

Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado

Design of a controller for refrigeration systems applying a simplified thermal comfort index

ALEJO-CHAN, Francisco Javier†*, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain

Universidad Autónoma del Carmen. Facultad de Ingeniería y Tecnología

ID 1^{er} Autor: *Francisco Javier, Alejo-Chan* / ORC ID: 0000-0003-0117-4005, Researcher ID Thomson: AAO-9227-2020, CVU CONACYT ID: 919878

ID 1^{er} Coautor: *Sósimo Emmanuel, Díaz-Méndez* / ORC ID: 0000-0003-1087-4193, Researcher ID Thomson: H-4671-2019

ID 2^{do} Coautor: *Hussain, Alazki* / ORC ID: 0000-0002-1960-3624, Researcher ID Thomson: M-1706-2017

DOI: 10.35429/JID.2020.10.4.30.40

Recibido 23 de Marzo, 2020; Aceptado 12 de Junio, 2020

Resumen

En este trabajo el objetivo es estudiar un índice de confort térmico simplificado y aplicar a un modelo de un edificio con sistema de refrigeración con la finalidad de comprobar si este índice de confort simplificado funciona como un sustituto al índice estandarizado que se encuentra indicado en normas internacionales y conlleve a la disminución en el uso de seis variables de entrada a solo dos lo que presentaría una reducción en la cantidad de instrumentos de medición a utilizar en aplicaciones reales. Esta aplicación presenta un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) para calcular la temperatura que satisfaga las condiciones para que dentro del edificio se mantenga un ambiente confortable siguiendo las escalas de los índices de confort. Se requiere realizar comparaciones de temperaturas, escalas de confort térmico y porcentaje de personas insatisfechas en ambos modelos para así obtener una validación. La programación de los modelos matemáticos del edificio como de los índices de confort térmicos simplificado y estándar se planea demostrar en base a diagramas de bloques mediante el software Matlab® en su plataforma de Simulink.

Confort térmico, Control PID, PMV

Abstract

This work, the objective is to study a simplified thermal comfort index and apply it to a model of a building with a cooling system in order to check if this simplified comfort index works as a substitute for the standardized index that is indicated in international standards and lead to the decrease in the use of six input variables to only two, which would present a reduction in the number of measuring instruments to be used in real applications. This application presents a Derivative Integral Proportional Controller (PID) to calculate the temperature that satisfies the conditions so that inside the building a comfortable environment is maintained following the scales of the comfort indices. Comparisons of temperatures, thermal comfort scales and percentage of dissatisfied people in both models are required to obtain a validation. The programming of the building's mathematical models as of the simplified and standard thermal comfort indices is planned to demonstrate based on block diagrams using the software Matlab® on its Simulink platform.

Thermal Comfort, PID Control, PMV

Citación: ALEJO-CHAN, Francisco Javier, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain. Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado. Revista del Diseño Innovativo. 2020, 4.10: 30.40

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: 090024@mail.unacar.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El estudio del confort térmico es una tarea compleja debido en como los humanos perciben su ambiente y manejan sus condiciones, incluyendo tanto aspectos psicológicos o fisiológicos, pasando por características del ambiente. Existen investigaciones (Kolic, Line, & Akbar Berry, 2017) sobre como las emociones de las personas podrían ser afectadas por el entorno térmico en que se encuentran, pero también influyen otras sensaciones al igual de preferencias de cada individuo.

Ahora bien, el confort térmico no es la única sensación que debe tenerse en cuenta, también influye el confort visual, confort acústico y la calidad del aire para obtener una adecuada calidad en la vida de las personas (2014). El ruido está considerado como uno de los mayores contaminantes del mundo, lo que afecta gradualmente a la salud física y mental de las personas. Además, el ruido está posiblemente relacionado con influir en la sensación térmica y percepción de temperaturas (Pellerin, 2004), aunque no todos los estudios están de acuerdo. En lo que respecta al confort visual, la mala distribución o exceso de iluminación en interiores son parte del problema que con lleva insatisfacción, además al ser generadores de calor, esta influye en las sensaciones térmicas de los ocupantes, así como fatiga visual provocados por estancias prolongados.

El estrés por calor térmico es la causa de muchos trastornos ocupacionales que interrumpen el desempeño del trabajador y la calidad del trabajo e incluso proporcionando la muerte (Zare, Bodin, Cercier, Brunet, & Roquelaure, 2015). El confort térmico tiene un factor de gran importancia en la construcción de edificios con el objetivo de crear ambientes cómodos y agradables que ayude en la salud de los ocupantes. Para ello con el invento de del aire acondicionado se hizo posible la regulación de la temperatura en los interiores y con independencia de las condiciones externas.

Actualmente los sistemas de aires acondicionados son importantes para la satisfacción y comodidad de las personas dentro de edificios, esto debido a que las personas se pasan entre un 80% a 90% su tiempo en estos lugares (U.S Department of Labor, 2012–13)

Pero provocando que el consumo energético total de un edificio sea un 30 a 40 % del consumo total de los edificios (Energy, 2017). Lo ha llevado que la principal preocupación sea el reducir el consumo de energía sin la necesidad de dejar de usar sistemas de aires acondicionados.

Por otro lado, en años recientes se ha tomado seriedad sobre los efectos de comodidad y salud de las personas que son provocados a raíz del ambiente interior en diferentes campos de aplicación.

Para ello, en los estándares internacionales ASHRAE-55 (ASHRAE, 2013) e ISO 7730 (ISO, 2005) se proporcionan especificaciones para lograr un ambiente de conformidad en interiores de edificio donde además especifica un modelo para calcular el estado de confort térmico denominado como índice PMV (Voto Medio Predicho).

La norma ASHRAE-55 específica con precisión, las combinaciones de los factores humanos o personales y de las condiciones térmico-ambientales más adecuadas con la tarea de satisfacer el sentir de los ocupantes de un lugar cerrado. Mientras que la norma ISO 7730 proporciona métodos para predecir la sensación de confort térmica y el grado de insatisfacción de las personas presente en ambientes térmicos tolerantes. Permite determinar analíticamente e interpretar el confort térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas), dando las condiciones ambientales consideradas aceptables para el confort térmico general, así como aquellas que representan molestias locales.

El modelo PMV-PPD fue desarrollado por P.O. Fanger en 1972 (P.O., 1972).

En el modelo de Fanger (P.O., 1972), el índice PMV es calculado a partir de seis variables: temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire, humedad del aire, actividad personal y aislamiento de la ropa. En el cual se muestra en una escala de siete niveles. Actualmente el modelo PMV-PPD se usa como el principal modelo de confort térmico en los estándares ASHRAE-55 e ISO 7730.

Desde entonces se han desarrollado diversos estudios y métodos para estandarizar e incluso mejorar el confort térmico en interiores dando a su vez una mejor respuesta a las exigencias de las personas resultando en una mejora en la calidad de vida.

Aires acondicionados convencionales con sistema de control.

En la actualidad la mayoría de los edificios utilizan un único sistema de aires acondicionados convencionales, generalmente son controlador mediante controladores ON/OFF donde su principal problema es no tomar en cuenta el ahorro de energía, así como inconvenientes debido al accionamiento continuo de sus actuadores como el compresor y ventiladores, además de presentar pobre regulación a cambios de temperaturas (Federspiel & Asada, 1992). A medida del avance en los sistemas de aires acondicionados, se han implementado mejores controladores que cumpliera con temperaturas constantes en menor tiempo y de manera estable.

El controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) es el más implementado en los sistemas de climatización; 97% de los controladores en aplicaciones industriales utilizan la metodología PID de los cuales basan su funcionamiento en la regulación de la velocidad del ventilador del aire acondicionado y la velocidad del flujo del vapor de agua (Mohammed, Mohammed, & Jabbar, 2018). Posteriormente se han aplicado técnicas de control inteligentes y robustas en los sistemas de aires acondicionados convencionales.

Aires acondicionados convencionales con sistema de control y aplicación de índices de confort térmico (PMV-PPD).

Los índices de confort térmico como el PMV en el control de los sistemas de aires acondicionados son de gran estudio para el trato del confort en los ocupantes de edificios. Por ejemplo, Hamdi (1998) propuso una estrategia de control de un Sistema HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado) implementando lógica difusa, aplicando el índice PMV de seis variables para obtener un ambiente de confort térmico interior constante y utilizando simulaciones numéricas.

Bermejo (2012), propone un nuevo sistema capaz de adaptarse a las preferencias térmicas del usuario y medir su nivel de comodidad al agregar parámetros térmicos en el índice térmico PMV en un conjunto con reglas difusas. Castilla (2014), presenta una arquitectura de control predictivo no lineal multivariable que permite de forma simultánea mantener el confort térmico y la calidad de aire mediante el uso de técnicas de ventilación natural y forzada. Se presenta en (Vázquez, 2018) una herramienta educativa interactiva diseñada para el aprendizaje de conceptos de confort térmico.

La herramienta desarrollada permite la definición del modelo térmico de una casa. En base a este modelo, el confort térmico se estima mediante PMV-PPD. También aborda una estrategia de control simple que se puede aplicar a los sistemas convencionales de HVAC. La herramienta está disponible para estudiantes de grado en ingeniería de control. Valladares (2019), propone un algoritmo de inteligencia artificial entrenado con 10 años de experiencias pasadas para mantenga el confort térmico y la calidad del aire dentro de los niveles óptimos mientras consume la menor cantidad de energía de las unidades de aire acondicionado y ventiladores.

Aires acondicionados convencionales con aplicación de índices de confort térmico simplificado (PMV-PPD).

Se analizan las principales variables de PMV y se simplifican los parámetros para implementar el modelo sin incurrir en costos adicionales o instalar equipos como sensores. Además, se compara el control simplificado de PMV con un control basado en la temperatura ambiente. El control simplificado de PMV proporciona un 7.0% más de confort térmico y un 5.6% más de reducción de energía que los logrados por el control de temperatura ambiente (Hana, Lee, JonghunKim, Jang, & Jeong, 2014).

Una metodología aplicada (Morgado, MárioTalaia, & LeonorTeixeira, 2017), utiliza una escala de color con el índice EsConTer demostró ser un método interesante para estudiar fácilmente los entornos térmicos y predecir el confort térmico de un espacio interior por la cual propone ser un nuevo modelo simplificado para la evaluación del riesgo de estrés térmico.

Con el objetivo de minimizar las investigaciones que requieran mucho tiempo para identificar problemas de confort térmico en los lugares de trabajo.

A pesar de estas investigaciones desarrollados, la mayoría en ambientes experimentales, hoy en día se tiene el problema de que comercialmente los sistemas de aires acondicionados no cuentan con una función que base su funcionamiento en conformidad térmica, esto debido a que los métodos existentes como el índice PMV complica su implementación al utilizar instrumentos muy sofisticados para medición de seis variables interiores y por ende resulta muy costoso para colocar en el mercado.

Esto nos lleva a buscar una alternativa para la implementación de dicha función que proporcione los mismos resultados que el índice PMV estandarizado, pero reduciendo recursos. Un modelo simplificado de confort térmico sería una buena opción debido a su simplicidad en el manejo de variables reduciendo a solamente dos y ayudado con una técnica de control, disminuiría considerablemente el número de instrumentos a utilizar y con ello un costo menor.

Modelo matemático de un edificio con sistema de refrigeración

Se utiliza como modelo del sistema una habitación que incorpora una etapa de refrigeración donde se suministra aire para enfriar el interior de la habitación.

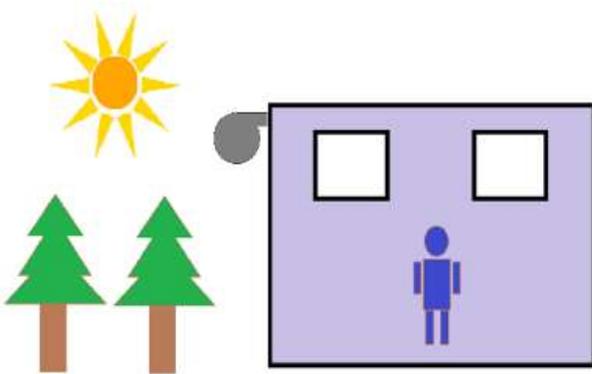


Figura 1 Sistema de una habitación con refrigeración
Fuente: *Elaboración Propia*

Las ecuaciones que modelan al sistema (Bejan, 1995) (Klein, 1967) se muestran a continuación:

La ecuación de balance de masa toma la forma

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (1)$$

donde el término a la izquierda representa el cambio de masa de aire dentro de la habitación, que es el volumen de control en estudio; \dot{m}_{in} representa la masa que llega a la habitación desde el intercambiador de calor; \dot{m}_{out} es la masa que sale de la habitación.

Considerando que la cantidad de flujo de masa de aire que sale y regresa a la habitación es la misma.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad (2)$$

La ecuación (1) queda de la siguiente forma

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = 0 \quad (3)$$

La ecuación de la tasa de equilibrio energético toma la forma

$$\frac{dU_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} \quad (4)$$

El término a la izquierda en la ecuación (4) representa el cambio de la energía interna del aire dentro de la habitación.

\dot{Q} es la tasa de energía transferida del ambiente a la habitación al ambiente; h_{in} representa la entalpia del aire que ingresa a la habitación; y h_{out} representan la entalpia del aire que sale de la habitación. \dot{W} es la tasa de trabajo.

Considerando que no hay tasa de trabajo desarrollado en la habitación.

$$m_{cv} \frac{dU_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} \quad (5)$$

Donde el término m_{cv} representa la masa de aire dentro de la habitación que permanece constante con respecto al tiempo, entonces considerando que el aire en estudio es como un gas ideal con constantes calores específicos.

$$m_{cv}C_v \frac{dT_{room}}{dt} = \dot{Q} + \dot{m}_{in}C_p(T_{in} - T_{room}) \quad (6)$$

La capacidad calorífica específica del aire a presión y volumen constantes son C_p y C_v respectivamente. La ecuación (6) se puede escribir como

$$\frac{dT_{cv}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{m_{cv}C_v} + \frac{\dot{m}_{in}C_p}{m_{cv}C_v}(T_{in} - T_{room}) \quad (7)$$

$$\frac{dT_{room}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{m_{cv}C_v} + \frac{\dot{m}_{in}k}{m_{cv}}(T_{in} - T_{room}) \quad (8)$$

La masa de aire inyectada a la habitación \dot{m}_{in} es una función de T_{room} . La derivada dT_{room}/dt representa la variación de la temperatura con el tiempo dentro del volumen de control; el primer y el segundo término a la derecha en la ecuación (8) son la carga térmica y la energía eliminada por el intercambiador de calor, respectivamente; k es la relación de capacidad calorífica específica entre C_p y C_v del aire; T_{room} es la temperatura del aire del edificio.

Modelo del índice de confort térmico PMV-PPD

El confort térmico está definido por el estándar estadounidense ASHRAE-55 como la condición mental que demuestra una agradable sensación con el ambiente térmico.

El trabajo Fanger relaciona la sensación térmica con la existencia de equilibrio térmico observando en una cantidad de personas dentro de un espacio cerrado.

El método de Fanger predice el confort térmico sobre una base de un conjunto de parámetros y ecuaciones empíricas del calor transferido entre el cuerpo humano y el medio ambiente.

Este análisis tiene como resultado un índice que predice la escala de sensación térmica. Al índice se le denomina Voto Medio Previsto (PMV), donde actualmente es el más utilizado en los estándares internacionales para medir los niveles de confort dentro de los edificios y los representa en una escala de siete niveles como se puede apreciar en la tabla 1, que consiste en los valores de -3 (mucho frío) a 3 (mucho calor).

PMV	Sensación térmica
+3	Mucho calor
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutro
-1	Ligeramente frío
-2	Frío
-3	Muy frío

Tabla 1 Escala de Sensación Térmica
Fuente: (ISO,2005)

En la metodología de Fanger se tiene presente el uso de seis variables: el nivel de actividad o metabolismo (M_{et}), aislamiento térmico de la ropa (I_{cl}), la temperatura del aire (T_a), la humedad relativa (R_h), la velocidad del aire (v) y la temperatura radiante media (T_{mr}).

Agregando a la figura 1, las respectivas seis variables del modelo de confort PMV, queda representado de la siguiente manera en la figura 2.

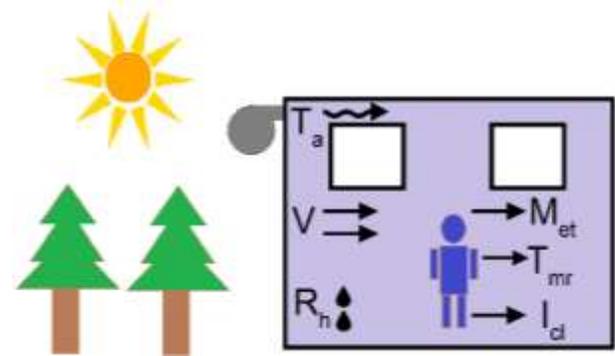


Figura 2 Sistema de refrigeración de una habitación con representación de variables del índice PMV
Fuente: Elaboración Propia

Para el cálculo del índice PMV se utiliza las siguientes ecuaciones (Croitoru, 2015) (Vázquez, 2018) :

$$PMV = (0.325e^{-0.042M_{et}} + 0.028)L \quad (9)$$

$$L = (M_{et} - W) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & - 0.0014M_{et}(34 - T_a) \\ & - 3.05 \\ & \times 10^{-3}[5733 \\ & - 6.99(M_{et} - W)P_{ain}] \\ & - 0.42(M_{et} - W \\ & - 58.15) - 1.72 \\ & \times 10^{-5}M_{et}(5867 \\ & - P_{ain}) - 3.96 \\ & \times 10^{-8}F_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 \\ & - (T_{mr} + 273)^4] \\ & - F_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \end{aligned}$$

Donde L representa la carga térmica en el cuerpo humano (W/m^2); W es el trabajo externo (W/m^2); P_{ain} es la presión parcial de vapor de agua en el aire (P_a); T_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa ($^{\circ}C$); h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/^{\circ}C m^2$); F_{cl} es el factor de área de la ropa.

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M_{et} - W) - 0.1515I_{cl} \times [3.96 \times 10^{-8}F_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mr} + 273)^4] + F_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)] \quad (11)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25}, B \geq 12.1\sqrt{v} \\ 12.1\sqrt{v}, B \leq 12.1\sqrt{v} \end{cases} \quad (12)$$

$$B = 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} \quad (13)$$

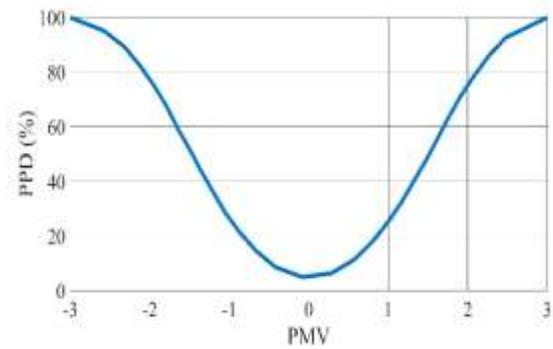
$$F_{cl} = \begin{cases} 1.0 + 0.2I_{cl}, I_{cl} \leq 0.5clo \\ 1.05 + 0.1I_{cl}, I_{cl} > 0.5clo \end{cases} \quad (14)$$

A consecuencia del índice PMV, se presenta otro índice asociado, el cual se le nombra Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD). Este índice establece una predicción cuantitativa del porcentaje de personas térmicamente insatisfechas, lo que quiere decir cuál es porcentaje de personas que siente demasiado frío o demasiado calor. Si el valor del índice PMV se encuentra cercano al neutro, es decir a cero, el porcentaje de personas insatisfechas será aproximadamente de 5%.

La relación de los dos índices PMV y PPD se expresa en la siguiente ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.219PMV^2)] \quad (15)$$

La relación del índice PMV-PPD se puede observar en la gráfica 1.



Grafica 1 PPD en función al índice PMV
Fuente: (ISO,2005)

Modelo del índice de confort térmico PMV Simplificado

Los métodos que existen para evaluación de confort térmico por lo general requieren de equipos de medición especializada que por lo general no son viables para gran parte de las medianas y pequeñas empresas. Uno de estos métodos es un índice simplificado llamado EsConTer, desarrollado por Talaia y Simo (2009). Este índice se presenta en forma de una escala térmica basada en una escala de colores que comprende también a la escala de siete niveles presentada en el índice PMV estándar que establece el estándar ASHARAE-55.

De la cual este índice utiliza la temperatura de aire y la temperatura de bulbo húmedo como entradas de datos, lo que proporciona un valor adimensional en un rango de +3 a -3 siguiendo el mismo esquema de sensación térmica ASHARE-55. La fórmula del índice de confort térmico simplificado EsConTer (Morgado M. T., 2015) (Talaia M. M., 2013) es la siguiente:

$$EsConTer = -3.75 + 0.103(T_a + T_w) \quad (16)$$

Donde T_a ($^{\circ}C$) es la temperatura del aire y T_w ($^{\circ}C$) es la temperatura de bulbo húmedo.

Modificando la figura 2, reemplazando las variables del índice PMV y sustituyéndola por el índice simplificado EsConTer, se muestra en la figura 3.

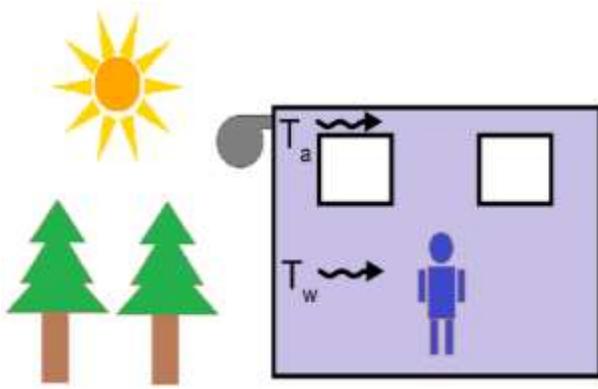


Figura 3 Sistema de refrigeración de una habitación con representación de variables del índice de confort térmico simplificado EsConTer

Fuente: Elaboración Propia

Aplicación de los índices de confort PMV-PPD estándar y simplificado

Se realiza la programación del modelo matemático de una habitación con sistema de refrigeración de la ecuación (7), además de los índices de confort tanto el estándar de la ecuación (9) como el simplificado de la ecuación (15). De igual manera se lleva a cabo el bloque de control, el cual está en función del índice de confort y se encarga de controlar el flujo de aire que entra al edificio para así realizar los cambios de temperatura que requiera para que el índice de confort sea el deseado.

Esta se lleva a cabo en diagramas de bloques del software Matlab®/Simulink. La representación del diagrama de bloque del sistema con el índice de confort estándar se observa en la figura 4.



Figura 4 Diagrama de bloques representando el sistema con el índice de confort térmico estándar de seis variables.

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de la aplicación del índice de confort simplificado, el funcionamiento del controlador es la misma, solo aplica un cambio de variables que interactúan con este índice. La representación se encuentra en la figura 5.

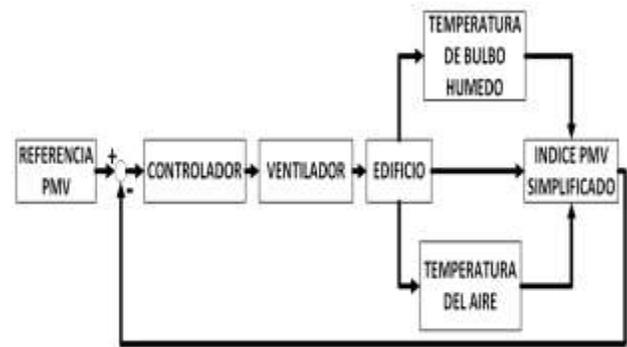


Figura 5 Diagrama de bloques representando el sistema con el índice de confort térmico simplificado

Fuente: Elaboración Propia

Se utiliza una estrategia simple de control clásico PID implementado a la ecuación (7) en conjunto con las ecuaciones de confort (9,15), tomando como entrada una referencia basado en la escala dado por los índices de confort, se ajustan manualmente los parámetros del valor proporcional, integral y derivativo mediante la ecuación característica del controlador PID. Donde K_p es la constante de proporcionalidad, K_i corresponde a la constante de acción integral, K_d es la constante de la acción derivativa, $e(t)$ indica el error y $u(t)$ representa la señal de control.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (17)$$

Con este controlador se espera que reduzca el error entre la referencia de entrada con el valor obtenido de los modelos de confort térmicos, para que así se alcance el valor de referencia PMV deseado en el menor tiempo posible y disminuyendo los sobretiros.

Consideraciones para la simulación

Al tomar como modelo matemático una habitación con sistema de refrigeración expresado en la ecuación (7), se toman las siguientes consideraciones.

- El flujo de tasa de aire, \dot{m}_{in} , que es inyectada al edificio tiene como valor máximo de 20 kg/s.
- La temperatura de la masa de aire inyectada al edificio es de 18 °C.
- La temperatura inicial del aire del edificio es de 30 °C.
- El volumen del edificio es considerado de 56 m³ y la cantidad de masa dentro de esta es de 70 kg.

- Las capacidades de calor específicas del aire, C_p y C_v , son 1.007 kJ/kg K y 0.7179 kJ/kg K.
- Se considera que existe una disipación térmica al medio ambiente \dot{Q} como 3.51 kW h.

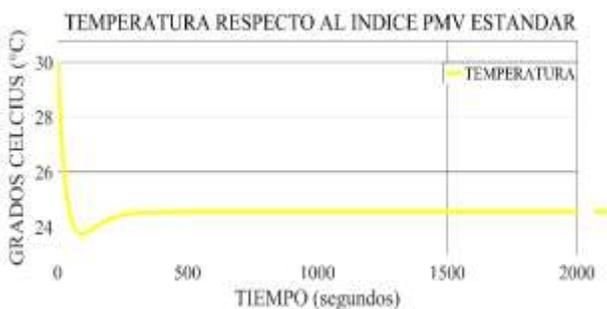
Para simular las condiciones de las variables del modelo de confort PMV estándar de las ecuaciones (9-14) se considera lo siguiente.

- Dado las condiciones típicas de una oficina $T_a = T_{mr}$
- La velocidad del aire se toma, $v = 0.15$ m/s .
- Se considera un porcentaje de humedad relativa, $R_h = 50\%$.
- Aislamiento térmico típico de un traje de negocios, $I_{cl} = 1.0$ clo
- Rango metabólico de una persona en estado de reposo, $M_{et} = 1.2$

Mientras que el índice de confort térmico simplificado solo toma dos variables, la temperatura del aire (T_a) en el interior del edificio y la temperatura de bulbo húmedo $T_w = 12$ °C aproximadamente.

Resultados de las simulaciones

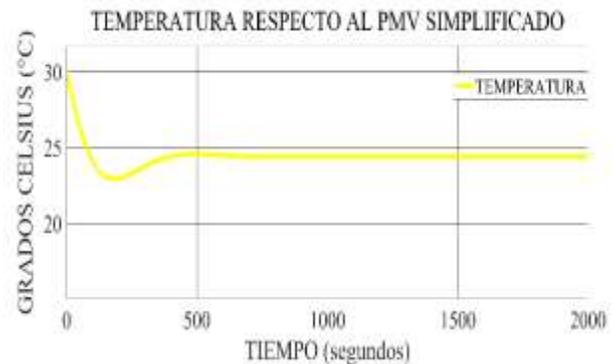
Para las simulaciones se toma como valor de referencia el valor neutro de la escala PMV el cual es cero. Los resultados se obtuvieron con los mismos valores de PID para ambos sistemas de confort el cual da parte para realizar comparaciones entre los dos índices. Los valores de PID utilizados son los siguientes, proporcional en 500, integrador en 5.5 y derivador en 10. La grafica 2 muestra el resultado de la temperatura del edificio calculado por el modelo de confort térmico estándar.



Grafica 2 Temperatura proporcionado por el índice PMV estándar

Fuente: Elaboración Propia

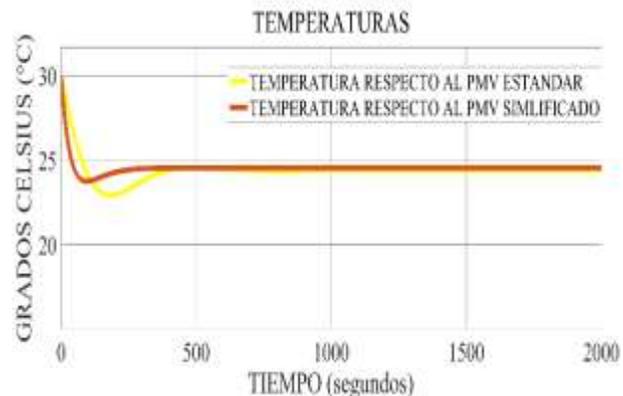
Por otro lado, la gráfica 3 muestra la temperatura del edificio calculado por el modelo de confort térmico simplificado.



Grafica 3 Temperatura proporcionado por el índice PMV simplificado.

Fuente: Elaboración Propia

Para visualizar una mejor comparación, la gráfica 4 proporciona ambas temperaturas en una misma grafica.



Grafica 4 Comparación de Temperaturas de los índices de confort térmico.

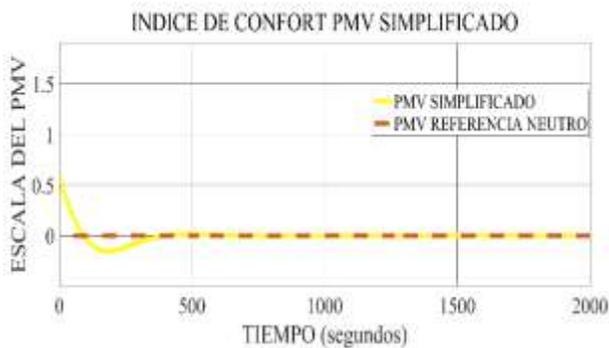
Fuente: Elaboración Propia

Con respecto a las escalas de confort dentro del edificio, la gráfica 5 muestra el resultado obtenido mediante el modelo de confort térmico estándar. Cabe mencionar que el valor deseado debe ser del valor neutro de la escala, es decir cero.



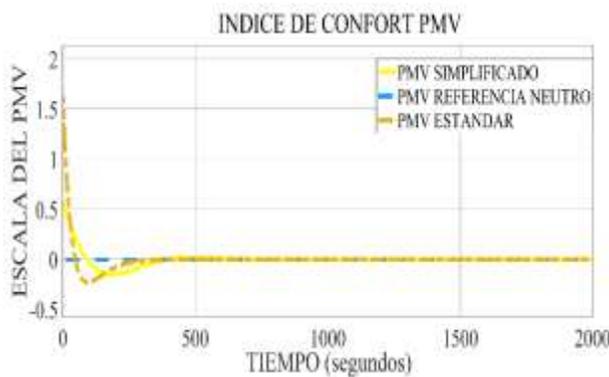
Gráfica 5 Escala de confort térmico obtenido por el modelo de PMV estándar
Fuente: Elaboración Propia

La gráfica 6 se observa el resultado obtenido del modelo de confort PMV simplificado.



Gráfica 6 Escala de confort térmico obtenido por el modelo de PMV simplificado
Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 7, se realiza la comparación de ambos resultados de confort térmicos.



Gráfica 7 Comparación de las escalas de confort térmico
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del porcentaje de personas insatisfechas PPD en base al índice PMV estándar se observa en la gráfica 8.



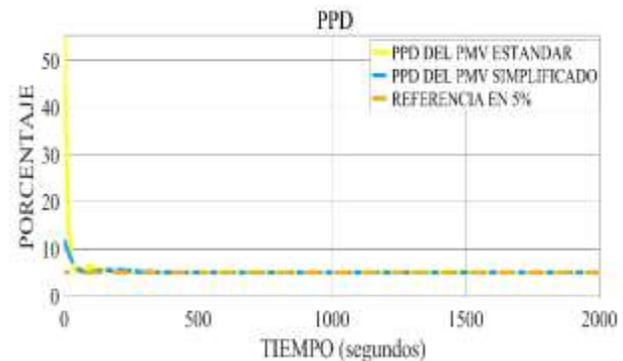
Gráfica 8 Valor obtenido PPD en base al PMV estándar
Fuente: Elaboración Propia

Mientras que el porcentaje obtenido de PPD del modelo PMV simplificado se visualiza en la gráfica 9.



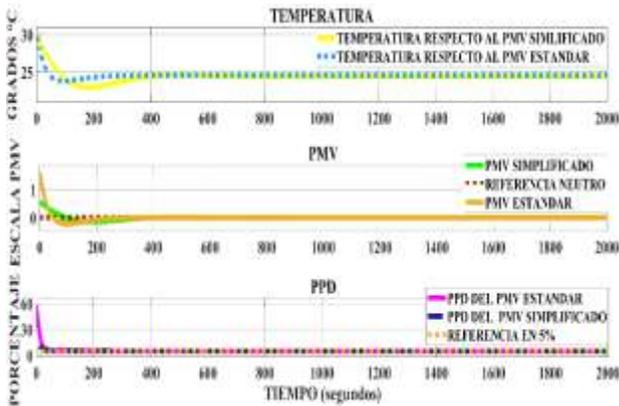
Gráfica 9 Valor obtenido PPD en base al PMV simplificado
Fuente: Elaboración Propia

Se comparan los resultados de ambos PPD en una sola grafica como se observa en la gráfica 10.



Gráfica 10 Comparación PPD en base a los índices PMV.
Fuente: Elaboración Propia

Por último, la gráfica 11 combina las tres comparaciones anteriores de temperatura, índice PMV y PPD.



Gráfica 11 Comparación de Temperaturas, PMV y PPD

Fuente: Elaboración Propia

Agradecimiento

Un agradecimiento a la Universidad Autónoma Del Carmen por las facilidades prestadas.

Conclusiones

Se presentó los modelos matemáticos de los índices de confort, así como también las ecuaciones que representan al sistema de un edificio con sistema de refrigeración. Se realizó la programación de ambos modelos y se determinó aplicar un control Proporcional Integral Derivativo (PID).

Las simulaciones mostraron comparaciones entre ambos modelos, donde se obtienen resultados muy semejantes entre ellos. El modelo con el índice de confort térmico simplificado obtuvo valores deseados bajo las condiciones que se plantearon al momento de realizar las simulaciones. Los valores de temperatura en ambos modelos presentaron ser muy semejantes, el valor de confort térmico PMV en ambos casos convergen al deseado y lo mismo sucede en cuanto al porcentaje de personas insatisfechas (PPD). Por lo que se concluye que el modelo de confort térmico simplificado puede usarse como sustitución al modelo de confort térmico estándar.

Referencias

ASHRAE. (2013). ANSI/ASHRAE 2013. Standard 55-2013, Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, GA, USA.

Bejan, A. T. (1995). Thermal design and optimization. John Wiley & Sons.

Croitoru, C. &. (2015). Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles—Current capabilities and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 304-318.

d'Ambrosio Alfano, F. R., Olesen, B. W., Palella, B. I., & Riccio, G. (2014). Thermal comfort: Design and assessment for energy saving. Energy and Buildings, 326-336.

Energy, D. o. (2017). Department of Energy, Buildings energy databook, Office of Energy, Efficiency & Renewable Energy. Washington, DC.

Federspiel, C., & Asada, H. (1992). User-Adaptable Comfort Control for HVAC Systems. American Control Conference. Chicago, IL, EE. UU., EE. UU.

Hamdi, M., & Lachiver, G. (1998). A Fuzzy Control System Based on. IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, AK, USA.

Hana, H., Lee, J., JonghunKim, Jang, C., & Jeong, H. (2014). Thermal Comfort Control Based on a Simplified Predicted Mean Vote index. Energy Procedia, 61, 970-974.

ISO. (2005). 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.

Klein, M. J. (1967). Thermodynamics in Einstein's thought. Science, 509-516.

Kolich, M., Line, J., & Akbar Berry, S. M. (2017). A Review of Human Physiological, Psychological & Human Biomechanical Factors on Perceived Thermal Comfort of Automotive Seats. SAE Technical Paper.

Mar, C. M., Álvarez, J., Julio, N.-R., Francisco, R., & M., B. (2014). Control predictivo no lineal del confort térmico y calidad de aire. XXXV Jornadas de Automática.

Mohammed, J. A.-K., Mohammed, F. M., & Jabbar, M. A.-S. (2018). Investigation of high performance split air conditioning system by using Hybrid PID controller. Applied Thermal Engineering, 129, 1240-1251.

ALEJO-CHAN, Francisco Javier, DÍAZ-MÉNDEZ, Sósimo Emmanuel y ALAZKI, Hussain. Diseño de un controlador para sistemas de refrigeración aplicando índice de confort térmico simplificado. Revista del Diseño Innovativo. 2020

Morgado, M. T. (2015). Creating productive workers in industrial context from the Definition of Thermal Comfort. *Int. J. Ind. Eng. Manag.* 75-84.

Morgado, M., MárioTalaia, & LeonorTeixeira. (2017). A new simplified model for evaluating thermal environment and thermal sensation: An approach to avoid occupational disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 60, 3-13.

P. Bermejo, L. R. (2012). Design and simulation of a thermal comfort adaptive system based on fuzzy logic and on-line learning. *Energy and Buildings*, 367-379.

P.O., F. (1972). *Thermal comfort analysis and applications in environment engineering*. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press.

Pellerin, N. &. (2004). Effects of steady-state noise and temperature conditions on environmental perception and acceptability. *Indoor air*, 129–136.

Talaia, M. M. (2013). Evaluation of the thermal comfort in workplaces e a study in the metalworking industry. *Occupational Safety and Hygiene.*, 473-477.

Talaia, M. S. (2009). EsConTer: Um índice de avaliação de ambiente termico. V Congresso Cubano de Meterologia, (pp. 1612-1626). Cuba. U.S Department of Labor. (2012–13). U.S Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Occupational Outlook, Medical Assistants.

Valladares, W., Galindo, M., Gutiérrez, J., Wu, W.-C., Liao, K.-K., Liao, J.-C., . . . Wang, C.-C. (2019). Energy optimization associated with thermal comfort and indoor air control via a deep reinforcement learning algorithm. *Building and Environment*, 155, 105-117.

Vázquez, J. G. (2018). Educational tool for the learning of thermal comfort control based on PMV-PPD indices. *Computer applications in engineering education*, 26(4), 906-917.

Zare, M., Bodin, J., Cercier, E., Brunet, R., & Roquelaure, Y. (2015). Evaluation of ergonomic approach and musculoskeletal disorders in two different organizations in a truck assembly plant. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 50, 34-42.