

Estudio de satisfacción del confort para la toma de decisiones

Pablo Aparicio Ruiz, José Guadix Martín, Luis Onieva Giménez

Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos, s/n,
41092 Sevilla. pabloaparicio@us.es

Palabras clave: Lógica difusa, confort, sistema experto, encuestas web.

1. Introducción

Medir la satisfacción de los usuarios se ha convertido en un medio de valoración de la calidad de los HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), permitiendo la verificación y validación de los sistemas de acondicionamiento de aire empleados en los edificios. Sin embargo, estos estudios se realizan a nivel general y sus datos se toman en consideración en su conjunto, pues la mayoría de los estudios tienen como objetivo fundamental la perspectiva ergonómica y psicosocial para optimizar las condiciones de trabajo según la ley de previsión de riesgos laborales (BOE, 1995) o para optimizar el bienestar térmico a través de las instalaciones del edificio según el Reglamento de las Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) (AENOR, 2007).

Frecuentemente, los sistemas de climatización de los edificios tienen un sistema de control, pero la información de la que dispone dicho sistema de control para modificar sus condiciones de operación es muy limitada. Asimismo sucede que el dispositivo de control sigue una ley de modificación que es estándar y que, por tanto, no ha sido comprobada ni verificada en dicho edificio. En consecuencia es frecuente que el grado de satisfacción de los usuarios de un edificio respecto de las condiciones de confort térmico y de calidad de aire interior del mismo sea bajo.

En la actualidad, el confort térmico tiende a ser analizado en base a modelos que sustentan la idea de que estos pueden ser aplicados igualmente a todo tipo de edificios. Los patrones de estos modelos se basan en estudios aplicados a cierta población en un cierto espacio, como ocurre con muchas investigaciones centradas en cómo alcanzar o mantener la temperatura de una sala en base al índice PMV (*Predicted Mean Vote*), otras combinan éste con metodologías como lógica difusa (Soyguder, 2009) (Dalamagkidis, 2007), redes neuronales (Liang, 2008), algoritmos genéticos (Magnier, 2010) y agentes (Dounis, 2008). Dounis (2009) presenta una revisión de los sistemas de control avanzados existentes, basados en el ahorro de energía y la gestión del confort en edificios. En la mayoría de los estudios, los controles térmicos se basan en el PMV, sobre el que muchos autores son críticos (Van Hoof, 2008).

Los usuarios se sienten más cómodos cuando las temperaturas del ambiente son neutrales, ya que el cuerpo se mantiene en equilibrio térmico, sin sudar o temblar, igualmente el aumento de la humedad en la superficie de la piel puede conducir al malestar. Cuando los usuarios de

un mismo HVAC se encuentran en las mismas condiciones de espacio y acondicionamiento artificial surgen dificultades para que estos puedan mantener el equilibrio de sus cuerpos, pues las valoraciones sobre la satisfacción con la temperatura de los sujetos varía con la temperatura de su propio cuerpo (Shitzer, 1978).

Los ocupantes de los edificios son la más valiosa fuente de información sobre el rendimiento de éste, su calidad ambiental interior, su confort y su gasto energético. La selección de la temperatura de un edificio en base a encuestas junto con la aplicación de sistemas de decisión, supone una mejora en el confort y permite evitar el despilfarro energético producido por la selección de valores fijos o programados sin tener en cuenta estas consideraciones. Existen situaciones en las cuales debe prevalecer el confort sobre el ahorro energético ya que los usuarios necesitan adaptarse a los cambios de temperatura producidos por la variación en la ocupación del edificio, la baja temperatura corporal en los momentos iniciales del día (Almirall, 1995), tras desayunos y comidas, etc. son hechos que afectan a las sensaciones térmicas humanas que suelen darse en conjunto. Claramente la adaptación a la temperatura depende de muchas condiciones, incluso externas a la persona (los ciclos de luz). Kelly (2007) presenta una revisión sobre la variabilidad de la temperatura corporal. La temperatura corporal nunca es lineal y por tanto su variación en el día afecta a la sensación de confort.

Es clara pues la necesidad de dotar a estos sistemas de la capacidad de decisión suficiente para actuar sobre el confort ahorrando la mayor cantidad de energía posible. No obstante, existen situaciones para las cuales maximizar el confort debe prevalecer sobre maximizar el ahorro. Ajustar el confort para maximizar el ahorro puede suponer una pérdida de la calidad en el confort; en cambio, maximizar el confort durante un periodo de tiempo para permitir la adaptación de los usuarios, esperar y reducirlo a valores de maximización del ahorro puede permitir mejorar la calidad y aceptación de este ahorro. Esto permitiría mejorar la eficiencia energética del edificio con una alta aceptación por parte de los usuarios frente a los excesos energéticos actuales.

En 1997 la Sociedad Americana de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) patrocinó un proyecto de investigación (Dear, 1998) que estudiaba el confort a nivel mundial mediante una base de datos. Los resultados que se presentaron en el proyecto alentaron a revisiones significativas de confort del estándar de ASHRAE. Pusieron en relieve el potencial de reducción de las necesidades energéticas mediante el diseño de sistemas de ventilación híbrida en muchas zonas de clima templado del mundo (Dear, 2001).

Algunos trabajos presentan condiciones térmicas neutras fuera de los rangos de confort del estándar de ASHARE (Roonak, 2009). Queda claro que la aceptación del estándar depende de la climatología del lugar y las condiciones del edificio. Por tanto sin despreciar la validez del estándar, se deben desarrollar sistemas de confort cuya ventilación y aire acondicionado estén basados en modelos de confort personalizados. Existen muchos ejemplos de estudios basados en web o papel (Huizenga, 2006) (Hwang, 2007) (Peretti, 2010) en los que se encuesta a personal de multitud de edificios en diversos países en momentos puntuales del día.

Aquellos estudios que abarcan multitud de edificios tienen en cuenta la información sobre las características físicas del edificio y el lugar de trabajo donde se encuentra el usuario, pero no tienen en cuenta valores de confort asociados a la sala (Zagreus, 2004). Otros estudios se basan en espacios de trabajo ya sean oficinas o fábricas en los que se estudia el confort tanto con ventilación natural o artificial (Wijewardane, 2008).

En este estudio se observa la respuesta respecto del confort a lo largo del tiempo en un área de un edificio. Los usuarios son analizados frente a un conjunto estándar de preguntas clave que se utiliza para medir la satisfacción con los factores ambientales.

2. Encuesta de confort vía web

Se ha demostrado que a menudo existe una aguda discrepancia entre el confort objetivo y el confort subjetivo (Meir, 2009). Frente a la comodidad objetiva del confort térmico presentado por ASHRAE, en este estudio utilizamos la encuesta subjetiva como elemento fundamental de la toma de datos. Tomando como base la norma internacional ISO 10551 (AENOR, 2002) referida a la influencia del ambiente térmico empleando escalas de juicio subjetivo. Aun así, pese a las peticiones de los encuestados, todo sistema debe estar limitado a ciertas normas ya sean por decisión del ergónomo experto o por las leyes o normativas de un país. La encuesta se realizó en base a siete juicios de valor, tres basados en el estado térmico personal (evaluación perceptiva, afectiva y de preferencia térmica), dos basados en el ambiente térmico (aceptabilidad personal y tolerancia personal) y dos en base al estado emocional (grado de estrés y estado de ánimo). Siendo la información de la evaluación perceptiva la utilizada en el sistema desarrollado. En la tabla 1 se presenta el cuestionario principal.

Tabla 1. Cuestionario principal de respuestas subjetivas

Estado térmico personal	
Perceptivo	¿Cómo valora la sensación térmica?
	Calurosa, cálida, ligeramente cálida, neutra, ligeramente fría, fría, muy fría.
Evaluación afectiva	¿Cómo percibe la temperatura?
	Claramente aceptable, aceptable, inaceptable, claramente inaceptable.
Preferencia Térmica	¿Quiere la temperatura del recinto?
	Más alta, sin cambios, más baja.
Ambiente térmico	
Aceptabilidad personal	¿Cómo percibe la calidad del aire?
	Claramente aceptable, aceptable, inaceptable, claramente inaceptable.
Tolerancia personal	¿Cómo percibe la intensidad del olor?
	Sin olor, olor débil, olor moderado, olor fuerte, olor muy fuerte, olor abrumador.
Estado emocional	
Grado de estrés	La actividad que está realizando...
	Le estresa, es normal, le relaja.
Estado de ánimo	Usted está ahora mismo...
	Feliz, optimista, entusiasmado, normal, apático, deprimido, triste.

Los usuarios cumplieron una segunda encuesta, realizada junto con la primera, una única vez en el día. La segunda encuesta contenía un cuestionario sobre datos personales, sexo, edad, estatura, peso y vestimenta.

Los grados o escalas elegidas para las respuestas se formularon en español sobre una muestra de población nativa, no existiendo efectos en la interpretación de las palabras utilizadas en las escalas de preferencia por el lenguaje o el contexto (Humphreys, 2008). Los grados y escalas del estado personal y del ambiente térmico pertenecen a la norma ISO 10551 (AENOR, 2002).

3. Metodología

La metodología propuesta, Aparicio (2010), pretende mejorar las estrategias de control y las leyes de los sistemas de climatización. Actualmente, existe una necesidad de dominar todo el conocimiento existente y la experiencia necesaria para realizar mejoras en la eficiencia energética de los edificios.

La metodología aplicada en este estudio proporciona un sistema de detección fiable pero a la vez de fácil implementación, el sistema se basa en la lógica difusa, ésta presenta características similares y el proceso suele constar de las siguientes tres fases: *fuzzification* (conversión del valor de las variables de entrada en valores “difusos”), proceso de inferencia basado en reglas lógicas; y *defuzzification* (conversión del valor de las variables difusas y toma de decisión).

El sistema se desarrolló a partir del estándar para implementar lógica difusa denominado FCL (*Fuzzy Control Language*) (IEC-TC65/WG-7/TF8, 1997), ya que facilita el desarrollo junto a librerías en diferentes lenguajes de implementación.

Junto al sistema presentado [Aparicio, (2010)] se desarrolló una herramienta web para la cumplimentación de encuestas, los datos del usuario se almacenaban en una base de datos, que analizaba el sistema para la toma de decisiones. El sistema registra el confort personal, la valoración de éste, dónde y en qué medida. Además, se pueden registrar los cambios deseados sobre el estado de las salas.

Anteriormente se estudiaron simulaciones de este sistema de lógica difusa que reflejaban su funcionamiento, aunque los parámetros se deben calibrar para su uso en un sistema real, como ocurre de manera general en los sistemas de lógica difusa. La metodología aplicada ofrece información que permite la toma de decisiones necesaria para lograr el mayor número de usuarios conformes y el ahorro gradual de la energía en los periodos en los que los usuarios estén adaptados, mejorando la eficiencia del edificio.

4. Experimentación

Los estudios realizados en la última década se centran en diversos aspectos del amplio campo del confort, en ellos se pueden distinguir dos tipos de estudios: Las pruebas de laboratorio en cámaras climáticas y las pruebas de campo en la gestión de edificios. Este artículo presenta un caso real mediante el cual se ha validado el modelo explicado anteriormente.

La experimentación se realizó durante un día invernal de 2010 en dos espacios de trabajo de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. El área de estudio se encuentra en una segunda planta, con ventanas en las que no hay luz directa del sol por su orientación, por lo que no se encuentra muy afectado por variaciones en las condiciones de ambiente exterior. El espacio analizado corresponde a 78'37 m², el acondicionamiento térmico se realiza con dos sistemas fan-coil de un sistema de climatización centralizado. Para

este experimento, se realiza el estudio con un único sistema de climatización central, aportándose la misma decisión de temperatura sobre los aparatos de las diferentes áreas.

El espacio tiene instalados 16 puestos de trabajo en conjunto. El estudio se realiza entre las 8:30 horas a 14:30 horas. Los usuarios estudiados se encuentran en un rango de edad entre 25 y 29 años, con buen estado de salud y forma física, la ropa mayoritariamente es pantalones de vestir, camisa de manga larga, jersey de manga larga, calcetines de invierno y zapatos. Las condiciones exteriores del día se mantuvieron entre los 9-13°C y una humedad superior al 80%. Durante el estudio se realizaron medidas de temperatura y humedad relativa del interior de cada espacio, véanse figura 2 y 3.

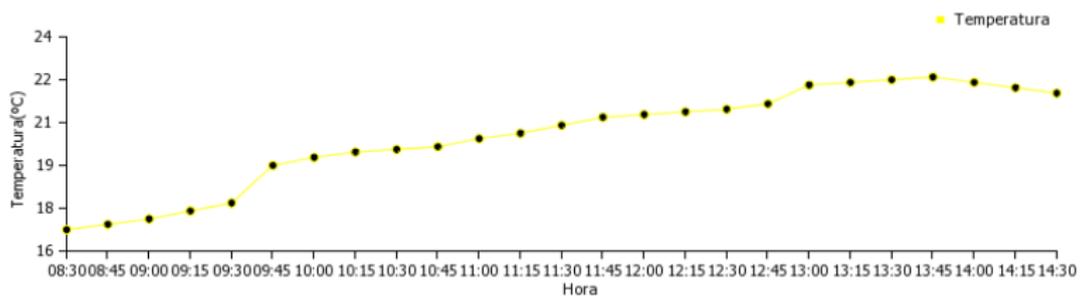


Figura 1. Temperatura de la sala A

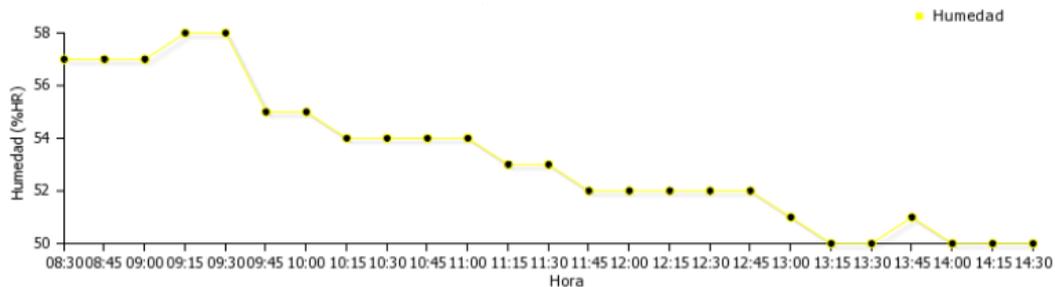


Figura 2. Humedad de la sala A

5. Resultados

Junto con las mediciones que se realizaron en las salas, los usuarios cumplimentaron los cuestionarios mediante una herramienta web. En la figura 3 se presenta la respuesta perceptiva de los usuarios, en ésta se muestra el porcentaje de respuesta de todas las encuestas relacionadas con la primera pregunta. Durante el estudio ningún usuario valoró la temperatura como calurosa. El 28% de las respuestas representan sensación de confort o neutralidad, el 44% insatisfacción por frío y el 28% insatisfacción por calor.



Figura 3: Respuesta perceptiva de los usuarios

A lo largo del estudio, el 80% de las encuestas opinaron positivamente respecto de la percepción de temperatura (figura 4), igualmente un 80% de las encuestas indicaban que la temperatura fue neutra, ligeramente fría o cálida (figura 3), los resultados fueron muy positivos, ya que en los estudios de confort objetivo, un 10% de insatisfechos manifiesta una situación satisfactoria para la mayoría de las personas. Las ecuaciones de los modelos objetivos no contemplan situaciones ideales donde no exista ningún trabajador insatisfecho con las condiciones térmicas, estimando que, en las mejores condiciones de confort térmico, al menos un 5% puede no estar conforme.

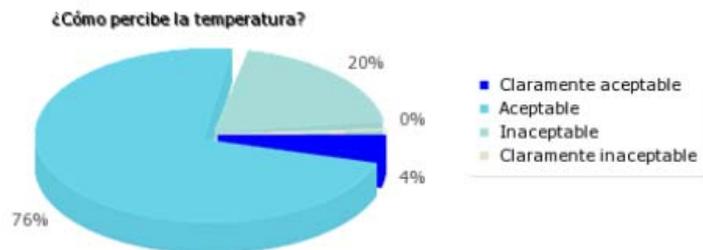


Figura 4: Evaluación afectiva de los usuarios

Durante la experimentación sólo un 4% de las encuestas reclamaban que la temperatura fuera más baja, mientras que el 56% de las encuestas demandaban una subida de la temperatura (figura 5).

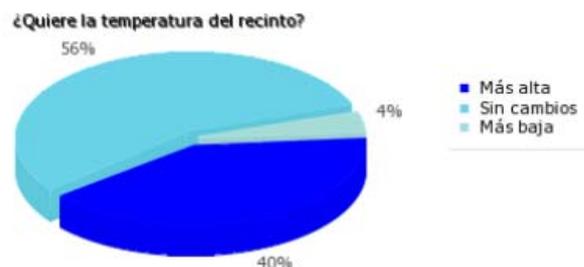


Figura 5: Preferencia térmica de los usuarios

Como se observa en la figura 6, la calidad del aire durante la experimentación fue altamente aceptable, existiendo una leve sensación de olor en el ambiente (figura 7).

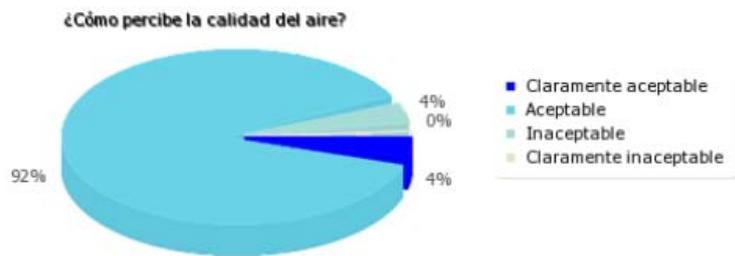


Figura 6: Aceptabilidad personal del ambiente térmico

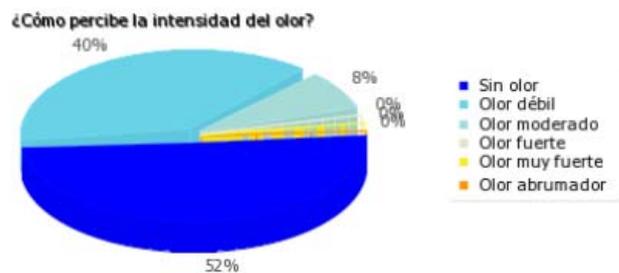


Figura 7: Tolerancia personal

Durante la experimentación el 80%, de las encuestas reflejó normalidad, frente al 20% de éstas que reflejaron estrés (figura 8). Sin embargo, el estado de ánimo de los usuarios siempre fue positivo o normal (figura 9).



Figura 8: Grado de estrés de los usuarios

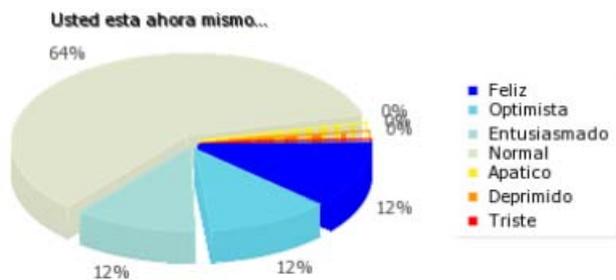


Figura 9: Estado de ánimo de los usuarios

En la figura 10 se muestran las respuestas a la primera pregunta en tanto por uno, al igual que la ocupación. La ponderación de la solución se representa, para la cual un uno representa maximizar el ahorro, y un cero maximizar el confort.

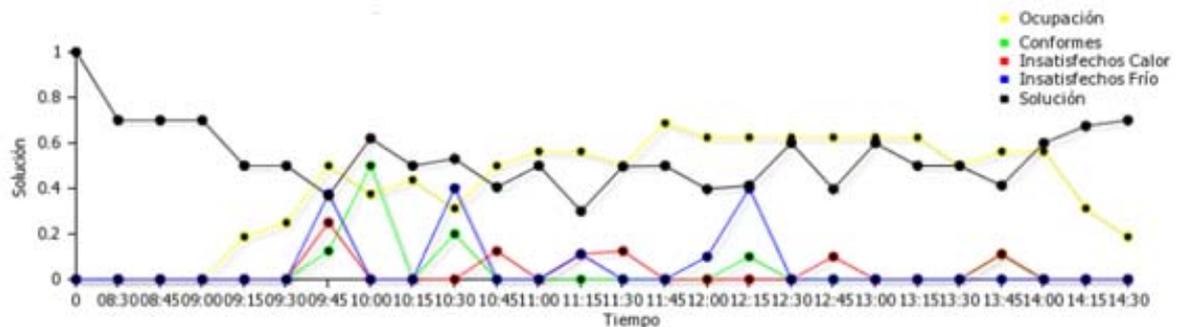


Figura 10. Resultado temporal del sistema de lógica difusa

Como se puede observar en la figura 10, no existieron valores altos de maximización del confort como en las simulaciones [Aparicio, (2010)]. Para que se produzcan dichos resultados debe existir una mayor disparidad en las respuestas, esto podría ocurrir a las 9:45 pero al existir gran cantidad de conformes con la temperatura, la petición de maximización del confort es menor, reduciéndose el grado de necesidad de éste. Sin embargo, a las 11:15, 12:15 y 12:45 se observaron momentos de prevalencia del confort, frente a los primeros y últimos instantes del día, donde la ocupación generó una clara tendencia al ahorro energético.

El sistema reflejó la necesidad de buscar el ahorro y el confort, aunque la tendencia fue mayor al confort por la alta ocupación del espacio, que fue modificada en base a la respuesta al cuestionario de los usuarios.

6. Conclusiones

La aplicación de la metodología podría ser efectiva a falta de realizar investigaciones en la selección del valor de temperatura de la sala en base a las respuestas del cuestionario junto con la ayuda para la toma de decisiones que proporciona este sistema.

La experimentación actual es poco significativa debido al tamaño de la muestra estudiada. El estudio se debe aplicar a un mayor número de usuarios en un mayor número de salas. De igual manera se debe realizar una experimentación en la que se modifique el periodo de tiempo entre respuestas. Igualmente se debe estudiar este sistema para salas en las que se efectúen modificaciones de temperatura desiguales.

La aplicación de situaciones climáticas fijas aplicadas en la actualidad es poco eficiente. Las futuras investigaciones deben tener en cuenta las necesidades de los usuarios de forma dinámica. Por tanto, se deben investigar sistemas de información que maximicen la eficiencia energética teniendo en cuenta el confort de los usuarios en base a las respuestas realizadas en el momento y a modelos de espacio de confort de los ocupantes en base a las encuestas realizadas en el pasado.

Referencias

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (2002). UNE-EN ISO 10551:1995. Ergonomía del ambiente térmico. Evaluación de la influencia del ambiente térmico empleando escalas de juicio subjetivo.

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (2007). Normas UNE del Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE), Madrid.

Almirall, H.; Marcet, C. (1995). Evolución de la temperatura corporal a lo largo del día, función de crecimiento y cronotipo. *Psicothermal*, 7 (2), pp. 317-326.

Aparicio, P.; Fernández, J.; Onieva, L. (2010). Expert system based on fuzzy logic to detect configurations associated to climatic comfort. *Dirección y organización*, 42, pp. 38-45.

Aparicio, P.; Fernández, J.; Onieva, L. (2010). Sistema experto basado en la lógica difusa para la detección de configuraciones climáticas asociadas al Confort. *Industrial Engineering As University Third Mission Agent. 4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (4)*. San Sebastián - España. Universidad del País Vasco, Servicio Editorial. pp. 576-587.

B.O.E. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos laborales. BOE nº 269, de 10 de noviembre.

Dalamagkidis, K. (2007). Reinforcement learning for energy conservation and comfort in buildings. *Building and Environment*, 7 (42), pp. 2686-2698.

Dear, R.; Brager, G. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE Transactions*, 104 (1A), pp. 145-167.

Dear, R.; Brager, G. (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology*, 45 (2), pp. 100-108.

Dounis A.I.; Caraiscos C. (2008). Fuzzy comfort and its use in the design of an intelligent coordinator of fuzzy controller-agents for environmental conditions control in buildings. *Journal of Uncertain Systems*, 2, pp. 101-112.

Dounis, A.; Caraiscos, C. (2009). Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 1246-1261.

Huizenga, C.; Abbaszadeh, S.; Zagreus, L.; Arens, E. (2006). Air Quality and Thermal Comfort in Office Buildings: Results of a Large Indoor Environmental Quality Survey. *Proceedings, Healthy Buildings, Vol. III*, 393-397, Lisbon, Portugal, June.

Humphreys, M.A. (2008). “Why did the piggy bark?” Some effects of context and language on the interpretation of words used in scales of warmth and thermal preference. *Proceedings of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*, Cumberland

Lodge, Windsor, UK, 27–29 July 2008. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings. <http://nceub.org.uk>.

Hwang, R.L.; Cheng M.J. (2007). Field survey on human thermal comfort reports in air-conditioned offices in Taiwan, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 1, pp. 8-13.

IEC-TC65/WG-7/TF8 (1997). IEC 1131 Programmable Controllers. Part 7: Fuzzy Control Programming. International Technical Electrotechnical Commission (IEC).

Kelly, G.S. (2007). Body temperature variability: masking influences of body temperature variability and a review of body temperature variability in disease. *Alternative Medicine Review* 12 (1), pp. 49-62.

Liang, J.; Du, R. (2008). Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies. *Energy Conversion and Management* 4 (49), pp. 517-528.

Magnier L.; Haghghat F. (2010). Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, 3 (45), pp. 739-746.

Meir, I.A.; Garb, Y.; Jiao, D.; Cicelsky, A. (2009). Post-occupancy evaluation: An inevitable step toward sustainability. *Advances in Building Energy Research*, 3 (1), pp. 189-220.

Peretti, C.; Schiavon, S.; Goins, J.; Arens, E.A.; De Carli, M. (2010). Evaluation of Indoor Environment Quality with a Web-based Occupant Satisfaction Survey: a Case Study in Northern Italy. UC Berkeley: Center for the Built Environment. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/4h5616k5>

Roonak, D.; Kamaruzzaman, S.; Jalil, M. (2009). Thermal Comfort in Naturally Ventilated Office under Varied Opening Arrangements: Objective and Subjective Approach. 26 (2), pp. 260-276.

Shitzer (1978). Human response from heat stress with relation to comfort, *Ergonomics*.

Soyguder, S.; Alli, H. (2009). An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach. *Energy and Buildings*, 41, pp. 814-822.

Van Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort: Comfort for all? *Indoor Air*, 18, pp. 182-201.

Wijewardane, S.; Jayasinghe, M. (2008). Thermal comfort temperature range for factory workers in warm humid tropical climates. 33 (9), pp. 2057-2063.

Zagreus, L.; Huizenga, C.; Arens, E.; Lehrer, D. (2004). Listening to the Occupants: A Web-based Indoor Environmental Quality Survey. *Indoor Air*, 14 (8): pp. 65-74.