

## **PREDICCIÓN DEL ÍNDICE DE DISCONFORMIDAD TÉRMICA EN ESPACIOS DE OFICINA CONSIDERANDO EL DIAGNÓSTICO DE USUARIOS**

**E. Kuchen<sup>1</sup>, M. N. Fisch<sup>2</sup>, G. E. Gonzalo<sup>3</sup>, G. N. Nozica<sup>4</sup>**

Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHa) – Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño – Universidad Nacional de San Juan – Ignacio de la Roza y Meglioli, CP 5400 – San Juan, Argentina

[www.faud.unsj.edu.ar](http://www.faud.unsj.edu.ar), Tel. +54 264 423 2395, Fax +54 264 423 5397, [ernestokuchen@yahoo.com.ar](mailto:ernestokuchen@yahoo.com.ar)

Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) – Fakultät für Architektur, Bauwesen und Umweltwissenschaften – Technische Universität Braunschweig – Mühlenpfordstraße 23, 10. OG D-38106 – Braunschweig, Alemania.

[www.igs.bau.tu-bs.de](http://www.igs.bau.tu-bs.de), Tel. +49 531 391 3555, Fax +49 531 391 8125, [prof.fisch@egsplan.de](mailto:prof.fisch@egsplan.de)

### **RESUMEN**

Estándares internacionales indican las exigencias sobre confort térmico que se deben alcanzar en espacios de oficina. Estos se basan en un modelo desarrollado por el Prof. Paul Ole Fanger en el Centre for Indoor Environment and Energy, Dinamarca. Hoy, 40 años de investigación muestran una evolución de estos indicadores. Es objetivo del trabajo obtener herramientas para la evaluación del confort térmico. Se desarrolla un método con base en mediciones y encuestas mediante el uso de una unidad móvil equipada con sensores y un cuestionario sobre el ambiente térmico. Se relevan las condiciones térmicas en 30 edificios de oficina con variantes en los sistemas de climatización. La correlación entre datos objetivos y subjetivos permite descubrir una fórmula que indica la disconformidad térmica en función de aspectos locales. Para los edificios analizados la temperatura de confort resulta ser 23,3°C y el mínimo porcentaje de disconformes, a esa temperatura, es del 7%.

### **Palabras clave**

Trabajo de campo, índice de disconformidad, temperatura de neutralidad, sensación térmica, preferencia térmica

### **INTRODUCCIÓN**

La definición del índice de disconformidad térmica de un espacio, se lleva a cabo mediante la aplicación del índice *PPD*, “**P**redicted **P**ercentage of **D**issatisfied” (Índice de predicción del porcentaje de disconformes) propuesto en la norma (ISO 7730, 2005). Este, se obtiene sobre la base de un modelo matemático, desarrollado por Fanger, a partir de experimentos con personas en una cámara climática controlada, que relaciona el *voto* de sensación térmica con valores de medición de la temperatura operativa (Fanger, 1970). El modelo responde a una muestra reducida de personas afectadas por un mismo ambiente térmico predefinido, es decir, mientras la temperatura operativa se hace variar entre 66 y 90°F (18,9 y 32,2°C), los demás parámetros físicos del ambiente que afectan el confort térmico (humedad y velocidad del aire) y parámetros físicos y fisiológicos de las personas (aislación de la ropa y niveles de actividad) permanecen constantes.

Investigaciones llevadas a cabo en (Kuchen y Fisch, 2009), indican que los usuarios manifiestan que aún en espacios con condiciones térmicas constantes son capaces de experimentar procesos de adaptación, pudiendo aceptar condiciones térmicas que les son impuestas por el controlador del sistema de climatización. Otros autores afirman que factores personales, como la constitución corporal, el sexo y la ingesta de alimentos (Frank, 1975 y Mayer, 1998) y parámetros del entorno inmediato, como el clima exterior (ver Bedford, 1950 y Auliciems, 1969), afectan la percepción térmica de las personas. Según estos, los usuarios no son receptores pasivos del ambiente térmico sino que, por el contrario, mantienen una actitud crítica que se traduce en un proceso de adaptación continuo (Hellwig, 2005).

En diversos trabajos de campo se muestra la combinación entre factores climáticos y no climáticos y su influencia sobre el confort térmico en espacios reales de trabajo. Varios autores (Hellwig y Bischof, 2006; Boestra, 2006; Raue et al., 2004; Nicol y Humphreys, 2002 y de Dear, 2004), sostienen que el empleo de normas como la (ISO 7730, 2005), que se basa en el modelo de Fanger, poseen desviaciones que son propias del método de obtención del mismo. Además se ven limitadas a la hora de contemplar una visión holística del confort y solo son útiles, mientras las condiciones internas se mantengan relativamente constantes y dentro de rangos predeterminados. Indican adicionalmente, que la habilidad de adaptación de los usuarios a diferentes ambientes térmicos, no se considera en los experimentos en cámara climática.

### **1**

<sup>1</sup> Dr.-Ing. Arq., Becario Posdoctoral CONICET, IRPHa, UNSJ.

<sup>2</sup> Prof.-Univ. Dr.-Ing., Director IGS, TU-BS, Braunschweig, Alemania.

<sup>3</sup> Prof.-Univ. Dr. Arq., Investigador Cat.I, Director IAA, UNT.

<sup>4</sup> Prof.-Univ. Dr. Arq., Investigador Cat.I, IRPHa, UNSJ.

El método presentado en este trabajo se basa en mediciones y encuestas simultáneas llevadas a cabo mediante un trabajo de campo en 30 edificios de oficina, en Alemania. Las mediciones se realizan mediante el uso de una unidad móvil equipada con sensores de alta precisión y las encuestas, a través de un cuestionario con preguntas sobre aspectos térmicos del espacio que, a través de un *voto*, se traducen en datos en una escala de valor (Kuchen y Fisch, 2009 y Kuchen, 2008). De la evaluación de los resultados se encuentran correlaciones fuertes entre el *voto* medio de sensación térmica, el *voto* medio de preferencia térmica y los valores de temperatura operativa de medición.

Como aporte, se definen criterios de neutralidad térmica (satisfacción térmica), se desarrolla un modelo para la predicción del índice de disconformidad térmica y se aporta una metodología para la elaboración de herramientas de cálculo para profesionales del área, con el objetivo de abordar el monitoreo y la evaluación térmica de espacios reales de trabajo que conduzcan a la elaboración de indicadores de calidad ambiental de edificios. Aunque no se trata en este trabajo, se destaca la gran importancia que implica modificar la temperatura operativa en  $\pm 1^\circ\text{C}$  en relación al consumo energético del edificio.

## 1 DESARROLLO

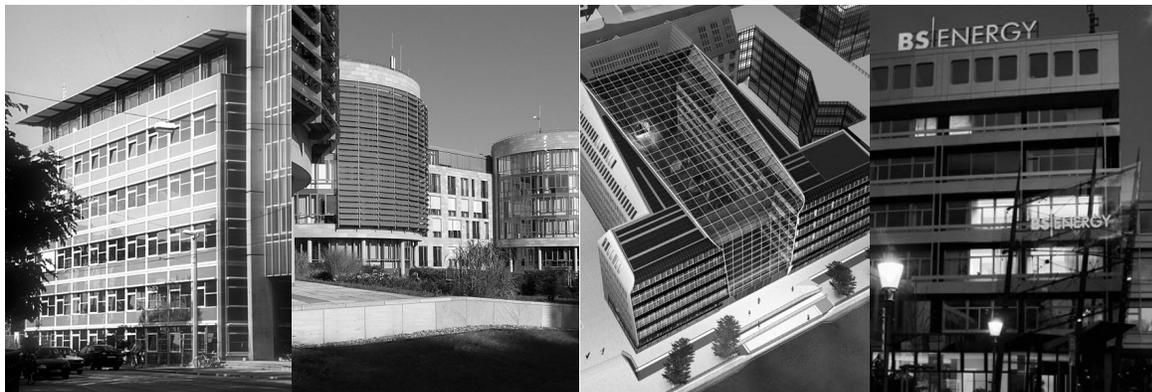
### 1.1 Edificios de oficina

La base de datos para el análisis, se compone de la información obtenida en 30 edificios de oficina, de no más de 10 años de antigüedad o saneados en base a estándares internacionales referidos al cuidado de la energía. Los edificios están afectados por el clima centroeuropeo y se localizan en las ciudades alemanas de Berlín (cantidad de edificios,  $n = 9$ ), Bonn ( $n = 1$ ), Braunschweig ( $n = 5$ ), Hamburgo ( $n = 4$ ), Hannover ( $n = 4$ ), Gelsenkirchen ( $n = 1$ ), Helmstedt ( $n = 1$ ), Leverkusen ( $n = 1$ ), Magdeburgo ( $n = 1$ ), Mannheim ( $n = 1$ ), Osnabrück ( $n = 1$ ) y Wolfsburg ( $n = 1$ ). Estos se sitúan entre los  $48^\circ$  y  $53^\circ$  de latitud norte y los  $6^\circ$  y  $15^\circ$  de longitud este. Algunos de estos edificios se muestran en la Figura 1. A partir de considerar criterios internacionales, es posible discernir entre estrategias empleadas en la ventilación y la climatización. De aquí que los edificios analizados se diferencian en tres categorías o tipos: Tipo 1, (cantidad de edificios evaluados,  $n = 8$ ), Tipo 2 ( $n = 14$ ) y Tipo 3 ( $n = 8$ ). Los tipos, se describen a continuación:

Tipo 1, **T1** (edificios sin climatización). Solo tienen ventilación natural y son aptos para cubrir las exigencias de calefacción y garantizar la comodidad térmica en el período de invierno (ventanas operables, calefactor, radiador). Este tipo de edificios se conocen como “free running building” o “natural ventilated building” (ASHRAE 55, 2004 y Nicol y Humphreys, 2005).

Tipo 2, **T2** (edificios con climatización parcial). Poseen calefacción y ventilación de ciertos sectores del edificio, sin tratamiento del aire más que una recuperación térmica (recirculación del aire tratado). Se caracterizan por disponer de superficies radiantes para calefacción/enfriamiento en combinación con radiadores (Fisch et al., 2007). Para ventilación, poseen sistemas mecánicos centrales o descentralizados (en fachada) de bajo consumo y ventanas operables. En relación a edificios abordados por otros autores, esta clasificación, es intermedia entre los “free running building” y los “air conditioning building” (de Dear et al., 1997 y Nicol y Humphreys, 2005). Respecto al control de los usuarios sobre el clima interior se parecen más a un tipo “Alpha-building” (Elevado control del usuario sobre el ambiente térmico) que a un “Beta-building” (Bajo control del usuario sobre el ambiente térmico). Ver (Raue et al., 2006).

Tipo 3, **T3** (edificios con climatización total). La ventilación natural queda restringida a un sistema mecánico de ventilación y acondicionamiento de aire de alto rendimiento, con retroalimentación mediante superficies radiantes para frío/calor. En gran medida, no poseen ventanas operables, de manera que se incrementa el volumen de aire a renovar para mantener las exigencias de calidad del aire. Poseen equipos con control de humedad y potencias suficientes para abordar rápidas modificaciones sobre los parámetros climáticos. Esta flexibilidad implica grandes inversiones en instalación y elevados costos de mantenimiento para garantizar condiciones térmicas constantes durante el período anual (Fisch et al., 2007 y Gonzalo et al., 2007). Según (de Dear et al. 1997; Nicol y Humphreys, 2005 y Raue et al., 2006), la variante Tipo 3 con ventanas operables, no se diferencia de la Tipo 2. De no poseer ventanas operables, estos edificios se conocen como “air conditioning building” (ASHRAE 55, 2004 y Nicol y Humphreys, 2005). En función del control de los usuarios sobre el clima interior se los clasifican como “Beta building” (Raue et al., 2006).



“I-Zentrum” Braunschweig

“Avacon” Helmstedt

“Energie-Forum” Berlin

“Braunschweig-Energy”

**Figura 1** Algunos ejemplos tipo de los 30 edificios que se incluyen en este trabajo de campo

## 1.2 Mediciones

Un equipo de medición móvil (Mobile LAB, ver Figura 2) 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 una jornada de medición. Se mide con sensores de alta precisión, con tiempos de respuesta y exactitud que exige la norma (DIN EN ISO 7726, 2002). El intervalo de medición fue de un minuto. La unidad móvil está equipada con sensores de temperatura del aire ( $t_a$ ), temperatura operativa ( $t_{op}$ ), temperatura del punto de rocío ( $t_{dew}$ ), asimetría de radiación ( $\Delta t_{pr}$ ) y velocidad del aire ( $v_a$ ) (ver Figura 2). Los datos de medición son recolectados y transferidos a un procesador notebook. Se considera un usuario sentado trabajando y por ello, el sensor de temperatura operativa y la mayoría de ellos se ubican a 1,1 m sobre el nivel de piso. La medición comienza luego de una fase de aclimatación de los sensores (3 minutos) y dura un máximo de 5 minutos. Paralelamente el usuario responde el cuestionario (aprox. 10 min.). Se prevén 5 minutos adicionales para el traslado del Mobile LAB dentro del edificio. En general, pueden relevarse satisfactoriamente cuatro espacios por hora. La unidad móvil fue diseñada sobre la base de los requerimientos de la norma ISO 7726 y la experiencia recolectada en extensas investigaciones de campo (de Dear et al., 1997; McCartney y Nicol, 2002 y Schiller et al., 1988).

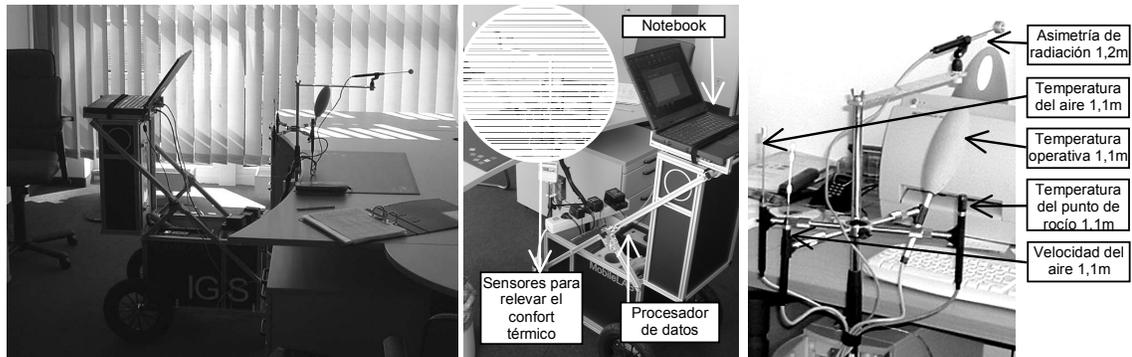


Figura 2 "Mobile LAB" Unidad móvil de medición con sensores para relevar los parámetros climáticos de cada lugar de trabajo

## 1.3 Encuestas

La encuesta constituye una medición de tipo subjetiva que contiene la información diagnóstica del usuario promedio. El cuestionario utilizado tiene preguntas que se refieren a aspectos psicológicos, fisiológicos y físicos del usuario respecto del ambiente térmico que lo rodea (Kuchen, 2008). Está elaborado sobre la base de los objetivos propuestos y en relación a otros modelos estandarizados utilizados en trabajos de campo (Cena y de Dear, 1998; McCartney y Nicol, 2002 y ASHRAE 55, 2004). De la encuesta, el voto CV, "Comfort Vote" (voto de sensación térmica o voto de confort), se emite sobre una escala de 7 puntos, originalmente definida por (Bedford, 1950), posteriormente redefinida por otros autores como escala de ASHRAE y verificada mediante escalas estandarizadas de la norma (EN ISO 10551, 2002). Sobre esta escala de dos polos de disconformidad, el usuario manifiesta su sensación térmica al elegir los valores que van desde -3 (mucho frío), -2 (frío), -1 (algo de frío), 0 (neutro=confort), +1 (algo de calor), +2 (calor), hasta +3 (mucho calor) y con posibilidad de elegir valores intermedios (ver Figura 3). Según (Auliciems y de Dear, 1986), el uso de la escala de ASHRAE permite obtener resultados homogéneos. El voto CV permite encontrar una zona térmicamente aceptable.

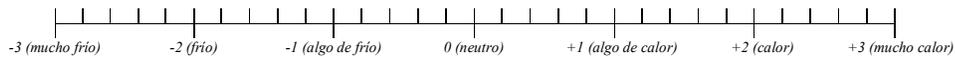


Figura 3 Escala de 7-puntos de ASHRAE para el voto de sensación térmica

De la encuesta, el voto PV, "Preference Vote" (voto de preferencia térmica), permite encontrar una cuota o índice de disconformidad en términos porcentuales. El usuario, expone su preferencia térmica sobre una escala de 3 puntos, verificada con escalas estandarizadas de la norma (EN ISO 10551, 2002), mediante la cual expresa la condición térmica que prefiere, sobre la actual que posee en el momento de la medición. La preferencia térmica sirve de complemento al CV y se obtiene de la respuesta al enunciado: "Prefiero un ambiente térmico:", con valores que van de -1 (más fresco), 0 (ni más fresco, ni más cálido = confort) y +1 (más cálido), sin poder elegir valores intermedios (ver Figura 4).

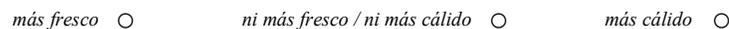


Figura 4 Escala de 3-puntos para emitir el voto de preferencia sobre el ambiente térmico deseado.

## 2 RESULTADOS

### 2.1 Temperatura operativa, $t_{op}$

La combinación entre la temperatura del aire ( $t_a$ ) y la temperatura radiante media ( $t_r$ ) bajo ciertas condiciones del movimiento del aire ( $v_a$ ), se traduce en una temperatura integrada, que se conoce como temperatura operativa ( $t_{op}$ ). Esta afecta globalmente la percepción del usuario sobre el ambiente térmico y se utiliza como parámetro en la evaluación del confort

térmico de espacios interiores. Independientemente de las estrategias de ventilación y climatización, la Figura 5, muestra la distribución de la temperatura operativa en invierno (cantidad de mediciones,  $n = 345$ ), en el período transitorio ( $n = 457$ ) y en verano ( $n = 546$ ). Además se representa el valor medio y la desviación estándar de cada período. La desviación estándar ( $\sigma$ ), es un indicador de la dispersión de los datos recolectados y representa el rango donde se encuentra cerca del 70% de los datos de medición, es decir, la zona más representativa de la muestra. Las condiciones climáticas interiores varían en función de las estaciones del año. La temperatura operativa interior en invierno alcanza un valor medio de  $22,7^{\circ}\text{C}$ ; con  $\sigma = 1,1$ . El valor máximo del período alcanza  $25,6^{\circ}\text{C}$  y el mínimo  $18,4^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 5). En el período transitorio,  $t_{op}$  alcanza un valor medio de  $23,5^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma = 1,2$ ; con valores extremos máx.  $28,5 / \text{mín. } 20,0^{\circ}\text{C}$ , con lo que se manifiesta un mayor intercambio térmico entre el clima interior y exterior, sobre todo a partir de la apertura de ventanas (Kuchen, 2008). En verano se intensifica este intercambio, con un valor medio de  $t_{op}$  que se incrementa en  $25,3^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma = 1,8$ ; máx.  $31,9 / \text{mín. } 21,0^{\circ}\text{C}$ . Las grandes oscilaciones de  $t_{op}$  en verano se dan fundamentalmente en espacios de la variante T1, pudiendo afectar el confort térmico en estos espacios (Kuchen, 2008). Esta situación y sobre todo, las notables oscilaciones de temperatura operativa que se observan durante el período transitorio y de verano, exigen un análisis caracterizado del voto de sensación térmica, en función de las variantes de ventilación y climatización para poder conocer el significado, que dichas temperaturas, tienen para los usuarios.

## 2.2 Voto de sensación térmica, CV

En este trabajo de campo se recolectan 1100 encuestas (votos) sobre la sensación térmica en 30 edificios de oficina. La observación del comportamiento de las temperatura operativa de medición y el voto de confort de la encuesta, constituyen el punto de partida para la evaluación de la comodidad térmica en espacios reales de trabajo. La encuesta (medición subjetiva) y el relevamiento de los parámetros climáticos interiores con sensores (medición objetiva), se llevan a cabo simultáneamente a fin de establecer comparaciones directas y hallar posibles correlaciones. La valoración subjetiva de los usuarios permite encontrar rangos en los que  $t_{op}$  puede percibirse como confortable (sensación térmica neutra), elevada (sensación de calor) o baja (sensación de frío). Para el análisis, se observan las condiciones térmicas en las variantes de ventilación y climatización, en función de las estaciones del año.

La Figura 6 muestra que los espacios de la variante T1 sufren las mayores oscilaciones anuales de temperatura operativa y de sensación térmica. En el período de verano la media de  $t_{op}$  en la variante T1, alcanza  $26,8^{\circ}\text{C}$ ; con  $\sigma = 1,9$  y el voto medio de confort queda definido dentro de la zona de calor, con un valor de  $1,20$ ;  $\sigma = 1$  sobre la escala de ASHRAE. En invierno,  $t_{op}$  desciende a  $22,1^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma = 1,2$  y el voto medio de confort baja a  $-0,13$ ;  $\sigma = 0,9$ . En contraposición a esto, las variantes T2 y T3 en invierno y período transitorio manifiestan condiciones térmicas relativamente constantes y el voto medio de confort se centra en torno a la zona neutra ( $CV = 0$ ), mínimamente desplazada sobre la zona de sensación de calor. El leve incremento de la temperatura operativa en estas dos variantes en verano, se halla muy por debajo del valor encontrado en la variante T1.

Las bajas fluctuaciones en las variantes T2 y T3, hace que sea difícil determinar hasta qué punto, los usuarios aceptan las condiciones térmicas o prefieren un ambiente más fresco o más cálido que el que poseen. Esto exige considerar la relación entre el voto de preferencia térmica y los valores de temperatura operativa de medición. La desviación estándar que se obtiene en las variantes analizadas, permite fortalecer la hipótesis de McIntyre quien indica que en estudios de campo, la desviación promedio debe oscilar entre  $\pm 1$  (McIntyre, 1978). En la Figura 6 se muestra además, para cada variante, el grado de significancia estadística de las poblaciones analizadas. En todos los casos se supera el 99% de confianza, a excepción de la variante T3 en el período de invierno, donde apenas alcanza un 85% de confianza ( $p < 0,14$ ).

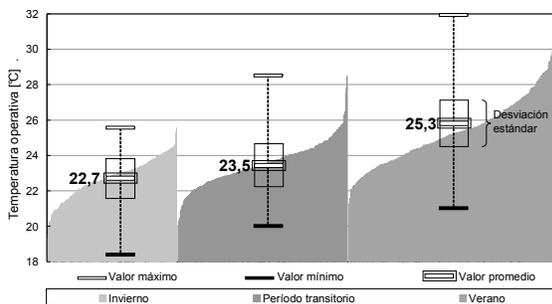


Figura 5 Temperatura operativa de medición en las diferentes estaciones del año

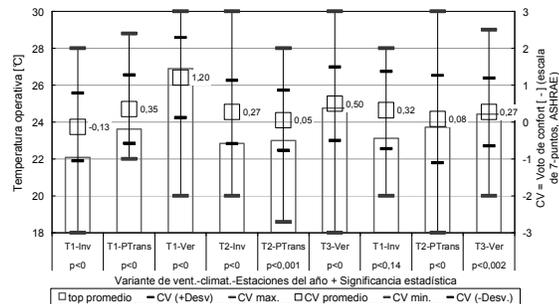


Figura 6 Comparación entre el voto de sensación térmica y el valor medio de la temperatura operativa de medición, en función de las estaciones de año y las variantes en ventilación y climatización

## 2.3 Voto de preferencia térmica, PV

La información que aporta el voto de preferencia PV ( $n = 528$  encuestas), es complementario a la que se obtiene del CV, ya que permite definir rangos de aceptación térmica claramente definidos (de Dear y Brager, 2001). El rango de aceptación térmica podría estimarse en base a deducciones sobre el modelo de confort propuesto por Fanger, quien define que los usuarios conformes con el ambiente térmico, votarían  $CV = \pm 1$  y que los que prefieren un ambiente térmico más frío o más cálido que el que poseen, votarían por encima de  $+1$  y por debajo de  $-1$  respectivamente sobre la escala de 7-puntos de ASHRAE. Este criterio es adoptado por la norma (ISO 7730, 2005) y por otras que basan algunos de sus fundamentos sobre esta última (ASHRAE 55, 2004 y ISSO 74, 2004).

Para establecer un paralelismo con los estudios de Fanger, se expresa el índice de disconformidad en términos porcentuales de la muestra observada. La Figura 7 muestra la distribución porcentual de votos de preferencia de usuarios encuestados en el período transitorio y en verano y solo aquellos que durante la medición demostraron disconformidad térmica ( $PV \neq 0$ ) y prefieren un ambiente más cálido (curva decreciente) o más fresco (curva creciente). Sobre el eje-x de la Figura 7 se expresa la temperatura operativa en clases cada  $2^\circ F$  (Fahrenheit) y su equivalente en grados Celsius. La Figura 7 muestra que la cuota porcentual mínima de usuarios disconformes con el ambiente térmico, por frío o por calor, se obtiene a  $t_{op} = 23,3^\circ C$ . El punto de intersección entre ambas rectas de regresión es indicio de la condición de máxima sensación térmica de confort.

La Tabla 1 muestra de cada variante, los valores de temperatura deseada y la cantidad de edificios analizados en verano y en período transitorio. En verano, la temperatura deseada es  $1K$  (Kelvin) más elevada que en el período transitorio. En espacios de la variante  $T3$  se observan mínimas diferencias estacionales ( $\leq \pm 0,5K$ ). En verano, la temperatura deseada en espacios de la variante  $T1$  y  $T2$  es  $0,7K$  más elevada que la  $T3$ , lo cual constituye un indicio de adaptación de los usuarios de dichas variantes al clima local. En el período transitorio se observan mínimas diferencias entre las variantes analizadas ( $\approx 0,3K$ ).

	$T1$	$T2$	$T3$
Edificios Período transitorio ( $n$ )	4	6	4
Temperatura deseada [ $^\circ C$ ]	$23,2^\circ C; \sigma = 0,6$	$22,9^\circ C; \sigma = 0,9$	$23,2^\circ C; \sigma = 0,5$
Edificios Período de verano ( $n$ )	6	9	4
Temperatura deseada [ $^\circ C$ ]	$24,4^\circ C; \sigma = 0,8$	$24,4^\circ C; \sigma = 0,6$	$23,7^\circ C; \sigma = 0,7$

**Tabla 1** Relación entre los valores medios y de desviación estándar de la temperatura de preferencia en el período transitorio y de verano.

### 3 EVALUACIÓN

#### 3.1 Aceptación y neutralidad térmica

Para la evaluación del confort térmico, se comparan los resultados de la medición con los de la encuesta a través de un análisis de regresión por mínimos cuadrados. Esto permite definir una función objetivo y describir el comportamiento y la interrelación de variables. Varios autores afirman que este análisis constituye un método apropiado para el desarrollo de un modelo de confort (Fanger, 1970; Auliciems, 1981; Schiller et al., 1988; de Dear y Brager, 2001 y Nicol y Raja, 1997). Del análisis del par temperatura operativa versus voto medio de sensación térmica ( $t_{op}$ ,  $CV$ ), es posible observar diferencias entre las variantes de ventilación y climatización analizadas, que merecen ser expuestas (ver síntesis en Tabla 2).

En la Figura 8, las pendientes  $b$  de las rectas de regresión encontradas para las variantes  $T1 = +0,52$ ,  $T2 = +0,69$  y  $T3 = +0,78$  y su intersección con los valores  $\pm 1$  sobre la escala de ASHRAE en el eje-y, permiten encontrar rangos de temperatura operativa, limitados entre los significados “algo de frío” y “algo de calor” ( $CV = \pm 1$ ). Estos rangos se inician entre  $21,4^\circ C$  y  $22,0^\circ C$  y terminan entre  $24,6^\circ C$  y  $25,3^\circ C$  y constituyen una evidencia sobre la aceptación térmica y el nivel de adaptación de los usuarios. Un mismo valor de temperatura no tiene el mismo significado para cada una de las variantes analizadas. La mayor amplitud del rango de aceptación de  $t_{op}$  se observa en espacios de la variante  $T1$ , con valores mínimo de  $21,4^\circ C$  y máximo de  $25,3^\circ C$ , lo cual es indicio de que estos usuarios son más hábiles para adaptarse a mayores amplitudes térmicas.

Cabe señalar que las diferencias entre las pendientes de cada recta de regresión son inferiores a lo esperado. Probablemente, el rango estrecho de  $t_{op}$  en las variantes  $T2$  y  $T3$  a lo largo del período anual, reduzca la significancia de las rectas de regresión encontradas. Estudios llevados a cabo en espacios reales de trabajo en climas cálidos, muestran pendientes  $b$  que varían entre  $+0,31$  y  $+0,38$  (Schiller et al., 1988). La diferencia con las pendientes obtenidas en este trabajo, es indicio de un nivel de adaptación de los usuarios al clima centroeuropeo, es decir, a menores amplitudes térmicas. La correlación ( $r$ , coeficiente de Pearson), que se obtiene del par ( $t_{op}$ ,  $CV$ ), en las variantes  $T1 = +0,47$ ,  $T2 = +0,48$  y  $T3 = +0,54$  en este trabajo, subraya la importancia que tiene la influencia de una población tan extensa de usuarios encuestados (1100 votos), con caracteres físicos, psicológicos y fisiológicos diferentes en cuanto a la percepción de la temperatura (Ye et al., 2006). En experimentos en cámara climática como los que desarrolla Fanger, se alcanzan coeficientes de correlación  $r$  que oscilan entre  $+0,70$  y  $+0,85$ , mientras que en estudios de campo, varían entre  $+0,30$  y  $+0,55$  (Fanger, 1970 y Auliciems, 1981).

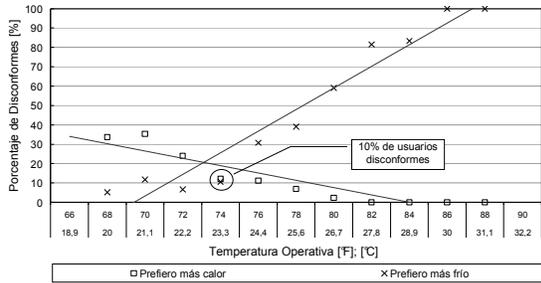
	$T1$	$T2$	$T3$
Cantidad de edificios ( $n$ )	8	14	8
Cantidad de mediciones ( $n$ )	278	498	326
Temperatura operativa [ $^\circ C$ ]	$24,4^\circ C; \sigma = 2,7$	$23,8^\circ C; \sigma = 1,3$	$23,7^\circ C; \sigma = 1$
Voto de sensación térmica [-]	$+0,62; \sigma = 0,88$	$+0,38; \sigma = 0,51$	$+0,20; \sigma = 0,55$
Pendiente de la recta $b$	$+0,52; \sigma = 0,21$	$+0,69; \sigma = 0,37$	$+0,78; \sigma = 0,34$
Ordenada al origen $a$	$-12,1; \sigma = 5,2$	$-16,0; \sigma = 8,6$	$-18,2; \sigma = 7,4$
Coeficiente de correlación ( $r$ )	$+0,47$	$+0,48$	$+0,54$

**Tabla 2** Análisis de regresión lineal entre la temperatura operativa de medición y el voto de sensación térmica, para las diferentes variantes en ventilación y climatización. Valores medio y desviación estándar.

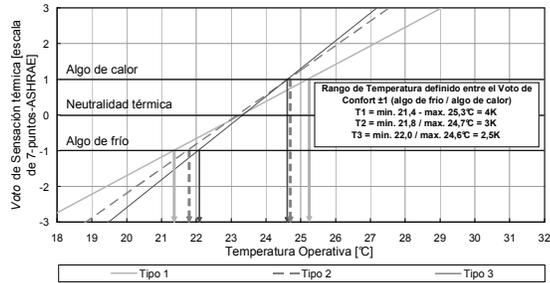
De conclusiones publicadas en (Kuchen y Fisch, 2009) se destaca que los usuarios de espacios con condiciones térmicas constantes a lo largo del período, experimentan una adaptación continua, independientemente del clima exterior y llegan a aceptar condiciones térmicas que les son impuestas, aún cuando el índice  $PMV$ , “Predicted Mean Vote”, (índice de predicción sobre voto medio de sensación térmica), que propone la norma (ISO 7730, 2005) indique que las condiciones

térmicas no son buenas (comparar con Figura 8 en Kuchen y Fisch, 2009). Esto permite justificar que los usuarios de espacios de la variante T3 (con climatización total), acepten rangos más estrechos y mínimas desviaciones de temperatura operativa y prefieran condiciones térmicas cuasi constantes (ver Tabla 1). Cabe destacar que cuanto más estrecho se mantiene el rango de temperatura operativa y mínimas sean las desviaciones estacionales de este parámetro, mayores serán las expectativas de los usuarios sobre el confort térmico (Hellwig, 2005; Kuchen, 2008 y de Dear et al., 1997).

El concepto de neutralidad térmica sirve para expresar el estado físico, psicológico y fisiológico en el que el usuario percibe el ambiente térmico agradable, no siente frío, ni calor y emite un voto  $CV = 0$  (cero) sobre la escala de 7-puntos de ASHRAE. Si se considera el enunciado de Griffiths, donde indica que cuando  $CV = 0$ , entonces  $t_{op} = t_n$  (ver Griffiths, 1990 y Kuchen y Fisch, 2009), es posible calcular un valor de temperatura de neutralidad ( $t_n$ ) para cada caso de estudio. Los valores de temperatura operativa que se leen sobre la intersección de la recta de regresión con el eje-y = 0 en la Figura 8, (voto de sensación térmica  $CV = 0$ ), alcanzan un valor de  $t_{op}$  de 23,2°C en espacios de la variante T1 y T2 y en T3 de 23,3°C. El concepto de neutralidad está en directa relación con el de preferencia térmica. A partir de comparar la Figura 7 con la Figura 8, se sugiere la existencia de una zona de confort, donde la disconformidad térmica llegó a ser mínima.



**Figura 7** Cuota de insatisfechos por condiciones térmicas de frío o calor respecto de la temperatura operativa, según (Kuchen, 2008)

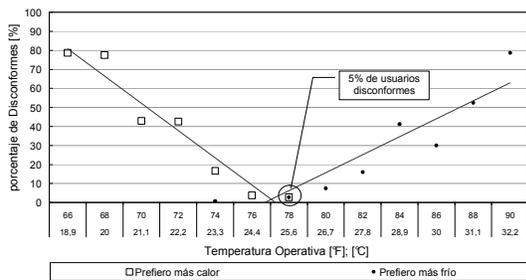


**Figura 8** Modelo de regresión lineal entre la temperatura operativa y el voto medio de sensación térmica en función de las variantes de ventilación y climatización

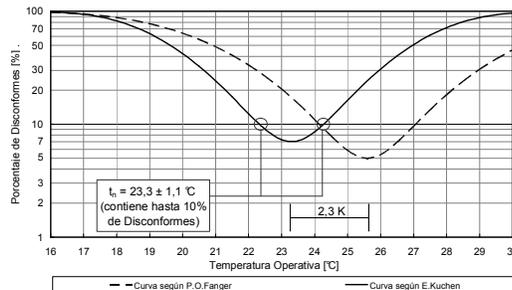
### 3.2 Predicción del índice de disconformidad

La evaluación sobre el índice de disconformidad exige establecer un paralelismo con los estudios de Fanger. La Figura 7 muestra las rectas de regresión que se obtienen al relacionar el voto de preferencia por frío o por calor, respecto a la temperatura operativa de medición. La Figura 9 muestra las rectas que Fanger obtiene en sus experimentos en cámara climática controlada. El desarrollo de un modelo de predicción del confort térmico exige hacer un análisis de probabilidad entre el índice de disconformidad y los valores de temperatura operativa de medición. Para la comparación con el modelo de Fanger, se desarrolla una curva de regresión que se asemeja a una distribución gaussiana invertida, donde el valor mínimo o ápice de la curva coincide con el mínimo porcentaje de disconformes respecto al ambiente térmico y con el valor de temperatura de neutralidad. En la Figura 10, se superponen el modelo desarrollado en este trabajo con la curva encontrada por Fanger (línea de trazo discontinuo).

El valor de temperatura de neutralidad que encuentra Fanger es 25,6°C y el mínimo porcentaje de disconformes de 5% (Fanger, 1970), valores adoptados por la norma internacional (ISO 7730, 2005) y la norma estadounidense (ASHRAE 55, 2004). Aunque Fanger advierte sobre la posibilidad de adaptación térmica de los usuarios y la existencia de diferencias climáticas, geográficas, culturales, etc., la fórmula de confort que desarrolla, no admite variables. En este trabajo, se encuentra una temperatura de neutralidad 2,3K más baja que la que encuentra Fanger (ver Figura 10) y el mínimo porcentaje de disconformes, es de 7% a  $t_{op} = 23,3^\circ\text{C}$ . En otros estudios en cámara controlada, Mayer, define que el mínimo porcentaje de disconformes no es menor al 20% y luego lo corrobora, en que no sobrepasa el 15% (Mayer, 1998). Huizenga, se basa en gran cantidad de estudios y llega a la conclusión de que el porcentaje mínimo de disconformes puede estar incluso por encima del 40% (Huizenga et al., 2006).



**Figura 9** Cuota de insatisfechos por condiciones térmicas de frío o calor respecto de la temperatura operativa, según (Fanger, 1970)



**Figura 10** Porcentaje de disconformidad en función de la temperatura operativa de medición

En la Figura 10 se muestra que la cuota de disconformes se incrementa en tanto aumente o disminuya el valor de temperatura operativa de 23,3°C. con lo cual es posible definir rangos de aceptación térmica y un indicador porcentual de disconformidad para cada rango. El 10% de usuarios disconformes se halla dentro de un rango de  $t_{op}$  definido entre  $23,3 \pm 1,1^\circ\text{C}$  y se incrementa hasta un 20% en tanto la temperatura operativa no supere  $25,5^\circ\text{C}$  o disminuya por debajo de  $21,5^\circ\text{C}$ . El 35% de disconformes se halla entre  $23,3 \pm 3^\circ\text{C}$  (ver Figura 10).

La Ecuación (1) representa la función de la curva de regresión no lineal que se muestra en la Figura 10 y responde al análisis de probabilidad desarrollado en este trabajo. Esta ecuación permite calcular el índice de disconformidad térmica. El modelo de predicción propuesto en este trabajo, a diferencia de lo propuesto en estándares internacionales (ISO 7730, 2005 y ASHRAE 55, 2004), permite introducir dos variables locales que definen la condición de confort térmico. La *variable 1*, el valor de temperatura de neutralidad de cálculo, al considerar el *voto* de confort de los usuarios y la *variable 2*, el valor de temperatura operativa de medición. De esta manera, se logran considerar factores que tienen influencia sobre el grado de adaptación térmica de los usuarios, así como considerar diferencias climáticas estacionales, geográficas, culturales, entre otras y conducir a una optimización del funcionamiento adecuado de edificios con variantes en los sistemas de ventilación y climatización.

$$\text{Ecuación (1)} \quad \text{Disconformes}_{(\text{Kuchen})} = 100 - 93 \cdot \exp^{(-0,0009 \cdot (-t_n + t_{op})^4 - 0,034 \cdot (-t_n + t_{op})^2)}; \quad [\%]$$

$t_n$  = temperatura de neutralidad

$t_{op}$  = temperatura operativa

## CONCLUSIONES

La evaluación del confort térmico expone claras diferencias sobre la aceptación térmica de usuarios de espacios con variantes en la estrategia de ventilación y climatización y se concluye que, el modelo de confort debe introducir variables propias del entorno local. La pendiente *b* del análisis de regresión, es un indicador sobre la adaptación de los usuarios al clima local. Los usuarios de espacios con ventilación natural, experimentan un contacto más frecuente con el exterior y son más tolerantes a rangos más amplios de temperatura operativa. En contraposición a esto, los usuarios de espacios con climatización total, experimentan mínimas variaciones de temperatura y por ello, son más sensibles a cambios de temperatura. La percepción térmica de los usuarios de espacios de la variante T3 es 1,5 veces más sensible que en espacios de la variante T1. En espacios de la variante T2 se observa una situación intermedia, donde los usuarios son hasta 1,2 veces más sensibles que en la T1.

Los variados niveles de adaptación del usuario, no pueden ser evaluadas bajo un mismo criterio y más bien, constituyen un potencial para hacer más eficiente el funcionamiento de edificios con diferentes sistemas de ventilación y climatización. A partir del modelo desarrollado en este trabajo, se destaca la importancia de relevar el *voto* de confort y la necesidad de que la encuesta y la medición sean simultáneas, para poder calcular la temperatura de neutralidad y describir la zona de confort térmica. Un resultado similar se obtiene de la temperatura de preferencia, la cual sirve además, para indicar la disconformidad térmica en términos porcentuales y describir la fuerte significación que puede tener una variación de  $t_{op}$  en  $\pm 1^\circ\text{C}$  sobre el consumo energético del edificio. La Ecuación (1) posibilita conocer el índice de disconformidad térmica de un grupo de usuarios, incorporando a  $t_{op}$  y  $t_n$  como variables. Esto constituye una innovación de importancia, ya que permite abordar el confort térmico de espacios reales y desarrollar estrategias para la optimización energética de edificios. Futuras investigaciones posibilitarían aplicar este método en otras regiones y países con entornos climáticos y culturales distintos.

## REFERENCIAS

### Norma

- ASHRAE 55:2004 - "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy" (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55:1992).
- DIN EN ISO 7726. (2002). Umgebunklima. Instrumente zur Messung physikalischer Größen (ISO 7726:1998). Deutsche Fassung EN ISO 7726:2001.
- EN ISO 10551. (2002). Ergonomie des Umgebunklimas. Beurteilung des Einflusses des Umgebunklima unter Anwendung subjektiver Bewertungsskalen" (ISO 19551:1995)". Deutsche Fassung EN ISO 10551:2002.
- ISO 7730. (2005). 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.
- ISSO 74. (2004). Thermische Behaaglijkheid. New Dutch Thermal Comfort Guideline. Publication 74, Rotterdam, Holland.

### Artículo de Revista

- 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.
- 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.
- Auliciems A. y 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.
- 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.
- Boestra A. C. (2006). The adaptive thermal comfort criterion in the new EPBD IEQ Standard. BBA Indoor Environmental Consultancy, The Netherlands (bba@binnenmilieu.nl)

- Cena K. y 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.
- de Dear R. (2004). Thermal comfort in practice. Division of Environmental and Life Sciences, Macquarie University, Australia; *Indoor Air*; 14 (Suppl 7): 32-39.
- de Dear R. y Brager G. S. (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment"; *Int. J. Biometeorol.* (2001) 45: 100-108.
- Griffiths I. (1990). Thermal Comfort Studies in Buildings with Passive Solar Features. Field Studies. Report to the Commission of the European Community, ENS35 090 UK.
- Hellwig R.T. y Bischof W. (2006). Gültigkeit thermischer Behaglichkeitsmodelle. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. *Bauphysik* 28, Heft 2.
- Huizenga C.; Abbaszadeh S.; Zagreus L. y Arens E. (2006). Air Quality and Thermal Comfort in Office Buildings: Results of a Large Indoor Environmental Quality Survey. Proceedings of Healthy Buildings 2006, Lisbon, Vol. III, 393-397.
- Kuchen E y Fisch M. N. (2009). Spot Monitoring - Thermal comfort evaluation in 25 office buildings in winter. *Building and Environment*; 44 (4):839-847.
- Mayer E. (1998). Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig?. *Klimatechnik / Behaglichkeit*; Ki Luft- und Kältetechnik 12/1998.
- McCartney K. J. y Nicol J. F. (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe: Results of the SCATs project. Oxford Centre for Sustainable Development, Oxford Brookes University.
- McIntyre D. A. (1978). Three approaches to thermal comfort. *ASHRAE Transactions*, Vol. 84, Part 1.
- Nicol J. F. y 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.
- Nicol J. F. y Humphreys M. A. (2005). Maximum temperatures in buildings to avoid heat discomfort. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", Santorini, Greece.
- Nicol J. F. y Raja, I. A. (1997). Indoor thermal comfort: the Pakistan study. *Energy for Sustainable Development*; Letter, No. 5; 1/1997; pp. 50-60.
- Raue A. K.; Boestra A. C.; van der Linden A. C. y Kurvers, S. R. (2004). NATVENT Buildings versus HVAC Buildings. A New Dutch Thermal Comfort Guideline. 25th AIVC Conference, Prague, Czech Republic, 2004.
- Raue A. K.; Kurvers S. R.; van der Linden A. C.; Boestra A. C. y Plokker W. (2006). Dutch Thermal Comfort Guidelines. From weighted temperature exceeding hours towards adaptive temperature limits; the Netherlands.
- Schiller G. E.; Arens E. A.; Bauman P. E.; Benton C.; Fountain M. y Doherty T. (1988). A Field Study of Thermal Environments and Comfort in Office Buildings. Centre for the Built Environment; University of California, Berkeley; No. 3164 (RP-462).
- Ye X. J.; Zhou Z. P.; Lian Z. W.; Liu H. M.; Li C. Z. y Liu Y. M. (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.

#### **Libro**

- de Dear R.; Brager G. S. y 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, Berkeley, USA; ASHRAE RP-884.
- 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.
- Fisch M. N.; Plesser S. y Bremer C. (2007). EVA – Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude. Bericht zur Grobanalyse; BMWA.
- 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.
- Gonzalo G. E.; Nota V. M.; Hernández S. P.; Martínez C. F. y Ledesma S. L. (2007). Diseño Bioclimático de Oficinas. Pautas para San Miguel de Tucumán. Centro de Estudios Energía y Medio Ambiente, Instituto de Acondicionamiento Ambiental. 1ª ed. - Tucumán: el autor, 2007, ISBN 987-43-9361-0, 285 p., 30x21 cm.
- Hellwig R. T. (2005). Thermische Behaglichkeit. Unterschiede zwischen frei- und mechanischen belüfteten Büro-gebäuden aus Nutzersicht. PhD Thesis. Dissertation: Technische Universität München.
- Kuchen E. (2008). Spot-Monitoring zum thermischen Komfort in Bürogebäude. PhD Thesis. Dissertation: Technische Universität Braunschweig. ISBN 978-3-89959-783-7, S. 203, Der Andere Verlag, Tönning, Alemania.

#### **ABSTRACT**

International standards indicate the requirements on thermal comfort to be achieved in workspace. These are based on a model developed by Prof. Fanger of Indoor Environment and Energy, Denmark. Today 40 years of research studies shows a trend. The aim of this work is to obtain tools for assessment of thermal comfort. It develops a method based on simultaneous measurements and surveys, using a mobile unit equipped with sensors and a questionnaire on the thermal environment. Thermal conditions are collected in workspaces of 30 office buildings with variations in ventilation and air conditioning systems. The correlation between objective and subjective data reveals a new formula of comfort, variable depending on local issues. The comfort temperature of the analyzed buildings is 23,3°C and the minimum rate of dissatisfied reaches 7%.

**Keywords:** Fieldwork, index of dissatisfied, neutral temperature, thermal sensation, thermal preference