 0 y 1
S	Tasa de sudoración requerida	Kcal/h
f	Eficiencia de enfriamiento por sudoración.	-
T_{mrt}	Temperatura media radiante	$^{\circ}\text{C}$
H_r	Humedad relativa	%
v	Velocidad del aire	m/s
T_{wb}	Temperatura de bulbo húmedo	$^{\circ}\text{C}$
w	Proporciones de humedad en T_a	-
w_s	Proporciones de humedad en T_{wb}	-
P_{s-wb}	Presión del vapor saturado	kPa

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Greta Marchante González: Investigación, curación de datos, análisis formal, metodología, recursos, software, validación-verificación, visualización, redacción-borrador original

Ana Isabel González Santos: Conceptualización, metodología, recursos, administración del proyecto, supervisión, validación-verificación, visualización, redacción-revisión y edición.

AUTORES

Greta Marchante González, Ingeniera en Automática, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba, greymg112015@gmail.com. No. ORCID: 0000-0003-4110-9099. Investiga en control predictivo no lineal para edificaciones inteligentes con garantías de ahorro energético y confort térmico.

Ana Isabel González Santos, Ingeniera en Máquinas Computadoras, Doctora en Ciencias Técnicas. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba, anita@automatica.cujae.edu.cu, gonzalezsantosanaibel@gmail.com. No. ORCID 0000-0002-7969-4070. Investiga en control predictivo no lineal, modelación de sistemas físicos e informática industrial.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)