

MODELO DE CONFORT. RANGOS DE ACEPTACION TERMICA

Ernesto Kuchen , M. Norbert Fisch , Guillermo E. Gonzalo

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, Tel. +54 264 423 2395, Fax +54 264 423 5397, ernestokuchen@faud.unsj.edu.ar
Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS) – Fakultät für Architektur, Bauwesen und Umweltwissenschaften – Technische Universität Braunschweig – Mühlenfordstraße 23, 10. OG D-38106 – Braunschweig, Alemania.
www.igs.bau.tu-bs.de, Tel. +49 531 391 3555, Fax +49 531 391 8125, prof.fisch@egsplan.de

Recibido: 4-8-10; Aceptado: 4-9-10.

RESUMEN.- Es objetivo del trabajo, disponer de una herramienta para evaluar la insatisfacción térmica en espacios de trabajo en edificios de oficina a partir de definir rangos de aceptación térmica. Para ello, un monitoreo puntual con mediciones y encuestas simultaneas, permite relevar las condiciones térmicas de 280 espacios reales de trabajo, distribuidos en 30 edificios de oficina con variantes en los sistemas de climatización. La evaluación, a partir del análisis de regresión, permite encontrar fuertes correlaciones entre los datos de medición y las encuestas hechas a los usuarios de estos espacios. Los resultados obtenidos muestran que una variación de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en la temperatura operativa es de gran importancia para alcanzar la eficiencia energética en edificios.

Palabras claves: trabajo de campo, temperatura de neutralidad, sensación térmica, preferencia térmica, eficiencia energética

COMFORT MODEL. THERMAL ACCEPTANCE RANGES

ABSTRACT.- The objective of the work is to count with a tool for evaluating the thermal discomfort index of indoor spaces, on the basis of defining the range of thermal acceptance expressed by users. To achieve this, a spot work sites monitoring approach composed of parameter measurement and individual questionnaires filled simultaneously by the users allow surveying the thermal conditions of 280 working sites of 30 office buildings featuring different acclimatisation systems. Data evaluation through regression analysis allows finding a strong correlation between measurement data and the questionnaire results for each work space. As a conclusion, the results show the importance that a variation of, for example $\pm 2^{\circ}\text{C}$, in operative temperature may have on the ideal energy efficiency values sought for the building.

Keywords: fieldwork, neutral temperature, thermal sensation, thermal preference, energy efficiency.

1. INTRODUCCION

El confort térmico puede definirse como el estado de satisfacción física y psíquica con el ambiente térmico. Desde hace más de un siglo, los investigadores buscan traducir la compleja interrelación de parámetros climáticos y no climáticos y su influencia sobre la sensación y preferencia térmica de usuarios, en pos de definir indicadores estándar de disconformidad térmica y lograr un control mayor sobre los acontecimientos térmicos en edificios. Un modelo matemático, desarrollado por el Prof. Paul Ole Fanger en el Centre for Indoor Environment and Energy, Dinamarca, es reconocido internacionalmente. A partir de experimentos con personas en una cámara climática controlada, relaciona el voto de sensación térmica de personas con valores de medición de la temperatura operativa (Fanger, 1970). Sus estudios conducen al desarrollo del índice PMV “Predicted Mean Vote” (índice de predicción del voto medio) y el índice PPD, “Predicted Percentage of Dissatisfied” (índice de predicción del porcentaje de disconformes) muy utilizados internacionalmente y adoptados por la norma (ISO 7730).

Varios autores afirman que factores personales, como la constitución corporal, el género, la ingesta de alimentos (Mayer, 1998) y parámetros del entorno inmediato, como el clima exterior (Auliciems, 1969), afectan la percepción térmica de las personas. Investigaciones llevadas a cabo por Kuchen y Fisch (2009) y Kuchen (2008), indican que los usuarios manifiestan que aún en espacios con condiciones térmicas constantes son capaces de experimentar procesos de adaptación; tales como: modificar los niveles de ropa, la posición de un termostato, controlar la apertura de puertas y ventanas, ajustar un parasol, etc. De esta manera pueden aceptar condiciones térmicas que les son impuestas y con ello se coincide con otros autores, en que los usuarios no son receptores pasivos del ambiente térmico sino que, por el contrario, mantienen una actitud crítica que se traduce en la habilidad de adaptación (Hellwig y Bischof, 2006; Boestra, 2006; Raue et al., 2004; Raue et al., 2006; Nicol y Humphreys, 2005; de Dear, 2004 y Gonzalo et al., 2007). Los mismos, sostienen que el empleo de la norma ISO 7730, que se basa en el modelo de Fanger, posee desviaciones que son propias del método de obtención del mismo, por

ejemplo: que la habilidad de adaptación de los usuarios a diferentes ambientes térmicos no se considera en los experimentos de Fanger. 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.

Los resultados obtenidos en este trabajo de campo, llevado a cabo en 280 espacios distribuidos en 30 edificios de oficina, en Alemania, permiten observar fuertes correlaciones entre el voto medio de sensación térmica, el voto medio de preferencia térmica de la encuesta y los valores de temperatura operativa de medición, con lo cual es posible definir rangos de aceptación térmica del 90%, del 80%, etc. El desarrollo de un modelo de confort, posibilita conocer el grado de aceptación térmica que poseen los usuarios de espacios de trabajo y constituye la base para definir criterios de eficiencia energética para edificios.

2. DESARROLLO

La base de datos se obtiene de mediciones y encuestas simultáneas, llevadas a cabo en 30 edificios de oficina, en Alemania. Los edificios, no tienen más de 10 años o han sido saneados en el último tiempo y responden a estándares sobre construcción energética y ecológica sustentable (EnEV) (ver Figura 1). Los edificios analizados se diferencian en tres tipos: Sin climatización o Tipo 1 (T1), con climatización parcial o Tipo 2 (T2), y con climatización total o Tipo 3 (T3) (ver Kuchen et al. 2009 y Kuchen 2008).



Administr. Pública "Neues Region Haus" en Hannover



Ccasa de seguros "Allianz" en Berlín

Fig. 1 Ejemplos de los 30 edificios que se incluyen en este trabajo de campo

La medición se lleva a cabo con una unidad móvil (Mobile LAB, ver Figura 2), que permite desplazar el instrumental dentro del edificio a cada espacio de trabajo y recolectar los parámetros climáticos de interés. La unidad móvil está equipada con sensores de temperatura del aire (t_a),

temperatura operativa (t_{op}), temperatura del punto de rocío (t_{dev}), asimetría de radiación (t_{pr}) y velocidad del aire (v_a), ubicados en su mayoría, a 1,1 m sobre el nivel del suelo. El intervalo de medición es de un minuto. Por tratarse de un monitoreo puntual (Spot-Monitoring), que permite correlacionar datos de medición con una encuesta simultánea, en cada lugar de trabajo, la medición no dura más de diez minutos, con lo cual es posible relevar varios espacios en el lapso de una jornada y obtener un corte transversal de la información (Kuchen et al. 2009 y Kuchen 2008). 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).

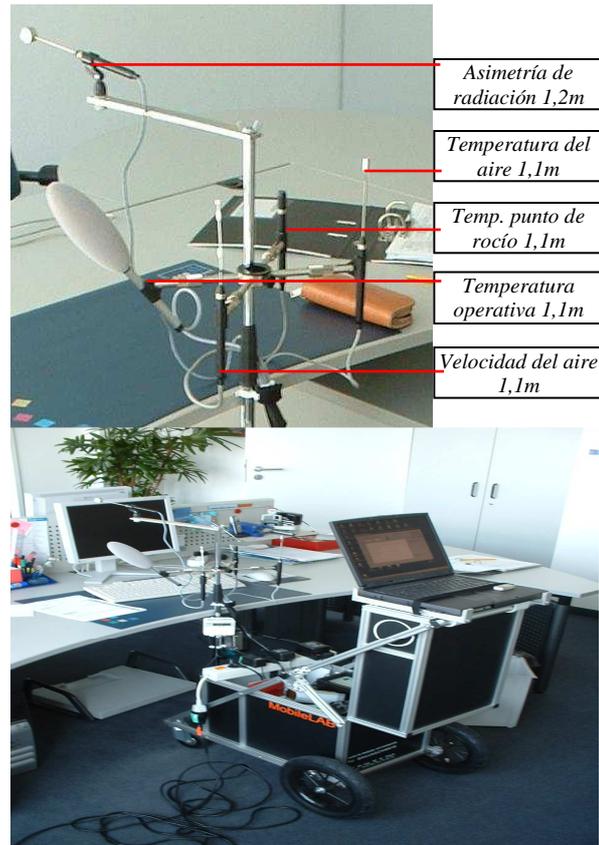


Fig. 2 "Mobile LAB" Unidad móvil de medición con sensores para relevar los parámetros climáticos de cada lugar de trabajo

La encuesta permite recolectar, simultáneamente a la medición con sensores, la opinión subjetiva del usuario en relación al ambiente térmico que lo rodea. El voto de sensación térmica CV, "Comfort Vote", se emite sobre una escala de 7 puntos y con ello se establece un paralelismo de comparación con el índice PMV, desarrollado por el Prof. Fanger. La escala de votación, es conocida como escala de ASHRAE, tiene dos polos de desconformidad y va desde -3 (mucho frío), -2 (frío), -1 (algo de frío), 0 (neutro=confort), +1 (algo de calor), +2 (calor), hasta +3 (mucho calor). El voto CV, permite describir una zona térmicamente aceptable (ver Figura 3), (Kuchen et al. 2009; Kuchen 2008).

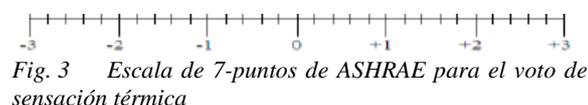


Fig. 3 Escala de 7-puntos de ASHRAE para el voto de sensación térmica

En la misma encuesta, otra escala de valor permite encontrar el voto de preferencia térmica *PV*, “Preference Vote” (ver Figura 4). Este, se emite sobre una escala de 3 puntos, mediante la cual se expresa la condición térmica que se prefiere, sobre la actual que se posee en el momento de la medición, con valores que van de -1 (más fresco), 0 (ni más fresco, ni más cálido = confort) y +1 (más cálido) (ver Kuchen et al. 2009 y Kuchen2008). El voto *PV*, permite encontrar una cuota de disconformes con el ambiente térmico, en términos porcentuales.

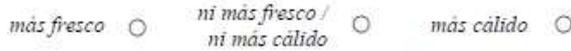


Fig. 4 Escala de 3-puntos para emitir el voto de preferencia sobre el ambiente térmico deseado.

3. EVALUACION DE LOS RESULTADOS

3.1. Sensación térmica

En este trabajo de campo se recolectan 1100 encuestas (votos) de sensación térmica en 30 edificios de oficina. La encuesta y el relevamiento de los parámetros climáticos interiores con sensores, se llevan a cabo simultáneamente a fin de establecer comparaciones directas y hallar posibles correlaciones. Para el análisis se toma la temperatura operativa t_{op} , que es una temperatura integrada que afecta globalmente la percepción térmica del usuario respecto del ambiente térmico. La temperatura operativa combina la acción de la temperatura del aire (t_a), la radiante media (t_r) y la velocidad del aire (v_a), sobre la percepción térmica de los usuarios.

Las mediciones indican que las condiciones climáticas interiores varían en función de las estaciones del año. Una primera aproximación muestra que los espacios de la variante *T1* (sin climatización), sufren las mayores oscilaciones anuales de sensación térmica, ya que la alta temperatura operativa media, medida en el período de verano ($25,3^{\circ}\text{C} \pm 1,8$), provoca que el voto medio de sensación térmica se encuentre dentro de la zona de calor, con un valor medio de $CV = 1,20 \pm 1$ sobre la escala de ASHRAE (ver Figura 5). En el período de invierno, en la misma variante *T1*, la temperatura operativa interior desciende ($22,7^{\circ}\text{C} \pm 1,1$) y el voto de confort CV baja a $-0,13 \pm 0,9$.

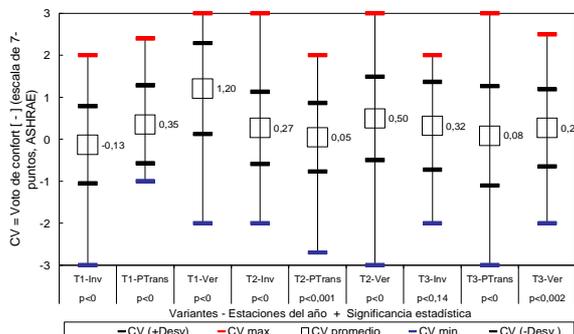


Fig. 5 Comparación entre el voto de sensación térmica y el valor medio de la temperatura operativa de medición, en función de las estaciones de año y las variantes en ventilación y climatización

En contraposición al comportamiento de la variante *T1*, las variantes *T2* y *T3* (con climatización parcial y total), manifiestan condiciones térmicas relativamente constantes a lo largo del período anual y el voto medio de confort se

centra en torno a la zona neutra de sensación térmica, algo desplazada sobre la zona de sensación de calor ($CV \approx 0$). En el período transitorio, se observa en general, que para todas las variantes una situación intermedia de los valores de temperatura operativa interior ($23,5^{\circ}\text{C} \pm 1,2$), se ve afectada por el intercambio térmico con el exterior que se genera a partir de la apertura de ventanas. En verano se intensifica este intercambio, sobre todo, en espacios de 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. El análisis de regresión por mínimos cuadrados, permite definir una función objetivo y describir la relación entre la temperatura operativa de medición y el voto CV de la encuesta. Varios autores afirman que este análisis constituye un método apropiado para la evaluación del confort térmico (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 encontrar rectas de la forma:

$$CV = b \cdot t_{op} - a \quad (1)$$

Las rectas de regresión encontradas para espacios con variantes en los sistemas de climatización (ver Figura 6) se escriben como sigue:

$$\text{Tipo 1: } CV = 0,52 \cdot t_{op} - 12,1 \quad ; [-] \quad (2)$$

$$\text{Tipo 2: } CV = 0,69 \cdot t_{op} - 16 \quad ; [-] \quad (3)$$

$$\text{Tipo 3: } CV = 0,78 \cdot t_{op} - 18,2 \quad ; [-] \quad (4)$$

La Figura 6 muestra las rectas de regresión encontradas. Las pendientes b de las rectas para las variantes $T1 = +0,52$, $T2 = +0,69$ y $T3 = +0,78$ y su intersección con los valores ± 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 constituyen una evidencia sobre la aceptación térmica 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*, lo cual es indicio de que estos usuarios son más hábiles para adaptarse a mayores amplitudes térmicas.

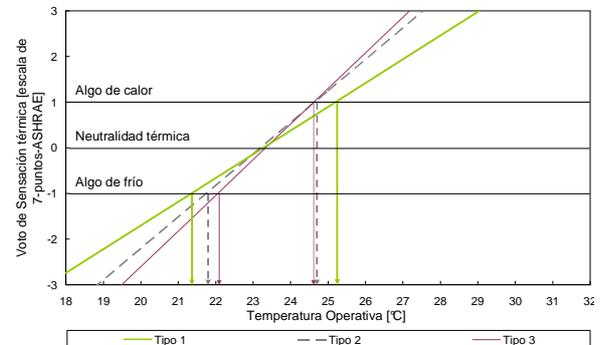


Fig. 6 Modelo de regresión lineal entre la temperatura operativa y el voto medio de sensación térmica en función de las variantes de ventilación y climatización

El valor de 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).

3.2. Neutralidad térmica

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. Los valores de temperatura operativa que se leen sobre la intersección de la recta de regresión con el eje- $y = 0$ en la Figura 6, alcanzan un valor de t_{op} de $23,2^{\circ}\text{C}$ en espacios de la variante $T1$ y $T2$ y en $T3$ de $23,3^{\circ}\text{C}$. El criterio de neutralidad en el modelo de confort nace de considerar el enunciado de Griffiths, donde indica que cuando $CV = 0$, entonces $t_{op} = t_n$ (ver Griffiths, 1990) y por ello, es posible escribir la Ecuación (1) como sigue:

$$0 = b \cdot t_n - a \quad (5)$$

De Ecuación (1) y (5), se deduce una temperatura de neutralidad t_n , como se muestra en la Ecuación (6), donde "c" es un valor constante y puede variar en función de aspectos locales, tales como el grado del vínculo que posee el usuario entre interior y exterior, es decir en función de las variantes de climatización y las estaciones del año (apertura de ventanas).

$$t_n = t_{op} - (c \cdot CV) \quad (6)$$

donde $c = 1/b$

De la cantidad total de votos de confort y mediciones de que se dispone, de cada estación del año y de cada edificio estudiado, se puede obtener un valor de temperatura de neutralidad. En la Figura 7 se comparan valores comunes obtenidos en condiciones similares mediante análisis de regresión para $t_n = f(t_{op})$. Las rectas de regresión que se muestran en la Figura 7, responden a cada variante analizada con las siguientes ecuaciones:

Tipo 1: $t_n = 0,42 \cdot t_{op} + 13 \quad ; [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$

Tipo 2: $t_n = 0,66 \cdot t_{op} + 7,4 \quad ; [^{\circ}\text{C}] \quad (8)$

Tipo 3: $t_n = 0,71 \cdot t_{op} + 6,6 \quad ; [^{\circ}\text{C}] \quad (9)$

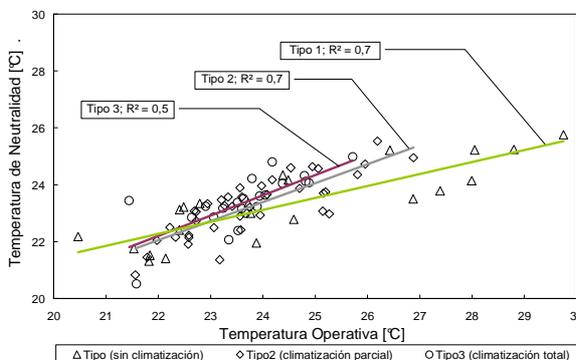


Fig. 7 Relación entre la temperatura de neutralidad y la temperatura operativa en las variantes analizadas

En la Figura 7, se identifican los espacios de la variante $T1$ a través de la elevada varianza que sufre el parámetro t_{op} a lo

largo del período anual. Entre las variantes de ventilación y climatización se observan mínimas diferencias entre las variantes $T2$ y $T3$, y que probablemente responden a los rangos de aceptación de temperatura que se muestran en la Figura 6.

La Figura 8 muestra la recta de regresión promedio para la relación t_n y t_{op} , la cual se compara con otras investigaciones de campo. La recta encontrada se indica en la Ecuación (10). Según el estudio de Humphreys, los usuarios poseen una capacidad de adaptación muy elevada ya que ante la modificación de la temperatura operativa en 1K , la temperatura de neutralidad se corresponde con una variación de $0,8\text{K}$. En relación a esto, la investigación llevada a cabo en este trabajo indica que, cada 1K de aumento de temperatura operativa, se corresponde con un incremento de temperatura de neutralidad de $0,5\text{K}$. Esto significa que los usuarios de espacios de trabajo en edificios de oficina en este estudio son más sensibles a los cambios de temperatura que en aquellos estudios. Auliciems considera la influencia de la temperatura del aire sobre la temperatura de neutralidad y sus resultados se ubican en una situación intermedia entre los otros dos.

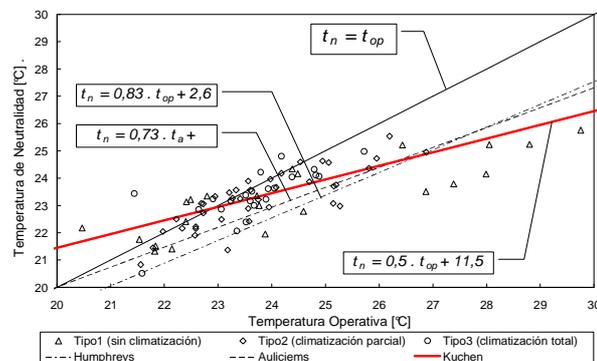


Fig. 8 Comparación entre el modelo de regresión de este trabajo y otros estudios de campo

$$t_n = 0,5 \cdot t_{op} + 11,5 \quad ; [^{\circ}\text{C}] \quad (10)$$

La Figura 8 y la Ecuación (10) indican que para una temperatura operativa de 22°C , la temperatura de neutralidad es de $22,5^{\circ}\text{C}$. Cuando $t_{op} > 22^{\circ}\text{C}$, entonces $t_n < t_{op}$. A modo de ejemplo, cuando $t_{op} = 29^{\circ}\text{C}$; $t_n = 26^{\circ}\text{C}$. Estos aspectos indican la existencia de una temperatura de neutralidad definida por el usuario de espacios de trabajo. La recta encontrada en la Figura 8, representa la relación entre la temperatura de neutralidad y la operativa en espacios de trabajo afectados por el clima centro europeo y por ello, no es transferible a otros edificios pertenecientes a climas diferentes. El concepto de neutralidad está en directa relación con el de preferencia térmica. Para determinar rangos de aceptación y cuotas de disconformidad térmica es necesario abordar el criterio de preferencia térmica en interiores.

3.3. Preferencia térmica

La dificultad para determinar la aceptación y disconformidad térmica en términos porcentuales, que se observa en el análisis del voto CV , exige considerar la relación entre el voto de preferencia térmica y los valores de temperatura operativa de medición. En este trabajo de campo se recolectan 528 votos sobre la preferencia térmica en 19 edificios de oficina. La información que aporta el voto

de preferencia térmica *PV*, es complementaria a la que se obtiene del voto *CV*, ya que permite definir rangos de aceptación térmica (de Dear y Brager, 2001).

El análisis se lleva a cabo en verano y en período transitorio. En verano, la temperatura deseada es 1K más elevada que en el período transitorio. En espacios de la variante *T3* se observan mínimas diferencias estacionales ($< \pm 0,5K$). En verano, la temperatura deseada en espacios de la variante *T1* y *T2* es 0,7K más elevada que la variante *T3*, lo cual constituye un indicio de adaptación de los usuarios de dichas variantes al clima local, probablemente por el mayor contacto con el exterior dado a partir de la apertura de ventanas. En el período transitorio se observan mínimas diferencias entre las variantes analizadas ($\approx 0,3K$).

La Figura 9 muestra las rectas de regresión que se obtienen del análisis de probabilidad, al relacionar el índice de disconformidad por frío o por calor, respecto a la temperatura operativa de medición. A partir de comparar la Figura 9 con la Figura 6, se sugiere la existencia de una zona, donde la disconformidad térmica llegó a ser mínima. Para la comparación con otros modelos 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.

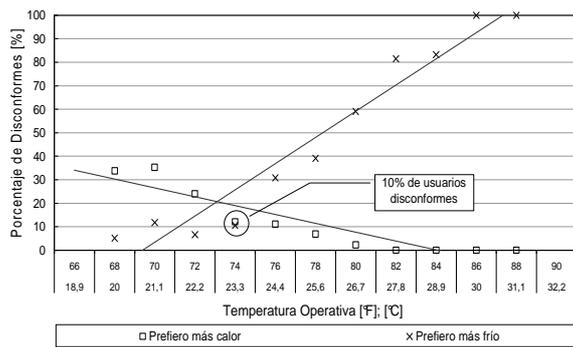


Fig. 9 Cuota de insatisfechos por frío o calor respecto de la temperatura operativa

La Figura 10 indica 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 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 $23,3 \pm 3^\circ\text{C}$ (Figura 10).

La Ecuación (11) representa la función de la curva de regresión no lineal que se muestra en la Figura 10 y que se obtiene de un análisis de probabilidad mediante el uso del software "Mathematica". Esta ecuación permite calcular el índice de disconformidad térmica (%*DISC*) para la población analizada y encontrar rangos de aceptación térmica en torno a una temperatura de neutralidad. Este modelo de predicción, a diferencia de otros como (ISO 7730 y ASHRAE 55), 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 (ver Ecuación (11)). 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.

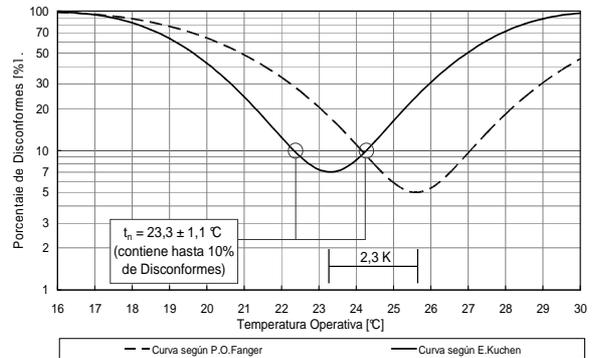


Fig. 10 Porcentaje de disconformidad en función de la temperatura operativa de medición.

$$\% \text{ DISC} = 100 - 93 \exp^{(-0,0009 (-t_n + t_{op})^4 - 0,034 (-t_n + t_{op})^2)} \quad (11)$$

Variable 1 t_n = temperatura de neutralidad

Variable 2 t_{op} = temperatura operativa

3.4. Aplicación del modelo

La validación de la teoría expuesta en este trabajo, conduce a aplicar los conceptos desarrollados sobre un caso de estudio. Para ello, se considera un espacio de trabajo real dentro de un edificio perteneciente a la administración pública alemana. El edificio posee climatización parcial. El caso se analiza durante el período de verano. El edificio, con 300 espacios de trabajo, se extiende sobre una superficie de 7134m² y responde a los estándares locales para el cuidado de la energía y el medio ambiente.

Como proyecto demostrativo dentro del programa EnBop "Energetische Betriebs-optimierung" (optimización energética del funcionamiento), el estudio de arquitectura bünemann+collegen, de Hannover, desarrolla un edificio sustentable (2007), de baja emisión, con una relación Area / Volumen a climatizar = 0,3 m¹, confortable y de alta eficiencia energética. Se construye con tabiques de hormigón armado, in situ, recubierto con aislación de fibra mineral compacta de 16 cm de espesor ($Valor_K = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) y superficies de vidrio doble que no superan el 40% de la fachada ($Valor_K = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$). Las ventanas poseen un tercer vidrio donde se alberga un parasol integrado que permite una mejor conservación (ver Figura 11). Además, poseen sistemas automáticos para el accionamiento de parasoles y encendido de luces, controlados en función de los niveles de radiación en fachada, niveles de iluminación interior y con posibilidades de ajustarlos manualmente.

Para un uso más eficiente de la energía, el edificio posee 12 sondas de 70m de profundidad para recuperar energía geotérmica, que se conecta a un sistema de calefacción /enfriamiento por suelos/techos radiantes dispuesto en los

espacios de trabajo, que se activan desde la primera hora de la mañana hasta el final de la jornada laboral (18:00hs). Para el caso de verano, no obstante la temperatura operativa interior siga subiendo, se activa el sistema de losas radiantes, mediante el cual se bombea agua fría. El agua toma el calor del ambiente interior y lo conduce por las sondas, permitiendo intercambiar calor con el suelo. El líquido, preenfriado en las sondas, se acondiciona por una bomba de calor y se hace recircular nuevamente por los conductos de la losa radiante en los espacios de trabajo. Estas estrategias permiten reducir el consumo energético un 20% por debajo del valor de demanda estándar del programa EnBop, que se fija en 100 kWh/m²a, llegando a ser de 79,8 kWh/m²a de energía primaria. Aún así, los costos de construcción del edificio llegan a ser un 15 y 20% menores que en uno convencional.

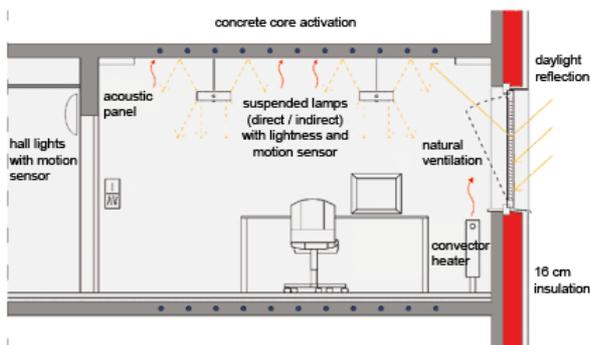


Fig. 11 Espacio de trabajo estándar en el edificio analizado

Para aplicar el modelo, se considera que la renovación del aire solo es posible mediante la apertura de ventanas (ver Figura 11). Esto tiene efectos positivos sobre la adaptación de los usuarios al clima local por el contacto frecuente con el aire exterior, con lo cual, para validar el uso del modelo se utiliza la Ecuación (2). De la medición de los parámetros climáticos y las encuestas se encuentran correlaciones similares a las que se obtienen en otros estudios de campo en edificios en Alemania, lo cual permite aplicar el modelo desarrollado, sin llegar a tener grandes desviaciones. Dentro del edificio en cuestión, se relevan otros espacios que denotan similitudes con el que se expone en este trabajo.

La Figura 12 muestra la evolución de la temperatura operativa y su relación con los rangos de aceptación térmica del 90% (entre $t_n \pm 1^\circ\text{C}$) y el 80% (entre $t_n \pm 2^\circ\text{C}$), en un espacio con orientación sur, durante cuatro semanas del mes de junio (verano en el hemisferio norte), con lugar para dos usuarios y con control automático y manual sobre los dispositivos de asoleamiento e iluminación. En el experimento, se relacionan los valores de temperatura operativa de medición con la temperatura de neutralidad que se obtiene de la Ecuación (8) encontrada para edificios con climatización parcial.

En la Figura 12 se observa que en verano, el 63,3% de las mediciones se hallan en la zona central, es decir, donde se tiene una aceptación térmica del 90%. Del resto, el 35,3% permanece en la zona del 80% de aceptación del ambiente térmico y el 1,1% fuera de esta última. Los resultados que se obtienen permiten verificar que la temperatura de confort es variable y depende de aspectos locales, como la habilidad de adaptación de los usuarios, entre otros.

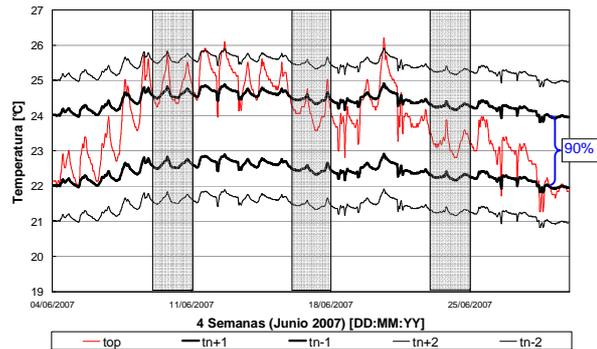


Fig. 12 Temperatura operativa en relación a los rangos de aceptación térmica del 90% y 80%.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran notables diferencias entre usuarios que permanecen en espacios con variantes en los sistemas de climatización y que sufren diferentes procesos de adaptación al ambiente térmico. Esta habilidad se traduce en un potencial de ahorro, que permite reducir hasta un 20% el consumo energético del edificio. Es destacable, que el espacio que se analiza se encuentra dentro de un edificio demostrativo que logra superar el estándar nacional de 100 kWh/m²a, a partir de conjugar el desarrollo tecnológico, las normativas que apuntan al uso racional de la energía y las exigencias sobre el confort que debe asegurarse para espacios interiores de trabajo.

El modelo desarrollado destaca la importancia de relevar el voto de sensación térmica y la necesidad de que la medición esté seguida de una encuesta simultánea. La correlación entre datos objetivos y subjetivos permite encontrar modelos lineales y no lineales para calcular una temperatura de neutralidad. Dicho valor, representa un potencial sobre el consumo energético del edificio, ya que permite modificar el set-point de temperatura de los equipos de acondicionamiento, variable entre $\pm 1^\circ\text{C}$ y $\pm 2^\circ\text{C}$, con el fin de obtener la máxima aceptación térmica de los usuarios de espacios interiores.

La pendiente "b" del análisis de regresión constituye en general, un indicio del nivel de adaptación de los usuarios, es decir, del grado de contacto que estos tiene con el ambiente exterior, siendo los usuarios de espacios de trabajo con ventilación natural por ventanas, los que experimentan el contacto mas frecuente con el ambiente exterior y por ello, los que aceptan rangos mas amplios de variación de temperatura.

El desarrollo de modelos sobre la habilidad de adaptación térmica de personas, es fundamental para la elaboración de estrategias que tiendan a alcanzar la eficiencia energética de edificios. Otros estudios de campo similares a este, deben contribuir a elaborar una base de datos que tiendan a generar discusión para la elaboración de normativas nacionales en pos de lograr mejores condiciones de trabajo y contribuir con el cuidado de los recursos energéticos.

REFERENCIAS

- Auliciems A. (1969). Effects of Weather on Indoor Thermal Comfort: *Biometeorol*, 13, 2, 147-162.
- Auliciems A. (1981). Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal. *Biometeorol*, 25, 2, 109-122.

- Boestra A. C. (2006). The adaptive thermal comfort criterion in the new EPBD IEQ Standard. *BBA Indoor Environmental Consultancy*.
- de Dear R. (2004). Thermal comfort in practice. *Indoor Air*; 14, 7, 32-39.
- de Dear R. y Brager G. S. (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *Biometeorol*, 45, 100-108.
- de Dear R.; Brager G. S. y Cooper D. (1997). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE RP-884*.
- Fanger P. O. (1970). *Thermal Comfort*. Technical University of Denmark, p.244. Danish Technical Press, Copenhagen, Dinamarca.
- 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 edición, p.285, Tucumán, Argentina.
- Griffiths I. (1990). Thermal Comfort Studies in Buildings with Passive Solar Features. *Report to the Commission of the European Community*, ENS35 090 UK.
- Hellwig R.T. y Bischof W. (2006). Gültigkeit thermischer Behaglichkeitsmodelle. *Bauphysik* 28, 2, 131-136.
- 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.
- Kuchen E. (2008). *Spot-Monitoring zum thermischen Komfort in Bürogebäude*. PhD Thesis. Technische Universität Braunschweig. p.203, Der Andere Verlag, Tönning, Alemania.
- Kuchen E.; Fisch M. N.; Gonzalo G. E.; Nozica G. N. (2009). Predicción del índice de disconformidad térmica en espacios de oficina considerando el diagnóstico de usuarios. *En Actas de Congreso ASADES*, pp.15-22, Salta, Argentina.
- 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*.
- McIntyre D. A. (1978). Three approaches to thermal comfort. *ASHRAE Transactions*, 84, Part 1.
- Nicol J. F. y Humphreys M. A. (2005). Maximum temperatures in buildings to avoid heat discomfort. *En Actas de la Conferencia Internacional Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*, pp. 219-224, Santorini, Grecia.
- Nicol J. F. y Raja, I. A. (1997). Indoor thermal comfort: the Pakistan study. *Energy for Sustainable Development*; III, 5; 50-60.
- Norma ASHRAE 55 (2004). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- Norma DIN EN ISO 7726 (2002). Umgebungs-klima. Instrumente zur Messung physikalischer Größen
- Norma 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.
- 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.
- 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. Draft Norm
- 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. *ASHRAE 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. *Indoor Air*; 16, 320-326.