

Técnicas de Control del Confort en Edificios

M. Castilla ^{*,***}, J.D. Álvarez ^{*,***}, M. Berenguel ^{*,***}, M. Pérez ^{**,***}
 F. Rodríguez ^{*,***}, J.L. Guzmán ^{*,***}

* Universidad de Almería, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

** Universidad de Almería, Dpto. de Física Aplicada

*** CIESOL, Centro Mixto Universidad de Almería-CIEMAT,
Ctra. Sacramento s/n, 04120 La Cañada (Almería), España

Resumen: La mayor parte del tiempo, las personas realizan sus actividades cotidianas en el interior de edificios, siendo por tanto preciso controlar las condiciones de confort (térmico, visual y calidad de aire) en el interior de los mismos, intentando minimizar el consumo energético simultáneamente. Este trabajo presenta una revisión de técnicas de control del confort en edificios. También muestra los resultados obtenidos en la implementación de un sistema de control jerárquico, que permite obtener situaciones de confort térmico adecuadas en el interior del CDDI-CIESOL-ARFRISOL (Contenedor Demostrador de Investigación - Centro de Investigación de la Energía Solar - Proyecto Singular Estratégico ARFRISOL) de la Universidad de Almería. *Copyright © 2010 CEA.*

Palabras Clave: Control jerárquico, Confort térmico, Confort visual, Calidad de aire.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la reducción del consumo energético asociado al uso y construcción de los edificios y el incremento de la eficiencia energética en el acondicionamiento climático de los mismos, son cuestiones que están recibiendo una gran atención, tanto desde el punto de vista científico-técnico como desde el empresarial (Kolokotsa *et al.*, 2000). Los estudios recientes indican que el consumo de energía en los edificios representa el 40 % del consumo energético mundial, siendo más de la mitad atribuible a sistemas de climatización (Yang *et al.*, 2003; Pérez-Lombard *et al.*, 2008; Morosan *et al.*, 2010). El cumplimiento del objetivo de ahorro energético no debe comprometer el bienestar de los usuarios (Nicol y Humphreys, 2002), requiriéndose (junto con innovaciones en los diseños constructivos) actuaciones de control específicas sobre los sistemas de climatización orientadas a proporcionar ambientes confortables desde el punto de vista térmico, visual y de calidad de aire óptima con el menor consumo de energía posible (Hernández, 1994a).

En este trabajo, se realiza una revisión de distintas técnicas de control del confort, tratando fundamentalmente técnicas de control predictivo (Donaisky *et al.*, 2007; Freire *et al.*, 2006; Dumur *et al.*, 1997), control basado en redes neuronales (Congradac y Kulic, 2009; Ahmed *et al.*, 1996) y control adaptativo y basado en lógica borrosa (Nicol y Humphreys, 2002; Federspiel y Asada, 1994; Dounis *et al.*, 1993). Además, se muestran resultados preliminares de aplicación de un sistema de control jerárquico del confort térmico en el interior del CDDI-CIESOL-ARFRISOL (Contenedor Demostrador de Investigación - Centro de Investigación de la Energía Solar - Proyecto Singular Estratégico ARFRISOL) de la Universidad de Almería (www.ciesol.es, www.arfrisol.es). Para ello, en la próxima sección se explica el concepto de confort y la forma de expresarlo matemáticamente. En la sección 3 se realiza una revisión de distintas técnicas de control del confort y en la sección 4, se expone el ejemplo de aplicación.

2. CONFORT

Las condiciones óptimas de confort en el interior de un edificio se pueden determinar a partir de tres factores determinantes (Dounis y Caraiscos, 2009): el confort térmico, el confort visual y la calidad del aire.

2.1 Confort Térmico

Según la mayoría de los estándares internacionales (ISO7730, 1994; ASHRAE55, 1992) el confort térmico se puede definir como: “*Aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico*” (Fanger, 1973). Sin embargo, esta definición se puede considerar ambigua ya que se deja abierto tanto el significado de *condición de la mente*, como el de *satisfacción*, pero lo que sí se deduce correctamente es que el juicio del confort es un proceso cognitivo influido por distintos tipos de procesos, por ejemplo, físicos, fisiológicos o incluso psicológicos (Ashrae, 2005).

Las expectativas de confort dependen de varias circunstancias, como por ejemplo, el lugar donde se encuentre el ser humano, los motivos que hacen que se encuentre en dicho lugar, la época del año, etc. Sin embargo, según diversos estudios, aunque los climas, las condiciones de vida y las culturas difieran bastante a lo largo del mundo, la temperatura que la gente elige para el confort bajo condiciones similares de vestimenta, actividad, humedad y velocidad de aire es muy parecida (Ashrae, 2005).

Índices de confort térmico

Han sido muchos los autores que han abordado el problema del cálculo de las condiciones de confort térmico en un determinado entorno (Sherman, 1985; de Dear y Brager, 2001; Hoof, 2008; Orosa, 2009; Wan *et al.*, 2009), existiendo varios índices y modelos en la bibliografía. Sin embargo, el más extendido es el índice PMV (*Predicted Mean Vote*) desarrollado por Fanger

en la década de los 70 para modelar el confort térmico de los seres humanos (Fanger, 1972).

Como pueden existir conflictos entre usuarios en las preferencias de confort térmico, además de los citados índices existen otros métodos utilizados generalmente en edificios no residenciales, en los que se usa un sistema de votación en el que los propios usuarios del edificio definen su situación de confort actual, así como sus necesidades de frío o calor. Posteriormente, en función de la elección de los usuarios, se establece un modo de funcionamiento en el interior del edificio. Por ejemplo, en (Lee *et al.*, 2008) se propone una *Arquitectura de Resolución de Conflictos (CRA)* para solucionar las discrepancias que puedan surgir entre los distintos usuarios de un edificio. La arquitectura de resolución de conflictos se encuentra dividida en dos sistemas de control, uno para las zonas públicas y otro para las zonas individuales o privadas asociadas a cada usuario. Además, se proponen dos aproximaciones que consisten en tomar una decisión en función de la prioridad de los usuarios o de la media de los privilegios que posee cada usuario.

El PMV refleja la opinión de un numeroso grupo de personas sobre la sensación térmica experimentada durante estancias prolongadas en determinadas condiciones termo-higrométricas (IDAE, 2007). El PMV se mide según una escala de siete valores que se puede ver en la tabla 1. Para garantizar el confort, los distintos estándares recomiendan mantener este índice a 0 con una tolerancia del ± 0.5 (Liang y Du, 2005).

Tabla 1. Escala de valores índice PMV.

PMV	Sensación
+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
± 0	Neutralidad térmica
-1	Fresco
-2	Frío
-3	Muy frío

Para el cálculo de este índice, son necesarias un total de seis variables que se recogen en la tabla 2. La actividad metabólica se puede definir como la cantidad de energía gastada en un cierto periodo de tiempo.

Tabla 2. Variables que definen el confort (IDAE, 2007).

Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Actividad metabólica	M	0.8 a 4	met, (W/m^2)*
Aislamiento de la ropa	I_{cl}	0 a 2	clo, ($m^2 \ ^\circ C/W$)**
Temperatura del aire	$y_T, (t_a)$	10 a 30	°C
Temperatura radiante media	\bar{t}_r	10 a 40	°C
Velocidad del aire	v_a	0 a 1	m/s
Humedad relativa	y_{HR}	30 a 70	%

* 1 met = 58.15 W/m²

** 1 clo = 0.155 m² °C/W

La obtención de la mayor parte de las variables necesarias para la estimación del índice PMV se puede realizar sin demasiada dificultad (Tse y Chan, 2008). Más concretamente, la temperatura del aire, la velocidad del aire y la humedad relativa se obtienen de forma directa a través de los correspondientes sensores. Por otra parte, el grado de vestimenta y la actividad metabólica no son variables medibles, ya que dependen de la situación del usuario en el momento del cálculo del PMV, de forma que, conociendo dicha situación los valores de ambas

variables se pueden encontrar en los diversos manuales o estándares como (ISO7730, 1994) y (Fanger, 1972). Por ejemplo, el grado de vestimenta y la tasa metabólica asociados con el entorno típico de una oficina son de 1.0 clo y 1 met respectivamente. Existen aplicaciones donde los propios usuarios proporcionan estos valores (Conceicao *et al.*, 2010).

La temperatura media radiante (\bar{t}_r) es un índice integrado que representa el intercambio radiativo que se establece por la diferencia de temperatura existente entre la superficie exterior de los individuos ocupando un espacio y la envolvente térmica que resulta de la superposición de las superficies de los diferentes paramentos del mismo. Su cálculo analítico puede realizarse a partir de la siguiente expresión.

$$\bar{t}_r^4 = t_1^4 F_{p-1} + t_2^4 F_{p-2} + \dots + t_n^4 F_{p-n}, \quad (1)$$

en la que $t_i; i = 1 \dots n$ es la temperatura de cada una de las superficies que constituyen el recinto y F_{p-i} son los denominados factores de forma de dichas superficies con relación a la superficie del individuo (ASHRAE, 2005). Esta definición general admite formulaciones alternativas atendiendo a la necesidad de simplificación o a la disponibilidad de datos para realizar el cálculo correspondiente. Así por ejemplo, en (Markov, 2002) y (ASHRAE, 2005) se plantean las siguientes expresiones para una persona sentada (2) y para una persona levantada (3) para el cálculo de la temperatura media radiante:

$$\begin{aligned} \bar{t}_r &= (0.18[t_{pr}(arriba) + t_{pr}(abajo)] + 0.22[t_{pr}(derecha) \\ &\quad + t_{pr}(izquierda)] + 0.30[t_{pr}(delante) + t_{pr}(detrás)]) \\ &/ (2[0.18 + 0.22 + 0.30]) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{t}_r &= (0.08[t_{pr}(arriba) + t_{pr}(abajo)] + 0.23[t_{pr}(derecha) \\ &\quad + t_{pr}(izquierda)] + 0.35[t_{pr}(delante) + t_{pr}(detrás)]) \\ &/ (2[0.08 + 0.23 + 0.35]) \end{aligned} \quad (3)$$

donde $t_{pr}(\cdot)$ es la temperatura de superficie [°C], que se puede definir como la temperatura uniforme de un recinto en el que el flujo radiante incidente en un pequeño elemento plano es el mismo que en el entorno actual. Una aproximación alternativa para estimar la temperatura radiante media utiliza la temperatura del aire, la temperatura de globo y la velocidad del aire en lugar de las temperaturas superficiales comentadas anteriormente. Para ello, se debe utilizar un sensor de temperatura de globo con forma esférica para una persona sentada y uno con forma elipsoide para una persona de pie, ya que, la temperatura radiante media se define en función del cuerpo humano, por lo que la forma del sensor influye. El proceso de cálculo utilizando esta aproximación se puede consultar en (ASHRAE, 2005).

Por otro lado, la sensación térmica del ser humano está estrechamente relacionada con el balance térmico del cuerpo, considerando éste como una única entidad, es decir, para que el ser humano esté en una situación de equilibrio térmico, la cantidad de calor producido por el metabolismo debe ser igual a la cantidad de calor perdido por el cuerpo. Por lo tanto, cuando el ser humano se encuentre en esa situación de equilibrio entonces se puede decir que se encuentra en las condiciones ideales de bienestar y el PMV será igual a 0 (IDAE, 2007). El índice PMV, se puede calcular en función de este balance y de los seis parámetros anteriores como se ve en la siguiente ecuación:

$$PMV = y_{PMV} = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \cdot L \quad (4)$$

donde L representa la carga térmica en el cuerpo [W/m^2], definida como la diferencia entre la producción de calor interna

y la pérdida de calor que se produce cuando la persona está en una situación de confort, y M la tasa metabólica [W/m²]. La carga térmica, L , se calcula según la ecuación (5). En las ecuaciones siguientes:

- Q : potencia mecánica efectiva [W/m²], es decir, el trabajo desarrollado por los músculos para realizar una determinada tarea.
- y_T : temperatura del aire [°C], también denominada t_a en muchos trabajos.
- p_a : presión parcial de vapor de agua en el aire [Pa]. La humedad relativa y_{HR} es la relación, expresada en tanto por ciento, entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la presión de saturación del vapor de agua a una temperatura dada.
- t_{cl} : temperatura de la superficie de la ropa [°C].
- h_c : coeficiente de transferencia de calor por convección [W/(m²°C)].
- I_{cl} : aislamiento de la ropa [m²°C/W].
- f_{cl} : factor del área de la ropa [-].
- v_a : velocidad del aire [m/s].

$$\begin{aligned} L = & (M - Q) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - y_T) \\ & - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - Q) - p_a] \\ & - 0.42 \cdot (M - Q - 58.15) - 1.72 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) \\ & - 39.6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \\ & - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - y_T) \end{aligned} \quad (5)$$

donde

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35.7 - 0.028(M - Q) - 0.155 \cdot I_{cl} \\ & \cdot [39.6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \\ & + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - y_T)] \end{aligned} \quad (6)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot (t_{cl} - y_T)^{0.25}, & A > 12.1 \cdot \sqrt{v_a} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_a}, & A \leq 12.1 \cdot \sqrt{v_a} \end{cases} \quad (7)$$

$$A = 2.38 \cdot (t_{cl} - y_T)^{0.25} \quad (8)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.0 + 0.2 \cdot I_{cl}, & I_{cl} \leq 0.5 \text{ clo} \\ 1.05 + 0.1 \cdot I_{cl}, & I_{cl} > 0.5 \text{ clo} \end{cases} \quad (9)$$

Existe otro índice muy relacionado con el anterior, el índice PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*), el cual indica el porcentaje de personas que se encuentran insatisfechas con un determinado ambiente térmico. Este índice se calcula según la siguiente ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)] \quad (10)$$

Se puede deducir fácilmente que aunque se consiga una situación en la que el índice PMV sea igual a 0, es imposible que el 100 % de las personas se encuentren satisfechas con el entorno, ya que al ser el confort una condición psicológica, cada individuo tiene su propio concepto de comodidad térmica.

2.2 Confort Visual

El ser humano percibe la mayor parte de la información a partir del sentido de la vista, por lo que la luz resulta un elemento muy importante, ya que permite distinguir la forma,

el color y la perspectiva de los distintos objetos existentes en un determinado entorno (Guasch *et al.*, 2001). Por lo tanto, el confort visual se puede expresar a través de niveles óptimos de iluminación, luminancia y color (Yener, 1999). Por ejemplo, en la tabla 3 se muestran los niveles de iluminación idóneos en función del recinto que se esté estudiando. Estos niveles se encuentran publicados en estándares (*of Light and Lighting*, 2002; UNE-EN12464-1, 2003; UNE-EN12464-2, 2008).

Tabla 3. Valores de iluminación (Yener, 1999).

Función	Estancia (nivel de iluminación [lux])
Doméstico	Salón (50-150), Dormitorio (50-100), Cocina (150-300), Baño (150), Aseo (100)
Hotel	Recepción (300), Dormitorios (50-100), Habitaciones (100)
Librería	General (300), Estanterías de libros (150)
Oficina	General (500), Sala de conferencias (500)

Las condiciones de confort visual en el interior de un recinto dependen de las propiedades geográficas y atmosféricas donde dicho recinto este situado. Por lo tanto, el nivel de iluminación real en el interior del mismo se debe calcular teniendo en cuenta propiedades como el diseño de la ventana, su orientación, los coeficientes de reflexión, y otros (Koçlar *et al.*, 2004). El objetivo de hacer coincidir el nivel de iluminación real con el deseado (tabla 3) a veces es imposible de cumplir usando únicamente luz natural, por lo que suelen ser precisos mecanismos de iluminación artificial, véase (Kim y Kim, 2010).

Para la evaluación del confort visual, en (Castilla *et al.*, 2010b) se propuso un índice llamado D_i , ecuación (11), el cual representa la diferencia entre la iluminación recomendada y la iluminación real en el interior del recinto estudiado. Para calcular la iluminación real en el interior del recinto se tiene que conocer la iluminación que entra en el recinto a través de las ventanas, ecuación (13) (Yener, 1999), y la iluminación proporcionada de forma artificial, ecuación (14), (Dounis *et al.*, 1993). Para ver cómo se obtiene cada parámetro de (13) véase (Yener, 1999).

$$D_i = I_d - I_r \quad (11)$$

$$I_r = I_{R1} + I_{R2} \quad (12)$$

$$I_{R1} = I_{AG} + I_{KG} + I_{GN} + I_{IY} + I_{EL} \quad (13)$$

$$I_{R2} = (n_l \cdot Q_1 \cdot V_1 \cdot n_1) / (2 \cdot \pi \cdot (h_1 - h_p)^2) \quad (14)$$

donde

- D_i : diferencia entre la iluminación recomendada (I_d) y la real (I_r) [lux].
- I_{R1} : nivel de iluminación interna (luz natural) [lux].
- I_{R2} : nivel de iluminación interna (luz artificial) [lux].
- I_{AG} : nivel de iluminación interior debido al cielo despejado [lux].
- I_{KG} : nivel de iluminación interior debido al cielo cubierto [lux].
- I_{GN} : nivel de iluminación interior debido a la influencia directa de la luz solar [lux].
- I_{IY} : nivel de iluminación interior debido a la componente reflejada [lux].
- I_{EL} : nivel de iluminación interior debido a la componente reflejada de las superficies de los elementos de sombreado [lux].
- n_l : número de luces fluorescentes encendidas [-].
- Q_1 : potencia media de una luz fluorescente [W].
- V_1 : luminosidad por vatio de una luz fluorescente [lux/W].

- n_1 : eficiencia de la luz fluorescente [-].
- h_1 : altura de la luz fluorescente con respecto al suelo [m].
- h_p : altura del punto de referencia respecto al suelo [m].

Finalmente, se debe tener en cuenta que en la mayoría de las ocasiones la iluminación en el interior de los recintos no es homogénea, pudiendo existir zonas de sombra o de incidencia directa de la luz natural. Para solucionar este problema, algunos trabajos como el de (Keyser y Ionescu, 2010) proponen dividir el recinto analizado en diferentes zonas sobre las cuales se realizará el análisis de confort visual de forma individual.

2.3 Calidad del Aire

Existe un término relativamente nuevo en el área de la edificación denominado “el síndrome del edificio enfermo”, el cual se puede considerar como un sinónimo de una calidad de aire pobre, lo que a su vez se traduce en la posible aparición de problemas de salud y en la falta de confort para los usuarios (Awbi, 2003). Por este motivo, la calidad del aire se debe definir en función de las necesidades de los usuarios, las cuales se pueden resumir en la percepción de aire fresco en lugar de aire cargado o viciado y que los riesgos para la salud que se pudieran derivar de respirar dicho aire sean despreciables (Hernández, 1994a).

Generalmente, las sustancias contaminantes responsables de una calidad de aire pobre en el interior de los edificios son: los olores, el dióxido de carbono, el humo de tabaco, los óxidos de nitrógeno y los aerosoles (Awbi, 2003). Sin embargo, para estimar el volumen de aire necesario para conseguir una calidad de aire óptima, se utiliza la concentración de dióxido de carbono (CO_2) (Atthajariyakul y Leephakpreeda, 2004), cuya principal fuente de generación es la respiración humana. La cantidad de CO_2 producida por el ser humano está directamente relacionada con la actividad física que esté realizando, siendo posible estimar la tasa de generación de CO_2 en función de dicha actividad. En (Berenguer y Bernal, 1994) se muestra un procedimiento, extraído de la norma UNE 100-01191, para determinar la cantidad de CO_2 que genera una persona sana, con una dieta normal, cuando realiza una determinada actividad. Dicho procedimiento está basado en (Leephakpreeda *et al.*, 2001), donde se define la tasa de generación de CO_2 [g/s] G en función de la actividad metabólica M como $G = 0.0042 \cdot M$. Además, se incluyen algunos ejemplos de valores de G en función de la actividad realizada.

Para controlar los niveles de CO_2 en el interior de un determinado edificio la técnica más utilizada es la ventilación, que se puede definir como el aporte y/o extracción de aire en un cierto entorno, ya sea de una forma natural o mecánica (Hernández, 1994b). Para describir la dinámica del CO_2 , se recomienda utilizar un modelo basado en balance de masas de la sustancia contaminante, en este caso el CO_2 como se muestra en la siguiente ecuación (Leephakpreeda *et al.*, 2001):

$$V \cdot \frac{\partial C_i}{\partial t} = F_o \cdot C_o - F_o \cdot C_i + F_f \cdot C_o - F_e \cdot C_i + N_p \cdot G \quad (15)$$

donde

- V : volumen de aire del recinto estudiado [m^3].
- C_o : concentración de CO_2 en el aire exterior [g/m^3].
- C_i : concentración de CO_2 en el aire interior [g/m^3].
- F_o : flujo de aire exterior a través de ventilación forzada [m^3/s].
- F_f : flujo de aire por infiltración [m^3/s].

- F_e : flujo de aire por exfiltración [m^3/s].
- N_p : número de ocupantes [-].
- G : tasa de generación de CO_2 [g/s por persona].

Por otro lado, en España existe otra normativa para estimar la calidad de aire interior. Esta norma se encuentra publicada en el estándar UNE-EN 1779 y en el informe 1752 del CEN (Comité Europeo de Normalización). Además, en el “Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios” (IDAE, 2007) se especifica cómo regular la calidad de aire interior en función del nivel de CO_2 , recomendándose que dicho nivel oscile entre 500 y 800 ppm. También se incluye la siguiente formulación para calcular la tasa de ventilación forzada necesaria que permitiría eliminar la concentración de un determinado contaminante:

$$C = \frac{q}{C_a - C_i} \cdot \frac{1}{E_v} \quad (16)$$

donde

- C : caudal volumétrico de aire de impulsión [m^3/s].
- q : caudal mísico de la sustancia contaminante medida [mg/s].
- C_a : concentración permitida en el ambiente [mg/m^3].
- C_i : concentración en el aire de impulsión [mg/m^3].
- E_v : eficacia de ventilación [-].

La eficacia de ventilación E_v se define como la relación $E_v = C_e / C_r$, siendo C_e la concentración del contaminante en la extracción del aire y C_r la correspondiente en la zona ocupada (Hernández, 1994a). Por tanto, la eficacia de ventilación es función de la ubicación y de las características de los elementos de suministro y extracción del aire y de las fuentes de contaminación.

3. CONTROL DE LAS CONDICIONES DE CONFORT EN EDIFICIOS

Los primeros trabajos de control climático para los usuarios de un edificio se basaban en el control de temperatura (Flórez, 1985; Flórez y Barney, 1987a,b). Esta línea de investigación todavía se sigue desarrollando hoy en día, dando lugar a diferentes sistemas de control, como por ejemplo, las soluciones obtenidas en el Benchmark de control desarrollado y propuesto por la Universidad de Sevilla dentro del proyecto Europeo HYCON (<http://www.ist-hycon.org/>), donde el sistema de climatización está compuesto por una máquina de frío solar como la utilizada en el apartado final de este trabajo (Menchinelli y Bemporad, 2008; Rodríguez *et al.*, 2008; Sonntag *et al.*, 2008; Zambrano y García-Gabin, 2008).

La alternativa al control de temperatura es el control directo del confort (que lleva implícito el de temperatura). El control de las condiciones de confort en el interior de los edificios es un problema multivariable (Bernard y Kuntze, 1999; Dounis y Caraíscos, 2009; Guo y Zhou, 2009), que no tiene una única solución, sobre todo en edificios bioclimáticos. Como ya se mencionó anteriormente, el principal objetivo que se pretende alcanzar con la implantación de sistemas de control en edificios, es la obtención de altos niveles de confort y calidad de aire, al mismo tiempo que se minimiza el consumo de energía (Dounis y Caraíscos, 2009). Sin embargo, en muchos casos, la utilización de los edificios no es homogénea existiendo áreas o recintos que no se usan frecuentemente. En estos casos, resulta fundamental disponer de información sobre la ocupación de los mismos para conseguir un mayor ahorro energético. Por ejemplo, en (Erickson *et al.*, 2009) se han

desarrollado una serie de modelos que permiten predecir la ocupación y movilidad de los usuarios dentro de un edificio en función de los datos obtenidos a través de una red de cámaras inalámbricas. Posteriormente, se utilizan las predicciones de dichos modelos (que poseen una precisión del 80 %) para aplicar las estrategias de control adecuadas solamente cuando los recintos estén ocupados.

Por otro lado, en los últimos 20 años se está haciendo especial énfasis en la construcción de edificios basados en una arquitectura bioclimática (arquitectura orientada al ahorro de energía y al confort). Generalmente, la arquitectura bioclimática se centra en la construcción de edificios que utilizan los beneficios de la energía solar y el flujo de aire natural para producir calefacción natural y refrigeración pasiva (Dounis y Caraicos, 2009). Mediante estas estrategias pasivas no se consiguen, en general, los niveles de confort óptimos, al menos en determinadas épocas del año, por lo que suele ser preciso utilizar los medios disponibles en el edificio para conseguir los objetivos mencionados anteriormente de la forma más eficiente.

La mayor parte de los edificios poseen como único mecanismo de actuación los sistemas de climatización (HVAC - *heating, ventilation and air conditioning* en terminología inglesa), los cuales se controlan generalmente mediante controladores todo/nada (Fedderspiel y Asada, 1994). Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de controladores es que no tienen en cuenta el ahorro de energía, además de otros inconvenientes relacionados con las comutaciones continuas de los actuadores y pobre regulación con cambios de temperatura en forma de diente de sierra. Por ello, en trabajos recientes (Dounis y Caraicos, 2009; Kolokotsa *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2008; Oldewurtel *et al.*, 2010b; Gwerder *et al.*, 2010) se están incluyendo otro tipo de mecanismos de actuación como pueden ser dispositivos de sombreado, apertura y cierre automático de ventanas, etc. con el principal objetivo de minimizar la utilización de los sistemas de climatización y por lo tanto el consumo energético.

Para realizar un correcto control de dichos mecanismos es importante disponer de medidas exactas de las principales variables climáticas del edificio, en otras palabras, es necesaria la instalación de una red de sensores precisa y robusta (Braun, 2007). Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de este tipo de instalaciones es su elevado coste. Por este motivo, las últimas tendencias relacionadas con este tipo de instalaciones están centradas en la reducción de costes de las mismas, ya sea mediante la aparición de nuevos estándares de comunicaciones (Tse y Chan, 2007; Wang *et al.*, 2004) o mediante la utilización de redes distribuidas de sensores (Tse y Chan, 2008), tecnologías inalámbricas (Akyildiz *et al.*, 2002; Braun, 2007; Guo y Zhou, 2009), etc. para disminuir los costes de cableado. Son muchos los trabajos referentes a este tema, por ejemplo, en (Guo y Zhou, 2009) se realiza una revisión de tecnologías actuales de control de sistemas de climatización (HVAC) usadas en edificios comerciales y haciendo especial énfasis en la idoneidad de las redes de sensores inalámbricas en este ámbito. En ese trabajo y las referencias que se citan en el mismo se pueden encontrar ejemplos de aplicación de controladores tipo PID y algunos otros que se van a tratar a continuación.

En este apartado se hace referencia a los modelos y técnicas de control más extendidas en la bibliografía relacionada con el control del confort. En la mayoría de las técnicas que se comentan subyace la idea de utilizar el índice PMV para generar

consignas de temperatura a un bucle clásico de control. Una interesante comparación (haciendo uso de un modelo basado en principios físicos) entre un sistema de control clásico con consigna constante y con consigna generada a partir del índice PMV se puede encontrar en (Kang *et al.*, 2010) para un sistema de climatización tipo VAV (volumen variable de aire). También se puede encontrar una revisión sobre la aplicación de sistemas de control avanzados en el ámbito del confort y ahorro energético en edificios en (Dounis y Caraicos, 2009), en la que se hace especial énfasis en técnicas basadas en lógica borrosa y en agentes inteligentes y se muestran simulaciones realizadas en TRNSYS/Matlab.

En las siguientes secciones el estudio se centra en técnicas de control predictivo basado en modelo (MPC), técnicas de control basadas en redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos y técnicas de control adaptativo y borroso. No se explican las técnicas relacionadas con agentes inteligentes porque se encuentran muy bien detalladas en (Dounis y Caraicos, 2009).

3.1 Control Predictivo basado en Modelo (MPC)

Se trata de una de las técnicas más extendidas para control de confort, ya que utiliza un modelo (del sistema, los ruidos y las perturbaciones) para realizar predicciones de la salida futura. Estas predicciones se incorporan dentro de una función de coste relacionada con el comportamiento en bucle cerrado y el esfuerzo de control, que se minimiza respecto a la secuencia de señales de control futuras, teniendo en cuenta las restricciones del problema. Finalmente, se implementa una estrategia de horizonte deslizante, aplicando en el instante actual k la señal de control calculada para ese instante y repitiendo los cálculos en el siguiente periodo de muestreo. En (Camacho y Bordons, 2004) se describe la estrategia de control predictivo y las posibilidades que ésta ofrece como motivación para su utilización.

Dentro del contexto que se trata en este trabajo, se van a explicar someramente las estrategias que se consideran más relevantes dentro del ámbito del control del confort en edificios. En (Donaisky *et al.*, 2007) se proponen dos estructuras de control predictivo basado en modelo con restricciones para el control del confort térmico en el interior de un edificio (figura 1). Ambas estrategias se caracterizan por lo siguiente: i) consideran que existe un único dispositivo de climatización (HVAC), ii) consideran el índice PMV como un factor para promover el confort térmico de los ocupantes, iii) la parte lineal de los modelos se genera mediante modelos de Laguerre (relacionan la señal de control con la temperatura interior), que presentan ventajas a la hora de ser identificados. La principal diferencia entre ellas, es que en la primera (modelo PMV interno) se utiliza el modelo PMV directamente en la función de coste (modelo de predicción) cuya minimización proporciona las señales de control, generando un problema de optimización no-lineal, mientras que en la segunda (modelo PMV externo), el índice PMV se utiliza para proporcionar la temperatura de consigna que se usa en una optimización clásica del MPC.

La primera estrategia se caracteriza por utilizar un modelo espacio-estado que relaciona la señal de control con el PMV. Mediante modelos lineales de Laguerre, se calculan las predicciones de la temperatura (\hat{y}_T) y de la humedad relativa (\hat{y}_{HR}) y se utiliza la expresión no-lineal del PMV (4) asumiendo valores constantes de los parámetros y un valor de la temperatura radiante igual a la temperatura ambiente para obtener la predic-

control MPC que utiliza un modelo (Laguerre) que relaciona la señal de control con la temperatura, como en el caso anterior (figura 1). La función de coste asociada a dicho controlador viene dada por la ecuación (22), donde ω_T es la temperatura de consigna obtenida de la minimización del PMV para las condiciones ambientales actuales y el resto de parámetros ya han sido explicados. Finalmente, al igual que en la primera estrategia, se resuelve el problema de optimización (23) sujeto a las restricciones (19), (20) y (24), esta última restricción asociada a posibles problemas de factibilidad de la solución.

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} (\hat{y}_{PMV}(k+j|k) - \omega_T(k))^2 + \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} \Delta u(k+j|k)^2 \quad (22)$$

$$\min_{\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} J(k) \quad (23)$$

s.a. (19), (20) y

$$\hat{y}_T(k+N_y+j|k) = \omega_T(k) \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (24)$$

Por otro lado, en (Freire *et al.*, 2006) se proponen tres esquemas MPC y la mejora de los índices relacionados con la sensación de confort térmico de los usuarios, donde la temperatura interior y la humedad relativa son las variables medibles y la variable manipulable es la potencia eléctrica suministrada al sistema de climatización (HVAC). Una extensión de este trabajo se puede encontrar en (Freire *et al.*, 2008). El primer esquema de control se basa en encontrar un valor óptimo de humedad relativa al mismo tiempo que se garantiza que la señal de temperatura se encuentra dentro de unos límites de confort. La función de coste asociada a este esquema se muestra en la ecuación (25) y la ley de control está relacionada con el problema de optimización con horizonte deslizante establecido en (26) sujeto a restricciones del tipo (19), (20) y (27).

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} (\hat{y}_{HR}(k+j|k) - w_{HR}(k))^2 \quad (25)$$

$$\min_{\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} J(k) \quad (26)$$

s.a. (19), (20) y

$$w_{T,\min} \leq \hat{y}_T(k+j|k) \leq w_{T,\max} \quad \forall j = N_1, \dots, N_y \quad (27)$$

donde $[w_{T,\min}, w_{T,\max}]$ son las bandas de temperatura permitida y w_{HR} es la consigna de humedad relativa.

En el segundo esquema, la sensación de confort térmico de los usuarios se define mediante un compromiso entre los errores de temperatura y humedad relativa en relación a las consignas predefinidas. Dichas consignas se establecen como el centro de la zona de confort de un diagrama psicométrico. La función de coste asociada a este esquema se muestra en la ecuación (28) y el problema de optimización viene definido por (29) sujeto a las restricciones (19) y (20).

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} (\hat{y}_T(k+j|k) - w_T(k))^2 + \lambda (\hat{y}_{HR}(k+j|k) - w_{HR}(k))^2 \quad (28)$$

$$\min_{\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} J(k) \quad (29)$$

Figura 1. Control MPC (Donaisky *et al.*, 2007).

ción del PMV a lo largo del horizonte de predicción ($\hat{y}_{PMV}(k+j|k)$) representa la predicción del PMV en el tiempo $k+j$ calculado en el instante de tiempo k). Como la ecuación (4) es una expresión estática, el sistema total tiene una estructura de tipo Wiener. El problema de optimización que se resuelve se muestra en la ecuación (17).

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} \hat{y}_{PMV}(k+j|k)^2 + \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} \Delta u(k+j|k)^2 \quad (17)$$

donde N_1 y N_y son los horizontes mínimo y máximo de predicción respectivamente y N_u es el horizonte control, λ es el factor de ponderación del esfuerzo de control, $\Delta u(k+j|k)$ representa la variación de la señal de control en el tiempo $k+j$ calculado en el instante de tiempo k (Camacho y Bordons, 2004). Finalmente, en esta estrategia, la ley de control se obtiene resolviendo el problema de optimización (18) sujeto a las restricciones (19), (20) y (21), donde u_{\max} es el valor máximo que puede tomar la señal de control y m un índice relacionado con la restricción terminal. Nótese que se trata de un problema de optimización no-lineal con restricciones no-lineales. Se sigue una estrategia de horizonte deslizante como se ha descrito previamente.

$$\min_{\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} J(k) \quad (18)$$

$$\Delta u(k+j|k) = 0 \quad \forall j = N_u, \dots, N_y \quad (19)$$

$$0 \leq u(k+j) \leq u_{\max} \quad \forall j = 0, \dots, N_u - 1 \quad (20)$$

$$\hat{y}_{PMV}(k+N_y+j|k) = 0 \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (21)$$

Obviamente, restricciones como (21) no siempre pueden ser cumplidas y pueden provocar problemas de factibilidad, debido principalmente a los límites físicos del actuador. Por ello, el generador de consignas siempre devuelve una referencia que sea físicamente alcanzable por el actuador, y que al mismo tiempo esté dentro de la banda de confort térmico, definida mediante un valor de PMV comprendido entre ± 0.5 .

Respecto a la segunda estrategia, se implementa en primer lugar una optimización en línea que calcula los valores de temperatura que minimizan el valor del PMV (que teóricamente lo hacen igual a cero). Las iteraciones toman como valor inicial la temperatura actual y las restricciones de valores máximo y mínimo admisibles del PMV (tabla 1). El valor de temperatura que minimiza el PMV se utiliza como referencia a un bucle de

sujeto a restricciones del tipo (19) y (20), donde λ en este caso define el compromiso entre los errores de temperatura y humedad relativa.

En el tercer esquema de control la sensación de confort térmico se proporciona a través del cálculo del índice PMV, de forma que cuanto más próximo esté a cero mejor será la sensación térmica. La función de coste asociada a este esquema se muestra en la ecuación (30), que como se observa está englobada en los trabajos previamente comentados.

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} (\hat{y}_{PMV}(k+j|k))^2 \quad (30)$$

En (Dumur *et al.*, 1997) se presenta un controlador predictivo para el control del clima en el interior de edificios, centrándose fundamentalmente en lograr unas consignas de temperatura muy estrictas. Para conseguir ese objetivo, implementan un sistema que consiste en una variación del esquema de control predictivo general y el desarrollo de una regla empírica anticipativa, que desplaza la consigna futura atrás en el tiempo con el fin de conectar o desconectar el sistema de climatización con la suficiente antelación y así cumplir las especificaciones propuestas. La función de coste asociada a esta estrategia es la misma ya mostrada en la ecuación (22).

Dentro de este ámbito cabe destacar un proyecto de investigación, *OptiControl (Uso de predicciones de las condiciones climatológicas y de la ocupación para un control óptimo del clima en edificios)* (www.opticontrol.ethz.ch/index.html) y las referencias que se pueden encontrar en su web. El principal objetivo del proyecto es mantener la temperatura del recinto, así como el nivel de CO₂ y el nivel de iluminación dentro de un rango de confort predefinido minimizando el consumo (Oldewurtel *et al.*, 2010a). Para ello, trabajan en simulación con distintas configuraciones de un recinto automatizado (Oldewurtel *et al.*, 2010b), IRA (de las siglas en inglés *Integrated Room Automation*), equipado fundamentalmente con un sistema de climatización (HVAC), un sistema de iluminación automatizado y un dispositivo de control sobre las persianas entre otras estrategias. Dichos actuadores difieren en términos del tiempo de respuesta y efectividad, así como en su dependencia de las condiciones climáticas y en el consumo de energía asociado a cada uno de ellos. Por lo tanto, el objetivo a alcanzar se puede resumir en la elección de la consigna apropiada para cada actuador en función de las predicciones de las condiciones climáticas para conseguir satisfacer los requerimientos de confort minimizando al mismo tiempo los costes energéticos. Dentro del proyecto, se han estudiado diversas estrategias de control, las cuales se pueden resumir en:

- *Control basado en reglas (RBC)*: este tipo de estrategia emplea reglas del tipo “Si condición entonces acción” (Gwerder *et al.*, 2010).
- *Control predictivo basado en modelo (MPC)*: se han analizado fundamentalmente dos esquemas MPC (Oldewurtel *et al.*, 2010a). Uno no tiene en cuenta la incertidumbre inherente al proceso (variación del clima), mientras que el segundo esquema tiene en cuenta la incertidumbre asociada a la predicción del clima de forma directa en el controlador y resuelve un problema de MPC estocástico (Oldewurtel *et al.*, 2008) que intenta aumentar la eficiencia energética respetando las restricciones marcadas por el confort deseado por los ocupantes.

- *Límite de comportamiento (PB)*: este último no es un controlador que se pueda implementar de forma real, es un concepto que se define como el control óptimo utilizando predicciones perfectas del tiempo y de las ganancias internas, de este modo proporciona los límites que cualquier controlador puede alcanzar, por lo que se utiliza como un punto de referencia teórico (Oldewurtel *et al.*, 2010a).

Para cada una de las estrategias anteriores se han realizado diversos análisis comparándolas entre sí (Gwerder *et al.*, 2010; Oldewurtel *et al.*, 2010b,a; Gyalistras *et al.*, 2010). Una de las estrategias más relevantes es el MPC estocástico desarrollada en (Oldewurtel *et al.*, 2010a). Esta estrategia tiene en cuenta las predicciones climáticas para incrementar la eficiencia energética, al mismo tiempo que se cumplen las restricciones que satisfacen las condiciones de confort para los usuarios. Una de las características más importantes de esta estrategia es que utilizan restricciones probabilísticas variables en el tiempo, un modelo numérico de predicción meteorológica y un modelo bilineal de la dinámica térmica del edificio y los subsistemas automatizados basado en una red multinodo de resistencias y capacitancias. Los modelos en tiempo discreto utilizados tienen la forma:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_v v(k) + \\ + \sum_{i=1}^m [(B_{vu,i}v(k) + B_{xu,i}x(k))] u_i(k) \quad (31)$$

donde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ son los estados (temperaturas de la habitación y de las diferentes capas en suelo, techo y paredes), $u(k) \in \mathbb{R}^m$ son las entradas y $v(k) \in \mathbb{R}^p$ son las perturbaciones relacionadas con el clima en el instante k y $A, B, B_v, B_{vu,i}$ y $B_{xu,i}$ son las matrices de tamaño apropiado que describen el sistema dinámico. La función de coste que utilizan en la optimización es lineal de la forma $J(k) = \sum_{k=0}^{N_u-1} c^T \cdot u(k)$ donde $c \in \mathbb{R}^m$ es un factor de escala relacionado con el coste asociado a cada actuador. A la optimización de la función lineal se añaden restricciones de probabilidad sobre las entradas y estados en el horizonte (Oldewurtel *et al.*, 2010b), del tipo $P[\mathbf{G}_i \mathbf{x} \leq \mathbf{g}] \geq 1 - \alpha_i, \forall i = 1, \dots, r$, donde P expresa probabilidad y $1 - \alpha_i$, con $\alpha_i \in [0, 1]$ denota el nivel de probabilidad; \mathbf{x} son los estados, \mathbf{G} y \mathbf{g} son las matrices de dimensiones adecuadas que definen las r restricciones sobre los estados.

Los autores han realizado simulaciones durante un periodo de tiempo de un año con un tiempo de muestreo de una hora. Por ejemplo, en (Gyalistras *et al.*, 2010) se muestra una comparación entre el ahorro obtenido a través de una técnica de control no predictiva (1% – 15%) y el ahorro teórico que se obtiene con técnicas de control predictivo (16% – 41%).

En la misma línea se desarrolla el trabajo (Siroky *et al.*, 2010), donde se presenta un esquema de control MPC del sistema de calefacción de un edificio que combina predicción del clima y un modelo térmico del edificio basado en modelos de espacio de estados identificados mediante técnicas de subespacios para estimar la evolución de la temperatura interna. De esta forma, se puede utilizar la capacidad térmica del edificio para minimizar el consumo energético manteniendo unos niveles aceptables de temperatura interior independientes del clima externo. La función de coste que utilizan en la minimización es una modificación de (22) donde en el segundo término no se minimiza el esfuerzo de control sino directamente la acción de control

$u(k)$ que está relacionada directamente con el coste de calefacción. Las restricciones de desigualdad que imponen son en la amplitud y velocidad de la señal de control y en el error de seguimiento de consigna. Es interesante destacar que muestran resultados reales.

Otra iniciativa relacionada más reciente es la del Laboratorio de Control MPC y distribuido de UC-Berkeley (sites.google.com/site/mpclaboratory/research/predictive-networked-building-control-1), donde se están centrando en el desarrollo de estrategias MPC para sistemas de almacenamiento de energía y el uso de tecnologías inalámbricas (Ma *et al.*, 2009, 2010). En este caso, las enfriadoras se operan de noche para recargar los tanques de almacenamiento para la operación del día siguiente. En estos trabajos se han desarrollado modelos simplificados de las enfriadoras, torres de refrigeración, tanques y edificios. Un controlador MPC híbrido se encarga de gestionar las enfriadoras para almacenar de una forma óptima la energía térmica en los tanques usando predicciones sobre las cargas térmicas en el edificio y las condiciones climáticas.

Existen también aplicaciones de técnicas de control predictivo distribuido (Morosan *et al.*, 2010) donde se explota el carácter de operación intermitente de la mayoría de edificios y se aplican técnicas de control MPC descentralizado y centralizado para resolver el problema de control de confort multi-zona. Utilizan modelos lineales tipo ARX que relacionan la potencia del sistema de calefacción y la temperatura del aire interior y un algoritmo de control MPC, cuya función de coste viene dada por:

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} \delta^k(j) |\hat{y}_T(k+j|k) - \omega(k+j)| + \lambda \sum_{j=0}^{N_y - N_1} u(k+j|k) \quad (32)$$

$$0 \leq u(k+j) \leq u_{\max} \quad \forall j = 0 \dots N_y - N_1 \quad (33)$$

$$u(k+j) = u(k+N_u - 1) \quad \forall j = N_u \dots N_2 - N_1 \quad (34)$$

donde el vector $\delta^k(j)$ se define como

$$\delta^k(j) = \begin{cases} 1, & \text{si } k+j \in \text{Ocupación} \\ 0, & \text{si } k+j \in \text{No ocupación} \end{cases} \quad (35)$$

y representa el perfil de ocupación futuro y además permite tener en cuenta la ausencia de consigna durante los períodos en que el edificio no se encuentre ocupado, de modo que el criterio prima minimizar el consumo. Si se detecta que una persona entra, se fuerza a que todos los elementos sean iguales a 1. Las restricciones son necesarias para garantizar la positividad del criterio y para definir la potencia máxima (u_{\max}) que pueden suministrar los actuadores. La finalidad de la restricción de igualdad es reducir la carga computacional en la optimización. Se puede añadir una restricción de temperatura mínima ($\hat{y}_T(k+j|k) \geq y_{T_{\min}}, \forall j = N_1 \dots N_y$) para evitar temperaturas demasiado bajas en períodos de no ocupación que alarguen los transitorios.

En lo comentado hasta el momento, todas las técnicas de control predictivo tratadas están enfocadas al control del confort térmico en edificios, ya que es el área de estudio más extendida. Sin embargo, existen otros trabajos como (Inkarojrit, 2006), en el que se desarrolla un controlador MPC del confort visual de los usuarios de un edificio actuando sobre las persianas. Dicho controlador está desarrollado en función de cuatro predictores del confort visual: la iluminación mínima, máxima y media a través de la ventana y la radiación solar vertical.

Dentro de este apartado y para finalizarlo se incluye el esquema de control jerárquico que se está implantando en el CDI-CIESOL-ARFRISOL. Tras realizar diversos análisis de confort en este edificio (Castilla *et al.*, 2009) y (Castilla *et al.*, 2010a) se llegó a la conclusión de que era necesario implantar un sistema de control específico que permitiera mantener las condiciones ambientales dentro de la zona de confort para el usuario, minimizando, al mismo tiempo, el consumo energético. El diagrama de bloques básico del esquema jerárquico (figura 2) (Castilla *et al.*, 2009) permite generar en la capa superior las consignas adecuadas de temperatura, humedad relativa, nivel de CO₂ e iluminación (no se incluyen las temperaturas radiantes porque la principal es la del aire) y desarrollar, en la capa inferior una serie de algoritmos de control de bajo nivel capaces de actuar sobre las variables de control. En (Castilla *et al.*, 2010b) se detalla la relación existente entre el confort (térmico, visual y calidad de aire) y los distintos grados de libertad a controlar dentro del edificio CDI-CIESOL-ARFRISOL (la figura 6 muestra el equipamiento, sensores y actuadores utilizados). Las ecuaciones (36)-(39) representan los objetivos que deben ser optimizados: confort térmico (y_{PMV}), confort visual (D_i), calidad de aire (A_c) y consumo energético (Q_e). La minimización de la función de coste (40) permite determinar las condiciones óptimas de humedad, temperatura, iluminación y concentración de CO₂ minimizando el consumo energético.

$$y_{PMV} = f(y_T, \bar{t}_r, y_{HR}, v_a) \quad (36)$$

$$D_i = f(I_d, I_r) \quad (37)$$

$$A_c = f(q, C_i, E_v) \quad (38)$$

$$Q_e = f(Q_{hvac}, Q_w, Q_s, Q_{ai}) \quad (39)$$

$$J(k) = \omega_{PMV} \cdot y_{PMV}(k)^2 + \omega_{D_i} \cdot D_i(k)^2 + \omega_{A_c} \cdot A_c(k)^2 + \omega_Q \cdot Q_e(k)^2 \quad (40)$$

donde los parámetros que no han sido previamente definidos son:

- Q_{hvac} : Consumo de potencia del sistema de climatización [W].
- Q_w : Consumo de potencia del motor de la ventana [W].
- Q_s : Consumo de potencia del sistema de sombreado [W].
- Q_{ai} : Consumo de potencia de las luces artificiales [W].
- $\omega_{PMV}, \omega_{D_i}, \omega_{A_c}, \omega_Q$: son los factores de ponderación del problema de optimización multiobjetivo asociados al confort térmico, visual, calidad del aire y eficiencia energética respectivamente.

Un caso particular de este problema de optimización, siguiendo una estrategia de horizonte deslizante similar a la de otros autores citados en este apartado, consiste en minimizar la función de coste (41) para obtener las consignas óptimas de temperatura para bucles de control climático clásicos.

$$J(k) = \min_{y_T} \left(\sum_{j=N_1}^{N_y} y_{PMV}(k+j|k)^2 + \lambda \sum_{j=N_1}^{N_y} \Delta y_T(k+j|k)^2 \right) \quad (41)$$

$$y_{T_{\min}} \leq y_T \leq y_{T_{\max}} \quad (42)$$

donde el término $\Delta y_T(k+j|k)^2$ penaliza variaciones bruscas de temperatura en el interior de las habitaciones. En la sección 4 se extenderá más este algoritmo incluyendo ejemplos prácticos.

Figura 2. Sistema de Control propuesto para el CDdI-CIESOL-ARFRISOL.

3.2 Control Neuronal y Algoritmos Genéticos

Otras aproximaciones utilizan controladores basados en redes neuronales, en algoritmos genéticos o una combinación de ambos métodos para el control del confort. En la mayoría de los casos, los algoritmos genéticos se han introducido como un instrumento para resolver problemas de optimización, ya que son capaces de proporcionar una solución global óptima, robusta y eficiente (Congradac y Kulic, 2009). En la bibliografía existen gran cantidad de trabajos en los que se aplican modelos de redes neuronales para el control de sistemas de climatización (HVAC) (Ahmed *et al.*, 1996; Henze y Hindman, 2002; Kalogirou y Bojic, 2000). Sin embargo, si se reduce el campo de estudio a la aplicación de las redes neuronales para la evaluación del confort térmico, el número de estudios se reduce considerablemente. En (Atthajariyakul y Leephakpreeda, 2005) se propone una aproximación para determinar el índice PMV a través de redes neuronales para el control de un sistema de climatización (HVAC). Como modelo de red neuronal se ha utilizado una red neuronal tipo perceptrón multicapa por adelanto formada por una capa de entrada de seis nodos (variables de la tabla 2), dos capas ocultas con ocho y cinco nodos, respectivamente y una capa de salida con un único nodo (el valor del índice PMV). Como mecanismo de adaptación de los pesos de la red neuronal se ha usado el gradiente descendente (*back-propagation*) utilizando el error cuadrático medio entre la salida proporcionada por la red neuronal y los valores reales del PMV.

En (Liu *et al.*, 2007) se desarrolla un modelo de evaluación del confort térmico interior basado en la misma técnica, ajustando el confort térmico de manera individual para cada usuario. Más concretamente la estructura de red neuronal esta compuesta por una capa de entrada con cuatro nodos (temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa y temperatura radiante media), una única capa oculta formada por cinco nodos y una

capa de salida con un único nodo (el valor del índice PMV). Otro ejemplo del uso de las redes neuronales se proporciona en (Liang y Du, 2005) y (Liang y Du, 2008), en el que se ha diseñado un controlador basado en una red neuronal que modela el PMV capaz de proporcionar un alto nivel de confort para un determinado usuario, véase la figura 3. Como se puede observar en dicha figura el sistema está formado por un módulo de aprendizaje de la zona de confort para un determinado usuario, un módulo de control que proporciona una estrategia de ahorro energético, un controlador basado en una red neuronal, un modelo de la sensación térmica del usuario y el sistema de climatización. La zona de confort se establece mediante aprendizaje a través de las entradas introducidas por el usuario, de forma que se proporciona al sistema las preferencias de confort térmico para un usuario. El módulo de control del consumo mínimo está diseñado combinando una estrategia de ahorro energético (proporcionando al controlador neuronal la consigna idónea que se debe alcanzar) y el control del sistema de climatización (de tipo VAV).

Respecto a la aplicación de los algoritmos genéticos en este ámbito, en (Congradac y Kulic, 2009) se describe el uso de esta técnica para actuar sobre sistemas de climatización estándar (HVAC) con el principal objetivo de optimizar su utilización en el control de la concentración de CO₂ al mismo tiempo que se consigue un ahorro de energía. En este caso, como criterio de optimización se utiliza una ecuación similar a (43) donde *u* es la posición de la válvula del sistema de climatización, λ es un factor de ponderación, y_{CO_2} es el nivel de CO₂ y w_{CO_2} es el nivel deseado de CO₂.

$$J(k) = \sum_{j=0}^{N_u-1} u(k+j|k)^2 + \lambda \sum_{j=N_1}^{N_y} (y_{CO_2}(k+j|k) - w_{CO_2}(k))^2 \quad (43)$$

Figura 3. Esquema de Control basado en Redes Neuronales. (Liang y Du, 2005)

En (Nassif *et al.*, 2003) se utiliza un algoritmo genético para encontrar los valores de consigna óptimos de un sistema de climatización (HVAC) con la finalidad de conseguir un confort térmico aceptable. Otros autores combinan las redes neuronales con los algoritmos genéticos. En (Magnier y Haghigat, 2010), se realiza primero una simulación del comportamiento del edificio usando para ello redes neuronales artificiales y posteriormente, se combina dicha red neuronal con un algoritmo genético multiobjetivo para realizar una optimización del sistema.

Otro ejemplo de utilización de las redes neuronales combinadas con algoritmos genéticos se puede ver en (Ruano *et al.*, 2010), en el que se desarrollan modelos de predicción para dos variables necesarias para el cálculo del confort térmico, la temperatura del aire y la humedad relativa, utilizando para ello redes neuronales del tipo RBF (*Radial Basis Function*) y algoritmos genéticos de optimización multiobjetivo (MOGA).

3.3 Control adaptativo y control basado en lógica borrosa

En (Nicol y Humphreys, 2002) se estableció el llamado *Princípio Adaptativo* que dice: “Si se produce un cambio que ocasione una situación de no confort, el ser humano reacciona intentando restaurar su confort”. Por tanto, se han desarrollado controladores capaces de aprender a predecir la sensación térmica actual de un usuario específico, sintonizando los parámetros de un modelo de sensación térmica (Fedderspiel y Asada, 1994). Dichos parámetros se ajustan en función de las indicaciones sobre la situación térmica actual de un determinado usuario, de forma que, con el tiempo se refleja el modelo de confort de un usuario concreto de forma precisa. El modelo de sensación térmica utilizado en (Fedderspiel y Asada, 1994) propone un índice que es una función explícita (y lineal en los parámetros) de las variables que afectan al cálculo del PMV. A través de las medidas de temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad relativa los parámetros del modelo se ajustan de forma adaptativa usando un algoritmo de mínimos cuadrados recursivo con restricciones estándar. Este modelo se emplea en el diseño de controladores del sistema de climatización.

En (Dounis y Caraiscos, 2009) se realiza una revisión de técnicas de control borroso del tipo PID. En (Guo y Zhou, 2009) se realiza una revisión de aplicaciones de la lógica borrosa al modelado y control de sistemas HVAC. La lógica borrosa es

una herramienta adecuada para imitar el comportamiento de los usuarios del edificio y desarrollar descripciones lingüísticas de la sensación de confort térmico que aproximen el modelo PMV y faciliten los cálculos de sistemas de control. En (Dounis y Caraiscos, 2009) se realiza una revisión general de técnicas de control borroso PID, mientras que en (Kolokotsa *et al.*, 2000; Gouda *et al.*, 2001) se utiliza una técnica de control PID borroso basada en el uso de un sensor virtual de PMV. En (Dounis *et al.*, 1993) y (Dounis *et al.*, 1995) se utiliza la lógica borrosa para desarrollar un esquema de control para el confort visual en el interior de los edificios. La luz diurna se puede considerar como una fuente dinámica de iluminación, ya que depende de diversos factores como la estación del año, la localización, la latitud y la nubosidad existente (Cziker *et al.*, 2007). En (Oliveira *et al.*, 2003) se propone una estrategia de control basada en lógica borrosa que consigue mantener la temperatura interior dentro de una banda, en vez de resolver un problema de regulación en torno a una consigna. En (Bernard y Kuntze, 1999) se propone un sistema supervisor basado en lógica borrosa que permite el control del ambiente térmico en el interior de un edificio en el que un determinado usuario puede adoptar una solución de compromiso (a través de un factor de ponderación) entre economía y confort, véase la figura 4. El esquema de control tiene en cuenta perturbaciones medibles (básicamente asociadas al clima exterior) y no medibles (asociadas a la ocupación de la habitación). Mientras que la temperatura suele ser controlada mediante dispositivos específicos, la humedad relativa y el CO₂ están muy acoplados y de ahí la necesidad de incluir la tasa de intercambio de aire como una variable de control auxiliar. A través de las medidas de las variables de interés tanto internas como externas y del criterio del usuario sobre la relación confort/economía, se obtienen las referencias de la temperatura interior y de la tasa de intercambio de aire. Para ello se usa una optimización multiobjetivo basada en lógica borrosa, que contiene tres etapas principales: i) se establecen dos objetivos relacionados con el confort y el ahorro de energía, definidos mediante funciones de pertenencia borrosas que se expresan en función de la temperatura del aire y de la tasa de renovación de aire (que son función de las variables de estado climáticas); ii) en vez de un modelo estático o dinámico definido, se usan funciones de pertenencia borrosas heurísticas para representar las variables de estado climáticas; iii) se realiza una optimización ponderando los dos objetivos dando como

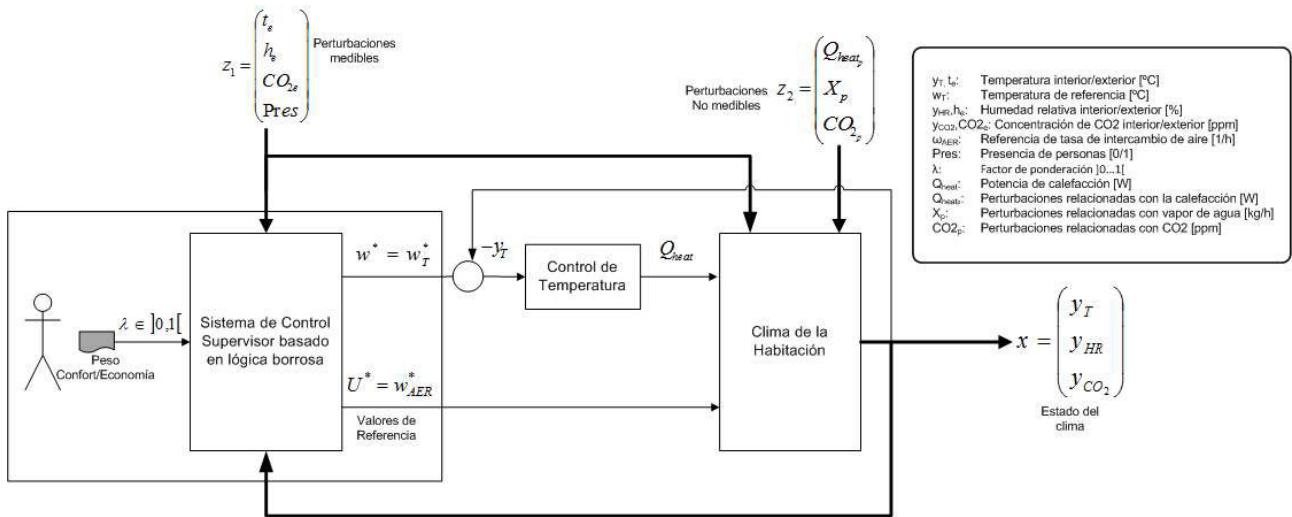


Figura 4. Esquema de Control basado en Lógica Borrosa (Bernard y Kuntze, 1999).

Figura 5. Esquema de Control Adaptativo basado en Lógica Borrosa (Huang y Nianping, 2006).

resposta la consignas de temperatura y de tasa de renovación de aire.

La aplicación de técnicas de lógica borrosa no se limita a un único campo, por ejemplo, en (Trobèc *et al.*, 2005) se aplica esta técnica para el control tanto del confort visual como del confort térmico, y en (Dounis y Caraiscos, 2007) se aplica la lógica borrosa para el control de las condiciones climáticas (térmicas, visuales y calidad de aire) en el interior de un edificio. Otro campo de aplicación de las técnicas de lógica borrosa es en la resolución problemas de optimización, por ejemplo, en (Yu y Dexter, 2007) se propone un esquema de control jerárquico de tres capas basado en lógica borrosa y cuyo principal objetivo es maximizar el confort térmico al mismo tiempo que se optimiza la eficiencia energética en el interior de un edificio. Más concretamente, la primera capa utiliza un árbol de decisión basado en lógica borrosa para la elección del conjunto de reglas apropiado que se utilizarán en la segunda y la tercera capa en función de la información disponible sobre el tiempo y la ocupación. Por otro lado, las reglas de la segunda capa generarán un perfil de energía óptimo y las de la tercera capa determinarán el modo de operación de los dispositivos instalados y seleccionarán las variables de control adecuadas para lograr el perfil de energía óptimo, generado en la segunda capa, de la forma más eficiente posible.

Sin embargo, en gran parte de la bibliografía donde estas técnicas se utilizan, aparecen combinadas la lógica borrosa con estrategias adaptativas. Un ejemplo de este tipo de estrategia es el que se puede ver en (Huang y Nianping, 2006), donde se propone un sistema de control adaptativo basado en lógica borrosa cuyo esquema principal, figura 5, está compuesto por dos bucles, un bucle para el control del proceso y un bucle de corrección de modelo o adaptativo. El bucle controlador basado en lógica borrosa evalúa los valores del PMV actual ($y_{PMV}(k)$) y la consigna ($\omega_{PMV}(k)$) suministrando un nuevo valor de PMV deseado ($\omega_{PMV_d}(k)$) a un modelo de la planta invertido que suministra las nuevas entradas al sistema de climatización ($u(k)$) que controla la temperatura del recinto ($y_T(k)$). El modelo de planta basado en lógica borrosa relaciona el PMV actual con las entradas al sistema de climatización, y se va actualizando mediante un mecanismo de identificación. Para un correcto funcionamiento del sistema, el bucle de corrección debe ser más lento que el bucle de control. Para ello, las tareas de control e identificación se realizan cada periodo de muestreo mientras que la inversión del modelo, la actualización de parámetros del controlador y la optimización (tareas de corrección) se realiza cada 20 periodos de muestreo.

Como el índice PMV presenta características no lineales, lo cual puede provocar ciertas dificultades cuando se monitoriza y se controlan los sistemas de climatización, en (Calvino *et*

al., 2004) se describe un controlador PID basado en lógica borrosa con modelos de Takagi-Sugeno para los sistemas de climatización (HVAC). Además, se le añade una red adaptativa que permite variar los valores de los parámetros que hacen referencia a los bloques integrativo y derivativo.

4. UN EJEMPLO PRÁCTICO: CONTROL DEL CONFORT TÉRMICO EN EL EDIFICIO CDDI-CIESOL-ARFRISOL

En este apartado se describen someramente los resultados preliminares obtenidos del desarrollo e implementación de un sistema de control que cuenta con un generador de consignas para el sistema de climatización del CDdI-CIESOL-ARFRISOL con el objetivo de controlar el confort térmico en el interior del mismo.

4.1 El CDdI-CIESOL-ARFRISOL

El CDdI-CIESOL-ARFRISOL (www.ciesol.es), véase la figura 6, se encuentra situado en el campus de la Universidad de Almería y se trata de un Centro Mixto de Investigación entre el CIEMAT y la Universidad de Almería, acogiendo a grupos de investigación de ambos centros. Es también uno de los contenedores de investigación (CDdI) considerados dentro del proyecto ARFRISOL junto con otros situados en la Plataforma Solar de Almería, en CIEMAT-Madrid, en la Fundación Barredo-Asturias y en CEDER-CIEMAT-Soria. ARFRISOL es un Proyecto Científico-Tecnológico de carácter Estratégico del Plan Nacional de I+D+I 2004-2011 cofinanciado con fondos FEDER y subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN). Este proyecto está liderado por la Unidad de Eficiencia Energética del CIEMAT y cuenta con la participación de las Universidades de Almería y Oviedo, además de diferentes tipos de empresas como: constructoras, fabricantes e instaladoras de captadores solares y módulos fotovoltaicos, fabricantes de bombas de absorción para acople a captadores solares, ingenierías de diseño e instalaciones solares térmicas y fotovoltaicas (<http://www.arfrisol.es>).

Este edificio se ha construido con criterios de arquitectura bioclimática, para lo cual cuenta con una importante red de sensores (Ferre *et al.*, 2009) y (Pasamontes *et al.*, 2007b) y sistemas de climatización que hacen uso de frío solar (Pasamontes *et al.*, 2007a), utilizando para ello un campo de colectores solares, un sistema de almacenamiento de agua caliente, una caldera y una máquina de absorción para producción de frío solar. El sistema de frío solar es similar al utilizado en el citado proyecto Europeo HYCON (<http://www.ist-hycon.org/>), (Zambrano *et al.*, 2008, 2006b,a).

Además, dada la función con la que se construyó, este edificio contiene todos sus recintos monitorizados mediante distintos sensores cuyos datos se van almacenando en una base de datos mediante un sistema de adquisición y monitorización (Ferre *et al.*, 2009). Actualmente se están tomando un total de 725 medidas (Ferre *et al.*, 2010) las cuales se pueden ser distribuidas en los siguientes grupos (figura 6):

- *Medidas del interior del edificio:* en las que se incluyen medidas de temperatura del aire, temperatura de superficie, temperatura de globo, humedad relativa, concentración de CO₂, apertura y cierre de ventanas y puertas, etc.
- *Medidas de la fachada ventilada:* dentro de este grupo se realizan medidas de radiación global, de temperatura del

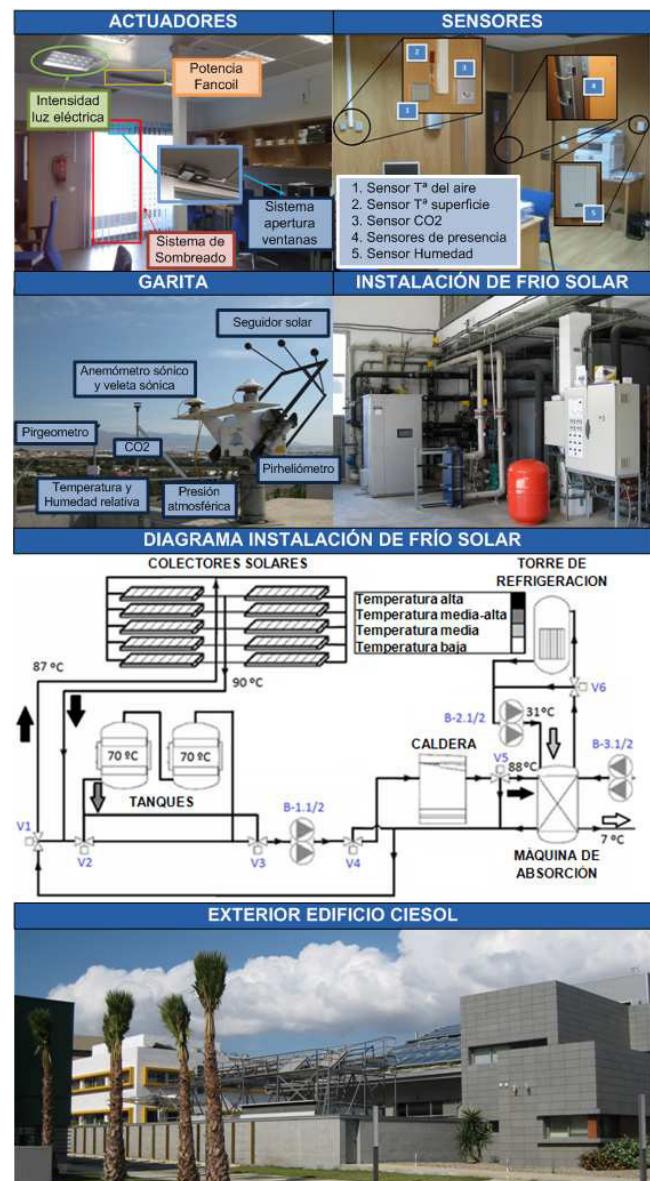


Figura 6. CDdI-CIESOL-ARFRISOL.

aire, de humedad relativa, etc. Además se cuenta también con sensores de flujo, una veleta sónica y anemómetros de hilo caliente.

- *Medidas de la estación meteo-radiométrica:* el CDdI-CIESOL-ARFRISOL dispone de una estación meteo-radiométrica situada en la azotea del edificio, que dispone de sensores de radiación global y difusa, un sensor de presión atmosférica, una veleta sónica, sensores de temperatura, de humedad relativa, de concentración de CO₂, etc.
- *Medidas de la instalación de frío solar:* dentro de la instalación de frío solar se encuentran la mayor parte de las medidas, donde hay que destacar la gran cantidad de sensores de temperatura, caudal, humedad relativa, velocidad del aire, etc.

4.2 Sistema de Control

En la figura 2 se introdujo un esquema preliminar de un sistema de control jerárquico multiobjetivo desarrollado con el principal objetivo de maximizar el confort (térmico, visual y calidad

de aire) ponderando los cambios bruscos en la temperatura interior. En este apartado, se muestra un ejemplo de aplicación incluyendo únicamente el control de confort térmico.

Para la implementación de dicho esquema, se ha supuesto que el único sistema de climatización disponible en el edificio para el control del confort térmico es una instalación de frío solar (Pasamontes *et al.*, 2007a, 2009), que dispone de dos modos de funcionamiento: verano e invierno. Se puede encontrar información sobre el control de este tipo de instalaciones en (Menchinelli y Bemporad, 2008; Rodríguez *et al.*, 2008; Sonntag *et al.*, 2008; Zambrano y García-Gabin, 2008).

Para cada modo de operación se han obtenido distintos modelos linealizados en torno a varios puntos de operación, que representan la dinámica de la temperatura interior de la habitación en función de la velocidad del *fancoil*, mediante técnicas de identificación clásicas (Rivera, 2007). Más concretamente, para la identificación de los modelos asociados a los distintos modos de funcionamiento de la instalación de frío solar (verano e invierno), se han utilizado señales binarias pseudo aleatorias (PRBS). Lo ideal sería disponer de modelos basados en primeros principios del clima interior del edificio (Kummer *et al.*, 1996; Torres y Martín, 2008; Mendes *et al.*, 2001) e incluso modelos bilineales aproximados (Oldewurtel *et al.*, 2010b) en lugar de los modelos linealizados utilizados en esta primera aproximación, pero esos modelos serán objeto de futuros trabajos. En cuanto a la predicción del clima exterior (Oldewurtel *et al.*, 2010b,a; Gruber *et al.*, 2001; Stauch *et al.*, 2008; Steiner *et al.*, 2008), se ha supuesto que los valores de las perturbaciones se mantienen iguales a los actuales en el horizonte considerado. En cualquier caso, se dispone de modelos de predicción del clima en un horizonte de varios días (Martín *et al.*, 2007) y de horas (Pawlowski *et al.*, 2010) que se utilizarán en el futuro. También está previsto incluir modelos de ocupación del edificio (Bourgeois, 2005; Erickson *et al.*, 2009; Mozer *et al.*, 1997; Leephakpreeda *et al.*, 2001; Page *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2005).

El ejemplo expuesto se trata por tanto de un sistema de control tradicional al que se le ha añadido un generador de consignas, con un tiempo de muestreo (120 minutos) superior al de la capa de controladores de bajo nivel (2 minutos), que por medio de un optimizador no-lineal devuelve la temperatura interior de referencia adecuada para alcanzar el máximo confort térmico en función del resto de parámetros climáticos, registrados por el sistema de adquisición y monitorización (Ferre *et al.*, 2009) mencionado anteriormente.

El generador de consignas obtiene la temperatura de referencia de la minimización de la función de coste (41) sujeta a las restricciones (42) expuesta en la sección previa, donde se minimiza el PMV pero también se ponderan los cambios bruscos en la temperatura interior. Como se ha analizado, el índice PMV depende de un total de seis variables e indica una situación de confort térmico óptimo cuando su valor oscila entre ± 0.5 . En el ejemplo que se está tratando, se toman como constantes la actividad física (58.15 W/m^2 para tareas típicas de oficina), el grado de vestimenta (0.5 clo en el periodo de verano y 1.0 clo para el periodo de invierno) y la velocidad del aire en el interior del edificio (0.2 m/s). El resto de variables (temperatura radiante media, temperatura del aire y humedad relativa) se obtienen de forma directa a través de los distintos sensores. Por lo tanto, el generador de consignas devuelve un valor de temperatura de referencia para el cual, el índice PMV sea lo

más próximo a 0 teniendo en cuenta el resto de variables en el instante de tiempo actual. En cuanto a las restricciones (42), se introducen para evitar que la temperatura de consigna pueda ser imposible de alcanzar debido a saturación del actuador (se puede hacer una simulación del comportamiento futuro haciendo uso de los modelos lineales desarrollados). Si esto ocurre, se modifican los límites del problema de optimización para generar otra consigna alcanzable dentro de la zona de confort.

Otra consideración que se ha tomado a la hora de diseñar el sistema de control es que tiene un modo de operación intermitente (Morosan *et al.*, 2010), es decir existen unos periodos de tiempo en los que se encuentra vacío, por lo que en dicho periodo se desconecta el sistema de climatización (teniendo en cuenta un periodo de arranque temprano para que cuando los usuarios entren en el edificio eviten el transitorio inicial o bien aprovechando las características de las técnicas MPC como en (Morosan *et al.*, 2010)), aunque el generador de consignas sigue funcionando (otra opción sería dejarlo en un valor fijo). El periodo de no ocupación del edificio considerado está comprendido entre las 21 y las 7 horas. Esta idea se podría extender a lo largo de todo el día si se conociera un perfil aproximado de ocupación de las habitaciones del edificio.

Finalmente, cabe comentar que para la capa inferior de control, que será la que reciba la consigna calculada por el generador de consignas de la capa superior, se ha implementado un PI discreto con un tiempo de muestreo de $T_m = 2 \text{ min}$ y con función *antireset windup* con constante de tiempo de seguimiento $\tau_t = \tau_i/2$, siendo τ_i el tiempo integral del controlador PI en tiempo continuo. Para la sintonización del resto de parámetros del controlador PI se ha elegido el método IMC (*Internal Model Control*) según las guías de diseño dadas en (Rivera *et al.*, 1986) eligiendo un valor para el parámetro del filtro $\epsilon = 40$. Los parámetros obtenidos para verano son $k_p = -11.5750 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$ y $\tau_i = 41.67 \text{ min}$ (siendo k_p la ganancia proporcional del controlador PI en tiempo continuo) y para invierno $k_p = 14.6258 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$ y $\tau_i = 44.17 \text{ min}$.

4.3 Resultados obtenidos

Para comprobar el funcionamiento del esquema de control desarrollado, se han utilizado datos del 16 al 31 de Agosto de 2009 (verano) y del 16-30 de Noviembre de 2009 (invierno). Durante ambos periodos se han realizado simulaciones comparativas para distintos valores de λ . En las figuras 7 - 9 se muestran diferentes gráficas que ilustran los resultados obtenidos tanto para el periodo de invierno como para el periodo de verano. Las franjas grises representan los periodos en los que el edificio no está ocupado (de 21 a 7 horas).

En la figura 7(a) se muestra la evolución en simulación del índice PMV utilizando el controlador desarrollado con unos valores de $\lambda = (0, 0.1, 0.2)$ y en modo libre, es decir, sin la intervención de ningún sistema de control automático utilizando para ello los datos reales obtenidos mediante el sistema de adquisición durante el periodo de invierno. Se puede observar que el índice PMV se corrige con el sistema de control formado por el generador de consignas y el PI, manteniéndose dentro de la zona de confort para cualquier valor de λ y acercándose más al confort óptimo ($PMV = 0$) durante un periodo de tiempo mayor que cuando no se está utilizando el control. Evidentemente, las diferencias dependen de la actuación manual sobre el sistema de climatización que realizarón los usuarios en el momento de adquisición de los datos. También se puede



Figura 7. Evolución del índice PMV durante los períodos de invierno y verano para distintos valores de λ .



Figura 8. Resultados obtenidos en simulación de la señal de control durante los períodos de invierno y verano para distintos valores de λ .

(a) Evolución T^a habitación frente a T^a referencia (invierno) (b) Evolución T^a habitación frente a T^a referencia (verano)

Figura 9. Evolución de la temperatura de referencia frente a la alcanzada por el controlador durante los periodos de invierno y verano.

observar que la diferencia existente entre el PMV obtenido con los distintos valores de λ es pequeña.

La figura 8(a), representa la utilización del *fancoil* (cuya señal de control se calcula cada 2 minutos) para distintos valores de λ . En este ejemplo, las diferencias obtenidas entre los valores de $\lambda = 0$ y $\lambda = 0.2$ en cuanto a ahorro de energía (a partir de las especificaciones del fabricante) no son representativas. Como es lógico, el verdadero ahorro (44 % con $\lambda = 0.2$) se consigue debido a la desconexión del sistema de climatización en períodos de no ocupación. Para finalizar con el análisis del periodo de invierno, en las figuras 9(a) se muestra la evolución de la temperatura de referencia proporcionada por el generador de consignas frente a la evolución de la temperatura obtenida a través del sistema de climatización.

Respecto al periodo de verano, se puede ver en la figura 7(b) que el índice PMV obtenido con los datos reales (operación manual) se encuentra muy por encima de la zona de confort, pero con la utilización del sistema de control desarrollado este comportamiento se corrige haciendo que el índice PMV se sitúe dentro de la zona de confort. En la figura 8(b) se muestra la utilización del *fancoil* durante el periodo de verano. Si se comparan los resultados de la utilización del actuador para los períodos de invierno y verano, se puede observar que su uso es mucho mayor durante el este último, esto se debe a que Almería, provincia donde se encuentra situado el CDdI-CIESOL-ARFRISOL, se caracteriza por tener veranos cálidos, con temperaturas máximas medias en torno a 30°C y unos inviernos suaves, con temperaturas máximas medias de 18°C.

Para finalizar, en la figura 9(b) se muestra la evolución de la temperatura de referencia proporcionada por el generador de

consignas frente a la evolución de la temperatura obtenida a través del sistema de climatización, para el periodo de verano. Al igual que en el periodo de invierno, se puede observar que las diferencias existentes entre ambas temperaturas, cuando el sistema está funcionando, son pequeñas, lo cual indica un buen funcionamiento del controlador desarrollado.

Actualmente se están realizando ensayos reales en un laboratorio del CDdI-CIESOL-ARFRISOL utilizando el controlador desarrollado para el control del confort térmico y cuyos resultados en simulación se han mostrado anteriormente. En la figura 10 se muestran los resultados reales obtenidos durante el periodo de ocupación de dicho laboratorio en un día de verano. Se tiene que tener en cuenta que, al igual que en simulación, se ha supuesto constante la actividad física, el grado de vestimenta y la velocidad del aire en el interior del laboratorio, mientras que el resto de las variables se obtienen de forma directa a través de los sensores instalados en el mismo. Otra consideración importante es que en el momento de realización del ensayo, el laboratorio contaba con la presencia de sus usuarios habituales, los cuales se encontraban trabajando de manera normal, por lo que en el laboratorio había ordenadores encendidos y las personas estaban entrando y saliendo del mismo.

Con los grados de libertad disponibles actualmente en el sistema de climatización del CDdI-CIESOL-ARFRISOL el tipo de controlador implementado ha sido un todo/nada modulado a través de una señal PWM (*Pulse-Width Modulation*), en la cual la señal de control continua se calcula cada 2 minutos y se implementa el PWM internamente usando un periodo de muestreo de 1 segundo. Además, se ha incluido una zona neutra de 0.25°C.

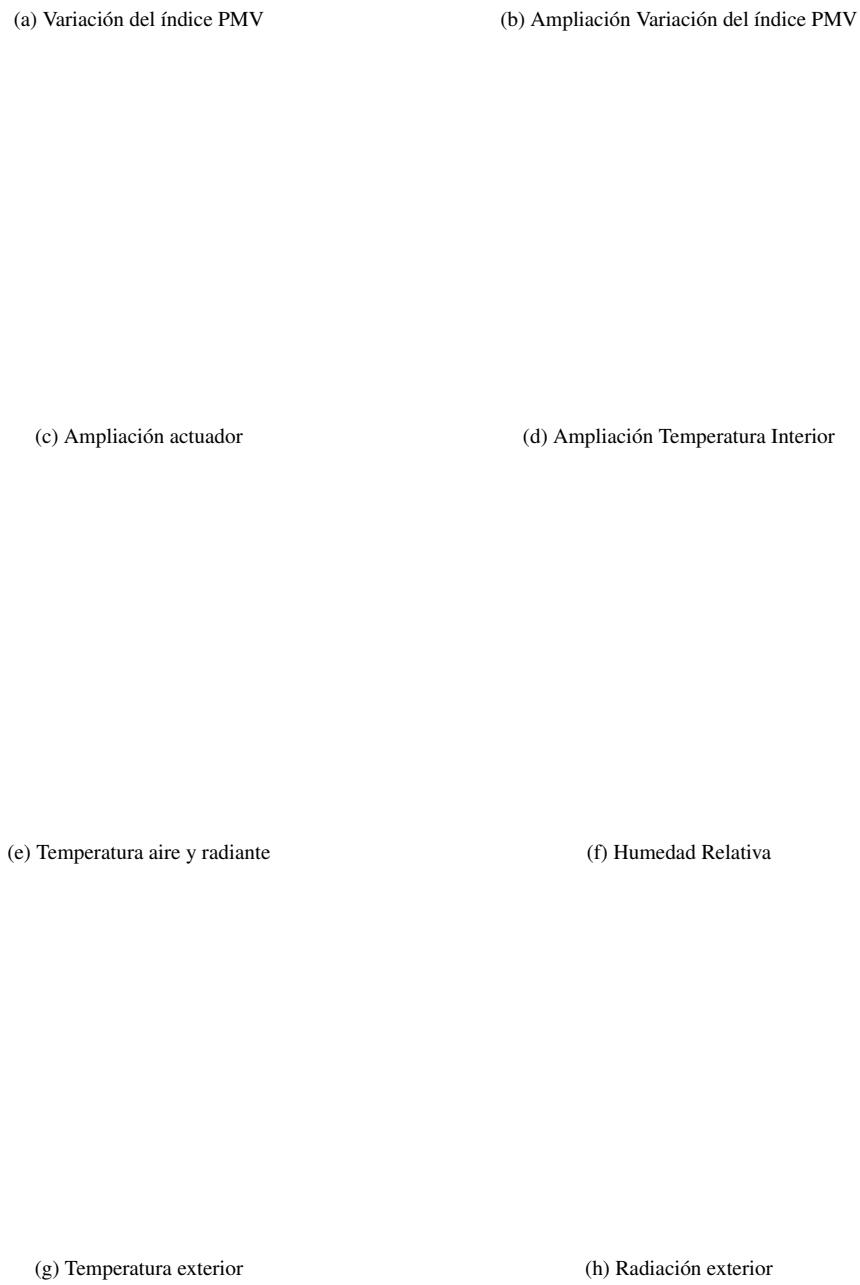


Figura 10. Resultados reales obtenidos en el laboratorio

Más concretamente, en la figura 10(a) (y la ampliación en la figura 10(b)) se muestra la evolución del PMV durante el periodo de estudio, se puede observar cómo al principio del mismo el valor de este índice se encontraba por encima de la zona de confort y que posteriormente, debido al uso del algoritmo de control se sitúa durante todo el periodo dentro de la zona de confort. Por otro lado, en la figura 10(c), se puede observar la utilización del actuador durante un periodo de 50 minutos. En la figura 10(e,f) se puede observar la evolución de las variables climáticas en el interior del laboratorio que influyen en el índice PMV: temperatura del aire (ampliada en la figura 10(d)), temperatura radiante y humedad. En dichas figuras se puede apreciar cómo al principio disminuye la temperatura de referencia para posteriormente ir aumentando a lo largo del día, esto se debe a que al estar el sistema de climatización funcionando se va enfriando el laboratorio, por lo tanto, la temperatura radiante disminuye y se puede permitir un aumento de la temperatura del aire, ahorrando energía y manteniendo la situación de confort térmico para los usuarios. En la figura 10(g,h) se observa la evolución de la temperatura y radiación exteriores.

5. CONCLUSIONES

La mayor parte del tiempo las personas realizan las distintas actividades de la vida cotidiana en un edificio, por lo que es importante que el ambiente de los recintos donde habitualmente se trabaja tenga condiciones óptimas para los usuarios. Para determinar esas condiciones de confort (térmico, visual y calidad del aire) con un consumo de energía eficiente, se pueden implementar sistemas de control automático. En este trabajo se han revisado las principales técnicas utilizadas y se ha incluido un ejemplo real de control de confort térmico del CDdI-CIESOL-ARFRISOL de la Universidad de Almería. Como se puede observar, se puede automatizar el control de confort a través del conocido índice PMV y los resultados preliminares obtenidos indican que se puede controlar el confort térmico a través del sistema de climatización. En el futuro se va a considerar la utilización de otros actuadores disponibles en el CDdI-CIESOL-ARFRISOL, como por ejemplo la apertura y el cierre automático de ventanas o los sistemas de sombreo, con un consumo energético menor, para mejorar la eficiencia energética en el interior del edificio, así como utilizar funciones de coste que explícitamente incorporen el gasto asociado a los actuadores. Otros elementos importantes a incorporar son los modelos de predicción de clima y de ocupación del edificio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el ámbito de los proyectos PSE-ARFRISOL PS-120000-2005-1 y DPI2007-66718-C04-04, financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores quieren agradecer la posibilidad del desarrollo de este trabajo a todas las empresas e instituciones incluidas en el proyecto PSE-ARFRISOL.

REFERENCIAS

- Ahmed, O., J. Mitchel y S. Klein (1996). Application of general regression neural networks (GRNN) in HVAC process identification and control. *ASHRAE Transactions* **102**, 1147.
- Akyildiz, I.F., W. Su y E. Cayirci Y. Sankarasubramaniam (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* **38**, 393–422.

- Ashrae (2005). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Refrigerating American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE55 (1992). Thermal environment conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Ventilating and Air Conditioning Engineers*.
- Atthajariyakul, S. y T. Leephakpreeda (2004). Real-time determination of optimal indoor-air condition for thermal comfort, air quality and efficient energy usage. *Energy and Buildings* **36**, 720–733.
- Atthajariyakul, S. y T. Leephakpreeda (2005). Neural computing thermal comfort index for hvac systems. *Energy Conversion and Management* **46**, 2553–2565.
- Awbi, H. (2003). *Ventilation of Buildings*. Spon Press.
- Berenguer, M.J. y F. Bernal (1994). Ntp 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad de aire interior. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España*.
- Bernard, T. y B. Kuntze (1999). Multi-objective optimization of building climate control systems using fuzzy-logic. In: *European Control Conference, Karlsruhe, Germany*.
- Bourgeois, D. (2005). Detailed occupancy prediction, occupancy-sensing control and advanced behavioural modelling within whole-building energy simulation. PhD thesis. Université Laval, Quebec, Canada.
- Braun, J.E. (2007). Intelligent building systems - past, present and future. In: *Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York, USA*.
- Calvino, F., M. La Gennusa, G. Rizzo y G. Scaccianoce (2004). The control of indoor thermal comfort conditions: introducing a fuzzy adaptive controller. *Energy and Buildings* **36**, 97–102.
- Camacho, E.F. y C. Bordons (2004). Control predictivo: Pasado, presente y futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **1**(3), 5–28.
- Castilla, M., J.D. Álvarez, M. Berenguel, M. Pérez, J.L. Guzmán, F. Rodríguez, J.A. Ferre y M. Pasamontes (2010a). Análisis de parámetros de confort térmico en el cddi ciesol del proyecto arfrisol. In: *I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL), Roquetas de Mar, Almería, España*.
- Castilla, M., J.D. Álvarez, M. Berenguel, M. Pérez, J.L. Guzmán y F. Rodríguez (2009). Análisis de confort térmico y consignas para control en el edificio bioclimático ciesol. In: *XXX Jornadas de Automática, Valladolid, España*.
- Castilla, M., J.D. Álvarez, M. Berenguel, M. Pérez, J.L. Guzmán y F. Rodríguez (2010b). Comfort optimization in a solar energy research center. In: *Proceedings of the IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency*.
- Conceicao, E., J. Farinho y M. Lúcio (2010). Human thermophysiological sensation control based in the adaptive comfort philosophy. In: *Proceedings of the IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency*.
- Congradac, V. y F. Kulic (2009). Hvac system optimization with CO_2 concentration control using genetic algorithms. *Energy and Buildings* **41**, 571–577.
- Cziker, A., M. Chindris y A. Miron (2007). Implementation of fuzzy logic in daylighting control. In: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems. London, UK*.
- de Dear, R. y G.S. Brager (2001). The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *International Journal of Biometeorology* **45**, 100–108.

- Donaisky, E., G.H. Oliveira, R.Z. Freire y N. Mendes (2007). Pmv-based predictive algorithms for controlling thermal comfort in building plants. In: *16th IEEE International Conference on Control Applications, Singapore*.
- Dounis, A.I., M.J. Santamouris, C.C. Lefas y A. Argiriou (1995). Design of a fuzzy set environment comfort system. *Energy and Buildings* **22**, 81–87.
- Dounis, A.I., M.J. Santamouris y C.C. Lefas (1993). Building visual comfort control with fuzzy reasoning. *Energy Conversion and Management* **1**, 17–28.
- Dounis, A.I. y C. Caraiscos (2007). Intelligent coordinator of fuzzy controller-agents for indoor environment control in building using 3-d fuzzy comfort set. In: *IEEE International Conference on fuzzy systems, London, England*.
- Dounis, A.I. y C. Caraiscos (2009). Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**, 1246–1261.
- Dumur, D., P. Boucher, K.M. Murphy y F. Déqué (1997). Comfort control in residential housing using predictive controllers. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications, Hartford, Connecticut, U.S.A.*
- Erickson, V.L., Y. Lin, A. Kamthe, R. Brahme, A. Surana, A.E. Cerpa, M. Sohn y S. Narayanan (2009). Energy efficient building environment. In: *Proceedings of the 1st ACM Workshop On Embedded Sensing Systems For Energy-Efficiency In Buildings. Berkeley, CA, USA*.
- Fanger, P.O. (1972). *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environment Engineering*. McGraw Hill.
- Fanger, P.O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine* **30**, 313–324.
- Fedderspiel, C.C. y H. Asada (1994). User-adaptable comfort control for hvac systems. *Transactions of the ASME* **116**, 474–486.
- Ferre, J.A., M. Pasamontes, M. Castilla, M. Berenguel, M.J. Jiménez, D. Bravo y M. Pérez (2010). Desarrollo de un sistema de monitorización y control para edificios bioclimáticos en el marco del proyecto arfrisol. In: *I Congreso sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (PSE-ARFRISOL), Roquetas de Mar, Almería, España*.
- Ferre, J.A., M. Pasamontes, M. Castilla, M.J. Jiménez y M. Pérez (2009). Diseño, implementación y explotación de un sistema de adquisición de datos en el edificio bioclimático ciesol en la Universidad de Almería. In: *XXX Jornadas de Automática, Valladolid, España*.
- Flórez, J. (1985). Temperature prediction models and their application to the control of heating systems. PhD thesis. Control Systems Centre, UMIST, UK.
- Flórez, J. y G.C. Barney (1987a). Adaptive control of central heating systems: Part 1: Optimim start time control. *Applied Mathematical Modelling* **11**, 89–95.
- Flórez, J. y G.C. Barney (1987b). Adaptive control of central heating systems: Part 2: Occupance time control. *Applied Mathematical Modelling* **11**, 96–103.
- Freire, R.Z., G.H.C. Oliveira y N. Mendes (2006). Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems. In: *IFAC Workshop on Energy Saving Control in Plants and Buildings, Bansko, Bulgaria*.
- Freire, R.Z., G.H.C. Oliveira y N. Mendes (2008). Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings* **40**, 1353–1365.
- Gouda, M.M., S. Danaher y C.P. Underwood (2001). Thermal comfort based fuzzy logic controller. *Building services engineering research and technology* **22**(4), 237–253.
- Gruber, P., M. Gwerder y J. Tödtli (2001). Predictive control for heating applications. In: *7th REHVA World Congress (Clima 2000/Napoli 2001). Napoli, Italy*.
- Guasch, J., R. Forster, F. Ramos, A. Hernández y N.A. Smith (2001). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Iluminación*. Organización Internacional del Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Guo, W. y M. Zhou (2009). Technologies toward thermal comfort-based and energy-efficient hvac systems: a review. *Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Antonio, TX, USA*. pp. 3883–3888.
- Gwerder, M., D. Gyalistras, F. Oldewurtel, B. Lehmann, K. Wirth, V. Stauch y J. Tödtli (2010). Potential assessment of rule-based control for integrated room automation. In: *10th REHVA World Congress, Sustainable Energy Use in Buildings-CLIMA 2010. Antalya, Turkey*.
- Gyalistras, D., M. Gwerder, F. Oldewurtel, C.N. Jones, M. Morari, B. Lehmann, K. Wirth y V. Stauch (2010). Analysis of energy savings potentials for integrated room automation. In: *10th REHVA World Congress, Sustainable Energy Use in Buildings-CLIMA 2010. Antalya, Turkey*.
- Henze, G.P. y R.E. Hindman (2002). Control of air-cooled chiller condenser fans using clustering neural networks. *ASHRAE Transactions* **108**, 4574.
- Hernández, A. (1994a). *NTP 343: Nuevos criterios para futuros estándares de ventilación de interiores*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España.
- Hernández, A. (1994b). *NTP 742: Ventilación general de edificios*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España.
- Hoof, J. (2008). Forty years of fanger's model of thermal comfort: comfort for all?. *Indoor Air* **18**, 182–201.
- Huang, Y. y L. Nianping (2006). Indoor thermal comfort control research based on adaptive fuzzy strategy. In: *IMACS Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications", Beijing, China*.
- IDAE (2007). *Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios. Technical Report*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España.
- Inkarojit, V. (2006). Developing predictive venetian blinds control models using visual comfort predictors. In: *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland*.
- ISO7730 (1994). *Moderate thermal environment.- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. International Organisation for Standardisation.
- Kalogirou, S.A. y M. Bojic (2000). Artificial neural networks for the prediction of the energy consumption of a passive solar building. *Energy* **25**, 479–491.
- Kang, D.H., P.H. Mo, D.H. Choi, S.Y. Song y M.S. Yeo (2010). Effect of mrt variation on the energy consumption in a pmv-controlled office. *Building and Environment* **45**, 1914–1922.
- Keyser, R. y C. Ionescu (2010). Modelling and simulation of a lighting control system. *Simulation Modelling Practice and Theory* **18**, 165–176.
- Kim, J.T. y G. Kim (2010). Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and Environment* **45**, 256–269.

- Koçlar, G., A. Köknel y N. Tamer (2004). Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Building and Environment* **39**, 281–287.
- Kolokotsa, D., A. Pouliezos, G. Stavrakakis y C. Lazos (2009). Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings. *Building and Environment* **44**, 1850–1863.
- Kolokotsa, D., D. Tsavos, G.S. Stavrakakis, K. Kalaitzakis y E. Antonidakis (2000). Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants thermal - visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and Buildings* **33**, 531–543.
- Kummer, M., P. André y J. Nicolas (1996). Development of simplified models for solar buildings optimal control. In: *EuroSun'96, Freiburg, Germany*.
- Lee, H., J.S. Choi y R. Elmasri (2008). A conflict resolution architecture for the comfort of occupants in intelligent office. In: *4th IET International Conference on Intelligent Environments, Seattle, USA*.
- Leephakpreeda, T., R. Thitipatanapong, T. Grittiyachot y V. Yungchareon (2001). Occupancy-based control of indoor air ventilation: A theoretical and experimental study. *Science Asia* **27**, 279–284.
- Liang, J. y R. Du (2005). Thermal comfort control based on neural network for hvac application. In: *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Canada*.
- Liang, J. y R. Du (2008). Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies. *Energy conversion and management* **49**, 517–528.
- Liu, W., Z. Lian y B. Zhao (2007). A neural network evaluation model for individual thermal comfort. *Energy and Buildings* **39**, 1115–1122.
- Ma, Y., F. Borrelli, B. Hencey, A. Packard y S. Bortoff (2009). Model predictive control of thermal energy storage in building cooling systems. In: *48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China*.
- Ma, Y., F. Borrelli, B. Hencey, B. Coffey, S. Bengea, A. Packard, M. Wetter y P. Haves (2010). Model predictive control for the operation of building cooling systems. In: *2010 American Control Conference - ACC2010, Baltimore, Maryland, USA*.
- Magnier, L. y F. Haghighat (2010). Multiobjective optimization of building design using trnsys simulations, genetic algorithm and artificial neural networks. *Building and Environment* **45**, 739–746.
- Markov, D. (2002). Practical evaluation of the thermal comfort parameters. Annual International Course: Ventilation and Indoor climate, Avangard, Sofia. pp. 158–170.
- Martín, L., F. Rodríguez, J.L. Guzmán y M. Berenguel (2007). Sistema automático de predicción climática. aplicación al control óptimo de crecimiento de cultivos bajo invernadero. In: *IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería, Albacete, España*.
- Menchinelli, P. y A. Bemporad (2008). Hybrid model predictive control of a solar air conditioning plant. *European Journal of Control* **6**, 501–515.
- Mendes, N., G.H.C. Oliveira y H.X. Araújo (2001). Building thermal performance analysis by using matlab/simulink. In: *7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil*.
- Morosan, P.D., R. Bourdais, D. Dumur y J. Buisson (2010). Building temperature regulation using a distributed model predictive control. *Energy and Buildings* **42**, doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.014.
- Mozer, M.C., L. Vidmar y R.H. Dodier (1997). The neurothermostat: Predictive optimal control of residential heating systems. In: *In M. C. Mozer, M. I. Jordan, and T. Petsche (Eds.), Advances in Neural Information Processing Systems 9. MIT Press, Cambridge, Massachusetts*.
- Nassif, N., S. Kajl y R. Sabourin (2003). Two-objective online optimization of supervisory control strategy. Vol. 1. Proceedings of the 8th building simulation conference, Eindhoven, Netherlands. pp. 927–943.
- Nicol, F. y M. Humphreys (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* **34**, 563–572.
- of Light and Lighting, Society (2002). *Code for Lighting*. Butterworth-Heinemann.
- Oldewurtel, F., A. Parisio, C.N. Jones, M. Morari, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann y K. Wirth (2010a). Energy efficient buildings climate control using stochastic model predictive control and weather predictions. In: *2010 American Control Conference (ACC2010), Baltimore, Maryland, USA*.
- Oldewurtel, F., C.N. Jones y M. Morari (2008). A tractable approximation of chance constrained stochastic MPC based on affine disturbance feedback. In: *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico*.
- Oldewurtel, F., D. Gyalistras, M. Gwerder, C.N. Jones, A. Parisio, V. Stauch, B. Lehmann y M. Morari (2010b). Increasing energy efficiency in buildings climate control using weather forecasts and model predictive control. In: *10th REHVA World Congress, Sustainable Energy Use in Buildings-CLIMA 2010, Antalya, Turkey*.
- Oliveira, G.H.C., L.S. Coelho, N. Mendes y H.X. Araújo (2003). Using fuzzy logic in heating control systems. In: *6th ASME-JSME thermal engineering joint conference, Hawaii, USA*. Vol. 1. pp. 1–6.
- Orosa, J.A. (2009). Research on general thermal comfort models. *European Journal of Scientific Research* **2**, 217–227.
- Page, J., D. Robinson, N. Morel y J.L. Scartezzini (2008). A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings* **40**, 83–98.
- Pasamontes, M., J.D. Álvarez, J.L. Guzmán y M. Berenguel (2009). Hybrid modeling of a solar cooling system. In: *IFAC International Conference on Analysis and Design of Hybrid System, ADHS09, Zaragoza, Spain*.
- Pasamontes, M., J.L. Guzmán, F. Rodríguez, M. Berenguel y E.F. Camacho (2007a). Modelo híbrido de una planta de frío solar. In: *Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico - CIATEA, Oviedo, España*.
- Pasamontes, M., M.J. Jiménez, J.L. Guzmán, R. Olmedo, M. Pérez, J.A. Ferrer, C. San Juan, S. Rosiek, F. Rodríguez, M. Berenguel, J. Batllés y R. Heras (2007b). Monitorización del edificio ciesol de la universidad de almería. In: *Congreso Internacional de Aislamiento Térmico y Acústico - CIATEA, Oviedo, España*.
- Pawlowski, A., J.L. Guzmán, F. Rodríguez, M. Berenguel y J. Sánchez (2010). Application of time-series methods to disturbance estimation in predictive control problems. In: *ISIE10 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, Italy*.
- Pérez-Lombard, L., J. Ortiz y C. Pout (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* **40**, 394–398.

- Rivera, D.E. (2007). Una metodología para la identificación integrada con el diseño de controladores imc-pid. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **4**(4), 5–18.
- Rivera, E. D., M. Morari y S. Skogestad (1986). Internal model control. 4. pid controller design. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development* **25**, 252–265.
- Rodríguez, M., C. De Prada, F. Capraro y S. Cristea (2008). Logic embedded nmpc of a solar air conditioning plant. *European Journal of Control* **6**, 484–500.
- Ruano, A.E., P.M. Ferreira y H. Mendes (2010). Moga design of temperature and relative humidity models for predictive thermal comfort. In: *IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency. Villamoura, Portugal*.
- Sherman, M. (1985). A simplified model of thermal comfort. *Energy and Buildings* **8**, 37–50.
- Siroky, J., S. Privara y L. Ferkl (2010). Model predictive control of building heating systems. Clima 2010 - 10th Rehva World Congress "Sustainable energy use in buildings", Antalya, Turquia.
- Sonntag, C., H. Ding y S. Engell (2008). Supervisory control of a solar air conditioning plant with hybrid dynamics. *European Journal of Control* **6**, 451–463.
- Stauch, V., M. Gwerder, D. Gyalistras y F. Schubiger (2008). Statistical adaptation of mesoscale numerical weather forecasts for designing predictive control of indoor building climates. In: *Proceedings of the 8th Annual Meeting of the EMS and 7th European Conference on Applied Climatology. Amsterdam, The Netherlands*.
- Steiner, P., V. Stauch, M. Gwerder, D. Gyalistras, B. Lehmann, M. Morari y F. Schubiger (2008). Numerical weather prediction at meteoswiss. In: *Proceedings of the 30th meeting of the European Working Group on Limited Area Modelling (EWGLAM) and 15th meeting of the Short Range Numerical Weather Prediction network (SRNWP). Madrid, Spain*.
- Torres, J.L. y M.L. Martín (2008). Modelo higrotérmico de una oficina para estudios de confort con climatización forzada. In: *XXI Congreso Argentino de Control Automático. Buenos Aires, Argentina*.
- Trobec, M., B. Zupancic y A. Krainer (2005). Fuzzy control for the illumination and temperature comfort in a test chamber. *Building and Environment* **40**, 1626–1637.
- Tse, W.L. y W.L. Chan (2007). Real-time measurement of thermal comfort by using an open networking technology. *Measurement* **40**, 654–664.
- Tse, W.L. y W.L. Chan (2008). A distributed sensor network for measurement of human thermal comfort feelings. *Sensors and Actuators A: Physical* **144**, 394–402.
- UNE-EN12464-1 (2003). *Iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: Lugares de trabajo en interiores*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- UNE-EN12464-2 (2008). *Iluminación. Iluminación de lugares de trabajo. Parte 2: Lugares de trabajo exteriores*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- Wan, J.W., K. Yang, W.J. Zhang y J.L. Zhang (2009). A new method of determination of indoor temperature and relative humidity with consideration of human thermal comfort. *Building and Environment* **44**, 411–417.
- Wang, D., C.C. Federspiel y F. Rubinstein (2005). Modeling occupancy in single person offices. *Energy and Buildings* **37**, 121–126.
- Wang, S., Z. Xu, H. Li y W. Shi (2004). Investigation on intelligent building standard communication protocols and application of IT technologies. *Automation in construction* **13**, 607–619.
- Yang, I.H., M.S. Yeo y K.W. Kim (2003). Application of artificial neural network to predict the optimal start time for heating system in building. *Energy Conversion and Management* **44**, 2791–2809.
- Yener, A.K. (1999). A method of obtaining visual comfort using fixed shading devices in rooms. *Building and Environment* **34**, 285–291.
- Yu, Z. y A. Dexter (2007). Hierarchical fuzzy rule-based control of renewable energy building systems. In: *CISBAT 2007 Renewables in a Changing Climate: Innovation in the Built Environment. Lausanne, Switzerland*.
- Zambrano, D., C. Bordons, E. Camacho y W. García-Gabin (2008). Model development and validation of a solar cooling plant. *International Journal of Refrigeration* **31**(2), 315–327.
- Zambrano, D., C. Bordons y W. García-Gabin and E. Camacho (2006a). Hybrid modeling of a solar air conditioning plant.
- Zambrano, D., C. Bordons y W. García-Gabin and E. Camacho (2006b). A solar cooling plant: a benchmark for hybrid systems control.
- Zambrano, D. y W. García-Gabin (2008). Hierarchical control of a hybrid solar air conditioning plant. *European Journal of Control* **6**, 464–483.