

Evaluación de restricciones de confort en controlador predictivo para la eficiencia energética

Marchante, G.^{a*}, Acosta, A.^{a*}, González, A.I.^{a*}, Zamarreño, J.M.^{b,d}, Álvarez, V.^c

^a Departamento de Automática y Computación, Universidad Tecnológica de La Habana 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.

^d Institute of Sustainable Processes, Dr. Mergelina s/n, 47011 Valladolid, Spain.

To cite this article: Marchante, G., Acosta, A., González, A.I., Zamarreño, J.M., Álvarez, V. 2021. Comfort constraints evaluation in predictive controller for energy efficiency. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18, 150-163. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13937>

Resumen

En este trabajo se reflejan los resultados obtenidos, vía simulación, del estudio de las restricciones de confort de un controlador predictivo basado en modelo (MPC) no lineal, para la gestión energética del sistema centralizado de climatización de una instalación hotelera. Con el objetivo de lograr eficiencia económica, el controlador empleado utiliza un modelo de predicción del comportamiento del consumo energético de las habitaciones a partir de los registros históricos del hotel. Para satisfacer el confort térmico requerido por los ocupantes, se considera un modelo de zona de confort más completo, que el modelo utilizado por (Acosta *et al.*, 2016), en una de las restricciones del problema de optimización. Esto permitió un mayor ahorro energético, siendo esta la principal contribución de esta investigación. Las simulaciones de los escenarios presentados fueron realizadas con MATLAB[®].

Palabras clave: controlador predictivo basado en modelo, confort térmico, consumo energético, modelo adaptativo.

Comfort constraints evaluation in predictive controller for energy efficiency

Abstract

This work reflects the results obtained, through simulation, from the study of the comfort constraints of a Model Predictive Controller (MPC), for the energy management of the centralized air conditioning system of a hotel installation. In order to achieve economic efficiency, the proposed controller is based on a prediction model of the behaviour of the energy consumption of the rooms from the hotel historical records. To satisfy the thermal comfort required by the occupants, a more complete comfort zone model is considered than the one used by (Acosta *et al.*, 2016), in one of the constraints of the optimization problem. This allowed greater energy savings, this being the main contribution of this research. The simulations of the presented scenarios were performed with MATLAB[®].

Keywords: model predictive control, thermal comfort, energy consumption, adaptive model.

1. Introducción

La calidad de un determinado ambiente interior depende de todas aquellas condiciones de un entorno creado artificialmente en el interior de un edificio. Esa calidad tiene efectos sobre sus ocupantes y las actividades que desarrollan en el mismo. Dichas condiciones guardan una estrecha relación con el consumo de los recursos energéticos en el ámbito de la

edificación. La gestión de ese consumo y las condiciones del entorno son cuestiones que se deben valorar.

Gran importancia reviste la optimización en este contexto, la cual es producto de la combinación adecuada entre el modelo de confort térmico elegido y el de energía propio del edificio. La generación de estrategias combinadas de eficiencia energética y confort térmico implica un mejoramiento en la calidad de vida de los usuarios en edificios (salud, rendimiento

*Autor para correspondencia: greymg112015@gmail.com (Greta Marchante), adriana.virginia@automatica.cujae.edu.cu (Adriana V. Acosta), anita@automatica.cujae.edu.cu (Ana I. González)

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

y productividad) y conduce a importantes ahorros de energía y emisiones.

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, como puede verse en (Acosta et al., 2016).

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) (Camacho y Bordons C., 2004) 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), (Acosta et al., 2016), (da Silva et al., 2018), (Lingua et al., 2019), (Valdivia et al., 2019), (Zhai, 2019), (Flores et al., 2019).

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 esta investigación al igual que los de (Acosta et al., 2016), 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. Este tipo de modelos precisan de un desarrollo más complejo que, por ejemplo, otros modelos empíricos como (Diaz et al., 2019).

En el presente trabajo se reemplaza la restricción empleada en (Acosta et al., 2016), de forma tal que no sea afectado el confort térmico de los ocupantes y por consiguiente su satisfacción. A pesar de que el modelo empleado en dicha restricción del controlador predictivo basado en modelo tiene más parámetros variables que el modelo utilizado por (Acosta et al., 2016), esto permitió tener un modelo más completo y un mayor ahorro energético.

Para la obtención del modelo empleado como restricción fue necesario el análisis de los principales modelos de confort, estrés térmico y zonas de confort que se han desarrollado a nivel internacional (Tabla 1).

Estos modelos fueron empleados como referencia teórica para el desarrollo y comprensión del modelo de zona de confort más amplio que se presenta en este trabajo. En cada modelo investigado se analizó la influencia de los factores y parámetros, tanto ambientales como personales, que inciden en la percepción confortable o no del ambiente térmico.

Los escenarios de simulación del controlador predictivo con la nueva restricción fueron logrados en el entorno de programación MatLab® (MathWorks, 2013). Con el objetivo de hacer comparaciones con resultados precedentes de investigación, fueron utilizados los registros históricos del hotel “Meliá Habana” del año 2012.

Tabla 1: Modelos para regular el confort térmico

Nombre del modelo y tipos	Referencia
TEÓRICOS	
PMV (Voto Medio Previsto)	(ASHRAE, 2017) (ISO 7730, 2005)
PPD (Porcentaje de Insatisfacción)	(ASHRAE, 2017) (ISO 7730, 2005)
TSENS (Sensación Térmica)	(ASHRAE, 2017) (Chávez, 2002)
DISC (Disconfort)	(ASHRAE, 2017) (Chávez, 2002)
ET* (Temperatura Efectiva)	(ASHRAE, 2017)
SET* (Temperatura Efectiva Estándar)	(ASHRAE, 2017) (Bogdan et al., 2017) (Nishi et al., 1977)
PET (Temperatura Psicológica Equivalente)	(Deb, 2010) ((Reza et al., 2013)
EMPÍRICOS	
PD (Porcentaje de insatisfacción debido al movimiento del aire)	(ASHRAE, 2017) (Chávez, 2002)
PS (predice la velocidad del aire elegida por la persona)	(Chávez, 2002)
TS (Voto de Sensación Térmica)	(Chávez, 2002)
ADAPTATIVOS	
Humphreys (Temperatura Neutral)	(ASHRAE, 2017) (Auliciems et al., 2007)
Nicol (Temperatura Neutral)	(ASHRAE, 2017) (Tiwari et al., 2010)
Auliciems (Temperatura Neutral)	(ASHRAE, 2017) (Auliciems et al., 2007)
Griffiths (Temperatura de Confort)	(ASHRAE, 2017) (Rubin, 1982)(Rijal et al., 2016)(Sabri et al., 2015)
ITS (Índice de Estrés Térmico)	(ASHRAE, 2017) (Joodaki et al., 2018)
COMPUTACIONAL	
PMV Fuzzy (basado en lógica difusa)	(Menyhárt, 2019) (Kotsopoulos et al., 2013)
PMV Neuronal (basado en redes neuronales)	(Atthajariyakul et al., 2005)

Los objetivos de la presente investigación estuvieron dirigidos a estudiar el confort térmico en sistemas de acondicionamiento de aire en una instalación hotelera sin afectar la eficiencia energética ni el bienestar en los servicios que se debe brindar a sus clientes. Se realizó un estudio de los factores y parámetros que influyen en el confort térmico, y los mismos se tuvieron en cuenta en el modelo empleado en una de las restricciones del controlador predictivo basado en modelo diseñado.

El artículo consta de cinco 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 diseñó el controlador predictivo bajo estudio. En la tercera sección se refleja la metodología empleada en la obtención del modelo utilizado como restricción de confort en el MPC no lineal. En la cuarta 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 previos (Acosta et al., 2008, 2011, 2015, 2016). 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 (Acosta et al., 2016).

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 del año 2012. El índice de consumo es mayor en los meses de verano que en los meses de invierno. Es por ello por lo que uno de los objetivos de la investigación fue modificar la restricción de confort para lograr disminuir los valores de consumo energético sin afectar el bienestar de los clientes del inmueble, y de este modo conseguir ahorro económico por este concepto.

2.1 Distribución del consumo de energía del hotel

El sistema de climatización del hotel es mixto pues combina el sistema individual de aire acondicionado con el sistema centralizado.

La distribución del consumo eléctrico del hotel se muestra en la Figura 2. Los sistemas de acondicionamiento de aire (Chiller) son los que más afectan al consumo del hotel y por ello son el objeto de atención.

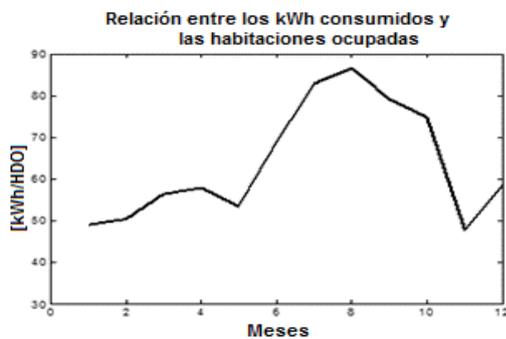


Figura 1: Comportamiento de la relación entre el consumo eléctrico (kWh) y la cantidad de habitaciones ocupadas (HDO) para cada mes durante el año 2012 en el hotel “Meliá Habana” (Acosta et al., 2016).

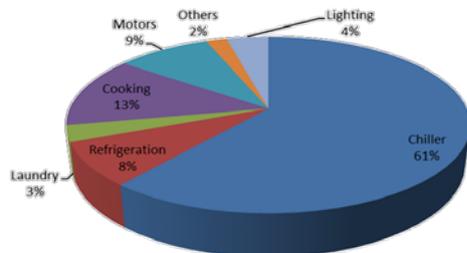


Figura 2: Distribution of electrical consumption for the “Meliá Habana” hotel (Acosta et al., 2016).

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 de las habitaciones están estrechamente relacionados con la cantidad de turistas hospedados. Para este estudio en particular se analiza la climatización de las habitaciones, partiendo del criterio de que el alojamiento del hotel debe constituir la principal fuente de ingresos de este.

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 (Figura 3). 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 del sistema propuesto en (Acosta et al., 2011).



Figura 3: Habitación clásica del hotel Meliá Habana.

Para una mejor comprensión del sistema bajo estudio se muestra en la Figura 4 el esquema general del controlador predictivo diseñado en (Acosta et al, 2016).

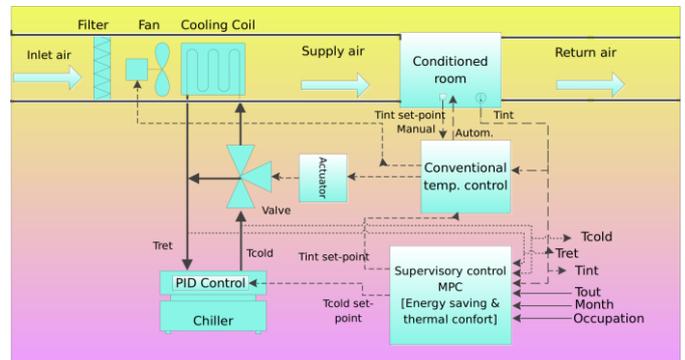


Figura 4: Esquema general del MPC diseñado en (Acosta et al., 2016) para el sistema de aire acondicionado centralizado.

3. Metodología empleada en la obtención del modelo de confort

Del estudio de los factores y parámetros que influyen en la percepción del ambiente térmico y de los modelos existentes que reflejan esta sensación se obtuvo el modelo que se describe a continuación. Este modelo es el que se utiliza como límite de una de las salidas del controlador predictivo.

3.1 Conceptualización

El modelo de confort térmico que se propone en esta investigación está integrado por disímiles variables, entre ellas: la edad, el coeficiente de aislamiento de la ropa, la actividad metabólica, la temperatura ambiente, el contacto visual con el exterior, las expectativas de confort, entre otras. Cada variable o parámetro tiene un aporte en dicho modelo por su influencia en el ambiente térmico del espacio y en el confort térmico del ocupante.

El modelo resultante permite no solo conocer la zona de confort térmico del ambiente bajo estudio sino también la zona de variación de la humedad relativa, siendo esta última una variable de singular importancia en Cuba.

3.2 Formalización

Con el criterio de obtener ecuaciones que dieran unos valores para la temperatura interior que no se desviasen

demasiado en condiciones extremas de la temperatura exterior, se modificó la ecuación de Nicol (1), donde T_m es la temperatura media exterior, para obtener las ecuaciones (2) y (3) que determinan el límite superior (T_{ls}) e inferior (T_{li}) de la zona de confort térmico respectivamente (Chávez, 2002). Entre la diversidad de definiciones de los modelos que caracterizan el confort térmico, este modelo clasifica como adaptativo pues incluye las variaciones del clima exterior para determinar las preferencias térmicas en el interior.

Además, se retoma el modelo de Auliciems representado en (4) para expresar la temperatura media mensual exterior (T_{mmo}) en función de la temperatura del aire (T_a) y la temperatura neutral (T_n) como muestra (5). El desarrollo del método que se emplea para determinar esta temperatura neutral se basa en el enfoque adaptativo de confort térmico, lo que implica la interacción de las variables físicas y biológicas (clima, metabolismo, arropamiento) junto con las psicológicas (adaptación, tolerancia, conveniencia). Por lo que al tener el cuerpo cierto margen para regularse, esta temperatura es típicamente menor que la temperatura corporal normal que varía según la temperatura exterior.

La principal diferencia entre el modelo obtenido y el resto de los modelos estudiados es que el primero además de tener su comportamiento adaptativo, pues en cierta manera tiene en cuenta las variaciones en el clima exterior para determinar las preferencias térmicas en el interior, incluye diversos factores y parámetros que también afectan a la sensación térmica en el individuo, lo que no ocurre en los demás.

$$T_n = 23.9 + 0.0295 * (T_m - 22) * e^{-\frac{(T_m - 22)^2}{24\sqrt{2}}} \quad (1)$$

$$T_{ls} = 24 + 0.02 * (T_{mmo} - 22) * e^{-\frac{(T_{mmo} - 22)^2}{24\sqrt{2}}} \quad (2)$$

$$T_{li} = 20 + 0.18 * (T_{mmo} - 22) * e^{-\frac{(T_{mmo} - 22)^2}{24\sqrt{2}}} \quad (3)$$

$$T_n = 9.22 + 0.48 * T_a + 0.14 * T_{mmo} \quad (4)$$

$$T_{mmo} = \frac{T_n - a - b * T_a}{c} \quad (5)$$

La expresión (5) es sustituida en (2) y (3) y se obtienen las ecuaciones básicas (6) y (7) para los límites superior e inferior de la zona de confort respectivamente (ver Tabla 2 para consultar valores de los coeficientes).

$$T_{n_{ls}} = A_s + B_s * (T_{n_{ls}} - b * T_a - d) * e^{-\frac{(T_{n_{ls}} - b * T_a - d)^2}{f}} \quad (6)$$

$$T_{n_{li}} = A_i + B_i * (T_{n_{li}} - b * T_a - d) * e^{-\frac{(T_{n_{li}} - b * T_a - d)^2}{f}} \quad (7)$$

A las expresiones (6) y (7) se le incorporaron los términos que consideran la influencia de la temperatura radiante (T_r) y los diferentes factores y parámetros que determinan el confort térmico (Chávez, 2002), (ASHRAE, 2017), (Olgay, 1998), (Auliciems and Szokolay, 2007), quedando las ecuaciones resultantes como muestran (8) para el límite superior y (9) para el límite inferior (ver Tabla 4 para términos adicionales incluidos).

$$T_{n_{ls}} = A_s + B_s * (T_{n_{ls}} - b * T_a - d) * e^{-\frac{(T_{n_{ls}} - b * T_a - d)^2}{f}} - \left(\frac{T_r - T_{n_{ls}}}{2}\right) - F_{va} \pm F_{adapt} \pm F_{contv} \pm F_{sexo} + F_{edad} - F_{clomet} \pm F_{ht} - F_{tp} \pm F_{exp} \quad (8)$$

$$T_{n_{li}} = A_i + B_i * (T_{n_{li}} - b * T_a - d) * e^{-\frac{(T_{n_{li}} - b * T_a - d)^2}{f}} - \left(\frac{T_r - T_{n_{li}}}{2}\right) - F_{va} \pm F_{adapt} \pm F_{contv} \pm F_{sexo} + F_{edad} - F_{clomet} \pm F_{ht} - F_{tp} \pm F_{exp} \quad (9)$$

El aporte a la zona de confort del factor de contacto visual F_{contv} , aunque este sea subjetivo, es fundamental. Desde el punto de vista del confort ambiental, el hecho de tener como referencia el clima exterior, es decir, tener una de las posibles causas del clima interno en el que se encuentra el usuario es muy importante. Cuando se está en presencia de un contacto visual ideal el usuario tiene un mayor grado de tolerancia al ambiente en que se encuentre (Olgay, 1998).

Para la humedad relativa se asignó un rango de valores para cada temperatura de los límites de la zona de confort, basados en la gráfica de confort de Fanger (Ramírez et al., 1995). En este caso se extienden estos valores a las condiciones climáticas de Cuba (ver Tabla 3).

3.3 Parametrización

En la Tabla 2 se resumen los valores empleados en el modelo de la zona de confort y en la Tabla 4 los rangos y valores adoptados por dichos parámetros, así como las variables medidas físicamente. En el cálculo de F_{clomet} la T_{mmo} fue calculada por la expresión (5).

Tabla 2: Coeficientes empleados en el modelo de la zona de confort

Coeficiente	Valor
a	9.22
b	0.48
c	0.14
d	12.3
f	4.7518
A_s	24 [°C]
A_i	20 [°C]
B_s	0.142857
B_i	1.285714

Tabla 3: Expresiones aplicadas para la obtención de la zona de confort de la humedad relativa

Límite inferior	Límite superior
Si $T_a \geq -20$ HR=65	Si $T_a \geq -20$ HR=85
Si $T_a \geq 15$ HR=60	Si $T_a \geq 21$ HR=80
Si $T_a \geq 16$ HR=55	Si $T_a \geq 22$ HR=72
Si $T_a \geq 17$ HR=48	Si $T_a \geq 23$ HR=65
Si $T_a \geq 18$ HR=40	Si $T_a \geq 24$ HR=60
Si $T_a \geq 19$ HR=35	Si $T_a \geq 25$ HR=57
Si $T_a \geq 20$ HR=30	Si $T_a \geq 26$ HR=55
Si $T_a \geq 21$ HR=25	Si $T_a \geq 27$ HR=50
	Si $T_a \geq 28$ HR=48
	Si $T_a \geq 29$ HR=44
	Si $T_a \geq 30$ HR=40
	Si $T_a \geq 31$ HR=35
	Si $T_a \geq 32$ HR=30
	Si $T_a \geq 33$ HR=25

3.4 Resolución y validación

Para la resolución del modelo obtenido, se desarrollaron varios escenarios de simulación, los cuales aparecen descritos en la Tabla 5. Estos escenarios reflejan los rangos y unidades de los valores para cada una de las variables en el modelo matemático con los que se definirá la zona de confort térmico correspondiente a la situación y usuarios, del caso que se esté analizando.

En función de las variables y parámetros anteriores se obtuvieron los resultados que se muestran de la Figura 6 a la 10.

En los escenarios 1 y 2 se varió la temperatura ambiente. Se puede apreciar en las Figuras 6 y 7 cómo, a medida que aumenta esta, la diferencia entre los límites de la zona de confort relacionados con la variable temperatura es menor.

En el caso del tercer escenario (Figura 8) se varió tanto la temperatura ambiente como la temperatura exterior, aumentando ambas con relación al primer escenario. Esto trajo como consecuencia que los límites de la zona de confort aumentaran con relación a dicho escenario, pero se redujeran ligeramente en comparación al segundo escenario de simulación.

Para el cuarto escenario se mantuvieron los parámetros de la segunda simulación excepto el coeficiente de aislamiento de la ropa que se aumentó a 1.37, lo que significa que el cuerpo del individuo está más cubierto. El nivel de actividad metabólica se aumentó a 3, lo que implica que el sujeto tendrá un nivel de actividad elevado. Estos cambios provocaron un aumento en el factor de aislamiento y nivel de actividad (F_{clomet}) por lo que la zona de confort se reduce ligeramente.

Tabla 4: Parámetros y variables del modelo resultante de la zona de confort

Parámetro	Significado	Ecuación	Rango/ Valor ideal
t	tiempo	-	-
clo	aislamiento térmico de la ropa	-	[0.36-1.37]
met	nivel de actividad	-	[0.7-8.7]
F_{va}	factor de la velocidad del aire para $T_a < 37^\circ\text{C}$	$F_{va} = V_a * 3.6363$	-1.455
F_{adapt}	factor de adaptabilidad	-	[-1 a 1/ 1 °C]
F_{contv}	factor de contacto visual	-	[0 a 2/ 2°C]
F_{sexo}	factor sexo	$F_{sexo} = \% \frac{\text{mujeres}}{200}$	-
F_{edad}	factor edad	$F_{edad} = edad * 0.025$	-
F_{clomet}	factor de vestimenta (clo) y nivel de actividad (met)	$F_{clomet} = T_{mmo} - (T_{mmo} - clo * 0.06 * (met * f_{cons}) - 0.018 * (met * f_{cons}))$	clo=0.95 met=1.5
f_{cons}	factor de constitución corporal	$f_{cons} = \frac{0.202M^{0.425}h^{0.725}}{1.72}$	h=1.7 M=65Kg
F_{ht}	factor del historial térmico	-	[-3 a 3/ 0 °C]
F_{tp}	factor de tiempo de permanencia	$A_{cl} = \frac{\ln(480 - t)}{\ln(21.5)}$	-
F_{exp}	factor de expectativa de confort	-	[0 - 2/ 0] °C
Variables			
T_a	Temperatura del aire interior	-	[0 -45 °C]
V_a	Velocidad del aire	-	[0 -1 m/s]
Tr	Temperatura radiante	-	[0 -45°C]
$Text$	Temperatura del aire exterior	-	[0 -45°C]
T_{mmo}	Temperatura media mensual exterior	-	[0 -45°C]

Se procedió de igual forma en el quinto escenario; lo que esta vez se mantuvo fue el nivel de actividad y se aumentó el aislamiento de la ropa a 1.35, aumentando así el F_{clomet} y ocasionando un cierto aumento en la zona de confort. Para poder evaluar estos resultados se realizó una visualización ampliada en el rango de temperatura de 15 a 21 °C sobre los resultados del segundo escenario (Figura 9).

Hasta el escenario 5 se estuvo simulando con un factor de expectativas de confort cero, lo que significa que se tenía muy pocas expectativas sobre el nivel de confort del espacio que se estaba analizando. Por lo tanto, se tenía una mayor tolerancia hacia las condiciones del clima interno, por lo que aunque el contacto visual no era el ideal, este nivel de expectativa favorecía a la zona de confort.

En el último escenario (Figura 10), en comparación con el primero, solo se aumentaron los parámetros de F_{contv} , F_{edad} y F_{exp} a 2, 55 años y 1, respectivamente. Aunque en este caso las expectativas sobre el ambiente sean altas y exista una menor tolerancia a las condiciones desfavorables de éste, el contacto visual contrarresta esta condición negativa pues al ser el ideal permite que el usuario tenga una mayor tolerancia a las condiciones ambientales y no sienta incomodidad por el frío o calor. Esto aumenta la zona de confort como se aprecia en la Figura 9, ya sea en la de temperaturas o en la de humedad. A este análisis también se suma la edad, que al ser mayor va a existir una reducción en el metabolismo de la persona teniendo como una de sus consecuencias la reducción en la producción de calor y va a existir 1°C más de preferencia de la temperatura del ambiente, pues la persona es mayor de 40 años (Olgay, 1998).

Tabla 5: Escenarios de simulación para el modelo resultante de la zona de confort

Parámetros y variables	Rangos y valores					
	Esc.1	Esc.2	Esc.3	Esc.4	Esc.5	Esc.6
F_{adapt}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
F_{contv}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	2
%mujeres	45	45	45	45	45	45
F_{edad}	21	21	21	21	21	55
clo	0.95	0.95	0.95	1.37	1.35	0.95
$1clo=0.155$ [m²K/W]						
met	1.5	1.5	1.5	3	1.5	1.5
$1met=58.15$ [W/m²]						
M [kg]	65	65	65	65	65	65
h [m]	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
t [min]	210	210	210	210	210	210
F_{exp}	0	0	0	0	0	1
T_a [°C]	20.9- 22.9	21.9- 30.0	21.2- 25.3	21.9- 30.0	21.9- 30.0	20.9- 22.9
V_a [m/s]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
$Text$ [°C]	21.3- 32.1	21.3- 32.1	25.9- 30.6	21.3- 32.1	21.3- 32.1	21.3- 32.1
Tr [°C]	21.5- 23.4	22.4- 30.6	21.7- 25.8	22.4- 30.6	22.4- 30.6	21.5- 23.4

3.5 Formalización del controlador predictivo con restricción de confort

En la solución del problema del controlador predictivo diseñado en (Acosta et al., 2016) se tuvo en cuenta una función objetivo con significado económico donde se minimiza el costo del consumo eléctrico del sistema de climatización

considerando las restricciones relacionadas con el confort térmico y con la operación de este.

$$J = \sum_{i=N_{p1}}^{N_{p2}} \alpha_{k+i} \left(C_{k+i} \hat{P}(k+i|k) \right) + \sum_{i=0}^{N_c-1} \left[\sum_{j=1}^{m_u} \beta_{k+i} (\Delta \hat{u}_j(k+i))^2 + \gamma_{k+i} (\hat{u}_j(k+i) - u_{ref,j}(k))^2 \right] \tag{10}$$

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, d_k) \tag{11}$$

$$y_k = g(x_k) = P = Q_{sal}/COP \tag{12}$$

$$x_k = [Q_{s,k}, T_{ret-s,k}, t_{e,k}] \tag{13}$$

$$u_k = [T_{int,k}, T_{afria,k}] \tag{14}$$

$$d_k = [T_{amb,k}, T_{ret,k}, HDO_k, Mes_k, DLT_k] \tag{15}$$

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

$$\Delta \hat{u}_j(k+i) = 0, i > N_c; j = 1, \dots, m_u \tag{17}$$

$$u_{i,j}^{min} \leq \hat{u}_j(k+i) \leq u_{i,j}^{max}; i = 0, \dots, N_c - 1; j = 1, \dots, m_u \tag{18}$$

$$\hat{u}_j(k+i) = u_{ref,j}(k), i > N_c; j = 1, \dots, m_u \tag{19}$$

$$P_i^{min} < \hat{P}(k+i|k) < P_i^{max}, i = N_{p1}, \dots, N_{p2} \tag{20}$$

$$T_{nt,i} < u_{ref,1}(k) < T_{nt,i}, i = N_{p1}, \dots, N_{p2} \tag{21}$$

$$u_{ref,2}(k) = \bar{T}_{afria,k} \tag{22}$$

En la ecuación (10) el índice $(k+i|k)$ denota el valor predicho para el tiempo $k+i$, basado en la información disponible en el tiempo k . Los parámetros α_{k+i} son los pesos de la salida, β_{k+i} son pesos de los incrementos de las acciones de control y γ_{k+i} son los pesos de las variaciones de las acciones de control con respecto a algunos de los valores de referencias basados en expertos (21), (22). $\Delta \hat{u}$ es la predicción del incremento de las acciones de control, $\hat{P}(k+i|k)$ [kWh] 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 $k+i$. Esto significa que los valores de la potencia consumida en las unidades de refrigeración se multiplican por la tarifa correspondiente para obtener una estimación del impacto económico de su funcionamiento.

En particular en el vector de perturbaciones (15) fueron incluidas las variables *Mes* y *DTL* (perturbaciones medibles) pues las mismas están muy relacionadas con las estaciones que a su vez influyen en el comportamiento de los clientes en el interior del inmueble y de la ocupación del mismo. En el caso de la variable *DTL*, responde a estrategias gubernamentales para obtener ahorro energético mediante el cambio de horario. Es posible que en un período se decida atrasar el cambio de horario y en otro se prescinda del mismo.

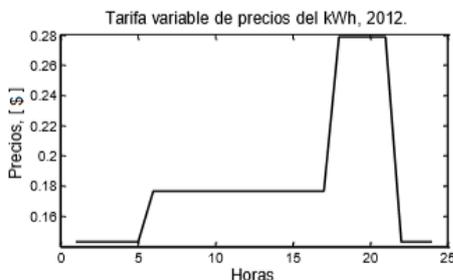


Figura 5: Vector de precios del kWh vigente en el año 2012.

La tarifa de costo considera la hora actual, la cantidad de combustible y el número de subestaciones que se utilizan en el edificio. En el año 2012 la tarifa aplicada a los hoteles era de tipo variable y dependía del horario, el precio del combustible

y una tasa fija según el número de subestaciones que se emplean para el servicio de alimentación eléctrica del edificio. En la Figura 5 se representa el comportamiento horario de la tarifa eléctrica.

Tabla 6: Variables y parámetros (Acosta et al., 2016)

Nomenclatura	Significado
<i>COP</i>	Es el coeficiente de rendimiento del enfriador (<i>Chiller Coefficient Of Performance</i> , por sus siglas en inglés)
<i>N_c</i>	Horizonte de control
<i>N_{p1}</i>	Valor inicial para el horizonte de predicción, [h]
<i>N_{p2}</i>	Valor final para el horizonte de predicción, [h]
<i>P</i>	Energía eléctrica consumida por el enfriador, [W]
<i>Q_s</i>	Carga de enfriamiento para cada habitación de hotel ocupada, [W]
<i>Q_{sal}</i>	Carga de enfriamiento total para todas las habitaciones ocupadas, [W]
<i>T_{afria}</i>	Temperatura de suministro de agua fría al edificio, [°C]
\bar{T}_{afria}	Vector horario (24 elementos) del promedio del mes actual de temperatura de suministro de agua fría al edificio, [°C]
<i>T_e</i>	Temperatura sol-aire [°C]
<i>T_{int}</i>	Temperatura del aire ambiente en el interior de las habitaciones optimizada por el NLPC, [°C]
<i>T_{ret}</i>	Temperatura total del agua enfriada de retorno, [°C]
<i>T_{ret-s}</i>	Temperatura de retorno del agua enfriada para cada habitación, [°C]
<i>u</i>	Vector de variables manipuladas
<i>d</i>	Vector de perturbaciones medibles
<i>y</i>	Salida
<i>T_{amb,k}</i>	Temperatura del aire exterior del edificio
<i>HDO</i>	Número de habitaciones ocupadas
<i>Mes</i>	Mes correspondiente para las mediciones
<i>DLT</i>	Hora del mediodía para el mes en cuestión

Tabla 7: Parámetros del controlador predictivo diseñado en (Acosta et al., 2016)

Parámetro	Valor	Descripción
<i>N_c</i>	2	Horizonte de control
<i>N_{p1}</i>	1	Valor inicial para el horizonte de predicción
<i>N_{p2}</i>	3	Valor final para el horizonte de predicción
<i>m_y</i>	1	Cantidad de señal de salida
<i>m_u</i>	2	Cantidad de señal de entrada
<i>m_d</i>	4	Cantidad de señales de perturbación medible
<i>p^{min}</i>	0 (kW)	Valor mínimo de la potencia eléctrica de las enfriadoras del hotel
<i>p^{max}</i>	2920 (kW)	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
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

En la Tabla 6 se resumen el resto de las variables y parámetros empleados en la formalización del controlador. En el caso de los parámetros $u_{ref,1}(k)$ y $u_{ref,2}(k)$, valor de referencia de la temperatura interior y valor de referencia de la temperatura de agua fría respectivamente, se verá su

comportamiento en correspondencia con los diferentes escenarios de simulación que fueron creados en la investigación realizada para el análisis de la nueva restricción de confort impuesta al controlador. Las restricciones a las que se encuentra sujeto el comportamiento del controlador están relacionadas con los límites de operación de las variables que intervienen en el mismo y sus características físicas.

En el caso de la temperatura interior se encuentra limitada por los valores que proporcionan confort térmico a los ocupantes, atendiendo a las condiciones climatológicas y a la percepción sensorial del huésped de la habitación (Acosta, 2015). En este caso dichos valores serán ofrecidos por el modelo propuesto en (8) y (9). Los límites de operación de la temperatura de agua fría se restringen por el funcionamiento de las climatizadoras.

En correspondencia con lo expuesto anteriormente y dadas las especificaciones del problema a optimizar: no lineal con restricciones y pocas variables de control, se eligió en (Acosta *et al.*, 2016) la función “*fmincon*” de la biblioteca de funciones de optimización “*optimtool*” del MatLab®. Para trabajar con dicha función, se empleó el algoritmo de conjunto activo pues fue el que mostró menor tiempo de solución del problema de optimización con relación a la programación cuadrática secuencial (SQP) y al algoritmo de punto interior (Camacho y Bordons C., 2004) (Caballero J. A. y Grossmann I. E., 2007).

En la Tabla 7 se resumen los parámetros empleados en (Acosta *et al.*, 2016) en el diseño del controlador para un mayor ahorro y un mínimo tiempo de cálculo.

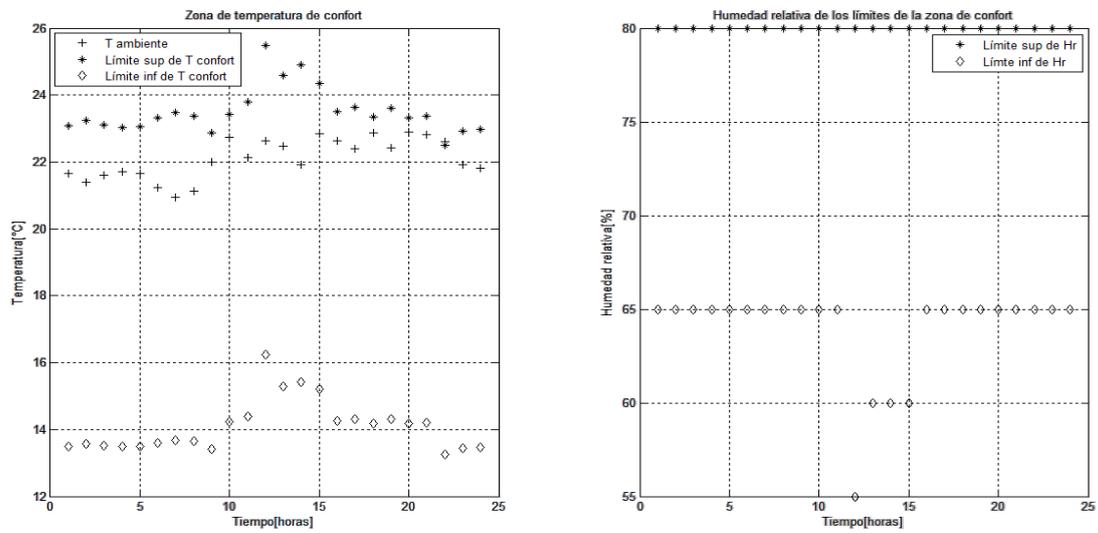


Figura 6: Zonas de confort (izquierda: temperatura, derecha: humedad relativa) para el escenario de simulación #1.

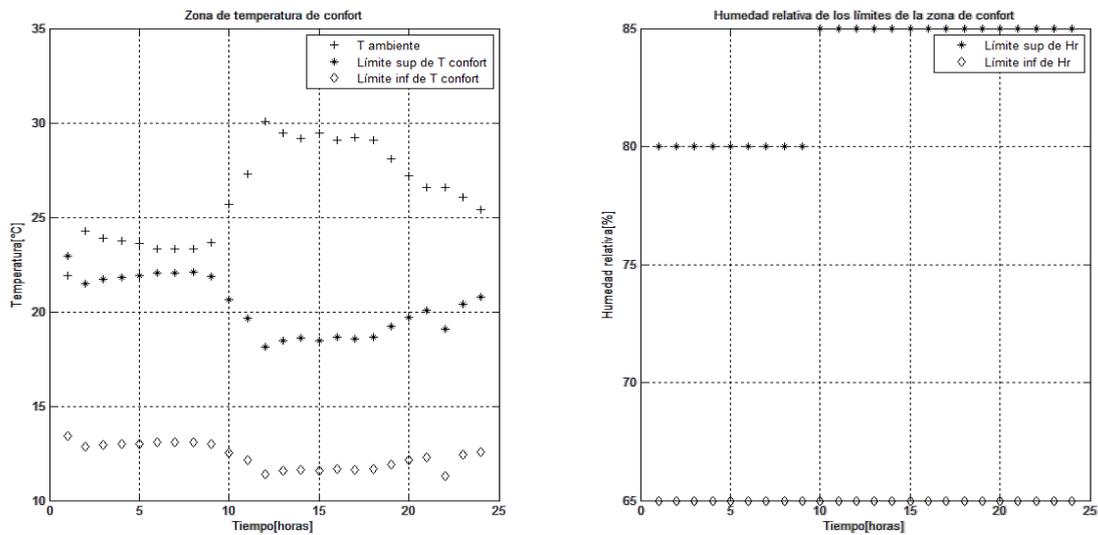


Figura 7: Zonas de confort (izquierda: temperatura, derecha: humedad relativa) para el escenario de simulación #2.

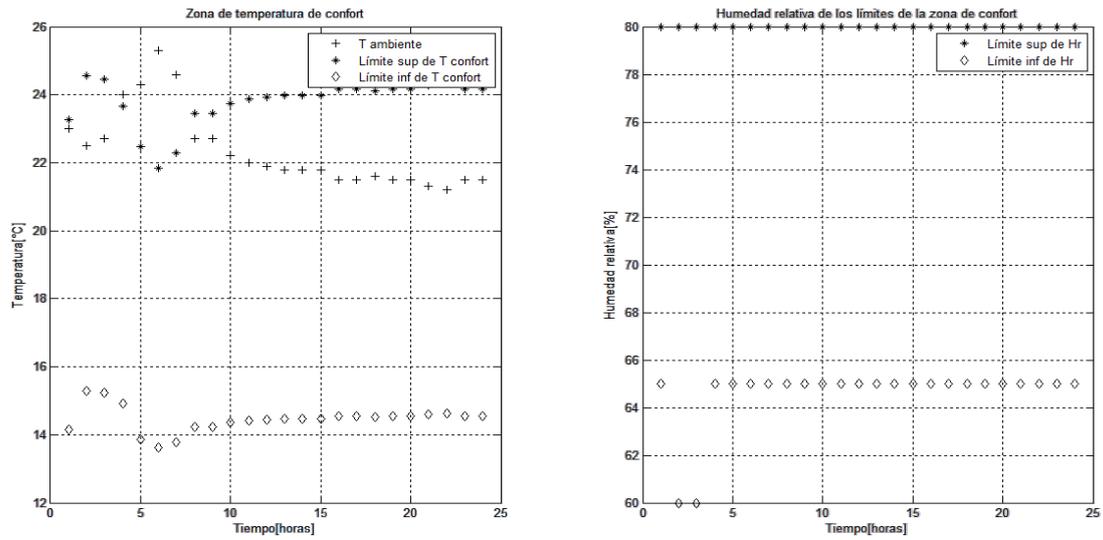


Figura 8: Zonas de confort (izquierda: temperatura, derecha: humedad relativa) para el escenario de simulación #3

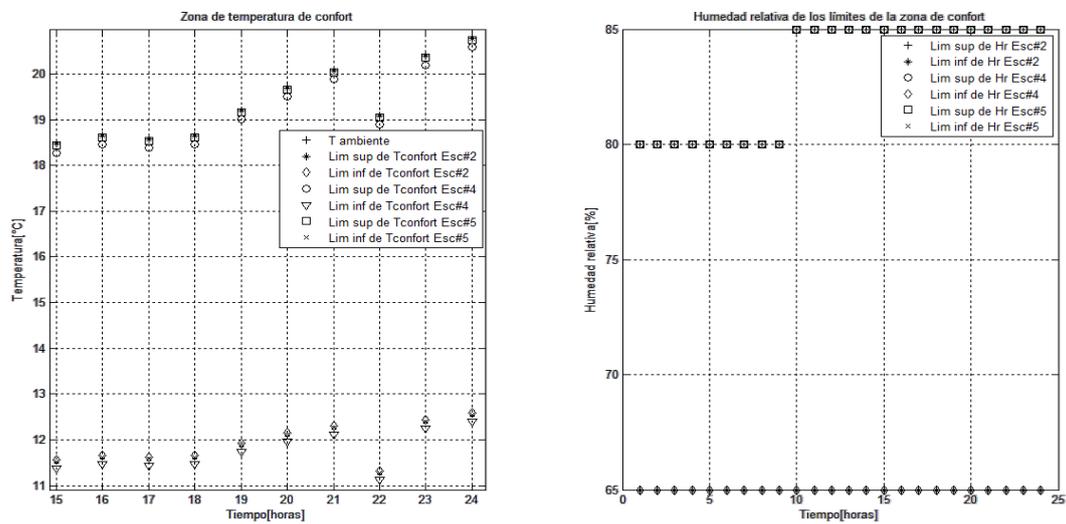


Figura 9: Zonas de confort (izquierda: temperatura, derecha: humedad relativa) para el escenario de simulación #4 y #5.

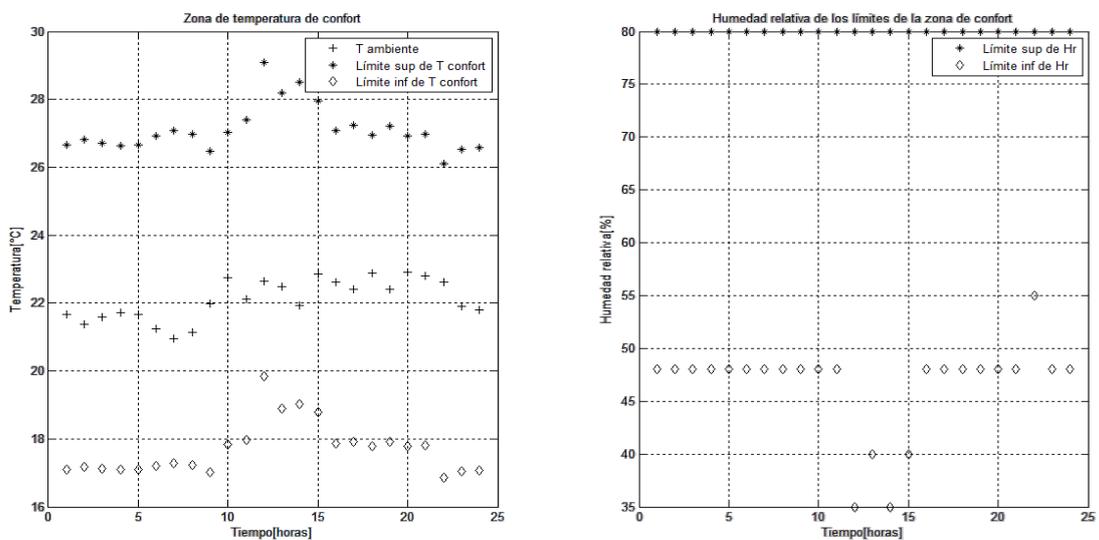


Figura 10: Zonas de confort (izquierda: temperatura, derecha: humedad relativa) para el escenario de simulación #6.

4. Análisis y discusión de los resultados

Para evaluar el desempeño del modelo presentado como restricción de confort en el controlador predictivo no lineal retomado de (Acosta *et al.*, 2016), se diseñaron varios escenarios de simulación en los que se variaron los factores y parámetros que afectan el confort térmico, de manera tal que se pudiera analizar en los resultados la incidencia de cada uno en el ahorro energético. Para todos los escenarios se mantuvieron iguales los valores de la temperatura ambiente y la temperatura exterior. Las simulaciones se hicieron específicamente para el día 2 de abril del 2012 completo y 16 horas del día 3 de abril (estación de verano en Cuba) y el MPC trabaja en tiempos de 24 horas con muestreo cada una hora, lo que es suficiente para calcular la temperatura de referencia para las habitaciones. Se encuentra en correspondencia con el método empleado de Series de Tiempo Radiante (RTS).

4.1 Escenario #1

En este escenario (Tabla 8) se varía la velocidad del aire y el factor de contacto visual y se mantienen constantes los siguientes parámetros: $F_{adap}=0.25$; $P_{mujeres}=65$; $E_{dad}=55$; $clo=0.95$; $met=1.5$; $M=65$; $h=1.70$; $t=210$; $F_{exp}=0$.

Tabla 8: Influencia de Va y Fcontv en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
Va=0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5 Fcontv=2	783.9711	5.5141	139.2982	5.4966
Va=0.6 Fcontv=2	783.4261	5.5102	139.2160	5.4933
Va=0.7 Fcontv=2	781.9732	5.5000	138.9883	5.4843
Va=0.1 Fcontv=0.25	783.6234	5.5116	139.2468	5.4945
Va=0.2 Fcontv=0.25	782.3173	5.5024	139.0422	5.4865
Va=0.3 Fcontv=0.25	779.2765	5.4810	138.5213	5.4659
Va=0.5 Fcontv=0.25	767.7237	5.3998	136.5633	5.3887
Va=0.6 Fcontv=0.25	758.5456	5.3352	134.9963	5.3268
Va=0.7 Fcontv=0.25	747.4721	5.2574	133.0850	5.2514

Se puede apreciar cómo el factor de contacto visual es determinante en los resultados en comparación con la velocidad del aire. Cuando se tiene un contacto visual ideal, lo que indica 2°C más de tolerancia al ambiente analizado, y la velocidad del aire no excede los 0.5 m/s, se obtendrá un mayor ahorro energético.

Para este escenario se realizó un análisis del ahorro alcanzado en correspondencia con la variación de humedad dada por el modelo empleado como restricción en el controlador predictivo (Figura 11). En la Figura 11 se puede apreciar cómo al aumentar la zona de humedad relativa aumenta también el ahorro y por consiguiente el consumo del sistema de acondicionamiento de aire es menor.

Esta variación de humedad hace que aumente el consumo de otros portadores energéticos como es el caso el agua caliente sanitaria. Es por ello por lo que para alcanzar un valor ideal en el ahorro del inmueble hay que tener en cuenta el

comportamiento de la humedad pues puede llegar a ser fuente de disconfort; es una relación de compromiso.

4.2 Escenario #2

En este caso se varía el porcentaje de mujeres y el factor de contacto visual (Tabla 9) y se mantienen constante el resto de los parámetros igual que en el escenario 1. La velocidad del aire Va se asume igual a 0.4m/s.

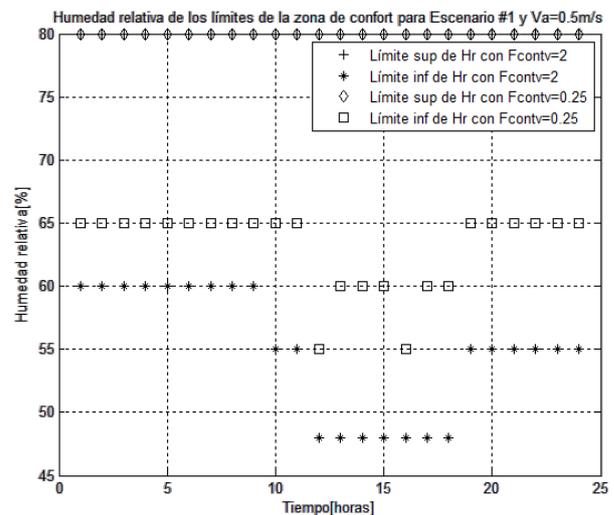


Figura 11: Variación de la humedad relativa en el Escenario #1.

Tabla 9: Influencia de P_mujeres y Fcontv en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
P_mujeres=25 Fcontv=0.25	771.1951	5.4242	137.1461	5.4117
P_mujeres=50 Fcontv=0.25	773.5724	5.4409	137.5456	5.4274
P_mujeres=80 Fcontv=0.25	775.8588	5.4570	137.9306	5.4426
P_mujeres=25; 50; 80 Fcontv=2	783.9711	5.5141	139.2982	5.4966

En este escenario de simulación 2 sucede lo mismo con el factor de contacto visual, pues al ser el ideal, independientemente del porcentaje de mujeres presente, se obtienen los mejores resultados, 2°C más de tolerancia al ambiente.

Para este caso no existe un límite del porcentaje de mujeres como en el caso de la velocidad del aire, pero a medida que aumenta dicho porcentaje los resultados en cuanto al ahorro mejoran. Esto se debe a que como las mujeres poseen una menor capacidad para la adaptación al ambiente térmico, ya que tienen una menor capacidad cardiovascular, y la temperatura de su piel, la capacidad evaporativa y su metabolismo son ligeramente inferiores a los hombres, se consideró en el modelo que la temperatura preferida por las mujeres sea de medio grado centígrado superior a la preferida por hombres. Es por ello por lo que este aumento es proporcional con la zona de confort y por consiguiente con el ahorro energético.

4.3 Escenario #3

Para este escenario (Tabla 10) se varía el factor de actividad metabólica, el factor de contacto visual y la edad. Se mantienen constantes el resto de los parámetros igual que el escenario 2 con un $P_{mujeres}=65$.

Tabla 10: Influencia de met, edad y Fcontv en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
met=0.9 Fcontv=0.25 Edad=55	775.4677	5.4543	137.8638	5.4400
met=1 Fcontv=0.25 Edad=55	775.3593	5.4535	137.8454	5.4392
met=1.25 Fcontv=0.25 Edad=55	775.0794	5.4515	137.7980	5.4374
met=0.9; 1; 1.25; 1.5 Edad=70 Fcontv=2	783.9711	5.5141	139.2982	5.4966

Como se puede apreciar en dicha tabla, ni la actividad metabólica ni la edad tienen influencia en el rango de temperaturas de confort. y por consiguiente en el ahorro energético cuando el contacto visual sigue siendo el ideal, enmascarándose su incidencia.

En las simulaciones donde el factor de contacto visual es menor se aprecia cómo, para una misma temperatura, a medida que aumenta la actividad metabólica (*met*), los resultados se ven ligeramente afectados. Esto es producto de que al mantenerse constantes ciertos parámetros como: el coeficiente de aislamiento de la ropa (*clo*), la masa corporal (*M*) y la altura del individuo (*h*), para una misma temperatura, al aumentar el *met*, el F_{clomet} , que tiene en cuenta estos aspectos y que se resta al modelo de la zona de confort, también aumenta, lo que produce que las temperaturas límites de confort disminuyan.

4.4 Escenario #4

Para estas simulaciones (Tabla 11) se varía la masa corporal, el factor de contacto visual y la edad, manteniéndose constante el resto de los parámetros en los mismos valores anteriores.

Tabla 11: Influencia de M, edad y Fcontv en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
M=40 Fcontv=0.25 Edad=55	775.1099	5.4517	137.8032	5.4376
M=50 Fcontv=0.25 Edad=55	774.9642	5.4507	137.7788	5.4366
M=80 Fcontv=0.25 Edad=55	774.6113	5.4482	137.7196	5.4343
M=40; 50; 80 Fcontv=2 Edad=70	783.9711	5.5141	139.2982	5.4966

En la Tabla 11 se puede apreciar que la incidencia de la masa corporal y la edad en los ahorros representados, no se logra diferenciar cuando el contacto visual sigue siendo el ideal. En este escenario es donde se alcanzan los mejores

resultados. Con un F_{contv} menor, a medida que aumente *M* el factor de constitución corporal también aumenta y por consiguiente, al igual que el escenario 3, el F_{clomet} también aumenta, lo que afecta igualmente la zona de confort y el ahorro.

4.5 Escenario #5

En los escenarios anteriores se trabajó con un contacto visual ideal. En el escenario # 5 (Tabla 12) se varía este factor y se mantienen constante el resto de los parámetros con una edad de 55 años.

Tabla 12: Influencia del Fcontv en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
Fcontv=0	770.1793	5.4171	136.9760	5.4049
Fcontv=0.5	777.9586	5.4718	138.2933	5.4569
Fcontv=0.75	780.6263	5.4905	138.7524	5.4750
Fcontv=1	782.4196	5.5032	139.0584	5.4871
Fcontv=1.5	783.8935	5.5135	139.2868	5.4961
Fcontv=2	783.9711	5.5141	139.2982	5.4966

Del análisis de la Tabla 12 se puede concluir que con un contacto visual que permita el mayor grado de tolerancia al ambiente estudiado se pueden obtener los mejores resultados de ahorro potencial, siendo el aumento de este directamente proporcional al ahorro representado.

4.6 Escenario #6

Aquí se decidió variar el factor de adaptabilidad (Tabla 13) y mantener constantes los siguientes parámetros con un $F_{contv}=0.25$.

Tabla 13: Influencia de Fadap en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
Fadap=0.5	777.9586	5.4718	138.2933	5.4569
Fadap=0.75	780.6263	5.4905	138.7524	5.4750

De los dos valores con los que se trabajó en este escenario, el mayor fue el que arrojó los mejores resultados, lo que es correcto pues en este caso el usuario tendría más posibilidad de adaptación al espacio, y la temperatura de confort en el interior de la habitación no se vería tan afectada (ligeramente inferior a la del escenario 1, ver Figura 15) por lo que el consumo del compresor sería menor.

En este caso no se simuló con un contacto visual ideal, pero estableciendo una comparación con el escenario 5 se puede observar cómo ambos parámetros son equivalentes lo que permite reafirmar que cuando la adaptación al espacio analizado es mayor, mayor será la tolerancia a dicho ambiente. Cabe resaltar que el mejor resultado en este escenario es menor en comparación con los obtenidos previamente en (Acosta et al., 2016).

4.7 Escenario #7

En este escenario (Tabla 14) se varía la edad y el factor de contacto visual, permaneciendo constante el resto de los parámetros.

Tabla 14: Influencia de la edad y Fcontv en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
Edad=25 Fcontv=0.25	757.8910	5.3306	134.8836	5.3224
Edad=40 Fcontv=0.25	767.4685	5.3980	136.5203	5.3870
Edad=50 Fcontv=0.25	772.6765	5.4346	137.3946	5.4215
Edad=70 Fcontv=0.25	779.4024	5.4819	138.5431	5.4668
Edad=25 Fcontv=2	783.3813	5.5099	139.2095	5.4931
Edad=40; 50; 70 Fcontv=2	783.9711	5.5141	139.2982	5.4966

En este escenario se aprecia cómo el contacto visual también es determinante, pero en este caso en comparación con la edad. Al igual que como ocurría en el primer escenario con la velocidad, en este existe también una diferencia con las edades, pues como se puede apreciar para un mismo contacto visual (Fcontv=2) los resultados no son iguales para una persona de 25 años que para las que son mayores de 40. Esto se debe a que conforme avance la edad se reduce el metabolismo de la persona teniendo como una de sus consecuencias la reducción en la producción de calor (Chávez, 2002) y este factor se insertó en el modelo obtenido utilizando como referencia el desarrollado por (Olgay, 1998) que es de 1°C más de preferencia de la temperatura del ambiente para las personas mayores de 40 años (extrapolando esta referencia a las edades de 0 a 100 años). Es por ello por lo que los mejores resultados se alcanzan para estas edades pues se aumenta la zona de confort.

4.8 Escenario #8

En este caso (Tabla 15) se varía el coeficiente de aislamiento térmico de la ropa, la edad y nuevamente el factor de contacto visual.

Tabla 15: Influencia de la edad, el clo y Fcontv en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
clo=0.5 Fcontv=0.25 Edad=55	775.4026	5.4538	137.8527	5.4395
clo=1.35 Fcontv=0.25 Edad=55	774.2164	5.4455	137.6530	5.4317
clo=1.5 Fcontv=0.25 Edad=55	773.9837	5.4438	137.6142	5.4301
clo=0.5; 1.35; 1.7; 1.5 Fcontv=2 Edad=70	783.9711	5.5141	139.2982	5.4966

Como se aprecia en la tabla 15, al igual que en el escenario 3 y 4, la incidencia del clo también se enmascara al trabajar con un factor de contacto visual ideal que permite alcanzar el mayor ahorro energético en este caso.

En las simulaciones donde el factor de contacto visual es menor se aprecia cómo, a medida que aumenta el coeficiente de aislamiento de la ropa (lo que implica que la persona tiene el cuerpo más cubierto), los resultados se ven más afectados. Esto es producto de que al mantenerse constante ciertos parámetros como: la actividad metabólica (*met*), la masa corporal (*M*) y la altura del individuo (*h*), para una misma temperatura, al aumentar el clo el F_{clomet} también aumenta, lo que produce una reducción en la zona de confort y en el ahorro representado.

4.9 Escenario #9

En este último escenario (Tabla 16) se modificó la altura del individuo (*h*) y se mantuvo constante el resto de los parámetros igual que en los escenarios anteriores. Se trabajó con un Fcontv=0.25, una edad de 55 años y un met=1.25.

Tabla 16: Influencia de la altura en el ahorro energético

Escenarios	Ahorro kWh	Ahorro kWh relativo %	Ahorro \$	Ahorro \$ relativo %
(Acosta et al, 2016)	781.7097	5.4982	138.9791	5.4840
h=1	775.5198	5.4546	137.8727	5.4403
h=1.25	775.3591	5.4535	137.8454	5.4392
h=1.5	775.2022	5.4524	137.8188	5.4382
h=2	774.8908	5.4502	137.7664	5.4361

En este escenario sucede lo mismo que en el escenario anterior, en el 3 y en el 4, que a medida que aumenta la altura los ahorros disminuyen. En este caso se mantiene constante el resto de los parámetros excepto *h*, que aumenta, lo que hace que el F_{clomet} aumente y haya una reducción en la zona de confort. El mejor resultado alcanzado no supera los obtenidos en (Acosta, 2015), (Acosta et al., 2016).

En la Figura 12 se puede apreciar el ahorro potencial que se pudiera alcanzar si la estrategia del controlador fuera implementada en tiempo real con los parámetros que arrojaron mejores resultados en todos los escenarios exceptuando el escenario 6.

El comportamiento de las temperaturas óptimas en el interior de las habitaciones, del agua fría y del aire exterior puede observarse en la Figura 13.

En las Figuras 14 y 15 se hace una comparación de los mejores resultados del escenario 1 con los del escenario 6. La diferencia del consumo, como se aprecia también en la tabla, es mínima.

La temperatura interior de las habitaciones, como se puede apreciar en las Figuras 13 y 15, no supera los límites indicados en la norma cubana de 24±2°C (NC: 220-3, 2009).

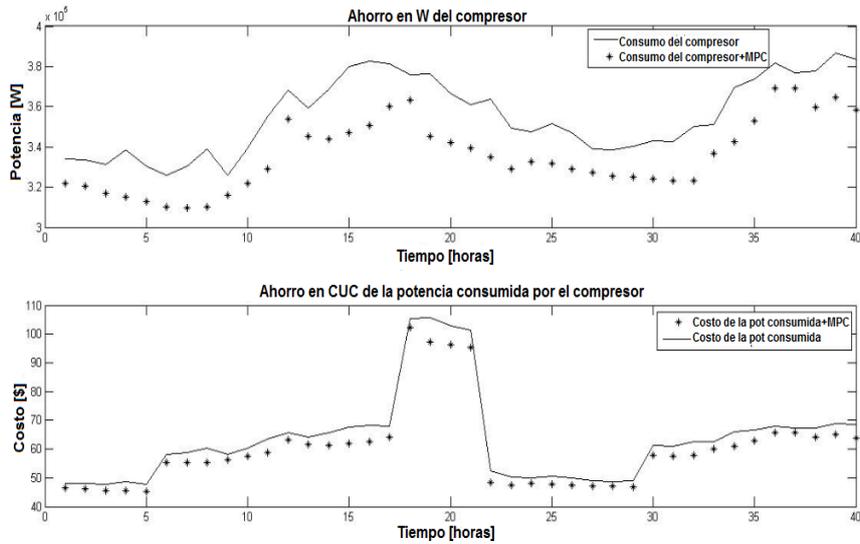


Figura 12: Ahorro potencial del controlador predictivo para los días 2 y 3 de abril del 2012.

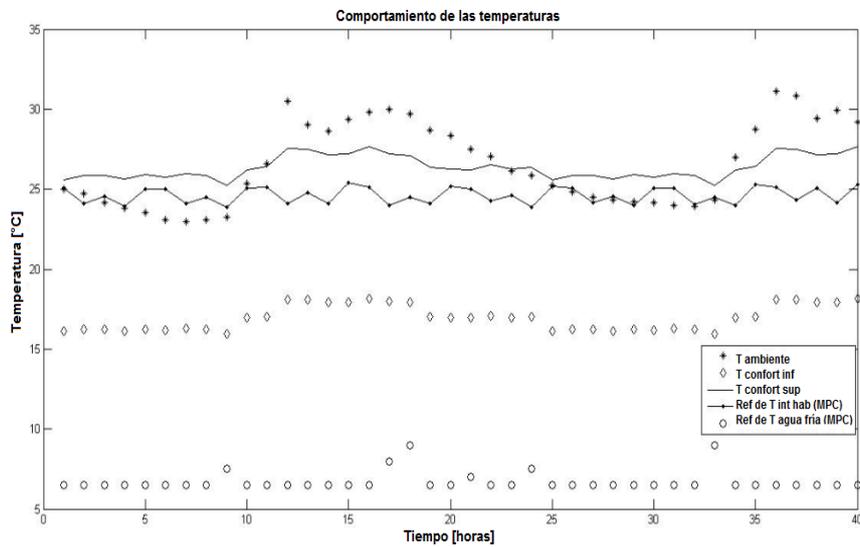


Figura 13: Variables de entrada al sistema para los días 2 y 3 de abril del 2012.

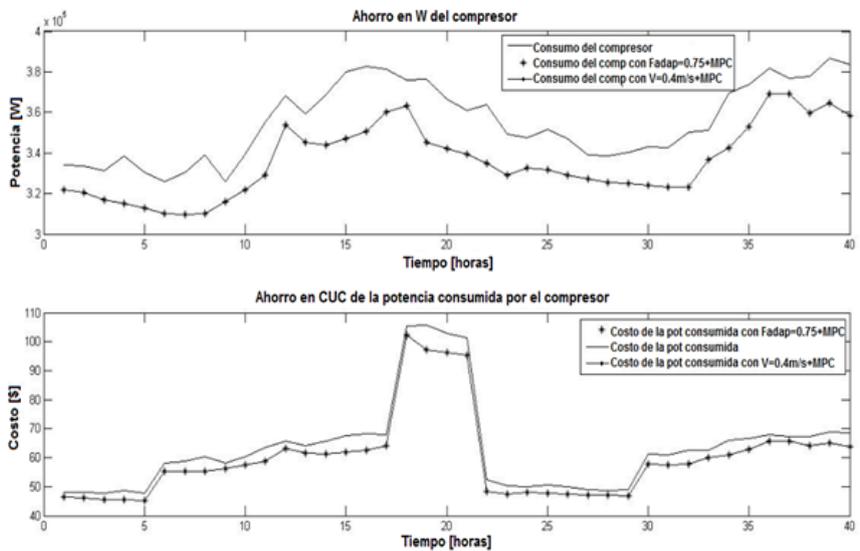


Figura 14: Comparación del ahorro potencial del controlador predictivo para los días 2 y 3 de abril del 2012. Escenarios 1 y 6.

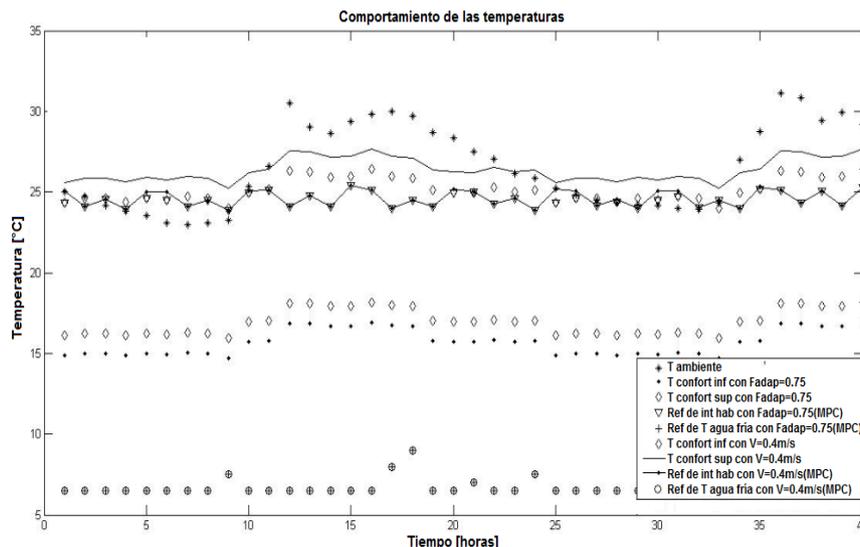


Figura 15: Comparación de las variables de entrada al sistema para los días 2 y 3 de abril del 2012. Escenarios 1 y 6.

5. Conclusiones

En el modelo presentado se integran los parámetros y factores ambientales y personales que se ha considerado que tienen una influencia importante en la configuración del ambiente y del confort térmico.

Para cada una de las variables se han asignado diferentes valores, parte de los cuales fueron adoptados por considerar que eran los mejores que reflejaban la realidad. Dichos valores tendrán que comprobarse y ajustarse en estudios posteriores para lograr una fiabilidad más alta de este modelo de confort térmico.

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.

Con los resultados obtenidos en cada escenario se demuestra cómo los factores y parámetros que afectan directamente a los intercambios de energía del cuerpo humano y al confort térmico influyen en la zona de temperaturas de confort. Al emplear, no solo la temperatura neutral como sucede en (Acosta *et al.*, 2016), sino todas estas variables en una de las restricciones del MPC, se logran mejores resultados lo que permite un mayor ahorro energético y por consiguiente económico en comparación con el trabajo presentado en (Acosta *et al.*, 2016) para cada escenario presentado.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del personal de la instalación hotelera que facilitó tanto las mediciones en las habitaciones como los registros históricos de consumo energético.

El cuarto autor agradece el apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades/FEDER a través del proyecto PGC2018-099312-B-C31; asimismo el apoyo de la Junta de Castilla y León y EU-FEDER (CLU 2017-09).

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. DOI:10.1016/j.riai.2011.09.001.
- Acosta C. A., 2015. "Control Predictivo No Lineal aplicado a la Gestión Energética del Sistema de Climatización Centralizada de las habitaciones de un Inmueble Hotelero", Tesis Doctoral. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba.
- Acosta C. A., González A. I., Zamarreño J.M. and Castelló V., 2015. "Controlador Predictivo No Lineal para la Gestión Energética del Sistema Centralizado de Aire Acondicionado de un Inmueble Hotelero". Revista Iberoamericana de Automática e Informática 12, 376-384. DOI: 10.1016/j.riai.2015.07.003.
- Acosta C. A., González A. I., Zamarreño J.M. and Castelló V., 2016. "Energy savings and guaranteed thermal comfort in hotel rooms through nonlinear model predictive controllers". Energy and Buildings 129, 59-68. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.07.061.
- ASHRAE, 2017. ASHRAE Handbook. Chapter 9, "Thermal Comfort". ASHRAE Handbook Editor.
- Atthajariyakul S., Leephakpreeda T., 2005. "Neural computing thermal comfort index for HVAC systems". Energy Conversion and Management 46 (15-16), 2553-2565. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.12.007.
- Auliciems A., Szokolay S. V., 2007. "Thermal Comfort". 2nd ed, Passive and Low Energy Architecture International in association (PLEA), Queensland, 66p.
- Bogdan M., Walther E., 2017. "Comfort modelling in semi-outdoor spaces". REHVA 54 (1), 23-25. Sitio web: www.rehva.eu.
- Caballero J. A. y Grossmann I. E., 2007. "Una revisión del estado del arte en optimización". Revista Iberoamericana de Automática e Informática. <http://www.revista-riai.org>. España, vol. 4, No. 1, pp. 5-23. ISSN: 1697-7912.
- 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.

- Chávez F.J., 2002. "Zona Variable de Confort Térmico", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Sitio web: <https://www.tesisenred.net>.
- Da Silva C. F., Freire R. Z. and Mendes N., 2018. "Optimization Applied to Energy Efficiency and Thermal Comfort of Buildings: Bibliometric Analysis on Techniques and Applications". *Thermal Engineering* 17 (2), 20-27.
- Deb CH., Alur R., 2010. "The significance of Physiological Equivalent Temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies". *International Journal of Engineering Science and Technology* 2(7), 2825-2828.
- Díaz J., Vuelvas J., Ruiz F., Patiño D., 2019. "A Set-Membership approach to short-term electric load forecasting". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 16(4):467-479.
- Florez F., Fernández P., Higón J.L., Olivar G. and Taborda J., 2019. "Modeling, Simulation, and Temperature Control of a Thermal Zone with Sliding Modes Strategy". *Mathematics* 7 (503), 1-13. DOI: 10.3390/math7060503. Sitio web: www.mdpi.com/journal/mathematics.
- 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.
- ISO 7730, 2005. "Ergonomics of the thermal environment- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria". INTERNATIONAL STANDARD. Sitio web: www.iso.org.
- Joodaki H., Tahmasbizadeh H., 2018. "The Impact of Climate on Ecological Design of Semnan City in Iran". *Open Journal of Ecology* 8, 1-14. DOI: 10.4236/oje.2018.81001.
- Keblawi, A., Ghaddar N., Ghali K., 2011. "Model-based optimal supervisory control of chilled ceiling displacement ventilation system". *Energy and Buildings* 43, 1359-1370.
- Kotsopoulos S. D., Casalegno F., Cuenin A., 2013. "Personalizing Thermal Comfort in a Prototype Indoor Space". *SIMUL: The Fifth International Conference on Advances in System Simulation*, 178-186.
- Lingua C., Becchio C., Bottero M. C., Corgnati S. P., Dell Anna F. and Fabi V., 2019. "Energy and Economic Evaluation of Thermal Comfort. The Case Study of the Hotel Residence L'Orologio". 16th IBPSA International Conference and Exhibition; Roma; Italy, 2507-2514. DOI: 10.26868/25222708.2019.210687.
- 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.
- MathWorks, 2013. MATLAB® 8.1.0.604 (R2013a). Ayuda de la herramienta de simulación.
- Menyhárt J., Kalmár F., 2019. "Investigation of Thermal Comfort Responses with Fuzzy Logic". *Energies* 12(1792), 1-13. DOI: 10.3390/en12091792.
- NC: 220-3, 2009. "Edificaciones-Requisitos de diseño para la eficiencia energética-Parte 3: Sistemas y equipamiento de calefacción, ventilación, y aire acondicionado". Oficina Nacional de Normalización (NC). Sitio web: www.nc.cubaindustria.cu. 2009.
- Nishi Y., Gagge A. P., 1977. "Effective Temperature Scale Useful for Hypo- and Hyperbaric Environments". *Aviation Space and Environmental Medicine* 48(2), 97-107.
- Olgyay, V., 1998. "Arquitectura y Clima. Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas". Ed. Gustavo Gili SL, Barcelona, 216 p. ISBN: 978-84-252-1488-2.
- Ramírez, P., Gregori, E., Comas, S., Castejón E. and Bartolomé E., 1999. "Ergonomía 2, Confort y Estrés Térmico". Tercera Edición, Ediciones UPC, Barcelona, ISBN: 84-8301-318-5. Sitio web: www.edicionsupc.es.
- Reza M., Bagherzadeh A., Tavousi T., 2013. Assessment of bioclimatic comfort conditions based on Physiologically Equivalent Temperature (PET) using the Raman Model in Iran. *Central European Journal of Geosciences* 5(1), 53-60.
- Rijal H., Humphreys M. A., Nicol J. F., 2016. "Towards an adaptive model for thermal comfort in Japanese offices" 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant, Windsor, UK, 228-242.
- Rubin A., 1982. "Thermal Comfort in Passive Solar Buildings -- An Annotated Bibliography". NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, Washington. Sitio web: <https://www.govinfo.gov/app>.
- Sabri M., Ahmad S., Hagishima A., Sukri M., 2015. "Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in university offices with cooling and free running modes". *International Joint Conference SENVAR-INTA-AVAN 2015*, Johor; Malasia, 43-52.
- Salsbury 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.
- Tiwari R., Pandey M., Sharma A., 2010. "An Approach to Human Adaptability towards its Built Environment: A Review". *Energy and Power Engineering* 2, 90-94. DOI:10.4236/epe.2010.22013.
- Valdivia Y., Álvarez M., Gómez J., Hens L. and Vandecasteele C., 2019. "Sanitary hot water production from heat recovery in hotel buildings in Cuba". *Ingeniería Energética* 40 (3), 234-244. Sitio web: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>
- 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.
- Zhai D. 2019. "Modeling and optimization of ACMV Systems for Energy Efficient Smart Buildings". Tesis Doctoral, Nanyang Technological University, School of Electrical and Electronic Engineering, Singapore.