

Titulo: “Spot Monitoring. Evaluación del confort térmico en edificios de oficina”

Seudónimo: “Resumen”

RESUMEN

En Alemania la optimización para el funcionamiento energético de los edificios conduce a cumplir estrictamente los requerimientos de confort térmico que propone la norma DIN EN ISO 7730:2006 (procedente de la ISO 7730), sin considerar el diagnóstico que puedan emitir los usuarios. En este trabajo de campo, se lleva a cabo un relevamiento del confort térmico en el período de invierno, en 345 espacios de trabajo, distribuidos en 25 edificios de oficina. El método consiste en mediciones y encuestas simultáneas a los usuarios mediante el uso de una unidad móvil equipada con sensores de temperatura, humedad y velocidad del aire y un cuestionario sobre aspectos térmicos del ambiente inmediato. El fin principal es definir una temperatura operativa óptima, que se obtiene de la relación entre los datos objetivos obtenidos a partir de mediciones y los datos subjetivos aportados por los usuarios a través de encuestas. Además de evaluar el confort térmico sobre la base del criterio de la norma y del voto medio de sensación térmica de los usuarios (CV, **Comfort Vote**), se pretende aportar una herramienta práctica para arquitectos e ingenieros del área, para la planificación y optimización energética del edificio. Como resultado y diagnóstico relevante se obtiene que los usuarios manifiestan que aún en espacios con condiciones térmicas constantes a lo largo del período, experimentan continuamente procesos de adaptación, pudiendo aceptar condiciones térmicas que les son impuestas, aún cuando el índice de predicción térmica que propone la norma (PMV, **Predicted Mean Vote**) indica que las condiciones térmicas no son buenas.

PALABRAS CLAVES

Estudio de campo, confort térmico, CV (Comfort Vote), temperatura de neutralidad, adaptación.

1 INTRODUCCIÓN

En Alemania la determinación de las condiciones térmicas de confort, se lleva a cabo mediante el cálculo de un índice de predicción térmica (PMV, **Predicted Mean Vote**) propuesto por la norma [DIN EN ISO 7730:2006] procedente de [22]. Este índice, obtenido del voto de sensación térmica (CV, **Comfort Vote**) en experimentos con personas en cámara climática controlada [16], consiste en un algoritmo matemático que combina cuatro parámetros físicos: temperatura del aire (t_a), temperatura radiante media (t_r), humedad relativa (RH) y velocidad del aire (v_a) y dos parámetros personales: actividad de las personas (MET) y aislación de la ropa (Clo). El CV, indica la menor o mayor aceptación que las personas tienen sobre las condiciones térmicas y se emite sobre una escala de 7 puntos (escala de ASHRAE), con los siguientes significados: -3 (mucho frío), -2 (frío), -1 (algo de frío), 0 (neutro), +1 (algo de calor), +2 (calor) y +3 (mucho calor).

Extensos trabajos de campo permiten observar la combinación de factores climáticos y no climáticos que afectan al confort térmico en espacios reales de trabajo y sostienen, que el uso de la norma es limitado (ver [9], [19], [27] y [29]). Los autores se basan en que factores personales como la constitución corporal, el sexo y la ingesta de alimentos (comparar con [17] y [24]) y locales, tales como el clima exterior (comparar con [5] y [2]), afectan la sensación térmica de las personas y afirman que éstas no son receptores pasivos del ambiente térmico sino por el contrario, mantienen una actitud crítica que se traduce en un proceso de adaptación continuo [18]. Esta habilidad, no se considera en los experimentos en cámaras climáticas controladas, donde se fija la totalidad de los parámetros para observar las oscilaciones específicas de alguno en particular.

El concepto “Spot-Monitoring para la evaluación del confort térmico en edificios de oficina”, se desarrolla con el fin de obtener un sondeo sobre las condiciones climáticas interiores en espacios reales de trabajo y su influencia sobre la sensación térmica de los usuarios de dichos espacios. El método consiste en esquemas de medición y encuestas simultáneas a los usuarios. Las mediciones se realizan mediante el uso de una unidad móvil equipada con sensores de temperatura del aire, temperatura operativa, temperatura del punto de rocío (t_{dew}), asimetría de radiación (Δt_{pr}) y velocidad del aire (ver Punto 2.2 y Figura 3) y las encuestas simultáneas a través de un cuestionario corto (dos carillas), sobre aspectos

térmicos del ambiente inmediato, para la obtención del voto medio de sensación térmica de las personas con el uso de la escala de 7 puntos de ASHRAE (ver Punto 2.3).

Para la evaluación del confort térmico, se construye una base de datos con información sobre la realidad térmica interior y exterior de 345 espacios de trabajo y el diagnóstico de 321 votos de sensación térmica, distribuidos en 25 edificios de oficina, durante el período de invierno 2004/2005 y 2005/2006. Además se cuenta con datos propios de cada espacio analizados sobre aspectos no climáticos: calidad del aire, confort lumínico y aceptación global del espacio de trabajo y factores locales: dimensiones del recinto, cargas térmicas, características de la fachada y cerramientos, estado del cielo, etc.

Estos fundamentos dan origen al presente trabajo, con el cual se pretende indicar un modo apropiado de proceder en el monitoreo y la evaluación del confort térmico local y en el aporte de una temperatura óptima, sin dejar de lado la opinión diagnóstica de los usuarios.

2 DESARROLLO

2.1 Objeto de estudio

El objeto de estudio son 25 edificios de oficina de no más de 10 años de ser construidos o saneados en los últimos años y afectados por el clima centroeuropeo, ubicados en las ciudades de Berlín (7), Brunswick (5), Hamburgo (3), Hannover (3), Gelsenkirchen (1), Helmstedt (1), Leverkusen (1), Magdeburgo (1), Mannheim (1), Osnabrück (1) y Wolfsburg (1). Algunos edificios de oficina de tipo estándar que se analizaron, se muestran en la Figura 1.

El clima donde se centra el trabajo, queda definido entre las latitudes 48° y 53° N y es templado frío y húmedo [23] con temperatura media exterior en invierno de -2,7°C [DWD, 2004]. Durante las mediciones de invierno la temperatura media exterior, medida entre las 10:00 y las 16:00 horas, alcanzó $3 \pm 3,5$ °C, la mínima -7°C y la máxima 9,7 °C. La humedad relativa exterior media del aire alcanzó $81,3 \pm 9,9$ %, la mínima 47,9 % y la máxima 97 %. La Figura 2 muestra la diferencia entre la temperatura media exterior (t_{out}) y la temperatura operativa media interior (t_{op}) en las mediciones realizadas en el período de invierno 04/05 y 05/06.



Figura 1 Algunos ejemplos de 25 edificios que se incluyen en este trabajo de campo.

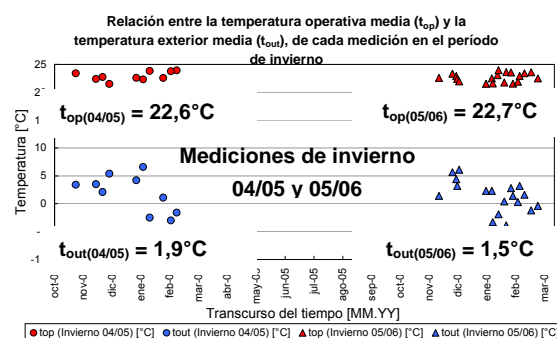


Figura 2 Diferencia entre valores medios de temperatura exterior e interior.

De los 25 edificios analizados, 6 son totalmente climatizados (AC, **Air Conditioned**), 12 parcialmente (MIX, **Mixed conditioned**) y 7 ventilados naturalmente (NV, **Natural Ventilated**). De los espacios analizados, 71,3 % poseen fachada simple, 22,3 % doble fachada, 3,8 % dan a un atrio y 2,6 % son espacios internos dentro del edificio. El 57,3 % de los espacios con fachada al exterior, posee una superficie de vidrio mayor al 60 % de la misma. Cerca del 85 % de los espacios, tiene ventanas operables, de las cuales cerca del 35 %, solo son pivotantes (intercambio de 1/5 del volumen del aire). De los espacios con fachada al exterior, 26 % tienen orientación sur (hemisferio norte), 28 % este, 31,5 % oeste y 15,5 % norte. La fachada norte, recibe radiación solar sólo en verano, a primera y última hora del día. Del total de espacios analizados, 17 % son espacios individuales de oficina, 68 % son espacios de 2 a 4 personas y el resto se distribuye en espacios grandes con más de 4 puestos de trabajo. Sobre las personas que intervinieron en las encuestas, 148 son de sexo femenino y 173 masculinos. El 17 % permanecen menos de 4 horas en los espacios de trabajo, 24 % entre 4 y 6 horas y 59 % más de 7 horas. El 92 % de las personas, no fuman en sus espacios de trabajo.

2.2 Mediciones

Un sistema de medición móvil (Mobile LAB, ver Figura 3) permite desplazar el instrumental (sensores) a cada lugar de trabajo dentro del edificio y relevar los parámetros climáticos. La medición se desarrolla en tres etapas. La primera durante la mañana hasta las 12:00 horas, la segunda al mediodía entre las 12:00 y las 14:00 horas y la tercera por la tarde a partir de las 14:00 horas. Esto permite recolectar los parámetros climáticos interiores de cada espacio seleccionado a lo largo de la jornada, en el lugar donde trabajan los usuarios afectados y poder analizar la evolución y la aceptación térmica.

Los valores de la temperatura del aire, la temperatura del punto de rocío, la temperatura operativa, la asimetría de radiación y la velocidad del aire, se miden con sensores de alta precisión. Los sensores, responden a los tiempos de medición y exactitud propuestos por la norma [11] y fueron calibrados, antes de comenzar las mediciones. El intervalo de medición fue de un minuto. Los datos de medición son recolectados y transferidos a un procesador notebook, evitando ser transferidos manualmente.

A excepción de los sensores de temperatura del aire, que se ubican a 1,1 m y a 0,1 m y el de asimetría de radiación a 1,2 m sobre el nivel del suelo, los demás se ubican a 1,1 m. Adicionalmente se midieron la temperatura y humedad exterior y en cada espacio interior, la temperatura de la superficie de fachada, del piso y del techo, los niveles de dióxido de carbono (CO₂) y los compuestos orgánicos en suspensión (TVOC, **T**otal **V**olatile **O**rganic **C**ompounds). Estos dos últimos se ubican a 0,6 m sobre el nivel del suelo. El relevamiento espacial y temporal de cada medición, contiene las dimensiones de cada recinto, la ubicación de la unidad móvil dentro del mismo, el estado del cielo en el momento de la medición, el tipo de fachada, el tipo de ventanas, el estado de uso de los mecanismos de protección solar, del sistema de acondicionamiento térmico y de ventilación del recinto. Estos datos son introducidos en una planilla estandarizada.

La medición comienza luego de una fase de aclimatación de los sensores (3 minutos aproximadamente) tiempo durante el cual se procede al posicionamiento de la unidad móvil junto al espacio de trabajo y dura entre 3 y 5 minutos. Paralelamente el usuario responde el cuestionario y un asistente realiza el relevamiento del espacio en estudio con lo que el tiempo necesario para recolectar la información no supera los 10 minutos. Para el traslado de la unidad móvil dentro del edificio, se prevén otros 5 minutos adicionales, de tal forma que pueden relevarse satisfactoriamente cuatro espacios por hora. La unidad móvil fue diseñada por Ingenieros especialistas, sobre la base de los requerimientos propuestos por la norma [DIN EN ISO 7726:2002] y la experiencia recolectada en extensas investigaciones de campo (ver [9], [25] y [30]).

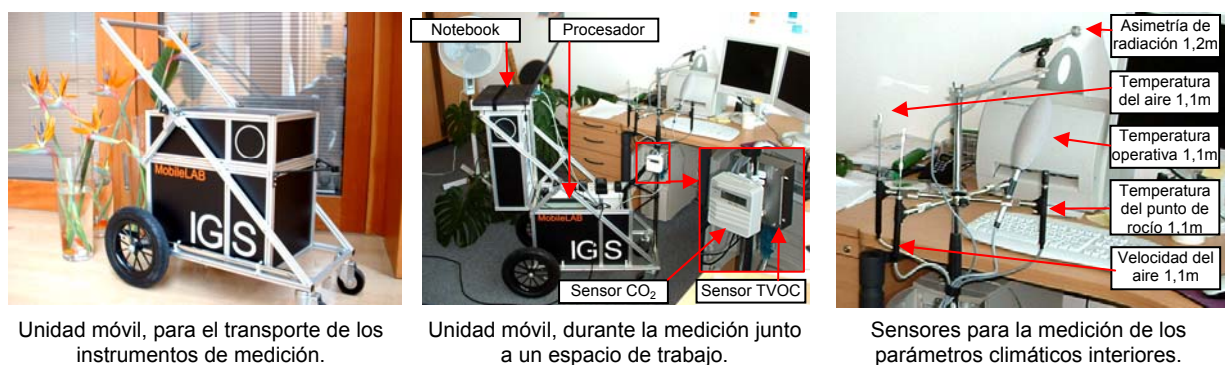


Figura 3 "Mobile LAB" Unidad móvil de medición con sensores para el relevamiento de los parámetros climáticos en cada lugar de trabajo.

2.3 Encuestas

La encuesta constituye una medición de tipo subjetiva que contiene la información diagnóstica del usuario promedio, respecto al ambiente térmico que lo rodea. El cuestionario utilizado posee dos carillas con preguntas que se refieren a aspectos psicológicos, fisiológicos y físicos del usuario y del ambiente en que se encuentra. Entre ellas, el voto de sensación térmica (ver punto 2.3.1), las posibilidades de control sobre el ambiente térmico (ver punto 2.3.2), la ingesta de alimentos (ver punto 2.3.3), el nivel de actividad realizada durante la última hora (ver punto 2.3.4) y los niveles de aislación de la ropa (ver punto 2.3.5), constituyen los puntos más importantes. También se incluyen preguntas básicas sobre aspectos "no climáticos" tales como la calidad del aire y del confort visual, que podrían tener influencia sobre el confort térmico. El cuestionario se elaboró sobre la base de los objetivos propuestos y en relación a otros modelos estandarizados utilizados en trabajos de campo (comparar con [7], [25] y [1]).

2.3.1 Voto de sensación térmica (CV): El CV se emite sobre una escala de 7 puntos, originalmente definida por [5], posteriormente redefinida por otros autores, como escala de ASHRAE [1] y verificada mediante escalas estandarizadas [DIN EN 15251:2005]. Sobre esta escala, el usuario estima su sensación térmica, al elegir los valores que van desde -3 (mucho frío), -2 (frío), -1 (algo de frío), 0 (neutro), +1 (algo de calor), +2 (calor), hasta +3 (mucho calor) y con posibilidad de elegir valores intermedios. El uso de la escala de ASHRAE permite obtener resultados mas homogéneos [4].

2.3.2 Control sobre el ambiente térmico: Este punto se refiere a las posibilidades o no y la frecuencia con que los usuarios proceden a la modificación del ambiente térmico a través de medios alternativos. Estos pueden ser, una superficie radiante (calefactor), un panel de control, la apertura de puertas o ventanas, las protecciones solares, la adaptación de la ropa y otros. Se supone que el control personal sobre los parámetros climáticos, tiene una influencia positiva sobre la satisfacción de los usuarios [20] e interviene en el proceso de adaptación.

2.3.3 La ingesta de alimentos: La cantidad de energía química que se toma de los alimentos provoca un incremento en los niveles de metabolismo (producción de calor interno), hasta un 15 % inmediatamente después de la ingesta y se prevé que tenga influencia sobre el confort térmico [16]. El cuestionario contempla la posible ingesta de alimentos o líquidos fríos o calientes que se hayan realizado en los últimos 15 minutos.

2.3.4 Nivel de actividad realizada: La producción de calor interna del cuerpo, depende de los niveles de actividad desarrollada y tiene influencia directa sobre la sensación térmica. En función de los niveles de actividad, la energía suministrada con la ingesta de alimentos, se involucra en los procesos de oxidación del cuerpo por unidad de tiempo, constituyendo la tasa metabólica. Para este análisis se suministra una lista con posibles actividades realizadas en la última hora y que para el cálculo, se asignan valores estandarizados [DIN EN ISO 8996:2004]. La unidad con que se mide la actividad realizada es el MET (**M**etabolic **E**quivalents of **T**ask). Un MET representa una producción de calor metabólico de 58 W/m² de superficie corporal. Para definir la cantidad de energía que interviene en el desarrollo de una actividad, debe considerarse el tipo de actividad, la superficie corporal (aprox. 1,7 m²) y el tiempo invertido en realizarla [13]. Por ejemplo: una persona al desarrollar una actividad sedentaria (1,2 MET) durante una hora, produce una cantidad de energía de 100 W/h.

2.3.5 Nivel de aislación de la ropa: Este valor es de fundamental importancia ya que afecta la pérdida o ganancia de calor entre el cuerpo humano y el ambiente inmediato. Para el análisis de este punto, se suministra una lista con vestimentas tipo. Para el cálculo se le asignan valores medios estandarizados [DIN EN ISO 9920:2005]. La unidad con que se mide el aislamiento de la ropa es el Clo (**C**lothing) definida por Gagge, A. P. en 1941 y utilizada en la actualidad. La unidad Clo equivale a una resistencia térmica de 0,155 m²K/W. El valor para una persona se obtiene de la sumatoria de los valores parciales que posee cada prenda de vestir [14].

2.4 Resultados

Los datos de la medición (objetivos) y de la encuesta (subjetivos) permiten analizar las propiedades físicas de cada espacio a lo largo de una jornada y poder compararlos entre si y con otros de similares características. Además posibilitan la evaluación de los resultados sobre la base de los límites propuestos por la norma [12] y analizar el voto de sensación térmica emitido por los usuarios (evaluación diagnóstica) para construir valores indicativos sobre el confort térmico. Durante las mediciones de invierno en los períodos 04/05 y 05/06 no se observan desviaciones que exijan tratarlos por separado. Tanto la diferencia entre las temperaturas externas como la diferencia entre las temperaturas operativas entre ambos períodos, son menores a 0,4 K. Los datos mas representativos de la medición con sensores, los datos de las encuestas y los valores calculados mediante métodos estándares necesarios para el análisis, se muestran en la Tabla 1.

2.4.1 Temperatura operativa, t_{op} : La columna 3 de Tabla 1, muestra los valores representativos (valor promedio, desviación estándar, máximo y mínimo) de la temperatura operativa. Este parámetro de medición utilizado frecuentemente en este tipo de estudios, se considera de gran importancia para el análisis de los acontecimientos climáticos interiores. Con t_{op} se sintetiza el efecto de la temperatura del aire y la temperatura de radiación, bajo ciertas condiciones del movimiento del aire [10] y [12] (ver valores de los demás parámetros en Tabla 1). La distribución normal de t_{op} en los 345 espacios analizados, indica que su valor, se encuentra dentro de un rango estrecho con mínimas desviaciones. Cerca del 70% de los espacios analizados posee $t_{op} = 22,7 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$ (ver campana de Gauss de la distribución normal, en la Figura 4). Respecto de los valores de t_{op} y considerando la categorización que

propone la norma [12] para los parámetros climáticos más representativos del confort térmico, en “A” (bueno), “B” (aceptable), “C” (limitado), el valor medio de t_{op} en el período de invierno, es categoría “A” ($22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), es decir, buen nivel de confort (ver valores límite en Tabla 2). El rango estrecho de t_{op} es producto del uso de sistemas de calefacción y de mantener las condiciones térmicas interiores dentro de límites normados.

2.4.2 Índice de predicción térmica, PMV (Predicted Mean Vote): La norma [DIN EN ISO 7730:2006] propone el índice PMV que representa un supuesto voto de sensación térmica, resultado de vincular en un algoritmo matemático, los cuatro parámetros físicos (temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad relativa) y dos parámetros personales (aislación de la ropa y niveles de actividad). El valor obtenido de PMV alcanza $0,37 \pm 0,43$, sobre la escala de 7 puntos de [1] (ver columna 8 de Tabla 1 y Figura 5). Según la categorización de la norma, el valor medio de PMV, es categoría “B” (niveles aceptables de confort) (ver límites en Tabla 2). Se contabilizan los valores de PMV del total de las mediciones y se obtiene que el 25 % de los casos es categoría “A”, el 33 % “B”, el 19,5 % “C” y el 22,5 % restante queda fuera del área de confort definido.

2.4.3 Voto de sensación térmica, CV (Comfort Vote): El valor obtenido del CV, emitido por las personas sobre la escala de ASHRAE en las encuestas, es $0,16 \pm 0,95$ (ver columna 9, de Tabla 1). Muestra un comportamiento homogéneo y una amplia dispersión destacando la gran variedad de opiniones respecto a un mismo ambiente térmico (ver Figura 5 y Tabla 3). Entre mujeres y hombres, la diferencia del CV no es significativa (0,03). Esta leve diferencia no puede adjudicarse al uso de vestimentas (ver punto 4.5, niveles de ropa), pero podría deberse a una relación fisiológica que los hace levemente diferentes.

2.4.4 La desviación estándar del CV ($\pm 0,95$) se asemeja a la que muestra [30] (0,99) y responde a la hipótesis de [26], en que la mínima desviación estándar posible en estudios de campo, es ± 1 . El uso de la escala de 7 puntos de ASHRAE permite comparar el CV y el índice PMV (ver Figura 5). El CV es parecido al PMV ya que ambos tienden a la zona de sensación térmica de calor, pero se diferencian en la dispersión de sus valores. Aunque menos disperso, el PMV muestra una dependencia muy fuerte con el acontecer de la temperatura operativa interior (ver Figura 4) y débilmente de algún proceso de adaptación que experimenten los usuarios. Esto es probable, debido a que el método de obtención del índice PMV (cámara climática controlada) considera como variable al valor de la temperatura, manteniendo los demás parámetros climáticos sobre valores constantes, condición ésta que dista de la realidad. El incremento registrado para los valores de actividad realizada (1,48 MET) es hasta un 19 % mayor al valor estándar propuesto por la norma [12] (1,2 MET). Un incremento del valor de actividad (aumento en la producción de calor corporal) puede afectar las cargas térmicas interiores del edificio y tener efecto sobre t_{op} y modificar aún más el valor del PMV. Estos aspectos indican que la respuesta subjetiva de las personas, mediante el voto de sensación térmica, constituye un buen índice para evaluar el confort térmico en espacios de trabajo y poder emitir un valor de temperatura operativa óptima.

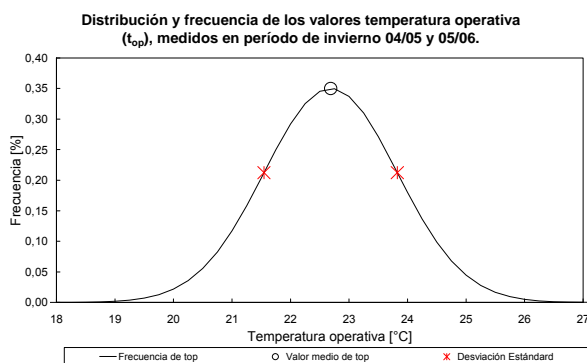


Figura 4 Distribución normal de temperatura operativa.

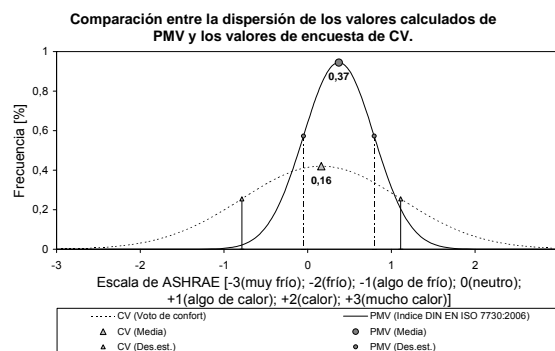


Figura 5 Distribución normal del índice PMV y del voto medio de confort CV.

2.4.5 Velocidad del aire, v_a (Velocity of air): La velocidad del aire de medición, con un valor medio de $0,04 \pm 0,03 \text{ m/s}$ (ver columna 5 de Tabla 1) no afectarían el confort ya que queda por debajo de los valores que propone la norma. Un incremento de hasta $0,16 \text{ m/s}$ en invierno, podría provocar molestias o lo que se indica a través del índice DR (Draught Rate) [12], conocido como riesgo de corrientes convectivas de aire (ver columna 13 de Tabla 1). Este índice de riesgo depende de factores tales como la temperatura del aire (t_a), v_a y el grado de turbulencia (t_u) y según se obtiene de cálculo en este trabajo,

indica que solo el 2,4% del total de los usuarios percibiría un enfriamiento provocado por corrientes de aire. Según la norma [12], es categoría "A" (ver Tabla 2). De la encuesta a los usuarios se obtiene un valor que podría compararse con el de medición, ya que el porcentaje de usuarios que perciben corrientes de aire alcanza un 29 %, de los cuales solo el 27 % se sienten disconformes. El resto no lo percibe o lo considera no molesto.

2.4.6 Humedad relativa, RH (Relative Humidity): El valor $31,6 \pm 11,8\%$ (ver columna 7 de Tabla 1) indica niveles bajos de humedad, que podrían provocar sequedad e irritación en los ojos y en las vías respiratorias. Esto suele ocurrir en el período de invierno cuando se usa el aire exterior, previamente calentado, para ventilar los espacios interiores. El valor RH se obtiene de relacionar t_a junto con la temperatura del punto de rocío (t_{dew}). Según otros estudios este parámetro solo tiene una pequeña influencia sobre la sensación térmica y por lo general un aumento del 10% de RH podría compararse con un incremento de t_{op} en $\pm 0,3$ K. La norma [DIN EN 15251:2005], propone una categorización para este parámetro (ver Tabla 2). De la encuesta a los usuarios se obtiene el voto medio de sensación de humedad en el aire mediante el uso de la escala de 7 puntos que toma valores desde -3 (muy seco) pasando por 0 (neutro) hasta +3 (muy húmedo). El valor obtenido indica que el ambiente tiende a ser algo seco (-0,68) lo que confirma el resultado obtenido en la medición.

2.4.7 Gradiente vertical de temperatura: El valor que se muestra en la columna 12 de Tabla 1, indica la diferencia entre t_a , medida a 1,1m y t_a a 0,1 m sobre el nivel del suelo. Esta diferencia no supera $1,3 \text{ K} \pm 0,9$, de tal forma que según [12] una posible disconformidad térmica local conocida como sensación de "pies fríos" o "cabeza caliente", no se ve comprometida (ver valores límite en Tabla 2).

2.4.8 Asimetría de radiación, Δt_{pr} : Este fenómeno alcanza una media de 0,7 K (ver columna 14 de Tabla 1) y queda muy por debajo de provocar una disconformidad térmica local, conocida como enfriamiento o calentamiento "asimétrico" del cuerpo según [12] (ver límites en Tabla 2). En los fenómenos de asimetría, se involucran la influencia de superficies frías o calientes tales como fachadas o superficies radiantes verticales u horizontales, utilizadas para la calefacción. La baja influencia de las ganancias solares en el período de invierno, la efectividad de los sistemas de calefacción en combinación con la masa térmica del edificio y las características aislantes de las superficies transparentes, permiten mantener valores dentro del límite de confort.

2.4.9 Niveles de aislación de ropa, Clo: Estos valores se obtienen de la encuesta, a partir de una lista que contiene prendas estandarizadas. El valor medio de aislación de la ropa alcanza $1,02 \pm 0,25$ Clo (ver columna 10 de Tabla 1) y supera sólo un 2% los valores propuestos por la norma [12] para el período de invierno ($1 \text{ Clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$). No se contabiliza el valor de aislamiento que aporta la silla de trabajo. La diferencia entre el valor de aislación de ropa entre mujeres (1,05 Clo) y hombres (0,99 Clo), en el período de invierno es despreciable.

2.4.10 Niveles de actividad desarrollada, MET: Estos valores se obtienen de la encuesta, a partir de una lista con posibles actividades desarrolladas en la última hora en espacios de oficina. El valor medio alcanza $1,48 \pm 0,31$ MET (ver columna 11 de Tabla 1) superando en un 19% los valores estandarizados. Constituye un dato muy importante a tener en cuenta en la evaluación del confort, ya que niveles mayores de actividad implican un incremento en el metabolismo pudiendo modificar la sensación térmica del usuario. El valor propuesto por la norma [12] para el trabajo de oficina es 1,2 MET.

2.5 Evaluación

La temperatura operativa de medición y el voto de sensación térmica de la encuesta constituyen los parámetros de mayor importancia para la evaluación del confort térmico. El diagnóstico de los usuarios permite encontrar una temperatura óptima o temperatura de neutralidad. A excepción de los valores de actividad y de humedad relativa, que requieren una atención especial, los demás parámetros de influencia sobre el confort térmico se encuentran dentro de los límites de confort.

La evaluación del confort térmico exige considerar las condiciones térmicas que los usuarios diagnostican como buenas, aceptables o malas y por ello, es fundamental analizar el concepto de temperatura de neutralidad que representa una t_{op} a la cual las personas se sienten térmicamente neutras o confortables, es decir que en promedio no sienten frío ni calor y votan 0 (neutro) sobre la escala de 7 puntos de ASHRAE [27]. Del total de 321 votos de sensación térmica, se obtienen 117 votos 0 (neutro). Esto se corresponde con el 34% de los usuarios encuestados, quienes indican que t_n es $22,7 \pm 1,5$ °C. Este valor se compara con [30] y sin considerar la estación del año se observa que se ubica entre valores obtenidos en trabajos de campo, tales como el de Auliciems, A. ($t_n = 20,5^\circ\text{C}$), de

Schiller, G. E. ($t_n = 22^\circ\text{C}$) y de Ye, X. J. ($t_n = 22,5^\circ\text{C}$) y valores encontrados en experimentos en cámara controlada por Gagge, A. P. ($t_n = 24^\circ\text{C}$) y por Fanger, P.O. ($t_n = 25,6^\circ\text{C}$). Para evaluar la relación entre el CV y la temperatura operativa, se recurre al método de análisis más frecuente utilizado en otros estudios (ver en [16], [3], [30], [4] y [28]). La regresión lineal o método de los cuadrados mínimos permite relacionar los parámetros de estudio bajo la forma lineal: $f(x) = b \cdot x + a$. La Figura 6, muestra la dispersión del total de votos de sensación térmica para valores medidos de t_{op} y la Ecuación 1 representa la relación lineal entre estos dos parámetros. La constante $b = 0,24$ de la Ecuación 1, representa la pendiente de la recta y puede interpretarse como una medida de la adaptación de las personas. Se espera que sin un proceso de adaptación, se obtengan pendientes más elevadas que superen el valor 0,3 [28]. De la Ecuación 1, la constante $a = -5,37$, se corresponde con la ordenada al origen.

Ecuación 1 $CV = 0,24 \cdot t_{op} - 5,37$

El CV logrado en experimentos de laboratorio con cámara controlada, donde las personas no experimentan un proceso de adaptación, produce valores que dan rectas con pendientes más elevadas, que oscilan entre 0,30 y 0,35. En trabajos de campo las pendientes oscilan entre 0,15 y 0,25. La débil correlación que se obtiene entre t_{op} y CV (R , coeficiente de Pearson = 0,31) indica la gran importancia que tienen los parámetros psicológicos de las personas al emitir un diagnóstico muy disperso sobre un mismo valor de t_{op} [30]. En laboratorios o cámaras controladas, se consiguen valores de correlación (R) entre 0,70 a 0,85, mientras que en trabajos de campo, oscilan entre 0,30 y 0,55 [3].

El conjunto de datos analizados se muestra en la Figura 6 y en la Tabla 3. Debido a la cantidad de datos obtenidos en cada medición, no se tiene información representativa sobre cada espacio analizado, pero a partir de contabilizar el voto medio de sensación térmica emitido por todos los usuarios encuestados se observa una tendencia muy clara sobre la temperatura de neutralidad para los edificios analizados en el período de invierno. La neutralidad térmica que representa el total de edificios analizados, se obtiene de relacionar el valor medio de la temperatura operativa con el valor medio de la temperatura de neutralidad. En algunos casos las personas no aceptan las condiciones térmicas, de modo que no se consiguen votos de neutralidad ($CV \neq 0$). A raíz de esto, se recurre a la aplicación de un artificio propuesto por Griffith, I. que indica que cuando $CV = 0$, $t_{op} = t_n$ y por ello la ecuación (1) es:

Ecuación 2 $0 = 0,24 \cdot t_n - 5,37$

De Ecuación 1 y Ecuación 2 obtenemos:

Ecuación 3 $t_n = t_{op} + (c \cdot CV)$

donde $c = 1/b$. Esta opción de cálculo se aplica en dos edificios del conjunto analizado, en los cuales no se consiguieron votos neutros de sensación térmica. El análisis de regresión entre t_n y t_{op} , indica una correlación muy buena entre ambas variables ($R = 0,91$) que puede ser explicada por la ocurrencia de t_{op} dentro de un rango muy estrecho y al que los usuarios se adaptan muy fácilmente. La Figura 7 muestra esta relación donde ajustando los datos, se obtiene una recta, cuya ecuación es:

Ecuación 4 $t_n = 1,03 \cdot t_{op} - 0,88$

que se corresponde con la temperatura de neutralidad para los edificios analizados mediante el método "Spot-Monitoring".

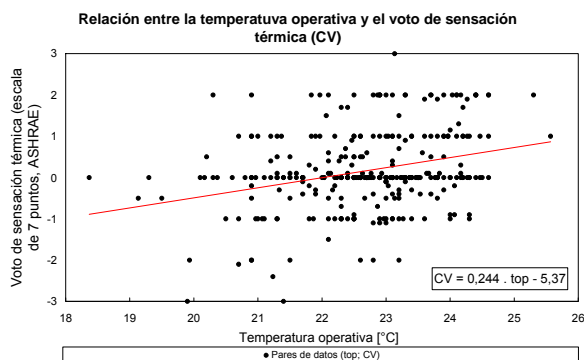


Figura 6 Dispersión de los datos de CV en función de la temperatura operativa (top).

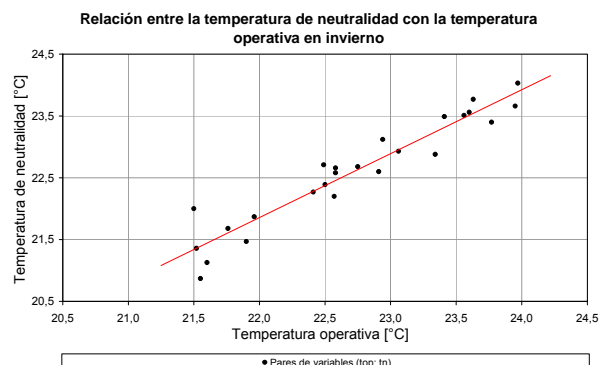


Figura 7 Relación entre temperatura operativa (t_{op}) y temperatura de neutralidad (t_n).

De esta manera se define una temperatura que fue diagnosticada por los usuarios y que deberá ser validada mediante su inclusión en otros cálculos mediante programas de simulación térmica y comparada con la que se obtendría en el período transitorio y en verano. Esta ecuación, no debe considerarse de aplicación general, ya que representa la temperatura operativa óptima para edificios de oficina afectados por el clima centroeuropeo.

3 CONCLUSION

Si bien los sensores proporcionan el mismo resultado, independientemente de la posición geográfica en que se desarrolle una medición, no ocurre lo mismo con las personas, quienes dentro de espacios parecidos bajo un mismo clima y perteneciendo a una misma cultura, emiten opiniones muy divergentes. Esto es propio de la combinación de gran cantidad de factores que afectan la percepción del ser humano y por ello, la opinión diagnóstica del mismo constituye una herramienta indispensable para llevar a cabo una evaluación integral de los parámetros de estudio. Del análisis, t_{op} y CV, constituyen los parámetros de estudio más representativos, el análisis de regresión el método más simple y apropiado para evaluarlos y t_n un índice con carácter de predicción muy útil en la optimización.

El índice PMV no difiere en gran medida del valor obtenido de CV, pero es altamente sensible a la variación de parámetros personales tales como el tipo de actividad y los niveles de aislación de la ropa, es decir, aquellos que no dependen del ambiente térmico sino que dependen del grado de adaptación. Considerando estas observaciones, la norma [DIN EN ISO 7730:2006] es de utilidad práctica para la evaluación del confort térmico en edificios de oficina, afectados por el clima centroeuropeo en el período de invierno. Esta conclusión debe ser validada para las estaciones de verano y período transitorio. Según otros autores, el uso de la norma original [ISO 7730] posee desviaciones propias del método de obtención (ver en [27], [6], [29] y [18]) y es útil mientras las condiciones internas se mantengan relativamente constantes y dentro de rangos predeterminados, sin grandes variaciones [8]. Si se consideran los resultados obtenidos con "Spot-Monitoring" en esta época del año, lo anterior puede afirmarse.

La visión diagnóstica aportada por los usuarios permite observar que aún en espacios donde las condiciones térmicas se mantienen constantes a lo largo del período, las personas experimentan continuamente procesos de adaptación pudiendo aceptar 21,5 °C como temperatura de neutralidad cuando se imponen valores de $t_{op} = 21,5$ °C y aceptar 24 °C cuando se impone $t_{op} = 24$ °C (ver Figura 7).

Los niveles variables de actividad, la preferencia por temperaturas impuestas (control de climatización del edificio) y los mecanismos alternativos de adaptación de las personas, en el control del clima interno, constituyen entre otras, preguntas que deben ser respondidas en futuros trabajos.

Tabla 1 Valores promedio, desviación estándar, máximos y mínimos más representativos del período de invierno. .

Columna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Parámetros de estudio	$t_a (1,1 m) - [^{\circ}C]$ (de medición)	$t_a (0,1 m) - [^{\circ}C]$ (de medición)	$t_{op} (1,1 m) - [^{\circ}C]$ (de medición)	$t_{dew} (1,1 m) - [^{\circ}C]$ (de medición)	$v_a (1,1 m) - [m/s]$ (de medición)	$tr (1,1 m) - [^{\circ}C]$ (de cálculo)	RH (1,1 m) [%] (de cálculo)	PMV-Index [-] (de cálculo)	CV-Voto [-] (de encuesta)	Ropa - [Clo] (de encuesta)	Actividad - [MET] (de encuesta)	Grad. Vert. - [K] (de cálculo)	DR-Index Corr. de aire - [%] (de cálculo)	Asimetría de radiación - [K] (de cálculo)
Promedio	22,7	21,0	22,7	2,9	0,04	22,5	31,6	0,37	0,16	1,02	1,48	1,3	2,4	0,7
Desviación	1,1	1,3	1,4	2,6	0,03	1,4	11,8	0,43	0,95	0,25	0,31	0,9	4,8	0,7
Mínimo	17,3	16,2	18,4	-5,3	0,00	18,2	17,0	-0,61	-3,00	0,50	1,20	0,0	0,0	0,0
Máximo	25,2	23,3	25,6	10,7	0,23	26,9	76,0	2,18	3,00	1,93	3,27	4,8	22,3	5,6

Tabla 2 Valores límite propuestos por la norma alemana [DIN EN ISO 7730:2006].

	Temperatura operativa t_{op} [°C]	Predicted Mean Vote PMV [-]	Velocity of air v_a [m/s]	Draught Rate DR [%]	Gradiente vertical de temperatura [K]	Asimetría de radiación [K]	Relative Humidity RH [%] [DIN EN 15251]	Criterio de evaluación
A	$21 \leq t_{op} \leq 23$	$-0,2 < PMV < +0,2$	$v_a \leq 0,10$	$DR < 10$	$< 2 K$	$< 10 K$	$40 \leq RH \leq 50$	Buen nivel
B	$20 \leq t_{op} < 21$ $23 < t_{op} \leq 24$	$-0,5 < PMV \leq -0,2$ $+0,2 \leq PMV < +0,5$	$0,10 < v_a \leq 0,16$	$10 \leq DR < 20$	$< 3 K$	$< 10 K$	$30 \leq RH < 40$ $50 < RH \leq 60$	Nivel aceptable
C	$19 \leq t_{op} < 20$ $24 < t_{op} \leq 25$	$-0,7 < PMV \leq -0,5$ $+0,5 \leq PMV < +0,7$	$0,16 < v_a \leq 0,21$	$20 \leq DR < 30$	$< 4 K$	$< 13 K$	$20 \leq RH < 30$ $60 < RH \leq 70$	Limitaciones

Tabla 3 Distribución del voto de sensación térmica (CV) para rangos de 1 K de temperatura operativa (t_{op}).

top [°C]	Total de Votos	CV [-]	CV (Comfort Vote), Voto de sensación térmica, en cantidades y en porcentajes.						
			-3 (mucho frío)	-2 (frío)	-1 (algo frío)	0 (neutral)	+1 (algo calor)	+2 (calor)	+3 (mucho calor)
18	2	-0,25	-	-	-	2 100,0 %	-	-	-
19	7	-0,33	1 11,1 %	1 11,1 %	-	5 55,6 %	1 11,1 %	1 11,1 %	-
20	25	-0,28	1 2,6 %	4 10,5 %	8 21,1 %	14 36,8 %	10 26,3 %	1 2,6 %	-
21	57	0,08	-	1 1,5 %	9 13,4 %	31 46,3 %	20 29,9 %	6 9,0 %	-
22	106	0,12	-	3 2,4 %	15 12,1 %	69 55,6 %	25 20,2 %	11 8,9 %	1 0,8 %
23	70	0,52	-	-	3 4,1 %	33 45,2 %	21 28,8 %	16 21,9 %	-
24	6	1,17	-	-	-	2 33,3 %	1 16,7 %	3 50,0 %	-
25	1	1,00	-	-	-	-	1 100,0 %	-	-

4 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASHRAE 55:2004 - "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy" (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55:1992).
- [2] Auliciems, A., 1969 - "Effects of Weather on Indoor Thermal Comfort" Department of Geography, Whiteknights, University of Reading, Reading, Berks., England; Int. J. Biometeor. , vol. 13, No. 2, pp. 147-162.
- [3] Auliciems, A., 1981 - "Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception" Department of Geography, University of Queensland, St. Lucia, Qld. 4067, Australia; Int. J. Biometeor. , vol. 25, No. 2, pp. 109-122.
- [4] Auliciems, A.; de Dear, R., 1986 - "Air Conditioning in a Tropical Climate: Impacts upon European Residents in Darwin, Australia" Department of Geography, University of Queensland, St. Lucia, Qld. 4067, Australia; Int. J. Biometeor., vol. 30, No. 3, pp. 259-282.
- [5] Bedford, T., 1950 - "Environmental Warmth and Human Comfort" Medical Research Council, Environmental Hygiene Research Unit, London School of Hygiene and Tropical Medicine, Gower Street, London, W.C.1; British Journal and Applied Physics, vol. 1, No. 2, pp. 33-38.
- [6] Boestra, A.C., 2006 - "The adaptive thermal comfort criterion in the new EPBD IEQ Standard" BBA Indoor Environmental Consultancy, The Netherlands (bba@binnenmilieu.nl)
- [7] Cena, K.; de Dear, R. 1998 - "Field Study of Occupant Comfort and Office Thermal Environments in a Hot-Arid Climate" Final Report ASHRAE, RP-921; Institute for Environmental Science, Murdoch University, Perth, Australia. ISBN 0-86905-648-4.
- [8] de Dear, R., 2004 - "Thermal comfort in practice" Division of Environmental and Life Sciences, Macquarie University, Australia; Indoor Air; 14 (Suppl 7): 32-39.
- [9] de Dear, R.; Brager, G. S., Cooper, D.; 1997 - "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference" Macquarie University, Sydney, Australia and Centre for Environmental Design Research, University of California, Berkley, USA; ASHRAE RP-884.
- [10] DIN 1946-2:1994 - "Raumluftechnik" Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)
- [11] DIN EN ISO 7726:2002 - "Umgebunklima. Instrumente zur Messung physikalischer Größen (ISO 7726:1998)". Deutsche Fassung EN ISO 7726:2001.
- [12] DIN EN ISO 7730:2006 - "Ergonomie des Umgebunklimas" Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO/DIS 7730:2003)".
- [13] DIN EN ISO 8996:2005 - "Ergonomie der thermischen Umgebung" – Bestimmung des körperlichen Energieumsatzes (ISO 8996:2004)". Deutsche Fassung EN ISO 8996:2004.

- [14] DIN EN ISO 9920:2005 - "Ergonomie der thermischen Umgebung" – Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination /ISO/DIS 9920:2004". Deutsche Fassung prEN ISO 9920:2004.
- [15] EN ISO 10551:2002 - "Ergonomie des Umgebungsklimas" – Beurteilung des Einflusses des Umgebungsklima unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen" (ISO 19551:1995)". Deutsche Fassung EN ISO 10551:2002.
- [16] Fanger, P.O.; 1970 - "Thermal Comfort". Technical University of Denmark, Laboratory of heating and Air Conditioning; Danish Technical Press, Copenhagen; ISBN: 87-571-0341-0.
- [17] Frank, W., 1975 - "Raumklima und Thermische Behaglichkeit". Institut für Bauphysik der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. mit 21 Bildern und 12 Tabellen; Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn KG.; ISBN: 3-433-00731-4.
- [18] Hellwig, R.T., 2005 - "Thermische Behaglichkeit". Unterschiede zwischen frei- und mechanischen belüfteten Bürogebäuden aus Nutzersicht; Dissertation: Technische Universität München.
- [19] Hellwig, R.T.; Bischof, W., 2006 - "Gültigkeit thermischer Behaglichkeitsmodelle" Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. Bauphysik 28, Heft 2.
- [20] Huizenga, C. et al., 2006 - "Air Quality and Thermal Comfort in Office Buildings" Result of a Large Indoor Environmental Quality Survey; Center for the Built Environment, University of California, Berkley, CA 94720-1839 USA; Proceeding of Healthy Building 2006, Lisbon, Vol. III, 393-397.
- [21] Humphreys, M.A., 1976 - "Field studies of thermal comfort compared and applied". Annals of Occupational Hygiene, Vol. 20, pp. 135-140.
- [22] ISO 7730:2005-11 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [23] Lauer, W.; Rafiqpoor, M. D., 2002 - "Die Klimate der Erde". Eine Klassifikation auf der Grundlage der ökophysiologischen Merkmale der realen Vegetation; Verlag: Franz Steiner; Stuttgart; ISBN: 3-515-0872-4.
- [24] Mayer, E., 1998 - "Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig?". Klimatechnik / Behaglichkeit; Ki Luft- und Kältetechnik 12/1998.
- [25] McCartney, K.J.; Nicol, J.F., 2002 - "Developinh an adaptive control algorithm for Europe: Results of the SCATs project". Oxford Centre for Sustainable Development, Oxford Brookes University.
- [26] McIntyre, D.A., 1978 - "Three approaches to thermal comfort". ASHRAE Transactions, Vol. 84, Part 1.
- [27] Nicol, J.F.; Humphreys, M.A., 2002 - "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings". Oxford Centre for Sustainable Development, School of Architecture, Oxford Brookes University, Gipsy Lane, Oxford OX3 0BP, UK.
- [28] Nicol, J.F.; Raja, I.A., 1997 - "Indoor thermal comfort: the Pakistan study". Energy for Sustainable Development; Letter, No. 5; 1/1997; pp. 50-60.
- [29] Raue, A.K. et al., 2004 - "NATVENT Buildings versus HVAC Buildings – A New Dutch Thermal Comfort Guideline". 25th AIVC Conference, Prague, Czech Republic, 2004.
- [30] Schiller, G.E. et al., 1988 - "A Field Study of Thermal Environments and Comfort in Office Buildings". Centre for the Built Environment; University of California, Berkley; No. 3164 (RP-462).
- [31] Ye, X. J., et al., 2006 - "Field study of a thermal environmental and adaptive model in Shanghai" Institute of Refrigeration and Cryogenic, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China; Indoor Air; 16: 320-326.