

## CONFORT TÉRMICO

El confort —al mismo nivel de la calidad de aire— es una condición crucial para el ocupante de un espacio. Este capítulo expone el tema desde una perspectiva práctica y sencilla, con el fin de que el tándem ingeniero-climatizador + arquitecto-director garanticen su obtención desde el diseño o, si trabajan con edificaciones existentes, lo evalúen y lo mejoren. Para este fin se presentan secuencialmente el concepto de confort y su composición, los índices que lo cuantifican, la normatividad existente al respecto, y —muy importante— las herramientas computacionales que permiten su inmediata evaluación.

### CONCEPTO DE CONFORT

El confort, en general, es un estado de bienestar del sujeto relacionado con su entorno y en el que son relevantes la acústica, la calidad de aire, la iluminación, el paisaje y las condiciones térmicas.

El confort térmico (o higrotérmico) está definido, tanto por la norma ISO 7730 como por el estándar ASHRAE 55, como “la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es valorada mediante evaluación subjetiva”. Algunos autores lo identifican como la situación de bienestar en la cual los mecanismos fisiológicos termorreguladores no se activan.

Para entender la naturaleza del confort individual es necesario visualizar a la persona como un sistema térmico estrechamente relacionado con el medio que la rodea. En principio, aceptemos que este “sistema” está en situación estable y, por consiguiente, su temperatura no cambia con el tiempo, de modo que las energías generadas más las entrantes están totalmente balanceadas con las energías salientes. También es necesario que no existan asimetrías considerables entre las temperaturas de pisos-cielo rasos-muros, o a diferentes alturas del aire ambiente, ni tampoco ráfagas

de aire. Cuando hay desbalances y/o asimetrías se experimentan calentamiento o enfriamiento o contrastes incómodos, procesos indeseables pues generalmente producen discomfort. Estas condiciones adversas se tratan más adelante, y están normalizadas según Ashrae Standard 55 [1].

La comodidad se da cuando la temperatura de la piel es estable dentro del rango  $31.5^{\circ}\text{C}$ - $34.5^{\circ}\text{C}$  y la del cuerpo es  $37^{\circ}\text{C}$  [2]. Temperaturas de piel mayores de  $45^{\circ}\text{C}$  o menores de  $18^{\circ}\text{C}$  causan dolor [3]; temperaturas internas del orden de  $28^{\circ}\text{C}$  conllevan arritmia cardíaca y muerte, mientras que mayores de  $46^{\circ}\text{C}$  causan daños cerebrales irreversibles [4]. Existen 6 (seis) factores que en acción conjunta determinan las temperaturas de la piel y del interior del cuerpo (y por consiguiente el confort); de ellos, cuatro pertenecen al ambiente exterior (temperatura, humedad y velocidad del aire, y temperatura radiante) y los otros dos son condiciones propias del sujeto (ropa y actividad). Las percepciones térmicas personales son fundamentalmente el resultado de la acción combinada de estos seis factores, y en mucho menor grado del aporte de la psicología individual y/o grupal.

El individuo, entonces, se caracteriza como un sistema térmico que intercambia energía calórica con sus alrededores, y que además genera calor en su interior. Se advierten entonces unos mecanismos que tienden a calentarlo y otros que tienden a enfriarlo. De que ese balance sea neutro, ya lo dijimos, depende la estabilidad de la temperatura y, claro está, la posibilidad de confort. Examinemos uno a uno cada factor.

### **Generación Interna de Calor o Metabolismo**

Citando a Cengel [2], decimos que los bloques elementales constituyentes de los organismos vivientes son las células, fábricas en miniatura que desempeñan varias funciones indispensables en la supervivencia. El cuerpo humano contiene cerca de 100 trillones de células con diámetro promedio de una centésima de milímetro. En cada una de ellas ocurren cientos de reacciones químicas por segundo, y son de nuestro particular interés la combustión de carbohidratos, grasas y proteínas, pues mediante ellas se da la generación de calor que se conoce con el nombre de metabolismo. La tasa de metabolismo en estado de reposo se denomina *tasa de metabolismo basal*, y es la tasa de generación energética necesaria para mantener las funciones básicas de respiración y circulación sanguínea con nivel cero de actividad externa. Para un hombre promedio (30 años, 70 kg, 1.73 m,  $1.8\text{ m}^2$  de piel), la tasa de metabolismo basal es 84 W. En la medida en que la actividad personal externa aumenta, también aumenta el metabolismo; la generación interna de energía puede superar 10 (diez) veces la basal cuando se hace un ejercicio físico muy exigente. Un hombre promedio genera 108 W cuando lee, escribe, tipea un documento

o escucha una conferencia en un salón de clase; sus máximos metabolismos a los 20 y a los 70 años son 1250 W y 730 W, respectivamente. Un atleta entrenado puede exceder los 2000 W. Cuando ocurre la sensación de frío intenso, las respuestas fisiológicas del cuerpo humano son tiritar, experimentar vasoconstricción, vello erizado y disminución de la circulación superficial, lo que conlleva aumentos de resistencia térmica y del metabolismo.

Para incorporar el metabolismo en las ecuaciones de evaluación cuantitativa del confort, se creó la unidad Met. Un Met es igual a 58.15 W/m<sup>2</sup> de superficie corporal. La Tabla 2.1 muestra los metabolismos más comunes.

*Tabla 2.1. Tasas de Metabolismo. Tomado de Gamboa et al [5].*

Actividad	W/m <sup>2</sup>	Met
Reclinado	46	0.8
Sentado relajado	58	1.0
Reparando relojes	65	1.1
Relajado de pie	70	1.2
Actividad sedentaria (oficina, hogar, escuela, laboratorio)	70	1.2
Manejando automóvil	80	1.4
Artes gráficas - encuadernar libros	85	1.5
De pie, actividad suave (compras, laboratorio, industria liviana)	93	1.6
Enseñanza	95	1.6
Trabajo domestico - afeitándose, lavándose y vistiéndose	100	1.7
Caminando en plano, 2 km/h	110	1.9
De pie, actividad media (asistente de compras, trabajador domestico)	116	2.0
Industria de la construcción - Pegar ladrillo (Bloque de 15.3 kg)	125	2.2
Lavando platos de pie	145	2.5
Trabajo domestico - rastrillando hojas en el patio	170	2.9
Trabajo domestico - lavando a mano y planchado (120-220 W/m <sup>2</sup> )	170	2.9
Industria de la construcción - construyendo los roles	180	3.1
Caminando en plano, 5 km/h	200	3.4
Silvicultura - aserrando madera	205	3.5
Agricultura - arando con una recua de mulas	235	4.0
Industria de la construcción - cargando una mezcladora con piedras y mortero	275	4.7
Deportes - patinando en el hielo a 18 km/h	360	6.2
Agricultura - cavando con pala (24 paladas / min.)	380	6.5
Deportes - esquiando a nivel, Buena nieve, 9 km/h	405	7.0
Silvicultura - trabajando con un hacha (peso 2 kg. 33 golpes/min.)	500	8.6
Deportes - corriendo, 15 km/h	550	9.5

### Aislamiento Térmico por Ropa

Como elemento que separa el cuerpo humano del medio que lo rodea, la ropa se constituye como un obstáculo para la transferencia de calor. En la medida en que aumente la cantidad de prendas, su grosor y su resistencia conductiva, la ropa se comporta como un aislante más efectivo, influyendo seriamente en la tasa de calor transferido, y consecuentemente, en la sensación de confort. Como consecuencia de lo anterior, la vestimenta (*clothing*) se clasifica de acuerdo con su capacidad de aislamiento y, análogo al caso anterior, su efecto en el confort se cuantifica en unidades conocidas como “Clo” y/o “m<sup>2</sup>C/W” (unidades de resistencia térmica). 1 Clo = 0.155 m<sup>2</sup>C/W. Una persona desnuda tiene un valor de 0.0 Clo; un traje de oficina tiene un valor de 1.0 Clo.

El valor Clo para una persona vestida se calcula simplemente sumando los valores Clo individuales de las distintas prendas. La figura 21 ilustra dos ejemplos de esta operación. La Tabla 2.2 muestra el valor Clo de diferentes prendas y el valor global Clo para distintos conjuntos.

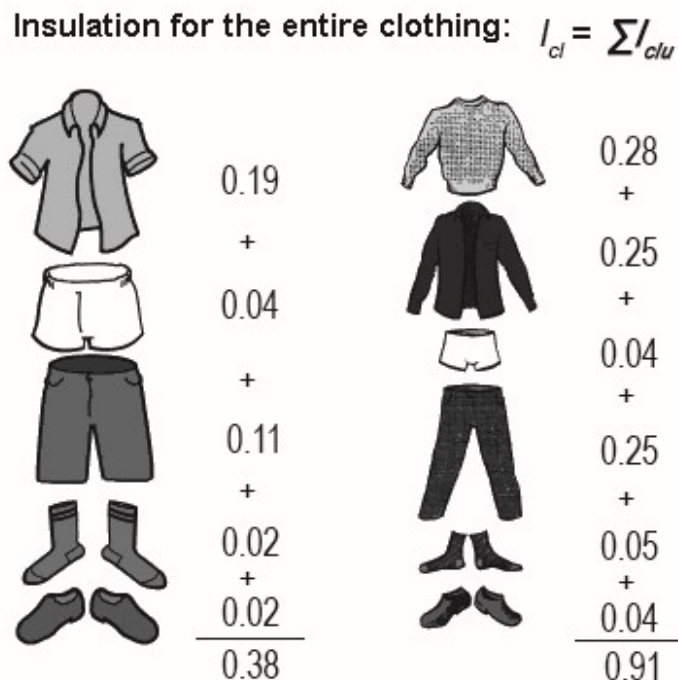


Figura 2.1. Dos ejemplos del cálculo de aislamiento por vestimenta.

Fuente: Gamboa *et al* [5].

**Tabla 2.2. Valores de aislamiento para distintas condiciones y prendas de vestir [5].**

El valor de aislamiento térmico de la ropa a menudo se mide con la unidad (Clo),

donde  $1 \text{ (Clo)} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K / W}$

			(Clo)	Rango en (Clo)		
Nivel	0	Desnudos	0.00	0.00	a	0.30
Nivel	1	Ropa Ligera	0.50	0.30	a	0.70
Nivel	2	Ropa Media	1.00	0.70	a	1.30
Nivel	3	Ropa Pesada	1.50	más	de	1.30

Ropa		Coefficiente de Transmisión Térmica (Clo)	Resistencia Térmica $\text{m}^2 \text{ K / W}$
	Tanga	0.02	0.003
Ropa Interior	Interiores cortos	0.03	0.005
	Interiores a media pierna	0.04	0.006
	Sostenedor	0.01	0.002
	Camiseta sin mangas	0.06	0.009
Camiseta	Camiseta manga corta	0.09	0.014
	Camiseta con mangas largas	0.12	0.019
	Camisetas con mangas y cuello largo	0.06	0.009
	Manga corta	0.09	0.029
Blusas y Camisas	Blusa ligera con mangas largas	0.15	0.023
	Camisa ligera con mangas largas	0.20	0.031
	Normal con mangas largas	0.25	0.039
	Camisa con mangas largas	0.30	0.047
	Blusa mangas largas con cuello	0.34	0.053
Pantalones	Pantalones cortos	0.06	0.009
	Bermudas	0.11	0.017
	Pantalones ligeros	0.20	0.031
	Pantalones normales	0.25	0.039
	Pantalones de franela	0.28	0.043

Continúa

Ropa		Coefficiente de Transmisión Térmica (Clo)	Resistencia Térmica $m^2 K / W$
Suéteres	Suéter delgado	0.20	0.031
	Suéter fino con mangas y cuello	0.26	0.04
	Suéter grueso	0.35	0.054
	Suéter gruesa con mangas y cuello	0.37	0.057
Chaquetas o Cazadoras	Chaqueta ligera sin forro	0.13	0.02
	Chaqueta ligera de verano	0.25	0.039
	Chaqueta de etiqueta	0.30	0.047
	Chaqueta	0.35	0.054
	Chaqueta con relleno de plumas de ganso	0.55	0.085
Calcetines y Zapatos	Abrigo	0.60	0.093
	Calcetines	0.02	0.003
	Zapatos	0.02	0.003
	Zapatillas	0.03	0.005
	Zapatos altos	0.04	0.006
	Calcetines de tobillo grueso	0.05	0.008
	Botas	0.05	0.008
Faldas	Calcetines largos de lana	0.10	0.016
	Falda ligera de 15 centímetros por encima de la rodilla	0.01	0.016
	Falda ligera 15 centímetros por debajo de la rodilla	0.18	0.028
Vestidos	Falda gruesa hasta la rodilla	0.25	0.039
	Vestido ligero sin mangas	0.25	0.039
	Vestido de invierno de manga larga	0.40	0.062
	Mallas de invierno	0.10	0.016

### Temperatura Media Radiante

Entre los distintos intercambios de calor del cuerpo humano con su entorno, la radiación es uno de los más importantes y de los más ignorados. La Figura 2.2, basada en [2], que ilustra una situación muy corriente, muestra el peso de su contribución. Aunque en un buen número de situaciones ignorar el fenómeno radiante es equivalente a fusionarlo con la convección, sin consecuencias para los resultados finales, existe

otro buen número de situaciones que desembocan en errores importantes, o que dejan pasar por alto magníficas oportunidades de climatizar eficientemente. Efectivamente, la experiencia enseña que situaciones de discomfort causadas por radiación incidente no pudieron resolverse al equivocarse en el diagnóstico, y también que, en otros casos, sencillas modificaciones en elementos radiantes condujeron a obtener bienestar en forma simple y a bajo costo.

En la teoría básica de transferencia de calor por radiación se conoce que el intercambio entre un sistema y sus alrededores es el resultado de un cálculo complejo, pues un objeto emite radiación en todas las direcciones a la vez que recibe radiación de todos los cuerpos que “lo pueden ver”. Además, se conoce que todos y cada uno de los involucrados absorben, reflejan y emiten radiación según su propia temperatura y sus características superficiales. Es decir, quedan implicadas todas las temperaturas, todas las propiedades superficiales, todas las geometrías y las posiciones relativas de todos los cuerpos. Para simplificar la contabilidad del balance radiante se desarrolló el concepto de “temperatura media radiante”, la cual se define como “la temperatura uniforme de un recinto negro imaginario que tuviera la misma transferencia de calor por radiación hacia la persona que el recinto real”, lo que es asimilable a un promedio ponderado de las temperaturas de las superficies vecinas (Ver Figura 2.3). No hay disponible un método simple para evaluar la temperatura media radiante; tanto en el diseño como en las edificaciones reales se debe partir de las temperaturas, áreas y propiedades de las superficies aledañas (muros, piso, techo, etcétera) y calcular su valor con las ecuaciones básicas o con software confiable disponible (Ver capítulo HERRAMIENTAS DE CUANTIFICACIÓN NUMÉRICA DEL CONFORT). Las temperaturas interiores de las superficies mencionadas se pueden medir directamente en casos de edificaciones existentes; en el caso del diseño, se pueden calcular a partir de las configuraciones y los datos ambientales, como se ilustra en el capítulo “Caso Base”. Aunque hay quienes tratan de asimilar la temperatura globo con la temperatura media radiante, estas no son equivalentes y confundirlas puede llevar a cometer serios errores (Ver la discusión de Parsons al respecto, ref [6] págs. 102-105). Ashrae Fundamentals 2017, capítulo 9, Thermal Comfort, procura una buena expresión para calcular la temperatura media radiante partiendo, eso sí, del supuesto de que la emisividad de las distintas superficies debe usarse con precaución porque es improcedente en muchos casos. Otro asunto, los efectos indeseables de asimetrías en la temperatura radiante, se trata en el aparte “Normatividad para el Confort Térmico”.

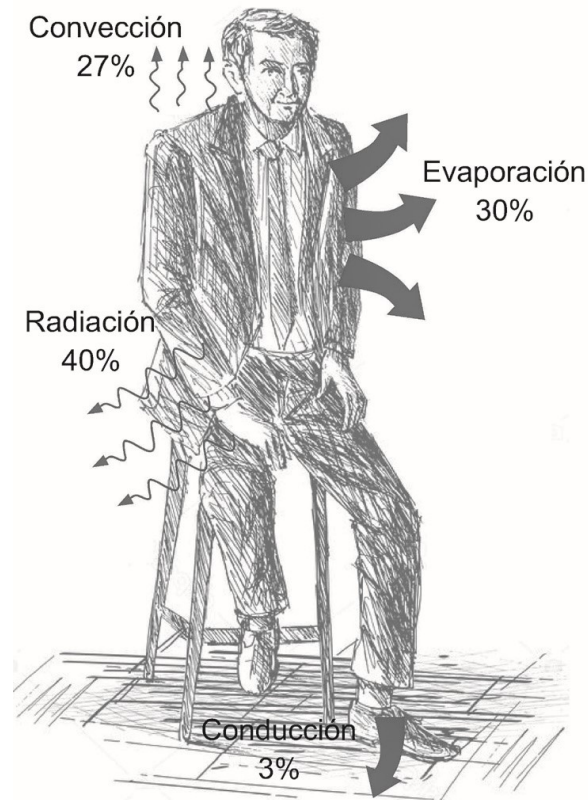


Figura 2.2. Proporciones de las pérdidas de calor en del cuerpo humano según modos, caso corriente.

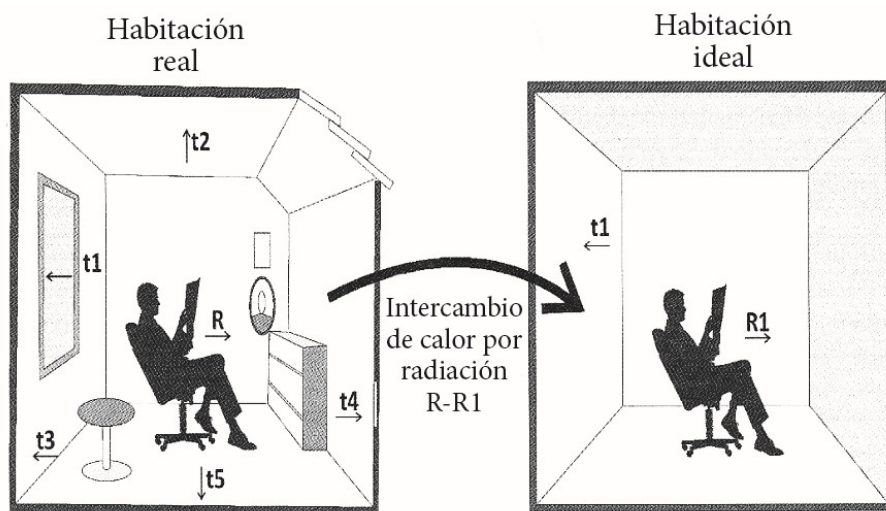


Figura 2.3. Esquema del concepto de temperatura media radiante.

### Temperatura del Aire Ambiente

El parámetro de mayor importancia en el confort es, casi siempre, la temperatura del aire ambiente, pues es el fluido directamente en contacto con toda la superficie corporal y al cual se le cede calor mediante el mecanismo de la convección. La tasa de calor depende de la diferencia de temperaturas



sólido-gas (ropa-aire), pero también está involucrada la velocidad del fluido, como puede advertirse cuando se usa un ventilador para aumentar la velocidad de transferencia. Si se quiere exactitud en la medición de la temperatura del aire se debe utilizar un termómetro con sensor blindado, evitando así efectos radiantes. Para cambiar la temperatura del aire se necesita de los procesos sicrométricos explicados: calentamiento sensible, enfriamiento sensible o con deshumectación, y enfriamiento evaporativo. Los efectos indeseables de asimetrías y variaciones temporales en la temperatura del aire se tratan en el aparte “Normatividad para el Confort Térmico”.

### Velocidad del Aire Ambiente

La tasa de calor transferido por convección desde el sujeto al aire ambiente depende del coeficiente de convección, el cual a su vez depende de la velocidad del fluido. A mayor velocidad del aire mayores coeficientes y tasa de calor cedido. Por lo anterior, es evidente la participación de la velocidad como factor del confort. Sin embargo, no resulta conveniente en muchos casos subir la velocidad por encima de valores que causan incomodidad, fenómeno conocido como ráfaga (draft), inconveniente que se presenta en el aparte “Normatividad para el Confort Térmico”. Una guía que orienta en la selección de velocidades de acuerdo las distintas aplicaciones es la Tabla 2.3, basada en [7] y [8], que puede aplicarse con precaución.

*Tabla 2.3. Recomendaciones sobre velocidad de aire [7] y [8].*

Velocidad de aire [m/s]	Percepción	Aplicación recomendada
0 - 0.08	Quejas por aire estancado	No
0.12	Favorable	Todas
0.12 - 0.25	Favorable en general	
0.35	Papeles que se mueven	No para oficinas
0.40	Aceptable para gente en movimiento moderado	Comercios
0.40 - 1.5	Grandes espacios	
La dirección es relevante. Buena: de frente. Aceptable: desde arriba. Regular: en la nuca.		

### Humedad del Aire Ambiente

Otro mecanismo del cuerpo humano para equilibrar condiciones externas es la transpiración. En este caso los poros permiten la salida del sudor que, al extenderse y evaporarse al medio ambiente, extrae de la piel el calor necesario para su cambio de fase, drenaje de energía calórica que pone su

cuota en el balance energético general. Cengel [2] recuerda que una persona en reposo produce algo más de un litro diario de sudor, cuyo calor latente de evaporación significa un efecto refrigerante de 30W. Sobre una base de 100W totales, valor corriente para el nivel de actividad mencionado y ya citado en la Figura 2.2, la fracción atribuible a la sudoración es entonces de un 30%. Este porcentaje, que crece en la medida en que la actividad se vuelve más viva, evidencia la importancia del mecanismo, a menudo olvidado en los balances.

Para que opere la refrigeración por evaporación del sudor emanado es necesario que el ambiente circundante tenga la capacidad de recibir el vapor a producir. La propiedad termodinámica del aire relevante para este fenómeno es la humedad relativa, cuya naturaleza se explicó en el capítulo “Fundamentos”. En la medida en que este parámetro sea menor, la evaporación es más ágil; en cambio, si el aire está cerca de la saturación, esto es que la humedad relativa ronde el 100%, no se producirá el cambio de fase sino que el sudor correrá líquido, y la incomodidad será inevitable. Los trabajos al respecto han dejado en claro que los valores medios de la humedad relativa son los propios para el confort, y los valores extremos se asocian con resequedad en las vías respiratorias o con ropa y piel húmedas, ambas situaciones seriamente inconfortables.

### INDICES DE CONFORT

Muy de acuerdo con [9] se reconoce que en el último siglo ha habido mucha investigación activa respecto a definir confort y cómo evaluar el stress térmico. Esos esfuerzos resultaron en varios modelos. Un gran número de índices fueron propuestos, muchos de los cuales estuvieron en uso en todo el planeta. Epstein y Moran (2006) [10] listan cuarenta, pero hay bastantes más. A continuación se presentan los índices más usados (Tabla 2.4), su descripción compacta y las referencias que pueden consultarse cuando haya algún interés particular. Sin embargo debe anotarse que para confort en interiores están prevaleciendo dos indicadores: PMV/PPD y adaptativo.

**Tabla 2.4. Índices de confort históricamente más utilizados.**

Método	Año, autor(es)	Descripción	Refs.
Temperatura Efectiva, ET (Effective Temperature)	1923/1924, Houghton & Yaglou [11]	ET es la temperatura de un ambiente estándar que contiene aire quieto saturado que provee la misma sensación térmica que el ambiente real. Se presentó en dos cartas: BET (Basic ET, x personas desnudas hasta la cintura) y NET (normal ET, para personas vestidas normalmente).	[13]
	1925, Yaglou & Miller [12]	Para considerar el efecto de la radiación, Vernon & Warner en 1932 introdujeron CET (Corrected ET), usando la 150mm black globe temperatura en lugar de la temperatura del aire (ver casilla correspondiente).	[14]
Temperatura Equivalente (Equivalent Temperature)	1929/36, Dufton [15]	Dufton inicialmente implementó un modelo cilíndrico negro calentado para imitar el comportamiento del cuerpo humano; Bedford, posteriormente, usando su escala de confort y encuestas en trabajadores, desarrolló la ecuación básica, después modificada por Chrenko (ver [6]) introduciendo la humedad, y por Nilsson [18]. La temperatura equivalente incluye efectos radiantes y de velocidad. $T_{eq} = 0.522 T_{ar} + 0.478 T_r - 0.21 \sqrt{V_{ar}} * (37.8 - T_{ar})$ donde: $T_{eq}$ : temperatura equivalente [°C]; $V_{ar}$ : velocidad aire[m/s]; $T_r$ : temperatura media radiante [°C]; $T_{ar}$ : temperatura aire [°C].	[19], [14]
	1936, Bedford [16]		
	1974, Chrenko [17]		
	2004, Nilsson [18]		
Temperatura resultante	1931/48, [20]	Índice de sensación térmica definido como la temperatura seca de un recinto ideal, pero con aire en reposo y muros a la misma temperatura del aire, que produce la misma sensación térmica que el recinto real con iguales presión de vapor, actividad y ropa. Engloba la temperatura seca, la temperatura radiante media y la velocidad del aire. $TR = T_s - 0,4 (T_s - 10) (1 - HR / 100)$ donde TR = temperatura resultante (°C); $T_s$ = temperatura de bulbo seco (°C); HR = humedad relativa (%)	[21], [14]
Corrected Temperature Effective, CET	1932, Vernon & Warner [22]	Las escalas de la Effective Temperature toman en consideración la temperatura, la humedad y la velocidad de aire. Los efectos de la radiación fueron incluidos en esta valoración, al sustituir la temperatura simple por la Temperatura Globo. Este cambio, introducido por Vernon & Warner-1932 y adoptado por Bedford-1946, dio lugar al índice Corrected Temperature Effective, CET.	[9]
	1946, Bedford [23]		
Wind Chill Index WCI	1945, Siple & Passel [24]	Derivado durante la Segunda Guerra Mundial, mediante experimentos con canecas de agua en condiciones antárticas, se trató de evaluar los efectos del enfriamiento en la gente. Combina los efectos de temperatura y velocidad del aire. Es ampliamente aceptado, pero una forma derivada recientemente es más usada: la temperatura chilling $t_{ch}$ , que es la temperatura en condiciones de calma que provee un efecto equivalente al ambiente real. Esta fórmula se diseñó específicamente para el cuerpo humano, o más específicamente para el rostro humano (la única parte desnuda del cuerpo cuando hace mucho frío).	[4], [14]
	2001, Oszcevs-ki & Bluestein [25]	La base física para el cálculo del <i>windchill</i> es la relación entre la temperatura y la velocidad del aire, usado por los servicios meteorológicos estadounidenses y canadienses se calcula mediante: $T_{ch} = 13.12 + 0.6215T - 11.37V^{0.16} + 0.3965TV^{0.16}$ Donde $T_{ch}$ es la temperatura de sensación en °C, T es la temperatura del aire, y V es la velocidad del viento en km/h con un anemómetro situado a 10 m de altura. La Tabla 2.5 también muestra las equivalencias.	
Índice de sobrecarga calórica (Heat stress index HSI)	1955, Belding & Hatch [26]	Este índice representa la relación entre la cantidad de calor que necesita evaporar por transpiración un hombre sometido a un ambiente con carga térmica determinada y la que puede eliminar como máximo en dicho ambiente. Está basado en el balance que caracteriza la tensión térmica, en el que intervienen los parámetros físicos que regulan los intercambios de calor entre el hombre y el medio ambiente. Se determina por medio de la ecuación: $HSI = (E_{req}/E_{max}) * 100\%$ , en donde: HSI = Índice de tensión térmica; $E_{req}$ = Calor de evaporación de la transpiración; $E_{max}$ = Calor de la máxima capacidad de evaporación en el ambiente laboral. Se parte de que la evaporación requerida = M + R + C En donde: M = Metabolismo total en kcal/hora R = Energía radiante (balance) en kcal/hora C = Energía intercambiada por convección en kcal/hora. Se mide directamente con el Extech HT30 (Ver Figura 2.4)	[14]

Continúa

Método	Año, autor(es)	Descripción	Refs.
Temperatura de globo y de bulbo húmedo, WBGT	1957, Yaglou & Minard [27]	Es un índice térmico muy importante. Se desarrolló para estimar el efecto de la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la radiación total (usualmente del sol) en condiciones de alta y/o prolongada demanda. Se usa por los higienistas industriales, atletas, y militares para determinar niveles de exposición apropiados a altas temperaturas. Se calcula mediante $WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_d$ , donde: $T_w$ = temperatura bulbo húmedo; $T_g$ = Temperatura Globo (también conocida como black globe temperature); $T_d$ = temperatura aire. Cuando la radiación solar es despreciable puede usarse $WBGT = 0.7 T_w + 0.3T_d$ . La <u>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</u> publica los valores umbral (threshold limit values TLVs) que han sido adoptados por muchos gobiernos; WGTB también está descrito por ISO 7243, y la <u>American College of Sports Medicine</u> basa sus guías en este índice. Se mide directamente con el Extech HT30 (Ver Figura 2.4.)	[14], [28]
Predicted Mean vote (PMV)	1970, Fanger [29]	Por su importancia se desarrolla por aparte a continuación	
New Effective Temperature ET*	1971, Gagge <i>et al</i> [30]	Es la temperatura de un ambiente estándar (RH50%, $t_a=t_r$ , $v<0.15$ m/s) que da un efecto equivalente con la persona en iguales condiciones de humedad de la piel, temperatura de piel, pérdida calórica de la piel, actividad sedentaria y ropa sencilla. Este índice incorpora una corrección por humedad de la piel. Lo anterior define una zona de confort para invierno y otra para verano, que se presentan gráficamente (modular comfort envelope). ET* es equivalente a SET en casos de actividad sedentaria (1.1 met), vestimenta ligera y baja velocidad de aire.	[4], [14]
Temperatura efectiva estándar, SET o SET*	1976, Gagge [31]	Creada como una extensión del índice ET* para incluir rangos de actividad y de ropas, el índice térmico Standard Effective Temperature SET* se define como la temperatura de un ambiente isotérmico con temperatura del aire igual a la temperatura media radiante, 50% RH y aire quieto ( $v<0.15$ m/s), en el cual una persona con nivel corriente de aislamiento por ropa tendría las mismas pérdidas de calor a la mismas temperatura y humedad de piel que las que tiene en el ambiente real con la ropa que está usando. Ver ecuaciones y tablas correspondientes en ref. [7]	[1], [13], [32], [14]
Adaptive Model	1998, Humphreys & Nicol [33]	Por su importancia se desarrolla por aparte a continuación	
Out Standard Effective Temperatura (OUT-SET*)	1999, Pickup & deDear [34]	El índice OUT_SET* provee representaciones fisiológicamente válidas de confort y stress <b>en exteriores</b> para casi infinitas combinaciones de temperaturas del aire y media radiante, humedad, velocidad del aire, aislamientos por ropa y tasas metabólicas. La gran diferencia con los espacios interiores es la radiación solar, y esta ha sido incluida en los cálculos de OUT SET* mediante un modelo separado de estimación de la temperatura media radiante para exteriores. El modelo calcula la temperatura uniforme de un encierro hipotético alrededor del sujeto parado, que intercambia la misma radiación infrarroja con el sujeto que el ambiente solar real complejo. Los detalles son accesibles en la red en la [34].	[32], [34], [35], [36]

Fuente: U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine.

Notas: Potencia de enfriamiento del ambiente expresada como temperatura equivalente bajo condiciones de calma [Ecuación (83)].

Vientos mayores de 70 km/h tienen muy poco efecto de enfriamiento incremental.



**Figura 2.4. EXTECH HT30. Instrumento para medición directa Wet Bulb Globe Temperature WBGT y Heath Stress Index HSI.**

“Las mediciones del HT30 Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) consideran los efectos de la temperatura, la humedad y la radiación directa del sol. También puede determinar el Heat Stress Index (HSI), el cual mide cómo se siente cuando la humedad se combina con la temperatura, el movimiento de aire, y el calor radiante. Black Globe Temperature (TG) monitorea los efectos de la radiación solar directa sobre una superficie. Una función in/out exhibe el valor WBGT con o sin exposición directa al sol.”

**Tabla 2.5. Temperatura windchill equivalente en ambientes fríos [1].**

Temperatura Windchill equivalente, °C													
Velocidad viento, km/h	Lectura real de termómetro, °C												
	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
calma	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
10	8	2	-3	-9	-14	-20	-25	-31	-37	-42	-48	-53	-59
20	3	-3	-10	-16	-23	-29	-35	-42	-48	-55	-61	-68	-74
30	1	-6	-13	-20	-27	-34	-42	-49	-56	-63	-70	-77	-84
40	-1	-8	-16	-23	-31	-38	-46	-53	-60	-68	-75	-83	-90
50	-2	-10	-18	-25	-33	-41	-48	-56	-64	-71	-79	-87	-94
60	-3	-11	-19	-27	-35	-42	-50	-58	-66	-74	-82	-90	-97
70	-4	-12	-20	-28	-35	-43	-51	-59	-67	-75	-83	-91	-99
Peligro menor: En menos de 5 h, piel seca. Peligro máximo la falsa sensación de seguridad (WCI < 1400)					Peligro creciente: riesgo de que la piel expuesta se congele en un minuto. (1400 ≤ WCI ≤ 2000)				Peligro máximo: la carne puede congelarse en 30 s. (WCI > 2000)				

En las evaluaciones de confort métodos PMV/PPD y Adaptativo se utilizan los parámetros conocidos como Temperatura Media y Temperatura Operativa (Top). A continuación se desarrollan esos conceptos.

**Temperatura Media** (Mean Temperature, en inglés). Es el promedio de las temperaturas del aire, medidas propiamente por un termómetro debidamente expuesto por un determinado período, usualmente un día, un mes o un año.

**Temperatura Operativa ( $T_{op}$ )** (Operative Temperature, en inglés). Es un valor representativo entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura radiante de un espacio. La ref. [203] presenta expresiones para dos casos particulares y un caso general. Para el caso general:  $T_{op} = A \cdot T_a + (1-A) \cdot T_r$ , siendo  $T_a$  = temperatura media del aire;  $T_r$  = temperatura media radiante;  $A$  (función de la velocidad del aire) es: 0.5 (<0.2 m/s), 0.6 (0.20-0.6m/s), 0.7 (0.6-1 m/s).

Otra expresión muy conveniente es presentada por Cengel [2] en términos de los coeficientes de convección y radiación, y los factores de forma del espacio en cuestión. Nótese que se conserva la suposición de que las superficies se comportan como cuerpos negros, lo cual, como ya se dijo, debe usarse con precaución.

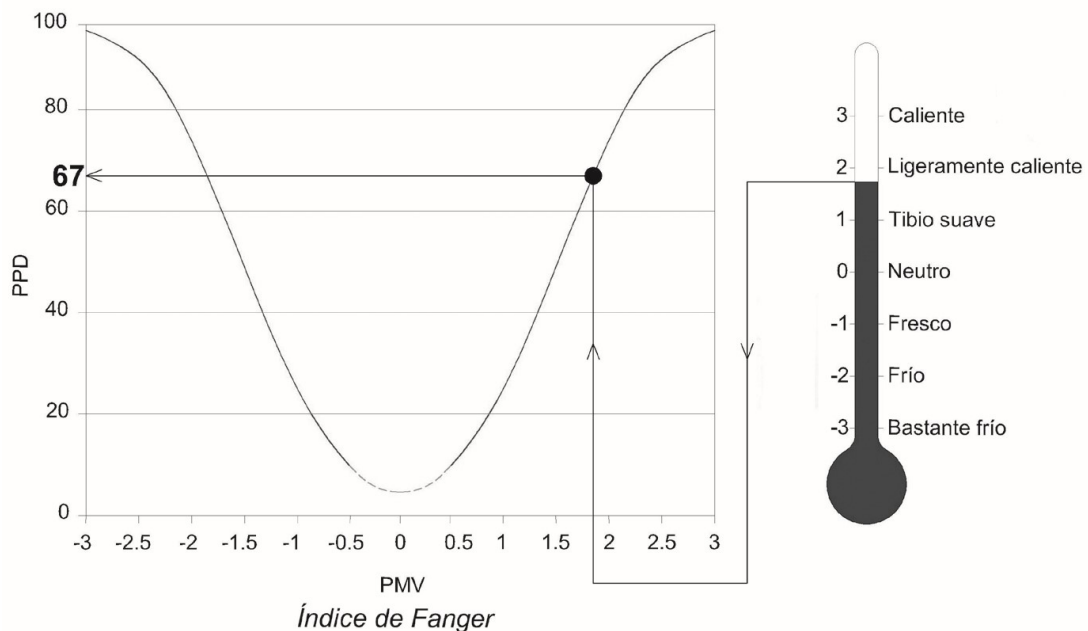
### **Método PMV/PPD**

El método PMV/PPD es el único procedimiento reconocido por el ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 para la evaluación de confort en edificios climatizados con sistemas mecánicos e híbridos. Para edificios con exclusivamente ventilación natural el estándar solo reconoce como procedimiento de evaluación de confort el Método Adaptativo.

El índice de valoración media PMV de Fanger, relata Kate [6], fue desarrollado en los años 70's con base en ensayos de laboratorio y cámaras ambientales. En algunos casos se fijaba un ambiente determinado y los participantes manifestaban cómo se sentían, y en otros casos ellos controlaban las condiciones hasta sentirse "térmicamente neutros". La calificación se hacía sobre la escala de sensación térmica ASHRAE (frío=-3, fresco=-2, ligeramente frío=-1, neutro=0, ligeramente caliente=+1, tibio=+2, caliente=+3).

El modelo matemático desarrollado, que representa el comportamiento y está basado en el balance de calor y la termorregulación, combina las cuatro variables físicas (temperatura, humedad, velocidad del aire y temperatura media radiante) y las dos personales (actividad y ropa) en un índice que, de acuerdo con la escala ASHRAE mencionada, predice la sensación de confort térmico de un gran grupo de personas. Fanger usó los datos del estudio de McNall, Jaax, Rohles, Nevins and Springer (1967) [37] y derivó una relación lineal entre actividad y sudoramiento, y la introdujo en las ecuaciones de balance térmico para finalmente crear su "ecuación de confort". Esta describe todas las combinaciones de los seis parámetros que resultan en una sensación neutra. Dicha formulación fue convalidada al contrastarse con estudios de Nevins, Rohles, Springer and Feyerherm (1966) [38] realizados en distintos campus.

Fanger también desarrolló un índice relacionado con el anterior, bautizado como Porcentaje de Insatisfechos PPD, el cual se calcula a partir del PMV y vaticina el porcentaje de gente insatisfecha con las condiciones térmicas existentes. PMV y PPD conforman una relación que gráficamente tiene forma de U, donde el porcentaje de insatisfechos se incrementa en la medida en que el PMV difiere de cero (el valor neutro). Un ejemplo se muestra en la Figura 2.5. Es de anotar que no existe una combinación de condiciones térmicas en la cual todos los involucrados se sienten satisfechos; el valor mínimo de insatisfechos esta alrededor de 5%, como también se muestra en dicha figura.



**Figura 2.5. relación PMV/PPD (p.e., a PMV 1.8 corresponde a 67% insatisfechos).**

Fuente: Gamboa *et al.* [207]

Desde que el modelo PMV/PPD fue desarrollado, muchos estudios fueron conducidos para verificar su validez. Kate [6] enumera 36, pero pueden ser muchos más. Con respecto a las conclusiones hay posiciones contrapuestas. Por un lado, el mismo Kate sostiene que, aunque las primeras verificaciones arrojaron buenas correspondencias, recientes estudios de laboratorio mostraron discrepancias: por ejemplo, Doherty & Arens (1988) [39] las cuantificaron tanto como 1.3 unidades de escala; un review de Humphreys (1994) [40] observó en 8 cámaras ambientales diferencias entre 0.8° C hacia abajo y 3° C hacia arriba, y también notó que había más diferencias cuando la ropa era más pesada y las actividades más fuertes. Kate concluye que el índice PMV tiende a sobreestimar las necesidades de climatización, y que “es mucho más aplicable a edificios con aire acondicio-

nado que a aquellos con ventilación natural, debido en parte a la influencia de la temperatura exterior y a las oportunidades para adaptación”. En contraposición, Hedge (2010) [13] y Howell *et al.* (1979) [41] relatan que estudios de campo de la ecuación de Fanger mostraron solo una varianza de 6% en sus estimaciones de confort respecto a los reportes, y que las variables demográficas (sexo, edad) no eran significativas mientras que las variables psicológicas podían, en cambio, afectar en mayor cuantía. Esta discusión fue, si no zanjada, por lo menos pospuesta a partir del reconocimiento y la inclusión del PMV como criterio dentro de los últimos estándares ISO 7730 y ANSI/ASHRAE 55-2013 [Parsons [14], Ashrae std. [1]]. Esto le confiere al modelo autoridad, eso sí dentro de las restricciones señaladas por tales normativas (ver subcapítulo correspondiente).

Para aplicar el índice PMV/PPD están disponibles varias herramientas computacionales de facilísimo acceso en la red. Las dos más elegantes y amigables, que no solo permiten evaluaciones sino también análisis de sensibilidad, son el “CBE Thermal Comfort Tool”, del Center for the Built Environment, University of California Berkeley, y el “PsychoTool”, del Informer Technologies, Inc. También es una buena herramienta de acceso libre el “PMVCalc\_v2”, de la University of Gavle. En el subcapítulo “Herramientas Computacionales para Evaluación del Confort” se describen algunas aplicaciones.

No obstante la excelente calidad de los programas, todos ellos asumen en el cálculo de temperatura radiante que las emisividades son las del cuerpo negro, lo que conlleva alguna imprecisión.

### **Metodo adaptativo**

El Método Adaptativo es el único procedimiento reconocido por el ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 para la evaluación de confort en edificios con ventilación exclusivamente natural. Para edificios climatizados con sistemas mecánicos e híbridos el estándar solo reconoce como procedimiento de evaluación de confort el método PMV/PPD.

Es de anotar que una buena cantidad de autores consideran el Método Adaptativo no como una alternativa aplicable solo a edificios ventilados naturalmente sino como un nuevo paradigma para la evaluación de confort en cualquier situación (Nicol & Humphrey [42]). Su nombre se deriva de considerar a los ocupantes como componentes integrales del sistema de confort. Los procesos adaptativos, plantea Nicol & Humphrey, fueron clasificados por [43] como fisiológicos (aclimatación), de comportamiento (uso de ventanas ajustables, ventiladores, puertas, toldos, etc.), y psicológicos (ajuste de expectativas de confort según las condiciones climáticas



prevalecientes en el interior y en el exterior). Los *papers* originales del modelo adaptativo fueron publicados por Humphrey y Nicol en los años 70's; ellos encontraron y describieron una fuerte relación entre las temperaturas interiores confortables (denominadas neutralidad) y las temperaturas representativas prevalecientes en el interior y, en casos de ventilación natural, con las temperaturas representativas mensuales del exterior.

Auliciems (1981) [44] , y Humphrey (1994) [40], propusieron respectivamente las siguientes expresiones:

$$T_n = 9.22 + 0.48T_a + 0.14 T_{mmo}$$

$$T_n = 23.9 + [0.295(T_{mmo} - 22)]/e^{-[(T_{mmo}-22)/24*\text{SQRT}(2)]^2},$$

donde  $T_n$  = temperatura neutral;  $T_a$  = temperatura del aire; y  $T_{mmo}$  = temperatura exterior mensual representativa.

La versión actual de las ecuaciones se encuentra en el ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, numeral 5.4. La aproximación adaptativa cobró importancia en el contexto mundial de la práctica y la investigación en confort cuando ASHRAE comisionó a deDear y Brager, a mediados de los años 90's, para desarrollar un modelo adaptativo riguroso a partir de datos de campo totalmente confiables recopilados en todo el mundo. Una segunda intención era detallar el modelo matemático teórico, que hasta ese momento no había sido claramente presentado. El *paper* resultado de este trabajo está clasificado como el más frecuentemente citado dentro de la literatura del confort térmico (deDear y Brager, 1998 [43]). Después de incontables iteraciones y mejoras, el comité a cargo del estándar 55 de la ASHRAE (SSPC55) accedió a incluirlo en el estándar de 2004 como opción para edificios que no tuviesen instalados equipos mecánicos de enfriamiento. Lo anterior elimina la posibilidad de aplicarlo en edificios modo-mezclado (se refiere a edificios con sistemas híbridos, esto es, que combinen ventanas manuales con otros dispositivos mecanizados o automatizados). Un par de años después, un proyecto europeo llamado SCATS ( [45], 2002) replicó el ejercicio descrito en un universo de 26 oficinas en Francia, Reino Unido, Grecia, Portugal y Suecia, a lo largo de un año; la intención fue proveer la base empírica de un estándar adaptativo exclusivamente europeo, el EN 15251, publicado en 2007 (CEN, 2007). Tanto EN 15251 como ASHRAE 55 contenían simples ecuaciones lineales relacionando temperaturas aceptables del interior de edificios ventilados naturalmente con temperaturas exteriores prevalecientes, con aparentemente un alto grado de coincidencia y similitud. Sin embargo se detectaron diferencias, atribuibles al número de casos de estudio, que para el trabajo europeo no era suficientemente grande.

Implícita en el modelo adaptativo está la hipótesis de que los ocupantes de un edificio naturalmente ventilado alcanzan confort en un rango de temperaturas interiores más ancho que los ocupantes de uno con sistemas centrales de climatización, debido a los niveles incrementados del control personalizado que tienen de las ventanas. Baguer *et al.* (2004) condujeron un estudio de campo con ventanas operadas manualmente, encontrando que a diferentes grados de control personal se daban diferentes respuestas térmicas, aunque todo el personal experimentara el mismo ambiente, vistiera ropajes con equivalente aislamiento y ejecutara las mismas actividades. Este tipo de hallazgos ofrece suficiente soporte empírico sobre el papel del control de ventanas en las expectativas de confort.

Desde la publicación del año 1998 de ASHRAE (refrendada en 2013, [46]) sobre el modelo adaptativo, los defensores de este enfoque critican la cruda bifurcación de los edificios entre ‘controlados centralmente’ y ‘naturalmente ventilados’, pues dejó a los primeros (que son la gran mayoría) por fuera del alcance del método adaptativo. Numerosos autores alegan que las correlaciones de este método son estadísticamente mejores que las demás.

Para aplicar el método adaptativo hay disponible una herramienta computacional de muy fácil acceso en la red. Además de elegante y amigable, este software permite análisis de sensibilidad: se trata del “CBE Thermal Comfort Tool”, del Center for the Built Environment, University of California, Berkeley. En el subcapítulo “Herramientas Computacionales para Evaluación del Confort” se describe su aplicación.

### **NORMATIVIDAD SOBRE CONFORT TÉRMICO**

La normatividad sobre confort humano se centra en dos estándares de reconocida calidad, cubrimiento y aceptación: el EN 15251 para Europa, y el ANSI/ASHRAE 55 para América y el resto del mundo. En razón de que nuestro entorno geográfico-técnico está muy asimilado a la cultura americana, se presenta el estándar ANSI/ASHRAE en su última versión, la de 2013 (52 págs.). El siguiente cuadro (Tabla 2.6), resume en forma sucinta pero completa la normatividad.

**Tabla 2.6. Resumen estándar ANSI/ASHRAE 55, 2013.**

ANSI/ASHRAE STD 55. 2013 Condiciones Térmicas Ambientales para Ocupación Humana	1. PROPÓSITO: Especificar la combinación de factores interiores y personales que producirán condiciones térmico-ambientales aceptables a la mayoría de ocupantes.						
	2. ALCANCE: el Std. Maneja 6 factores (T, HR, y Vel. aire; radiación, Met, Clo); aplica hasta 3000 m de altura; no incluye luz, ruido, limpieza, etc.						
	3. DEFINICIONES (terminología)						
	4. REQUERIMIENTOS GENERALES: documentación, espacios involucrados, ocupantes representativos, parámetros.						
	5. Condiciones que proveen confort térmico	5.1 Requerimientos Generales: Aplicabilidad de los métodos; 6 factores relevantes.					
		5.2 Método para determinar las características de los ocupantes	5.2.1 Tasa metabólica	5.2.1.1 Ocupantes representativos			
				5.2.1.2 Tabla 5.2.1.2			
				5.2.1.3 Promedio ponderado			
				5.2.1.4 Std. no aplica si Met >2			
		5.2.2 Aislamiento por ropa	5.2.2.1 Ocupantes representativos				
5.2.2.2 Tablas 522A y 522B y 522C							
5.2.2.3 Std. No aplica si Clo >1.5							
5.3 Método General para determinar condiciones térmicas aceptables en espacios ocupados		5.3.1 Método Grafico Zona Confort	Aplica si $1 < Met < 1.3$ ; $.5 < Clo < 1$ ; $Vel < .2 \text{ m/s}$ y $w < 12 \text{ g/kg}$ Zona aceptable Fig. 5.3.1 dependiendo de Taire, w, Clo				
		5.3.2 Método analítico Zona Confort	Aplica si $1 < Met < 2$ y $Vel < .2 \text{ m/s}$ Código computador para normativa en apéndice B ref.4 Ashrae Thermal Comfort Tool ( $-.5 < PMV < +.5$ aceptable, igual a PPD <10%)				
	5.3.3 Velocidad de aire elevada	Vel >.2m/s	Resulta en temperaturas permisibles más altas (fig 533A)	usa modelo SET de ASHRAE thermal confort tool	Met >1.3 → Vel sin límite Met <1.3 +control Vel → Vmax=1.2m/s Met <1.3 sin control → si Taire <22.5°C → Vmax=.15m/s; si Taire entre 22.5 y 25.5°C → ec.5.3.3.2; si Taire >25.5°C → Vmax.8m/s		
	5.3.4 Disconfort térmico local	Aplica si Clo <.7 y Met <1.3	Asimetría Triangulante: dif T cielo/piso/muros/aire según tabla 5.3.4.2 Draft: si Taire <22.5°C → Vel <.15 m/s Dif temperaturas tobillo/cara <3°C y Tpisos entre 19°C y 29°C				
	5.3.5 Variaciones temporales de la temperatura	5.3.5.1 aplica cuando no hay control de Temp por ocupantes					
		5.3.5.2 amplitud Temp ciclo <1.1°C si periodo < 15 min					
5.3.5.3 rampas de Temp aire cumplirán tabla 5.3.5.3							
5.4 Determinación de condiciones térmicas aceptables en espacios naturalmente climatizados y controlados por ocupantes	Aplica si $1 < Met < 1.3$ , sin climatizadores, Clo libre entre .5 y 1, $10^\circ\text{C} < T_{\text{exterior}} < 33.5^\circ\text{C}$		Temp aceptables en Fig.5.4.2 o ecuaciones 5.4.2.2 Xingresar: $T_{pma} = f(\text{Text.media}, \text{Text } 7 \text{ a } 30 \text{ días})$ ; cálculos y/o gráficos límites Taire (ec.5.4.2.2 o fig.5.4.2); si $.6 < Vel < 1.2$ calcular cambio Tair de T5.4.2.4				
6. CONFORMIDAD DEL DISEÑO Documentación	Diseño	Los sistemas seleccionados deben ser capaces de mantener los rangos					
	Establecer: -a) el método (5.3.1, 5.3.2 o 5.3.4); -b) Taire, HR, Text, cargas, periodo aceptable fuera de condiciones; -c) Vel, Clo, Met; -d) Disconfort local; -e) equipos; -f) control Vel; -g) variaciones 5.3.4 y 5.3.5						
7. EVALUACIÓN DEL CONFORT EN EDIFICIOS EXISTENTES. Introducción. Criterios [por encuestas; por mediciones (acondicionamiento mecánico o natural)]. Diagnóstico [por encuestas; por mediciones(acondicionamiento mecánico o natural)]							

APÉNDICES DEL ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013 (*: son parte del standard, los otros apéndices no lo son)	
APÉNDICE A*	Determinación de temperatura operativa. $t_o = T_{aire}$ si no-panele radiantes + $SHGC < .48 + U_w < 50 / (t_{di} - t_{de})$ ; $t_o = A * T_{aire} + (1-A)tr$ , donde $A = f(Vel)$ tabla p.16; $t_o = (T_{aire} + Tr) / 2$ si Met entre 1 y 1.3
APÉNDICE B*	Programa de computador para calcular PMV/PPD. Es el mismo anexo D del ISO 7730 que dio permiso. Para información adicional y versión I-P ir a <i>Ashrae Thermal Comfort Tool</i> . Son 62 líneas + un ejemplo (los resultados que generaron la Fig. 5.3.1)
APÉNDICE C	Condiciones que proveen confort (prácticamente un resumen de 5.3)
APÉNDICE D	Uso de datos sobre metabolismo (prácticamente un resumen de 5.2.1)
APÉNDICE E	Aislamiento por ropa: métodos para cálculo de Clo y cambios en $t_o$ . Amplía y complementa a 5.2.2
APÉNDICE F	Determinación de condiciones aceptables para interiores. 6 parámetros para establecer confortabilidad; métodos gráfico y analítico; curva relación PMV/PPD; equivalencia entre software responsabilidad del usuario; límite humedad
APÉNDICE G	Evaluando efecto enfriador de la Vel. Método SET. Explica procedimiento, da programa; aconseja sobre aproximar y diversas alturas
APÉNDICE H	Disconfort local y temporal. Ampliación de 5.3.4 y 5.3.5 (asimetría radiante, ráfaga, variación vertical, variaciones cíclicas, rampas)
APÉNDICE I	Espacios naturalmente ventilados con control por ocupantes. Cálculo de $t_{pma(out)}$ promedios normal/mensual/ponderado reciente
APÉNDICE J	Formatos sugeridos para reportar resultados de evaluación del confort en el diseño
APÉNDICE K	Mediciones, encuestas y evaluación del confort en espacios existentes. Incluye procedimientos, formatos, directrices para cálculos
APÉNDICE L	Bibliografía y referencias
APÉNDICE M	Resumen de las 18 adendas publicadas desde 2010

En Colombia aplica la NTC – 5316, “CONDICIONES AMBIENTALES TÉRMICAS DE INMUEBLES PARA PERSONAS”, 2004-12-01, I.C.S.: 23.120.00. Esta norma “es una adopción idéntica (IDT) por traducción de la norma ANSI/ASHRAE 55”. Es de resaltar que en ella se dejaron explícitas las condiciones térmicas interiores de aceptabilidad, pues en su texto se lee: “1. ALCANCE Esta norma especifica las combinaciones de factores personales y ambientales en espacios interiores, *que producirán condiciones ambientales térmicas aceptables para el 80 % o más de los ocupantes dentro de un espacio.*”

## HERRAMIENTAS DE CUANTIFICACIÓN NUMÉRICA DEL CONFORT

La valoración del confort, ya sea como un pronóstico dentro de un diseño, o como la evaluación en un edificio existente, es una labor dispendiosa, que necesita obligatoriamente la asistencia de una herramienta sistematizada. Y es que *hacer evaluación del confort* no se trata solamente de tomar unos datos fijos y calcular un índice sino de explorar unos rangos donde variables y parámetros toman distintos valores y le permiten al ingeniero visualizar un universo de posibilidades técnicas y económicas. Además, dentro de una controversia general acerca de la validez de distintos métodos resulta por lo menos interesante comparar cómo diagnostican su ambiente térmico particular las distintas herramientas. Todo lo anterior solo se hace posible si se conocen, se manejan y se interpretan hábilmente los distintos softwares.

La herramienta computacional más elegante, de fácil acceso, amigable y completa es el “CBE Thermal Comfort Tool”. Esta magnífica producción, además, alerta permanentemente sobre cumplimiento o incumplimiento de las distintas normativas (ANSI/ASHRAE y/o EN-15251). Como está presentada bajo atributo de Creative Commons (CC) es totalmente gratuita (CC es una organización para compartir, sin costo, creatividad y conocimiento). Sus autores son Tyler Hoyt, Stefano Schiavon, Alberto Piccioli, Dustin Moon y Kyle Steinfeld, del Center for the Built Environment, de la University of California, Berkeley, 2013. Se puede acceder a ella en [47]. Las Figura 2.6, Figura 2.7, Figura 2.8, Figura 2.9, Figura 2.10, Figura 2.11,

Figura 2.12 y Figura 2.13 muestran distintas situaciones que son posibles de analizar: la primera corresponde al método PMV y estándar ANSI/ASHRAE 55-2013, suministrando las temperaturas del aire y media radiante; en la segunda se cambia especificando temperatura operativa; en la tercera nos trasladamos al Método Adaptativo ingresando temperatura del aire y temperatura media radiante; en la cuarta se cambia aportando temperatura operativa. Las últimas cuatro figuras siguen la misma secuencia, pero en referencia al estándar EN-15251. El cursor indica la resultante de las condiciones térmicas existentes, y si está en zona de confort.

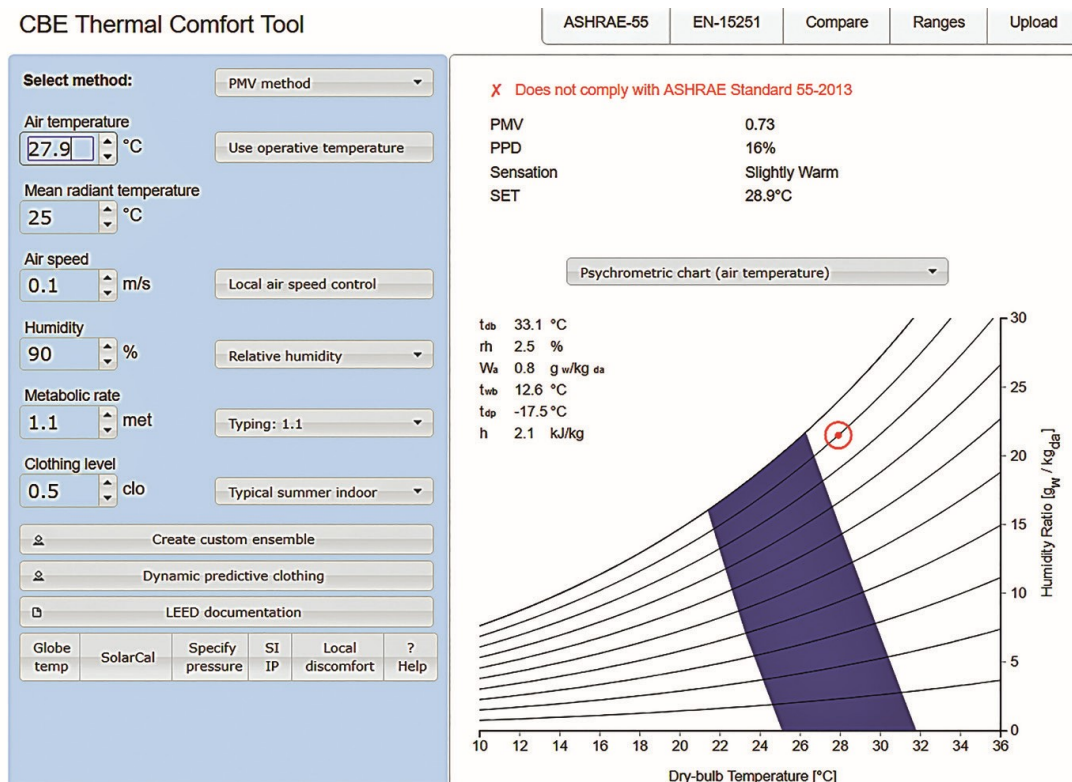


Figura 2.6. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar ASHRAE; inputs: Taire, TMR, Vel.aire, HR, Met, Clo.

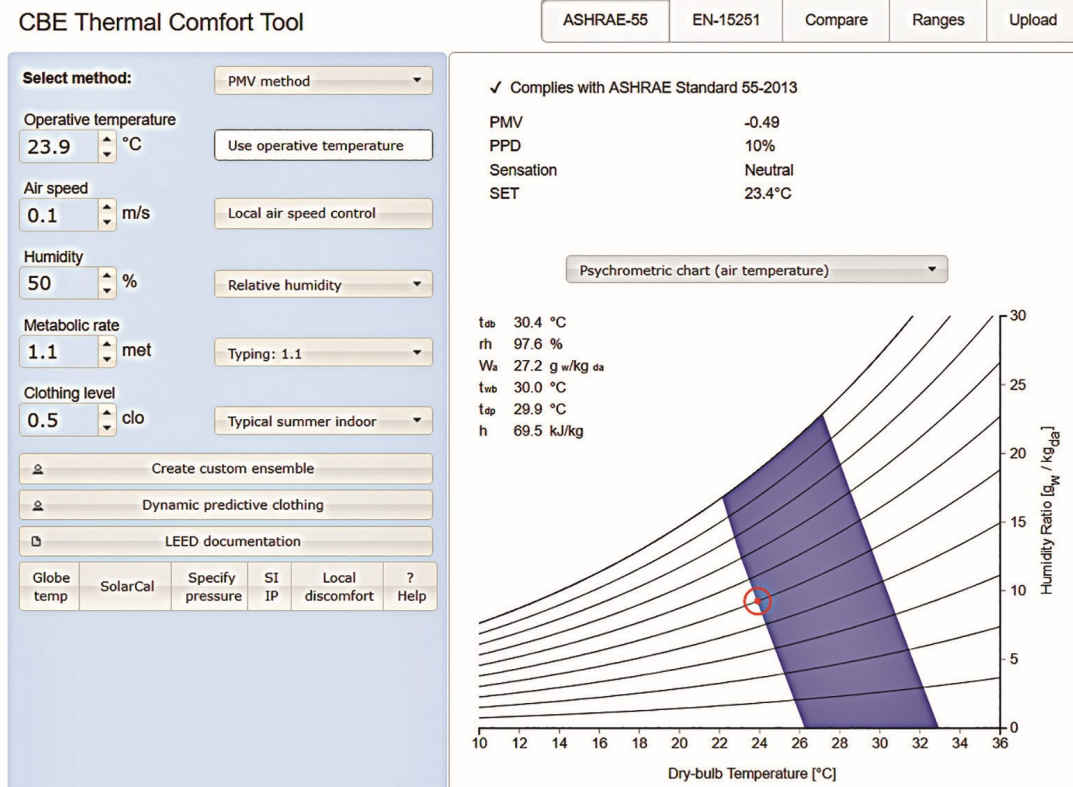


Figura 2.7. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar ASHRAE; inputs: Operativa, Vel. aire, HR, Met, Clo.

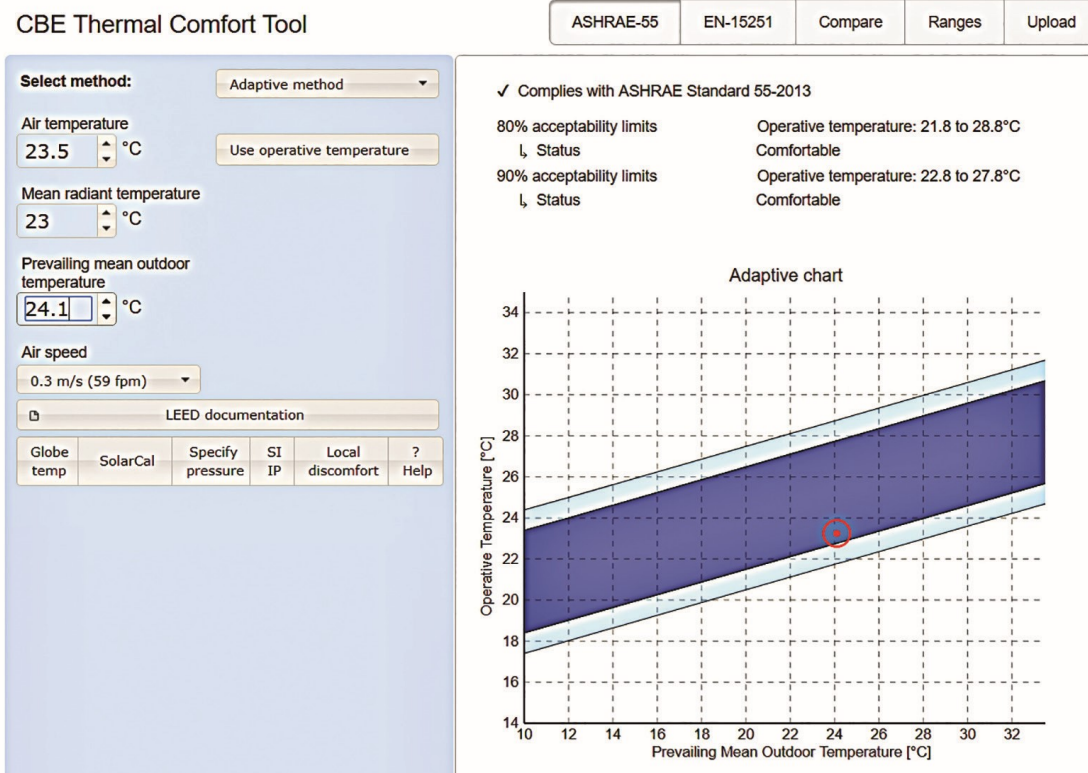


Figura 2.8. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar ASHRAE; inputs: Taire, TMR, T media exterior, Vel. aire.

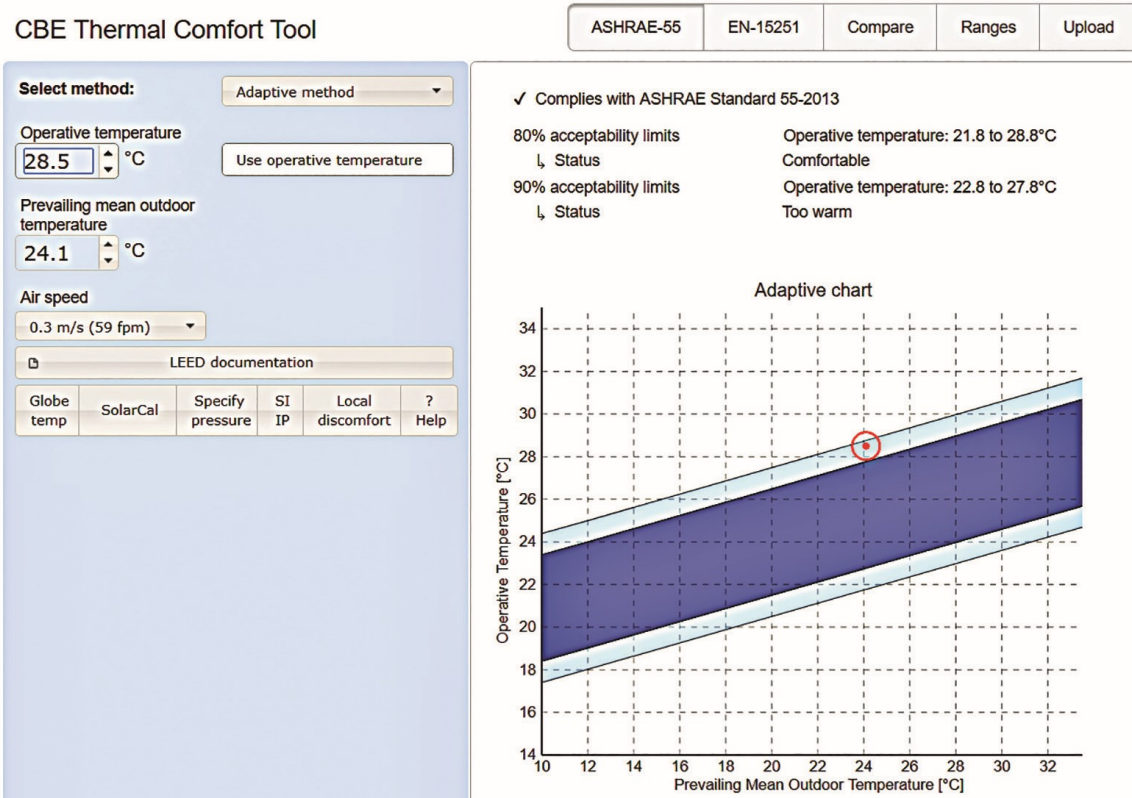


Figura 2.9. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar ASHRAE; inputs: Operativa, T media exterior, Vel. aire.

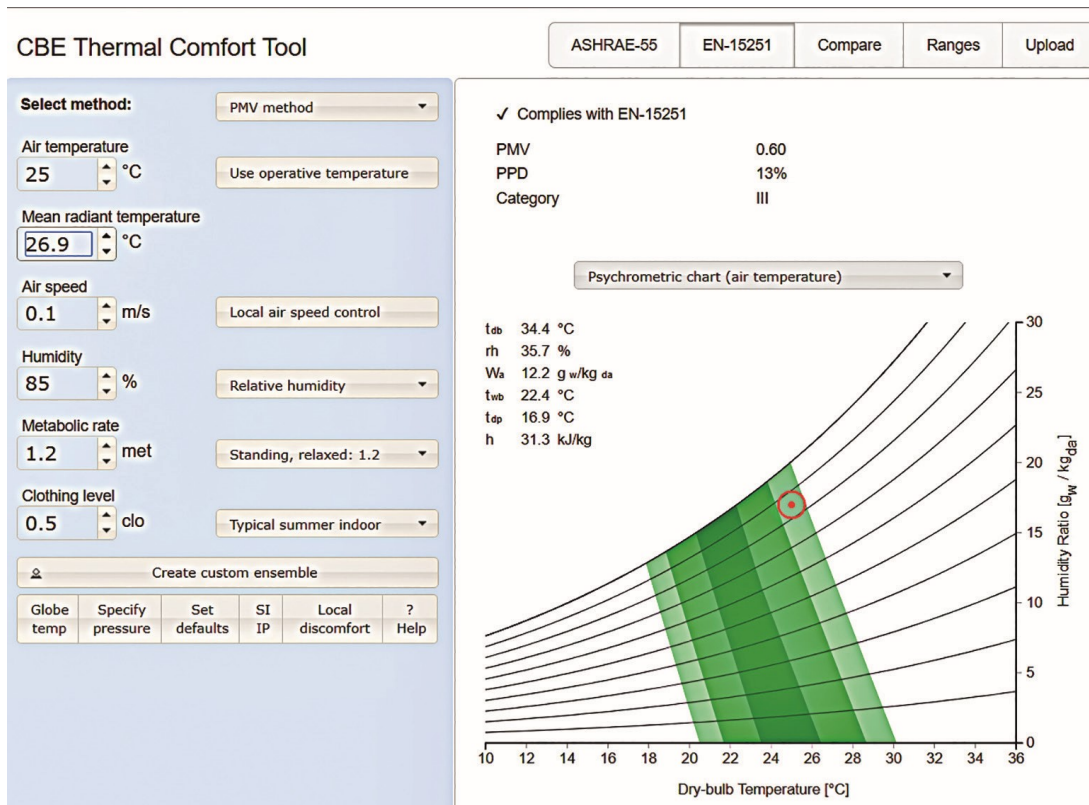


Figura 2.10. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar EN-15251; inputs: Taire, TMR, Vel.aire, HR, Met, Clo.

CBE Thermal Comfort Tool

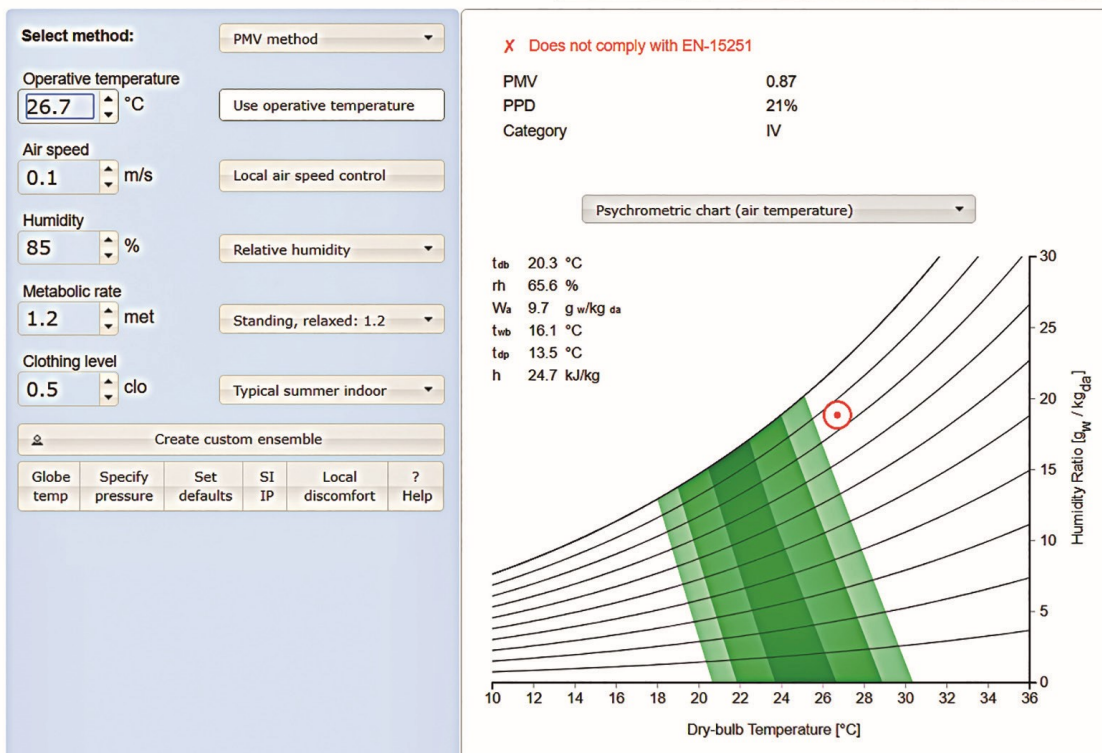


Figura 2.11. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar EN-15251; inputs: Toperativa, Vel. aire, HR, Met, Clo.

CBE Thermal Comfort Tool

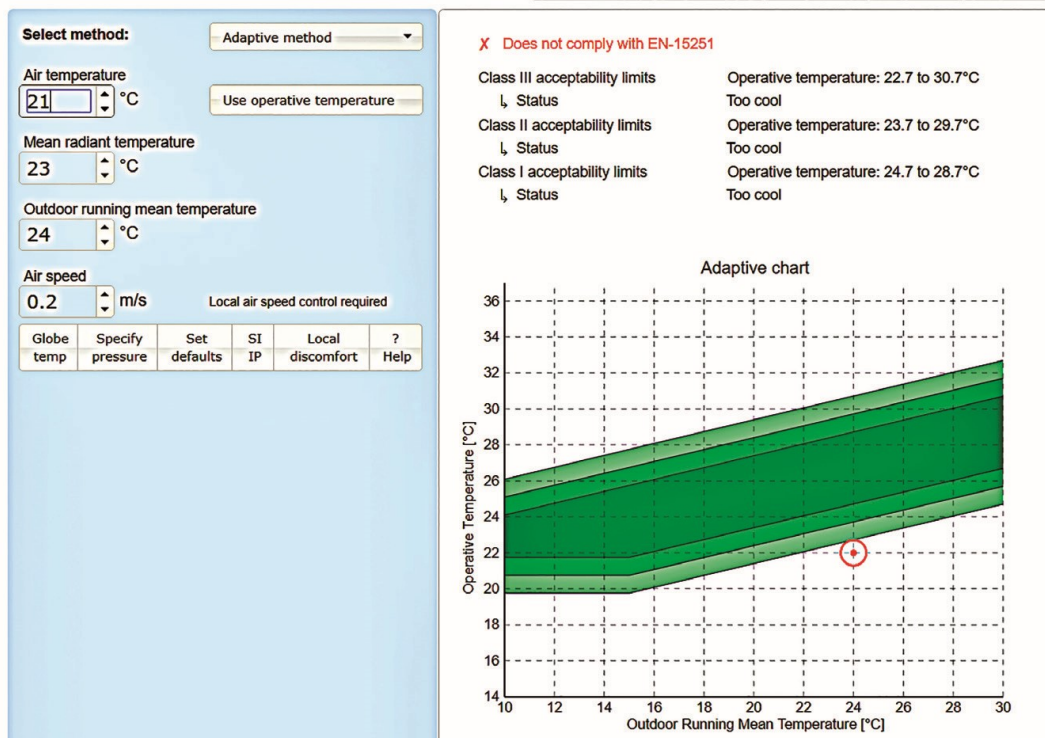
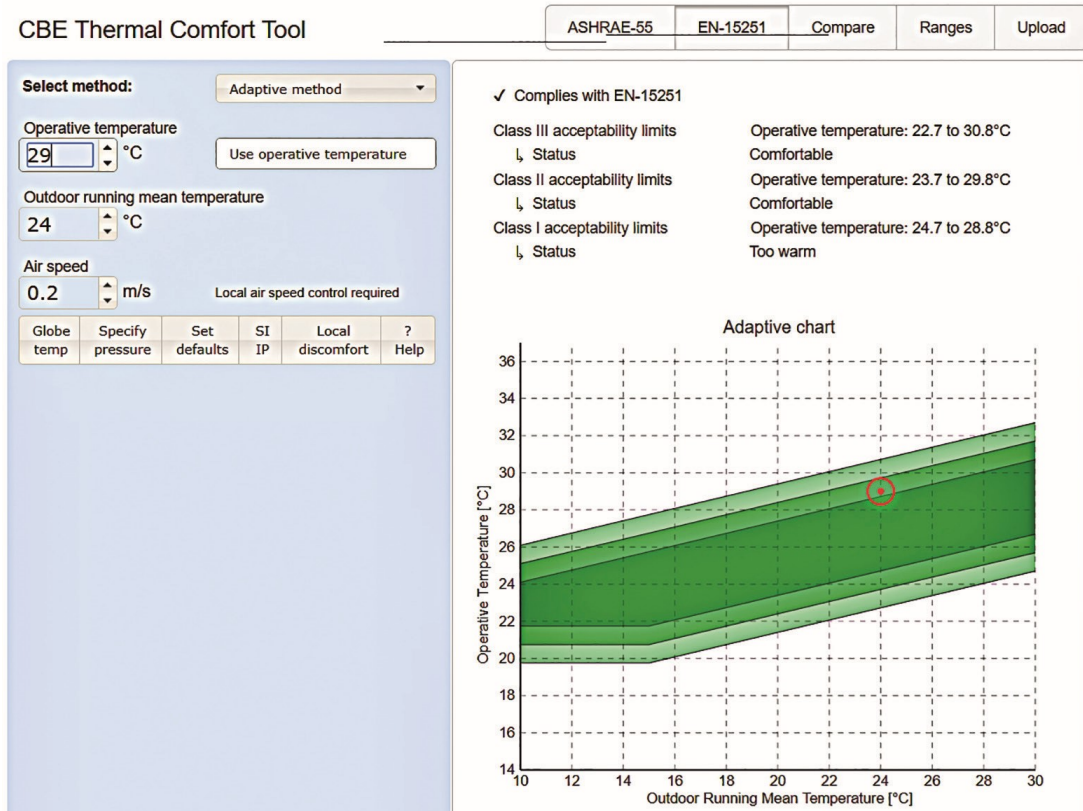


Figura 2.12. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar EN-15251; inputs: Taire, TMR, T media exterior, Vel. aire.



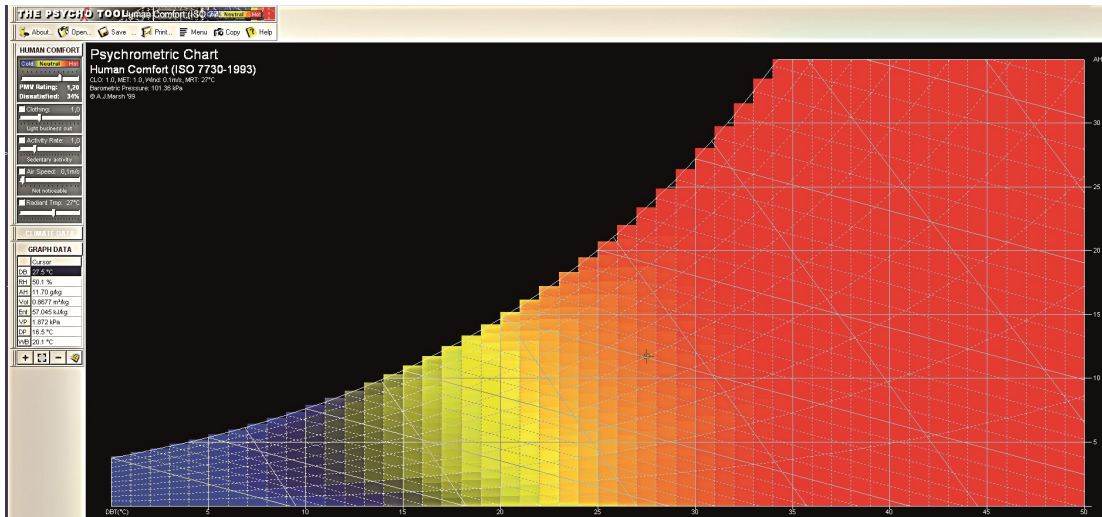


**Figura 2.13. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar EN-15251; inputs: Toperativa, T media exterior, Vel. aire.**

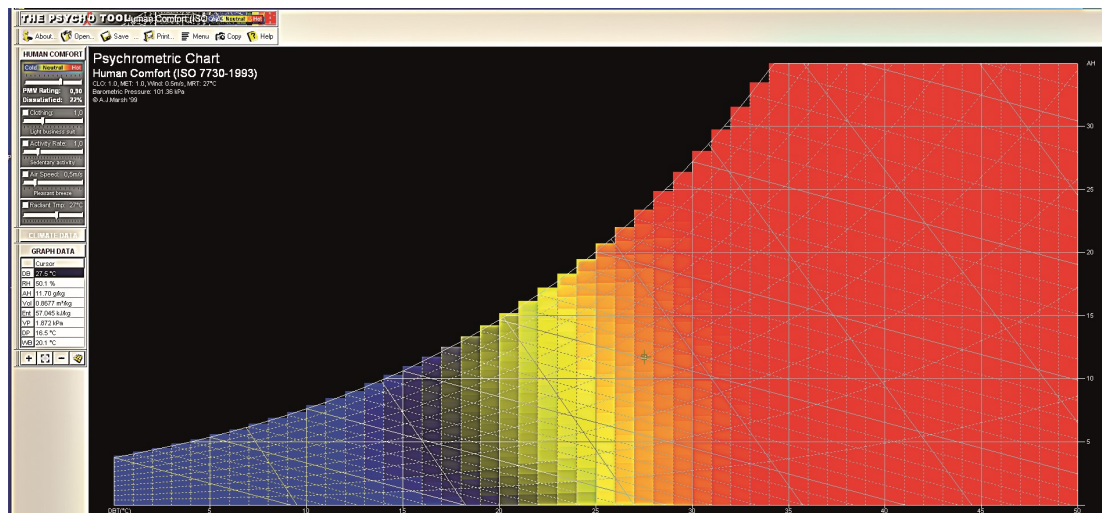
Otra herramienta de excelente calidad por agilidad, amistad y ayuda en los análisis de sensibilidad es el “PsychroTool”, de Informer Technologies, Inc. [48]. Como los parámetros de funcionamiento se alimentan simplemente ubicándose en la respectiva barra, e inmediatamente se despliega la descripción de la opción escogida, resulta muy fácil visualizar el efecto de cualquier cambio escogido. El psychrotool trabaja con el índice PMV/PPD. Las Figuras 2.14, Figura 2.15, y Figura 2.16 ilustran el efecto de hacer un cambio de velocidad de aire en una situación específica.

También es una buena herramienta de acceso libre, aunque su interfaz gráfica sea mucho más sencilla, el “PMVCalc\_v2” de la University of Gavle. La Figura 2.17 muestra un ejercicio con este programa.

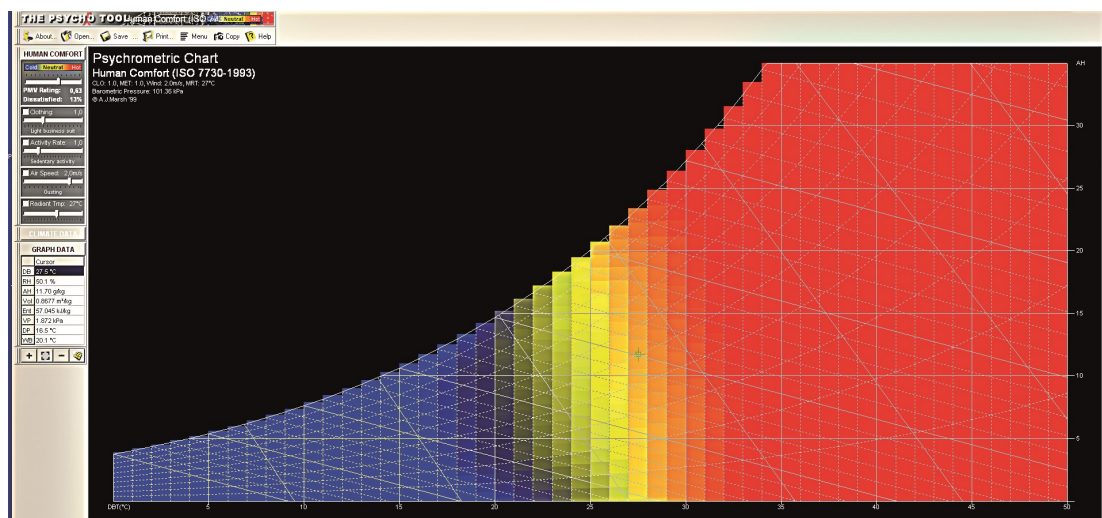
Como se expuso en la sección “FUNDAMENTOS”, la valoración de la Temperatura Media Radiante conlleva cierta dificultad, pues se depende de un buen número de parámetros. Los autores (y sus tesis) hemos desarrollado un software que evalúa la Temperatura Media Radiante para una persona en el centro de un cuarto que tiene en cuenta, distinto de otros, la emisividad de las distintas superficies. Próximamente lo compartiremos en la página web de la universidad.



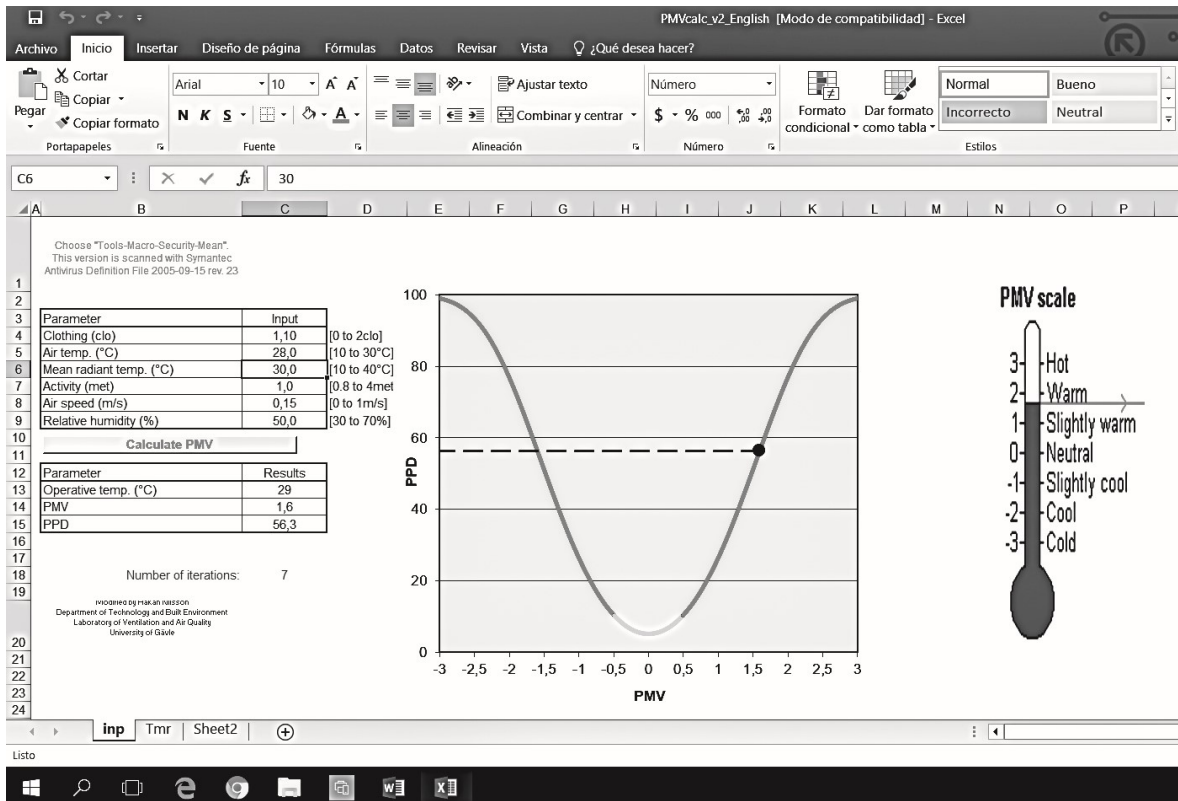
**Figura 2.14. Evaluación del confort. Método PMV; estándar ISO 7730; inputs fijos: Taire, TMR, HR, Met, Clo. Input variable: Vel.aire= 0.1 m/s.**



**Figura 2.15. Evaluación del confort. Método PMV; estándar ISO 7730; inputs fijos: Taire, TMR, HR, Met, Clo. Input variable: Vel.aire= 0.5 m/s.**



**Figura 2.16. Evaluación del confort. Método PMV; estándar ISO 7730; inputs fijos: Taire, TMR, HR, Met, Clo. Input variable: Vel.aire= 2.0 m/s.**



**Figura 2.17. Evaluación del confort. Método PMV; programa “PMVCalc\_v2” de la University of Gavle.**

