



Controlador Predictivo No Lineal para la Gestión Energética del Sistema Centralizado de Aire Acondicionado de un Inmueble Hotelero

Adriana Acosta^{a,*}, Ana I. González^a, Jesús M. Zamarreño^b, Víctor Álvarez^c

^a Departamento de Automática y Computación, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.

^b Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, EII, Universidad de Valladolid, C/ Dr. Mergelina s/n, 47011, Valladolid, España.

^c Hotel Meliá Habana, Ciudad Habana, Cuba

Resumen

En este trabajo se reflejan los resultados obtenidos durante la sintonía de un controlador predictivo basado en modelo no lineal, para la gestión energética del sistema centralizado de climatización de una instalación hotelera. Con el objetivo de lograr eficiencia económica, el diseño del controlador emplea un modelo de predicción del comportamiento del consumo energético de las habitaciones a partir de los registros históricos del hotel. La predicción de la carga térmica de las habitaciones se calcula utilizando el método de series de tiempo radiantes (RTS). La sintonía y simulación del controlador fue realizada con MATLAB®. Copyright © 2015 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Control predictivo basado en modelo, método RTS, carga térmica, consumo eléctrico, hotel

1. Introducción

Los objetivos del presente estudio están dirigidos a aumentar la eficiencia de la operación energética en una instalación hotelera, y a disminuir el impacto medioambiental asociado a ese funcionamiento sin afectar el bienestar en los servicios que se debe brindar a sus clientes.

La introducción de técnicas avanzadas de control representa un potencial real en la obtención de nuevas fuentes de eficiencia a partir del mejoramiento de la gestión de los recursos y herramientas ya existentes.

En los últimos 10 años se ha estado investigando en la aplicación de las técnicas de control predictivo a la gestión energética de los edificios climatizados (Hao H. and Lei C., 2013). La utilización de las técnicas de control predictivo basado en modelo (MPC) en la gestión energética de los edificios es un campo que se encuentra en pleno desarrollo (Salsbury T. *et al.*, 2010), (Castilla *et al.*, 2010).

En la aplicación de los controladores predictivos a la regulación eficiente de la energía en edificaciones, se han apreciado tres vertientes principales: los controladores que utilizan modelos basados en las ecuaciones de balance de masa y energía (Castilla *et al.*, 2012); los controladores que emplean modelos basados en la analogía de los circuitos térmicos con los circuitos eléctricos (Ma J. *et al.*, 2012), (Vega B. *et al.*, 2013) y

los controladores que utilizan modelos basados en la inteligencia artificial (Hao H. and Lei C., 2013), (Keblawi *et al.*, 2011).

Los resultados de este trabajo se corresponden al primer grupo mencionado. Como modelo de predicción energética se emplea el propuesto en el trabajo (Acosta *et al.*, 2011), basado en el método de series de tiempo radiantes (RTS, según sus siglas en idioma inglés) para determinar la carga térmica en las habitaciones de la instalación hotelera.

La mayoría de los autores coinciden en que las técnicas de control predictivo, empleadas como técnicas avanzadas de control en la gestión de los sistemas de climatización, son técnicas adecuadas en el nivel de supervisión y son capaces de coordinar las diferentes acciones de los controladores de los múltiples subsistemas de climatización (Marik *et al.*, 2011). Por ejemplo, en (Ma J. *et al.*, 2012) se propone una función objetivo del controlador MPC con significación económica para reducir el costo diario de la energía eléctrica consumida por el sistema de aire acondicionado. Mientras en (Borrel Ma, *et al.*, 2010) se diseña un controlador MPC para la operación de sistemas de aire acondicionado en edificios con almacenaje térmico. En (Keblawi *et al.*, 2011) se desarrolla un controlador predictivo supervisorio para minimizar el gasto energético del sistema de climatización, garantizando confort térmico y calidad del aire interior empleando un algoritmo genético. (Álvarez *et al.*, 2013) utilizan el control predictivo para obtener el mayor confort térmico optimizando el uso del sistema de climatización. Durante la optimización emplean el método de Lagrange. En (Colmenar-Santos *et al.*,

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: adriana.virginia@electronica.cujae.edu.cu (Adriana Acosta), anita@electronica.cujae.edu.cu (Ana I. González), jesusm@autom.uva.es (Jesús M. Zamarreño)

2013) se simula un control predictivo basado en modelo para la gestión energética de un edificio, que no depende de una computadora principal sino que aprovecha las facilidades de operación del sistema a través de un bus inteligente, realizando una mejor gestión del edificio y de su masa térmica. No obstante los autores (Gongsheng H. and Tin-Tai Chow, 2011) utilizan un controlador MPC robusto para sustituir al controlador PID convencional en la regulación del sistema centralizado de aire acondicionado a flujo constante.

Es conocido que alrededor del 60% de la energía eléctrica consumida en la gestión de un edificio se encuentra dedicada a la operación del sistema de ventilación y aire acondicionado del inmueble (ASHRAE, 2009). Esta cifra se ratifica también para los hoteles, los cuales se caracterizan por su uso permanente durante todo el día y a lo largo del año, a diferencia de otros inmuebles dedicados a oficinas, centros comerciales, teatros y hospitales. En los hoteles predomina el movimiento de los ocupantes desde la habitación hacia las áreas exteriores, la presencia de cristales, la diversidad entre habitaciones, así como el amplio uso del sistema de aire acondicionado. Estos factores inciden decisivamente en los altos niveles de carga térmica. Por estas razones, para las actividades de alojamiento en el turismo, constituye un verdadero reto lograr la eficiencia energética sin afectar la calidad de los servicios que se brindan (ASHRAE, 2007).

La posibilidad de aplicar un controlador predictivo no lineal, basado en el método RTS, a la operación del sistema de aire acondicionado en un edificio dedicado al alojamiento turístico, sin afectar el confort térmico de los clientes, es bastante novedosa.

En este trabajo se diseña un controlador predictivo a nivel supervisorio como estrategia de regulación del consumo eléctrico del sistema centralizado de clima para las habitaciones de un hotel, de forma tal que no sea afectado el confort térmico de los ocupantes y por consiguiente su satisfacción. Para ello fueron utilizados los registros históricos del hotel de los años 2011 y 2012.

Toda la sintonía del controlador predictivo fue lograda en el ambiente de programación MATLAB® (MathWorks, 2011).

El artículo consta de seis secciones. En la introducción se realiza un breve estado del arte sobre el tema estudiado. En la segunda sección se describe el sistema para el cual se diseña el controlador predictivo. En la tercera sección se refleja la metodología empleada en la síntesis del controlador. En la cuarta sección se sintoniza el controlador predictivo. En la quinta sección se comentan los resultados alcanzados y por último se expresan las conclusiones.

2. Descripción del sistema

Para la realización de este trabajo fue utilizado el hotel “Meliá Habana” que ha sido objeto de estudio de trabajos anteriores (Acosta et al., 2008, 2011). La instalación hotelera se encuentra ubicada en el litoral noroeste de la Habana. Tiene características de hotel de ciudad y de playa, lo que incide en el comportamiento de su carga térmica dinámica. Posee cierto nivel de automatización y adecuada gestión de los registros históricos de operación.

El edificio tiene dos bloques habitacionales con un total de 413 habitaciones. El primer bloque cuenta con 9 pisos y 297 habitaciones. El segundo bloque cuenta con 4 pisos y 116 habitaciones. Las habitaciones se subdividen en tres tipos (A, B, C) atendiendo al área que ocupan, su disposición en el edificio y

la distribución de las secciones interiores. Es un hotel de cinco estrellas y para un mejor servicio a sus clientes cuenta con varias habitaciones dobles.

En la Figura 1 se puede apreciar el comportamiento de la relación entre el consumo eléctrico, medido en (kWh) y la cantidad de habitaciones ocupadas en el hotel Meliá Habana, durante todos los meses de los años 2007, 2008, 2009 y 2011. El índice de consumo es mayor en los meses de verano que en los meses de invierno. Uno de los objetivos del presente trabajo es disminuir estos valores sin afectar el bienestar de los clientes del inmueble, y de este modo conseguir ahorro energético por este concepto.

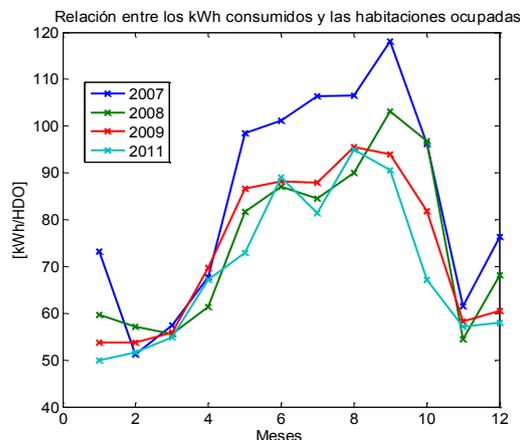


Figura 1: Comportamiento de la relación entre el consumo eléctrico (kWh) y la cantidad de habitaciones ocupadas (HDO) para cada mes durante los años 2007, 2008, 2009, 2011 en el hotel “Meliá Habana”.

El sistema de climatización del hotel es mixto pues combina el sistema individual de aire acondicionado con el sistema centralizado. El clima es el responsable del 60% del consumo eléctrico de este hotel, y por ello será objeto importante de atención.

El esquema general del equipamiento del sistema centralizado de aire acondicionado se representa en la Figura 2. Está conformado por un circuito primario y otro secundario.

El circuito primario está constituido por 4 máquinas enfriadoras del agua, de condensación por aire; con una capacidad de 208 ton de refrigeración o 730 kW de carga frigorífica cada una, para un total de 2.92 MW. Este circuito se complementa además con el empleo de bombas que impulsan el agua hacia los lugares de consumo, a través de sistemas de tuberías y de manejadoras, climatizadoras y unidades de ventiladores y serpentines (conocidos como “fan coils”).

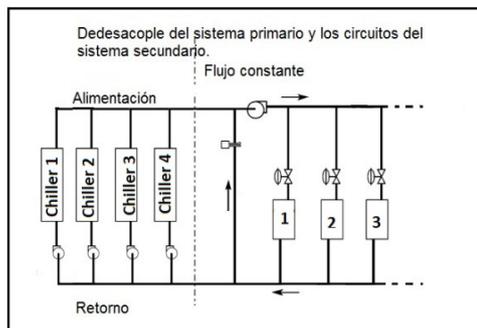


Figura 2: Esquema del sistema centralizado de aire acondicionado.

Por estrategia de diseño, el volumen de agua fría que se distribuye en el circuito primario no satisface el volumen de consumo de todo el circuito secundario. Es por ello que es necesario mezclar el agua de las enfriadoras con una porción del agua que retorna de los destinos de consumo. La relación entre ambos volúmenes se establece a través de un factor de caudal.

El circuito secundario de alimentación de agua fría se encuentra subdividido en 7 circuitos a su vez, para una mejor gestión del sistema en general. Las habitaciones son alimentadas por tres de estos circuitos: uno para los pisos del primero al quinto del bloque A, uno para los pisos del sexto al noveno de ese mismo bloque y uno para los cuatro pisos del bloque B. El resto de los circuitos están destinados a otras áreas de la instalación. El caudal de agua de los circuitos destinados a las habitaciones es el 50% del caudal total del sistema secundario.

El gasto energético del hotel, por concepto de climatización, se utiliza en enfriar el agua, transportarla, transformarla en aire frío e impulsar este aire a su destino. Los gastos por concepto de climatización se dividen en tres categorías: gastos fijos, gastos de salones de eventos y gastos de habitaciones.

Los gastos fijos no dependen de la ocupación del hotel y están asociados con el funcionamiento básico de la instalación, independientemente de la afluencia de turistas. Comprende las áreas de uso general como son el recibidor, el centro de negocios, los restaurantes, las oficinas, los almacenes, la planta real, la cocina central, los locales tecnológicos y otros.

Los gastos de salones de eventos dependen del uso que se le dé a los mismos y de la programación del hotel. Los gastos de las habitaciones están estrechamente relacionados con la cantidad de turistas hospedados. Para este estudio en particular será analizada la climatización de las habitaciones, partiendo del criterio de que el alojamiento del hotel debe constituir la principal fuente de ingresos del mismo.

La mayor fuente de ganancia térmica en las habitaciones desde el punto de vista constructivo está relacionada con una amplia puerta de cristal que separa la habitación del balcón. Por otra parte en el interior de cada habitación se encuentra un mobiliario abundante, varios equipos electrodomésticos, así como abundante iluminación, que también transfieren calor al local, al igual que los ocupantes. Todos estos aspectos, incluido la época del año fueron considerados en el modelo de predicción de este sistema (Acosta et al., 2011).

3. Metodología empleada

El procedimiento utilizado para diseñar y aplicar el controlador no lineal en la reducción del consumo energético consta de los siguientes pasos:

1. Determinación de la carga térmica de las habitaciones del inmueble hotelero empleando un predictor de carga basado en el método de series radiantes descrito en (ASHRAE, 2009) y ya publicado en (Acosta et al., 2011).
2. Modelación del consumo eléctrico de las unidades enfriadoras en dependencia de la carga térmica estimada.
3. Diseño del controlador predictivo basado en el modelo no lineal, capaz de generar las acciones de control óptimo.
4. Cálculo de los resultados económicos obtenidos a partir de la aplicación del controlador predictivo.

3.1. Modelo del controlador predictivo.

El modelo que es utilizado para desarrollar el controlador se compone de dos elementos fundamentales: el predictor de carga térmica y el modelo de las unidades enfriadoras.

3.1.1. Predictor de carga térmica basado en el método RTS.

En la Figura 3 se ilustra un esquema del modelo del predictor de carga desarrollado. Cada hora, como variables de entrada, se deben medir los valores de la temperatura exterior, de la temperatura en el interior de la habitación, de la temperatura del agua fría, de la temperatura del agua de retorno total y se actualiza el vector de habitaciones ocupadas del hotel. Se asume que los valores de temperatura son los mismos para cada habitación (temperatura exterior, temperatura interior, temperatura del agua fría y la temperatura del agua de retorno total). Además, al modelo se le introducen el mes y la hora que se corresponde con la mayor radiación del sol. Con todos estos datos se calcula la carga térmica de cada habitación $Q_{s,\theta}$, determinando las diferentes ganancias de calor procedentes de las fuentes internas y externas. Luego se totaliza el resultado de la carga térmica para el hotel, $Q_{sal,\theta}$ (Acosta et al., 2011).

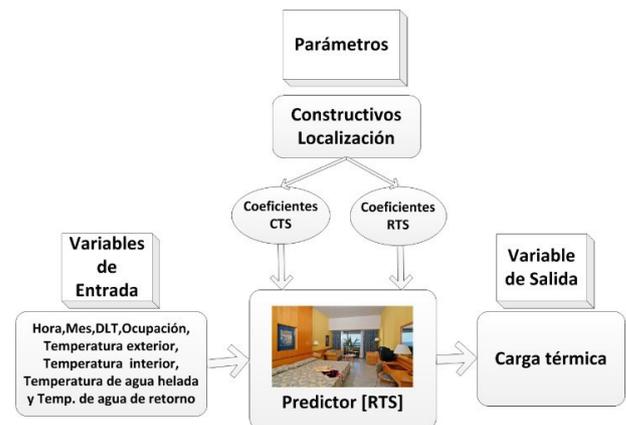


Figura 3: Esquema del modelo de predicción de carga térmica de las habitaciones del hotel.

$$Q_{sal,\theta} = \sum_{s=1}^{HDO} Q_{s,\theta} \quad (1)$$

$s = 1, \dots, HDO$

En la tabla I se describen todas las variables y parámetros que se emplean en el artículo.

3.1.1.1. Método RTS.

El método de series de tiempo radiante es un método riguroso, que no requiere cálculos iterativos y que es capaz de cuantificar la contribución de cada uno de los componentes a la carga térmica total. Es un método derivado directamente del método de balance de calor ASHRAE (2009), destinado a cálculos de la máxima carga térmica instantánea de operación. En este trabajo, por sus facilidades, el método es utilizado para predicciones horarias del consumo energético.

El método RTS considera los retardos de tiempo por conducción y por radiación multiplicando la ganancia de calor horaria por 24 coeficientes de una serie de tiempo. Estos coeficientes son conocidos como factores de tiempo radiante y de conducción (RTF y CTF).

Las principales ecuaciones utilizadas en el cálculo de la carga térmica a través del método RTS se describen a continuación.

3.1.1.2. *Temperatura sol-aire.*

La temperatura sol-aire (t_e) es la temperatura del aire exterior equivalente a la combinación de todas las fuentes de energía por radiación y convección existente en el exterior de la zona. Esta temperatura se calcula a partir de la expresión del balance de calor de una superficie iluminada por el sol, (2).

$$t_e = t_o + \frac{a_r E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (2)$$

3.1.1.3. *Cálculo de la ganancia de calor por conducción utilizando los factores de tiempo por conducción.*

En el método RTS, la conducción del calor a través de las superficies exteriores se determina utilizando la serie de coeficientes de conducción, como se expresa en (3) y (4).

$$q_{i,\theta-n} = UA(t_{e,\theta-n} - t_{rc}) \quad (3)$$

$$q_\theta = c_0 q_{i,\theta} + c_1 q_{i,\theta-1} + c_2 q_{i,\theta-2} + \dots + c_{23} q_{i,\theta-23} \quad (4)$$

3.1.1.4. *Carga de calor por radiación.*

El método de serie de tiempo radiante convierte la porción radiante de la ganancia de calor en carga, utilizando los factores de tiempo radiantes, es decir, los coeficientes RTF.

$$Q_{r,\theta} = r_0 q_{r,\theta} + r_1 q_{r,\theta-1} + r_2 q_{r,\theta-2} + \dots + r_{23} q_{r,\theta-23} \quad (5)$$

3.1.1.5. *Resolución del predictor.*

Para la implementación del método RTS a la aplicación real fue utilizado el ambiente de programación MatLab® (MathWorks, 2011). En el trabajo, los coeficientes y factores de tiempo fueron generados con la ayuda de un programa desarrollado por (Seng I., 1999), conocido como “PRF/RTF Generator”.

3.1.2 *Modelo del consumo eléctrico de las unidades enfriadoras.*

En la modelación de las enfriadoras se emplea el modelo físico completo propuesto por Gordon y Ng en el año 1994, (ASHRAE, 2001). El modelo predice la dependencia del coeficiente de eficiencia, conocido como COP, de la temperatura del agua de salida del evaporador, de la temperatura del aire de entrada al condensador y de la capacidad frigorífica de la enfriadora, (6), (7).

Tabla I: Variables y parámetros empleados en el trabajo

Nomenclatura	
A	Área de la superficie, [m ²]
A ₀ , A ₁ , A ₂	Coefficientes de las características de la enfriadora
Ahorro	Ahorro potencial del consumo eléctrico de las unidades enfriadoras obtenido a través de la simulación, [kW]
c ₀ , c ₁ , ... c ₂₃	Factores de la serie de tiempo por conducción
C _k	Precio del kWh según la tarifa vigente en los años 2011 y 2012, [USD]
COP	Coefficiente de eficiencia del compresor
DLT	Hora del día cuando el sol se encuentra en el ángulo vertical para la localidad, [h]. (DayLight Time)
E _t	Radiación solar total que incide sobre la superficie, [W/ m ² .K]
HDO	Habitaciones Ocupadas en el hotel para ese Día
h _o	Coefficiente de transferencia de calor por radiaciones de larga longitud de ondas y por convección de la superficie exterior, [W/ m ² .K]
mes	Mes correspondiente a la fecha de las mediciones
N _c	Valor del horizonte de control
N _{p1}	Valor inicial del horizonte de predicción
N _{p2}	Valor final del horizonte de predicción
P	Potencia eléctrica de las unidades enfriadoras, [W]
q _{r,θ-n}	Ganancia de calor por radiación para n horas atrás, [W]
Q _{evap}	Capacidad térmica de los evaporadores de las unidades enfriadoras, [W]
q _{i,θ}	Entrada de calor por conducción para la superficie para la hora actual, [W]
q _{i,θ-n}	Entrada de calor por conducción para la superficie, n horas atrás, [W]
Q _{r,θ}	Carga por radiación para la hora actual, [W]
q _{r,θ}	Ganancia de calor por radiación para la hora actual, [W]
Q _s	Carga térmica de cada habitación ocupada del hotel, [W]
Q _{s,θ}	Carga térmica de la habitación ocupada s, para la hora actual, [W]
Q _{sal}	Carga térmica total de todas las habitaciones ocupadas del hotel, [W]
Q _{sal,θ}	Carga térmica total de todas las habitaciones ocupadas del hotel para la hora actual, [W]
q _θ	Ganancia de calor por conducción de la superficie para cada hora, [W]
r ₀ , r ₁ , ... r ₂₃	Factores de la serie de tiempo radiante
T _{afria}	Temperatura del agua fría que sale de las unidades enfriadoras, [°C]
t _{e, θ-n}	Temperatura sol aire, n horas atrás, [°C]
T _{cond} ^{rent}	Temperatura del aire a la entrada del condensador, [°C]
Tiempo	Tiempo de obtención de la secuencia de acciones de control óptimos, [s]
t _o , T _{amb}	Temperatura ambiente del aire en el exterior del edificio, [°C]
t _{rc} , T _{int}	Temperatura del aire en el interior de las habitaciones climatizadas, [°C]
T _{ret}	Temperatura del agua fría total que retorna a las unidades enfriadoras, [°C]
T _{ret-s}	Temperatura del agua fría que retorna a las unidades enfriadoras desde cada habitación, [°C]
T _{evap} ^{sal}	Temperatura del agua a la salida del evaporador, [°C]
U	Coefficiente de transferencia de calor para la superficie, [W/m ² .K]
α	Peso del error del vector de las salidas en la función objetivo
a _r	Coefficiente de absorción de la radiación solar por la superficie
β	Peso del incremento de las acciones de control en la función objetivo
ΔR	Diferencia entre las radiaciones de larga longitud de ondas que inciden en la superficie desde el cielo y sus alrededores y las emitidas por un cuerpo negro a la temperatura del aire exterior, [W/ m ²]
Δt	Tiempo de muestreo, [h]
ε	Emisividad hemisférica de la superficie

Los coeficientes A_0 , A_1 , y A_2 se calculan a partir de los datos de operación proporcionados por los fabricantes de las enfriadoras.

$$\left(\frac{1}{COP} + 1 - \frac{T_{cond}^{ent}}{T_{evap}^{sal}} \right) Q_{evap} = -A_0 + A_1 T_{cond}^{ent} - A_2 \frac{T_{cond}^{ent}}{T_{evap}^{sal}} \quad (6)$$

$$COP = \frac{Q_{evap}}{P} \quad (7)$$

Durante las simulaciones de consumo energético se igualan la carga térmica que es necesario retirar, como resultado de la climatización de las habitaciones ocupadas del hotel Q_{sal} y la capacidad térmica de los evaporadores de las unidades enfriadoras Q_{evap} , para estimar el consumo eléctrico de estas últimas, P .

$$Q_{evap} = Q_{sal} \quad (8)$$

3.1.3 Modelo no lineal.

El modelo de predicción del controlador puede ser descrito según la formulación general de modelos no lineales en el espacio de estado discretos, (9), (10).

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, d_k, w_k) \quad (9)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) + e_k \quad (10)$$

donde $x_k \in R^n$ es el vector de n estados, $u_k \in R^{m_u}$ es el vector de m_u variables manipuladas, $d_k \in R^{m_d}$ es el vector de m_d perturbaciones medibles, $w_k \in R^{m_w}$ es el vector de m_w perturbaciones no medibles, $y_k \in R^{m_y}$ es el vector de m_y salidas, e_k es el vector de errores de medida de igual dimensión que el vector de salidas, f y g son funciones no lineales, (Maciejowski J.,2000), (Allgöwer F. et al.,2002).

$$x_k = [Q_s, T_{ret-s}, t_e] \quad (11)$$

$$u_k = [T_{int}, T_{afria}] \quad (12)$$

$$d_k = [T_{amb}, T_{ret}, HDO, mes, DLT] \quad (13)$$

$$y_k = P \quad (14)$$

El vector de estados está conformado por las variables: carga térmica de cada habitación (Q_s), temperatura del agua de retorno para cada habitación (T_{ret-s}) y la temperatura sol-aire (t_e). El vector de variables manipuladas está compuesto por la temperatura en el interior de las habitaciones (T_{int}), y la temperatura del agua fría (T_{afria}). El vector de perturbaciones medidas está formado por la temperatura ambiente del aire en el

exterior del edificio (T_{amb}), la cantidad de habitaciones ocupadas (HDO), la temperatura del agua de retorno total (T_{ret}) y el mes al que corresponde las mediciones. La salida es la potencia eléctrica consumida por las enfriadoras en correspondencia con la carga térmica de las habitaciones ocupadas del hotel (P). El vector de perturbaciones no medibles está representado por la nubosidad y las precipitaciones, pero en este trabajo no fueron considerados.

3.2 Diseño del controlador predictivo basado en el modelo no lineal.

El objetivo del controlador es solucionar un problema de optimización cada hora, obteniendo los valores de los esfuerzos de control futuros óptimos $u^* = (T_{int}^*, T_{afria}^*)$, que permitan satisfacer las condiciones de confort térmico en el interior de las habitaciones, minimizando la potencia eléctrica consumida por las enfriadoras. T_{int}^* y T_{afria}^* son las variables de referencias de los controladores convencionales que actúan sobre las unidades serpentín ventilador y las unidades enfriadoras.

La función objetivo se representa en (15).

$$J = \sum_{i=N_{p1}}^{N_{p2}} \alpha (C_{k+i} \hat{P}_{k+i|k}) + \sum_{i=0}^{N_c-1} \left[\sum_{j=1}^{m_u} \beta_j (\Delta \hat{u}_{k+i|k,j})^2 + (\hat{u}_{k+i|k,j} - u_{ref,j})^2 \right] \quad (15)$$

sujeto a las restricciones (16), (17) y (18):

$$\Delta u_{i,j}^{\min} \leq \Delta \hat{u}_{k+i|k,j} \leq \Delta u_{i,j}^{\max}, \quad i = 0, \dots, N_c - 1 \\ j = 1, \dots, m_u \quad (16)$$

$$u_{i,j}^{\min} \leq \hat{u}_{k+i|k,j} \leq u_{i,j}^{\max} \quad (17)$$

$$P_i^{\min} \leq \hat{P}_{k+i|k} \leq P_i^{\max}, \quad i = N_{p1}, \dots, N_{p2} \quad (18)$$

En (15) el índice $(k+i|k)$ denota el valor predicho para el tiempo $k+i$, basado en la información disponible en el tiempo k . α y β_j son los pesos de la salida y de los incrementos de las acciones de control. $\hat{P}_{k+i|k}$ es la predicción del valor de la potencia eléctrica de las enfriadoras correspondiente al tiempo $k+i$ y C_{k+i} es el precio del kWh según la tarifa vigente para la hora $k+i$. $\Delta \hat{u}$ es la predicción del incremento de las acciones de control y $u_{ref,j}$ son los valores estimados por el personal especializado del hotel en base a su experiencia, de tal forma que el índice penaliza valores alejados de estos (requisito impuesto por el hotel).

Los valores de los parámetros de la mejor sintonía del controlador diseñado se muestran en la Tabla II.

El vector de precios aplicado en el año 2011 fue el siguiente, en función de la hora del día:

$$C_{1..24} = \{0.143 \ 0.143 \ 0.143 \ 0.143 \ 0.143 \ 0.143 \ 0.143 \ 0.177 \ 0.177 \\ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.177 \ 0.279 \\ 0.279 \ 0.279 \ 0.279 \ 0.143 \ 0.143 \ 0.143\}$$

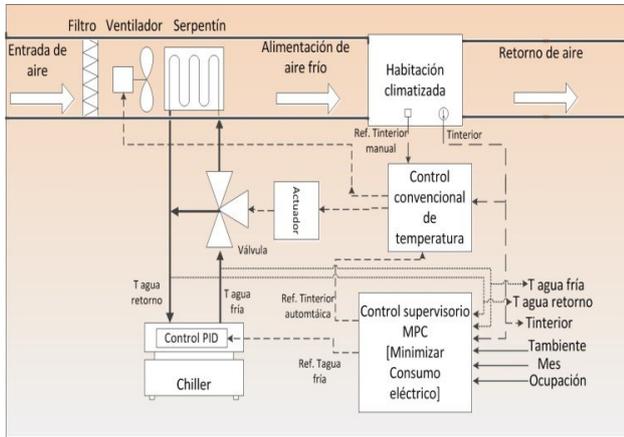


Figura 4: Esquema general del controlador predictivo.

Tabla II: Parámetros del controlador predictivo diseñado

Parámetro	Valor	Descripción
N_{p1}	1	Valor inicial del horizonte de predicción
N_{p2}	3	Valor final del horizonte de predicción
N_c	2	Valor del horizonte de control
m_y	1	Cantidad de señales de salida
m_u	2	Cantidad de señales de entrada
m_d	4	Cantidad de señales de perturbación medible
u_1^{min}	21 (°C)	Valor mínimo de la referencia de la temperatura interior
u_2^{min}	7 (°C)	Valor mínimo de la referencia de la temperatura del agua fría
u_1^{max}	26.5 (°C)	Valor máximo de la referencia de la temperatura interior
u_2^{max}	12.5 (°C)	Valor máximo de la referencia de la temperatura del agua fría
p^{min}	0 (W)	Valor mínimo de la potencia eléctrica de las enfriadoras del hotel
p^{max}	10^6 (W)	Valor máximo de la potencia eléctrica de las enfriadoras del hotel
Δu_1^{min}	-0.5 (°C)	Valor mínimo del incremento de la temperatura interior
Δu_2^{min}	-0.5 (°C)	Valor mínimo del incremento de la temperatura de agua fría
Δu_1^{max}	0.5 (°C)	Valor máximo del incremento de la temperatura interior
Δu_2^{max}	0.5 (°C)	Valor máximo del incremento de la temperatura de agua fría
$u_{ref,1}$	25.5(°C)	Valor de referencia de la temperatura interior
$u_{ref,2}$	7.25(°C)	Valor de referencia de la temperatura de agua fría
β_1	0.07	Peso del incremento de la temperatura interior
β_2	0.07	Peso del incremento de la temperatura de agua fría
α	0.99	Peso del gasto eléctrico de las enfriadoras del hotel
Δt	1 (h)	Periodo de muestreo del controlador

En la Figura 4 se muestra el esquema general del controlador predictivo diseñado para el sistema centralizado de clima de las habitaciones del hotel.

3.2.1 Resolución del controlador predictivo.

Para la resolución del problema de optimización no lineal se empleó la función “*lsqnonlin*” de la herramienta “Optimtool” desarrollada en el ambiente de programación Matlab®. Esta función implementa dos algoritmos de optimización: “Levenberg-Marquardt” y “la región de confianza”. El primero de ellos, más clásico y antiguo, no convergió para nuestra aplicación, por lo que usamos el segundo algoritmo. El procesador utilizado fue un Pentium(R) Dual Core a una velocidad de 2.60 GHz. En la Figura 5 se representa el diagrama de flujo del controlador para cada iteración.

3.2.2 Criterios de comparación del desempeño del controlador.

En la evaluación del desempeño del controlador se utilizaron los criterios de ahorro potencial (*Ahorro*) y de tiempo de optimización (*Tiempo*).

El ahorro potencial es la cantidad de kWh consumidos que pueden economizarse respecto al consumo eléctrico real registrado por el hotel, si los resultados alcanzados en la simulación fueran aplicados ciertamente.

El tiempo de optimización es la duración del proceso de obtención de la secuencia de acciones de control óptimas. Este criterio es de vital importancia para la aplicación, debido a todas las tareas en tiempo real que se deben cumplir para la correcta operación del controlador.

El mejor desempeño será alcanzado por el controlador con mayor ahorro y menor tiempo. La línea de base de comparación fueron los registros históricos de consumo del inmueble hotelero del día 2 de noviembre del 2011.

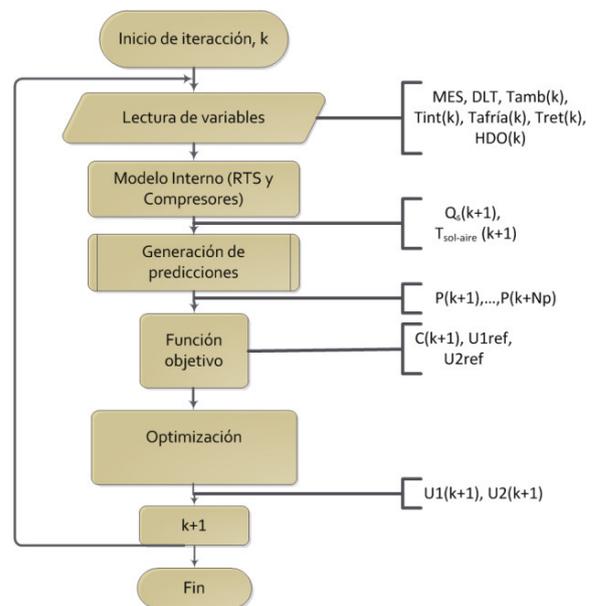


Figura 5: Diagrama de flujo del controlador diseñado.

3.2.3 Restricciones

Las restricciones del controlador están muy relacionadas con los límites de operación de las variables que intervienen en el

mismo. En el caso de la temperatura interior se encuentra limitada por los valores que proporcionan confort térmico a los ocupantes. Estos valores están estrechamente vinculados a las condiciones climatológicas y a la percepción sensorial del cliente de la habitación.

Para la temperatura de agua fría, los límites de operación se restringen por el funcionamiento de las climatizadoras. Los valores utilizados en la implementación del controlador se encuentran en la Tabla II.

4. Sintonización del controlador predictivo.

Para lograr un mejor desempeño del controlador predictivo fue necesario seleccionar adecuadamente los valores de los parámetros de sintonía del mismo. Los parámetros que se consideraron fueron: N_{p2} , α y β .

4.1 Horizonte de predicción.

Durante la selección del horizonte de predicción, este parámetro fue fijado a los valores de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

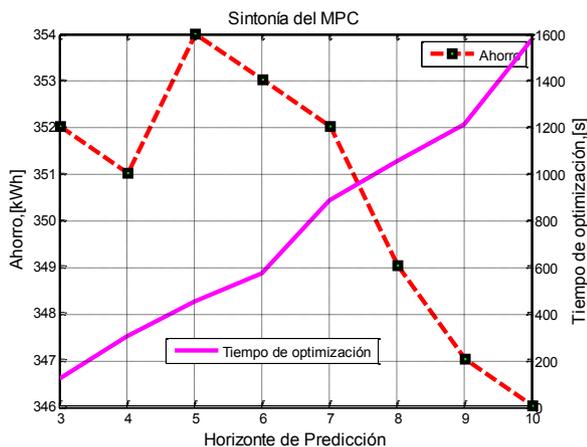


Figura 6: Variación del ahorro potencial y del tiempo de optimización en dependencia del valor final del horizonte de predicción, N_{p2} .

En la Figura 6 se muestra el comportamiento del ahorro potencial y del tiempo empleado en la optimización en dependencia de los diferentes valores del horizonte de predicción. El valor seleccionado final del horizonte de predicción para las simulaciones es de $N_{p2}=3$; debido a que el valor de ahorro no se diferencia mucho del correspondiente a $N_{p2}=5$ y a que posee menor tiempo de optimización. Los parámetros de α y β se mantuvieron en 0,99 y 0,07 respectivamente.

4.2 Pesos de la función objetivo.

Los pesos α y β que son empleados en la función objetivo del controlador inciden en el cálculo de las variables manipuladas por el controlador. En la Figura 7 se representa la variación del peso α y su relación con los valores de ahorro y de tiempo de optimización. Este parámetro fue modificado con los siguientes valores durante la selección: 0.9, 0.975, 0.99 y 1.05.

El valor seleccionado final del peso α , fue de 0.99 para el cual se obtiene el mayor ahorro. Los valores de N_{p2} y β se mantuvieron en 3 y 0.07 mutuamente.

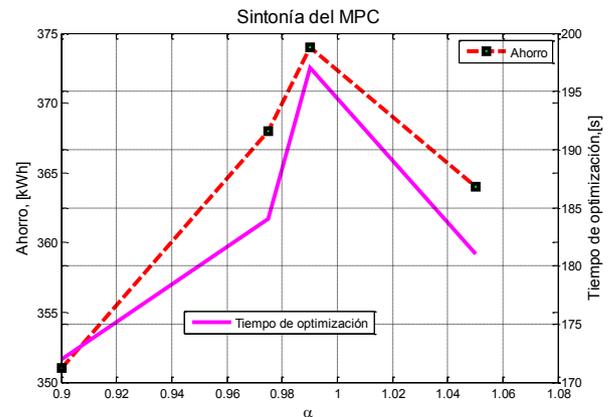


Figura 7: Comportamiento del ahorro y del tiempo de optimización en dependencia de las variaciones del peso de la función objetivo, α .

En el caso del peso β fueron utilizados los valores: 0.07, 0.075, 0.085 y 0.089. El valor seleccionado final de β fue 0.07, para el cual se alcanza el mayor ahorro y el tiempo de optimización no supera los 200 segundos. La dependencia de β a los parámetros de desempeño se ilustra en la Figura 8. Los valores de N_{p2} y α se mantuvieron en 3 y 0.99 cada uno.

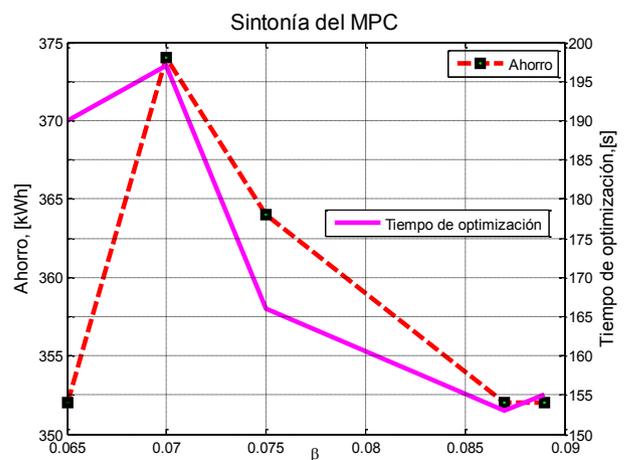


Figura 8: Comportamiento del ahorro y del tiempo de optimización en dependencia de las variaciones del peso β de la función objetivo.

5. Resultados de las simulaciones

5.1 Simulaciones en diferentes épocas del año.

Para los hoteles es importante considerar la época del año y la temporada turística debido a que el comportamiento de los huéspedes en un momento u otro varía considerablemente. Por ello se realizaron estudios en dos meses: noviembre del 2011 y abril del 2012.

En las Figuras 9 y 10 se representan los resultados de la potencia eléctrica de las enfriadoras, estimada por modelo, para los registros reales del hotel, (Real) y de la salida del controlador predictivo, (MPC); para 5 días de simulaciones de cada mes. El área sombreada se corresponde con el ahorro potencial. Además aparece el valor calculado del ahorro para cada hora.

El comportamiento de las temperaturas en el interior de las habitaciones, del agua fría, del aire exterior y la cantidad de habitaciones ocupadas puede observarse en las Figuras 11 y 12 respectivamente para el mes de noviembre y para el mes de abril.

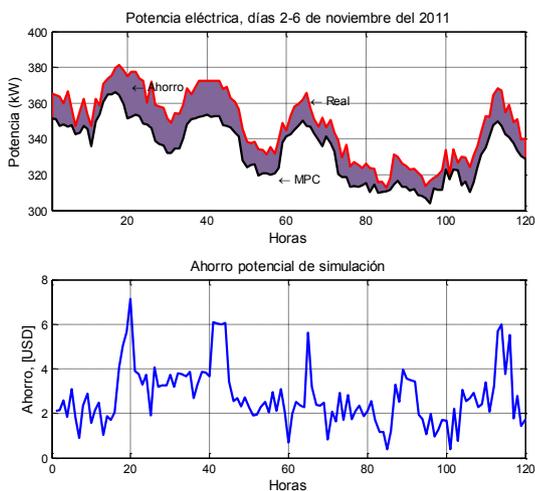


Figura 9: Resultados del controlador predictivo para los días del 2 al 6 de noviembre del 2011.

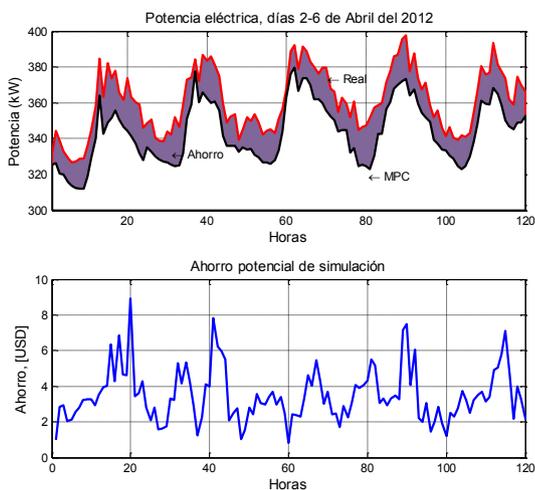


Figura 10: Resultados del controlador predictivo para los días del 2 al 6 de Abril del 2012.

En ambos meses el controlador logra su objetivo satisfactoriamente, lo que evidencia la posibilidad de obtener el ahorro potencial supuesto. En los días de noviembre se alcanza un ahorro potencial promedio de 333 kWh diarios lo que es equivalente al 3,98 % de consumo eléctrico de las enfriadoras correspondientes a la climatización de las habitaciones ocupadas. En los días del mes de abril se obtiene un ahorro potencial promedio de 418 kWh diarios lo que representa un 4,87% del consumo eléctrico de las enfriadoras.

En los dos casos simulados se aprecia una correspondencia entre los comportamientos de la potencia eléctrica y de la temperatura ambiente, lo que ratifica la gran influencia que ejerce esta variable en el consumo total de las habitaciones.

Los valores de potencia eléctrica de las enfriadoras para el mes de abril son superiores a los del mes de noviembre, lo que es correcto, considerando que la media de la temperatura ambiente para los cinco días del mes de noviembre es de 25,7°C y la de los días de abril es de 26,3°C.

Los esfuerzos de control óptimos, (referencia de la temperatura en el interior de las habitaciones y referencia de la temperatura del agua fría), calculados por el controlador posibilitan conseguir el objetivo de control sin que se alcance con mucha frecuencia los valores de las restricciones.

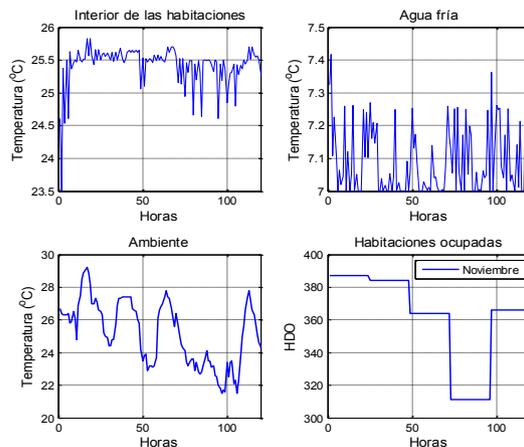


Figura 11: Variables de entrada al sistema para los días del 2 al 6 de noviembre del 2011.

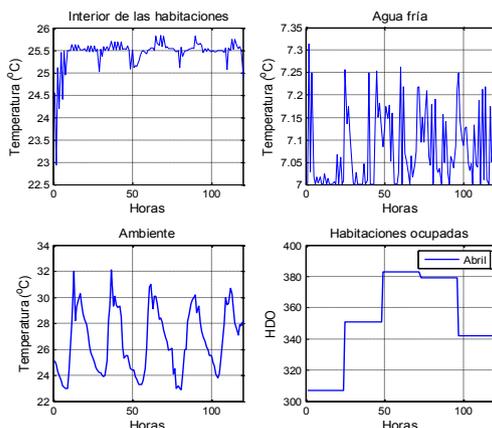


Figura 12: Variables de entrada al sistema para los días del 2 al 6 de abril del 2012.

5.2 Cálculo económico.

Con el objetivo de obtener una comparación con significado económico es favorable presentar los resultados en cifras monetarias.

Los valores de ahorro potencial del consumo eléctrico de las unidades enfriadoras son multiplicados por la tarifa de precios que estuvo vigente en el año 2011. Se considera que la tarifa varía durante todo el día. En el epígrafe 3.2 se detalló el vector de precios utilizado. El vector de precios considera el horario, el precio del combustible y una tasa fija según el número de

subestaciones que se emplean para la alimentación eléctrica del edificio. En este trabajo se desestimaron las bonificaciones y las penalizaciones.

Para un ahorro potencial de 333 kWh diarios como lo obtenido en el epígrafe 5.1, es posible economizar 66 USD por día.

6. Conclusión

El desarrollo de una estrategia de control predictivo aplicada a la regulación del consumo eléctrico del sistema de climatización de las habitaciones del hotel posibilita la obtención de un ahorro económico, y además mitiga el impacto medioambiental subyacente.

Los resultados de la sintonía del controlador utilizando los valores reales de operación evidencian que existen potencialidades serias de eficiencia en el empleo de este tipo de algoritmo en las instalaciones hoteleras.

Las características de intermitencia de la ocupación en los hoteles influyen decisivamente en el comportamiento del sistema investigado.

El trabajo mostró la sintonía de un controlador predictivo no lineal con significación económica para un hotel de ciudad respetando las condiciones de confort térmico y las condiciones operacionales del sistema de climatización.

English Summary

Non-linear Predictive Control for the Energy Management of an Air Conditioning Centralized System in a Hotel Installation.

Abstract

In this work we show the results obtained from the tuning of a non-linear model based predictive controller, for the energy management of an air conditioning centralized system in a hotel installation. With the aim of reaching economic efficiency, the controller design employs a prediction model of the energy consumption behaviour of the rooms based on the historic data of the hotel. Prediction of the thermal load of the rooms is obtained using the Radiant Time Series (RTS) method. The application was developed in Matlab® programming language.

Keywords:

Model based predictive control, RTS method, thermal load, electrical consumption, hotel.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda del personal de la instalación hotelera que facilitó las mediciones en las habitaciones y los registros históricos de consumo energético.

Referencias

- Acosta C. A., González A. I., Zamarreño J.M. and Castelló V., 2008. "A model for energy predictions of a hotel room" 20th European Modeling & Simulation Symposium, (Simulation in Industry). EMSS 2008. Briatico, Italy.
- Acosta C. A., González A. I., Zamarreño J.M. and Castelló V., 2011. "Modelo para la predicción energética de una instalación hotelera". Revista Iberoamericana de Automática e Informática 8, 309-322.
- Allgöwer F., Findeisen R., Ebenbauer C. 2002. "Nonlinear Model Predictive Control". Institute for systems theory in engineering, University of Stuttgart, Germany.
- Álvarez J.D., Redondo J.L., Camponogarc E., Normey-Rico J.E., Berenguel M., Ortigosa P.M., 2013 "Optimizing building comfort temperature regulation via model predictive control". Energy and Buildings 57, 361–372.
- ASHRAE, 2001. ASHRAE Handbook. Chapter 31, "Energy Estimating and Modeling Methods". ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE, 2007. ASHRAE Handbook. Chapter 5, "Hotels, Motels, and Dormitories". ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE, 2009. ASHRAE Handbook. Chapter 18, "Nonresidential cooling and heating load calculations". ASHRAE Handbook Editor.
- Borrelli Ma,Y., F, Hency B., Coffey B., BEGEA S., 2010. "Model predictive control for operation of building cooling systems". In 2010 American Control Conference, ACC 2010. Baltimore, Maryland, USA.
- Camacho, E.F., Bordons C., 2004. Model Predictive Control, Second edition. Springer-Verlag.
- Castilla M., Álvarez J.D., Berenguel M., Pérez M., Rodríguez F. and Guzmán J.L., 2010. "Técnicas de control de confort en edificios". Revista Iberoamericana de Automática e Informática 7, 5-24.
- Castilla M., Álvarez J.D., Normey-Rico J.E. and Rodríguez F., 2012. "A nonlinear model based predictive control strategy to maintain thermal comfort inside a bioclimatic building". 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). Barcelona. Spain, July 3-6.
- Colmenar-Santos A., Terán de Lober L. N., Borge-Diez D., Castro-Gil M., 2013. "Solutions to reduce energy consumption in the management of large buildings". Energy and Buildings 56, 66–77.
- Gongsheng H. and Tin-Tai Ch., 2011. "Uncertainty shift in robust predictive control design for application in CAV air-conditioning systems". Building Services Engineers Res. Technol., 32.4, 329-343. <http://bse.sagepub.com/>.
- Hao H. and Lei C., 2013. "Multi-zone temperature prediction in a commercial building using artificial neural network model". 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA) Hangzhou, China, June 12-14.
- Keblawi, A., Ghaddar N., Ghali K., 2011. "Model-based optimal supervisory control of chilled ceiling displacement ventilation system". Energy and Buildings 43, 1359–1370.
- Ma J., Qin J., Salisbury T. and Xu P., 2012. "Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control". Chemical Engineering Science 67, 92-100.
- Maciejowski J.M., 2000. "Predictive Control with constraints". Prentice Hall Editor. An imprint of Pearson Education. Harlow, England. <http://www.booksites.net/maciejowski>.
- Marik K., Rojicek J., Stluka P. and Vass J., 2011. "Advanced HVAC Control: Theory vs. Reality". Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano. Italy. pp. 3108-3113.
- MathWorks, 2011. Matlab 7.12.0. Ayuda de la herramienta de simulación.
- Salisbury T., Mhaskar P. and Qin S., 2013. "Predictive Control Methods to Improve Energy Efficiency and Reduce Demand in Buildings", Comp. & Chem. Eng. 51, 77-85.
- Seng I., 1999. "Experimental validation of the Radiant Time Series Method for cooling load calculations". Thesis of Bachelor of Science. University of Macau. Taipa, Macau.
- Vega B.G., Bombino O., Cigler J., Oldewurtel F., Rodríguez M. Á., 2013. "Model Predictive Control for a Tropical Island Hotel". Paper ID 975. CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC. Czech Republic.