



Sistema de control óptimo basado en data meteorológica para regulación térmica de edificaciones

(Optimal control system based on meteorological data for building thermal regulation)

Marcia Díaz

Universidad Privada Dr. Rafael Beloso Chacín (URBE)

marciadiazm@hotmail.com

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo general proponer un sistema de control óptimo basado en data meteorológica para regulación térmica de edificaciones. En cuanto a las referencias teóricas del estudio se basó en teorías propuestas por Berenguel y Vargas (2003), Bula y Márquez (2002), Cengel (2007), Hernández (2009), entre otros; metodológicamente en la propuesta de Hernández, Fernández y Baptista, L (2006) y Supo, J. (2012). De acuerdo con la metodología empleada, se catalogó como descriptiva, con un diseño de tipo no experimental y proyecto factible. La unidad de análisis estuvo conformada por el equipo de acondicionamiento de aire tipo Chiller modelo Carrier 30GB que sirve al bloque E de la Universidad Dr. Rafael Beloso Chacín; Esta es una estructura de construcción pesada que cuenta con 1140 m² y una altura de 19 m, a la cual se le aplicaron las mediciones respectivas con el fin de comprender la naturaleza térmica de su comportamiento. Es así como, a partir de los datos de Temperatura vs. Resistencia plasmados en el manual de funcionamiento, en conjunto con ciertas leyes físicas de la termodinámica y la data meteorológica, se obtuvo un modelo matemático capaz de representar la acción dinámica de la unidad acondicionadora de aire, en su interacción con las diversas variables del edificio en cuestión. Esta función de transferencia permitió diseñar un sistema de control PI óptimo que regula en tiempo real la temperatura interna del recinto, tomando en cuenta las cambiantes condiciones meteorológicas de cada instante del día, al generar un patrón de comportamiento de las variables involucradas dentro de un rango de operación en el cual se considera como óptima la temperatura del inmueble.

Palabras Claves: Control Óptimo, Regulación Térmica, Data Meteorológica.

ABSTRACT

This research had the general objective of proposing an optimal control system based on meteorological data for thermal regulation of buildings. Regarding the theoretical references of the study, it was based on theories proposed by Berenguel and Vargas (2003), Bula and Márquez (2002), Cengel (2007), Hernández (2009), among others; methodologically in the proposal of Hernández, Fernández and



Baptista (2006) and Supo (2012). According to the methodology used, it was classified as descriptive, with a non-experimental type design and a feasible project. The analysis unit was made up

of the Carrier 30GB model Chiller air conditioning equipment that serves block E of the Dr. Rafael Belloso Chac n University; This is a heavy construction structure that has 1140 m² and a height of 19 m, to which the respective measurements were applied in order to understand the thermal nature of its behavior. This is how, from the data of Temperature vs. Resistance reflected in the operation manual, together with certain physical laws of thermodynamics and meteorological data, a mathematical model was obtained capable of representing the dynamic action of the air conditioning unit, in its interaction with the various variables of the building in question. This transfer function allowed designing an optimal PI control system that regulates the internal temperature of the enclosure in real time, taking into account the changing meteorological conditions at each moment of the day, by generating a pattern of behavior of the variables involved within a range of operation in which the temperature of the property is considered as optimal.

Key Words: Optimal Control, Thermal Regulation, Meteorological Data

INTRODUCCIÓN

En estos tiempos modernos, nadie escapa de apreciar el alivio que proporcionan las modernas instalaciones de aire acondicionado ante las incomodidades climáticas. Muchos de los hogares, y la mayoría de las oficinas e instalaciones comerciales, no serían confortables si no contaran con un sistema de control permanente del ambiente interior. La denominación de “artículo de lujo” con que se etiquetaba a los equipos de aire acondicionado antes de la Segunda Guerra Mundial, dio paso a otra que aprecia su lado práctico para hacer más saludables y productivas las vidas humanas. Razón por la cual, la gran demanda energética mundial, siempre en miras de satisfacer las necesidades de los habitantes, impulsó al avance tecnológico de los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

Sin embargo, a pesar de la constante evolución de los métodos y de la existencia de una mejor comprensión de los parámetros que definen la calidad del aire en interiores, muchos de los postulados básicos del buen diseño de unidades de acondicionamiento de aire se siguen manteniendo inmutables. En este sentido, la regulación térmica no es la excepción; pues aún se carece de una estrategia de control que permita ajustar en una edificación, de manera automática, la temperatura de acuerdo a la variación de las condiciones climáticas tanto externas como internas, trayendo como consecuencia un enorme desperdicio energético. Por tal motivo, esta investigación propone el diseño de un sistema de control óptimo para la regulación térmica de edificaciones, a partir de data meteorológica.



OBJETIVO

Proponer un sistema de control óptimo basado en data meteorológica para regulación térmica de edificaciones.

METODOLOGÍA

La presente investigación se catalogó de tipo descriptiva debido a que la misma pretendió caracterizar el cambiante comportamiento térmico de una edificación a lo largo del tiempo, con el fin de comprender la interacción dinámica de las variables involucradas, tanto internas como externas, y su influencia en la obtención de una determinada respuesta térmica dentro del inmueble para un instante de tiempo determinado.

De la anterior aseveración pueden dar sustento los conceptos propuestos por Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2006) quienes señalan que una investigación descriptiva es aquella que se encarga de caracterizar rasgos importantes de cualquier fenómeno que se estudie, con el fin de establecer su estructura o comportamiento; asimismo, destacan que este tipo de estudio se centra en medir, con la mayor precisión posible, los conceptos o variables a los que se refieren, de manera más bien independiente.

A su vez, se catalogó como no experimental, ya que el modelo matemático obtenido para representar el comportamiento térmico de la edificación, se construyó a partir de data meteorológica recolectada previamente al inicio del estudio. Por tanto, dichos datos no fueron manipulados deliberadamente de ninguna forma durante esta investigación, sino que se emplearon tal cual como fueron recabados. Los criterios expuestos por Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2006), respaldan tal afirmación, pues estos autores indican que en las investigaciones no experimentales no se hacen variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables, sino que se observan los fenómenos en su contexto natural para después analizarlos.

Así mismo, esta investigación se considera de tipo proyectiva, la cual es definida por Hurtado (2012) como aquella cuyo objetivo es diseñar o crear propuestas dirigidas a resolver determinadas situaciones presentes en el campo. Es por ello, que la finalidad principal de este estudio estuvo enfocada en proponer un sistema de control óptimo basado en data meteorológica para regulación térmica de edificaciones.

Conforme a la apreciación de Supo (2012), la unidad de análisis se trata de la entidad determinada por el investigador para realizar mediciones. En virtud de esto, se puede afirmar que en la presente investigación la unidad de análisis estuvo definida por el sistema de regulación térmica de la edificación, correspondiente a la unidad de acondicionamiento de aire tipo chiller modelo 30GB que sirve al bloque E de la Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chac n. Es importante destacar, que para efectos de la presente investigación se empleó la observación directa como principal técnica de recolección de datos primarios; específicamente durante el diagnóstico del proceso de regulación térmica de la edificación, donde se recabaron datos relacionados con las características de diseño de la infraestructura, así como

también, toda la información pertinente a la distribución y funcionamiento de los equipos de acondicionamiento de aire que sirven a estas instalaciones.

RESULTADOS

Recopilación de la información

Con relación a la descripción del proceso de regulación térmica de la edificación, y en correspondencia con la de la metodología utilizada, asociada a la recopilación de la información, se realizaron una serie de visitas a las instalaciones de la Universidad Privada Dr. Rafael Beloso Chacín, específicamente al bloque E, donde se encuentran ubicadas tres unidades de acondicionamiento de aire tipo Chiller modelo Carrier 30GB de 90 toneladas, las cuales acondicionan de manera integral y conjunta la distintas áreas de la edificación.

Cada uno de estos equipos está dividido en dos partes, un sistema central denominado enfriador de líquidos (chiller o mini-chiller) ubicado en el techo del bloque y la otra parte conocida como UMA (Unidad Manejadora de Aire), colocada en cada uno de los extremos de los pasillos de los cuatro pisos del bloque. Las únicas conexiones entre estas dos unidades es un circuito hidráulico común cerrado.



Figura 1. Sistema de acondicionamiento de aire tipo chiller
Fuente: Elaboración propia (2013)

Cada chiller es un sistema completo de refrigeración que cuenta con tres compresores, un condensador, un evaporador, una válvula de expansión (evaporación), refrigerante y tuberías, además de una bomba de impulsión de agua, tal como se muestra en la Figura 1. Asimismo, incluye una serie de dispositivos electrónicos como termostatos y presostatos, los cuales permiten al sistema operar de forma automatizada, gracias al control ejercido por una tarjeta madre programable en función al set point de temperatura deseado, tal como se observa en la Figura 1.

Cabe destacar, que debido a la naturaleza de estos equipos, no es posible apagarlos por completo en los periodos de tiempo en los cuales la universidad se encuentra descansando de sus actividades rutinarias; es necesario el funcionamiento constante de al menos un chiller, con el fin de garantizar tanto el mantenimiento lo suficientemente bajo de la temperatura del agua utilizada para enfriar el proceso, de tal manera que no corra el riesgo de evaporarse, como la circulación de la misma para evitar posibles estancamientos susceptibles a



ocasionar acumulación de sólidos, y por ende, una posible obstrucción en el sistema.

Por tal motivo, en los períodos de inactividad como la noche (de 10:00 pm a 7:00 am), fines de semana (sábado de 6:00 pm a lunes 6:00 am), días festivos y vacaciones; se mantiene funcionando un solo chiller, el cual se alterna por temporadas con los otros dos para evitar un desgaste excesivo. De igual forma, en los momentos de operación completa del sistema, solamente operan dos, ya que se deja descansar el tercero. Asimismo, dependiendo de la temperatura a la cual se programe el set point y a los ajustes requeridos con respecto a este, el equipo de manera automática elegirá la cantidad de compresores que trabajaran en la unidad de cada chiller. Normalmente este set point se regula en 75 °F (24 °C), pues es la temperatura considerada como “temperatura confort”.

El intercambiador de calor como tal del sistema, trabaja con un diferencial de temperatura ΔT de 10°F. Es decir, una vez accionada la unidad, la temperatura del agua proveniente de la UMA es medida por el sensor de temperatura posicionado en la entrada del intercambiador. Luego de que el calor sensible del agua es extraído por parte del líquido refrigerante dentro del intercambiador, la temperatura de retorno del agua a la UMA debe ser 10°F menor.

Sin embargo, cuando el agua circula por cada una de las UMA, su temperatura aumenta al absorber todo el calor del proceso, por lo que necesita volver al intercambiador para rectificar su temperatura nuevamente. Con cada uno de estos retornos, el agua logra aumentar 2°F la temperatura del ambiente, gracias a la activación programada de los compresores. Por el contrario, si el sistema detecta una temperatura mayor a la establecida en el set point, entonces la desactivación programada de los compresores permite disminuir la temperatura 2°F por cada retorno. De esta manera, asumiendo una temperatura inicial de 80°F, en cada chiller se establecerán las combinaciones de los compresores.

Los compresores pueden ser de tipo semihermético, hermético o de tornillo y tienen la función de hacer circular el refrigerante a través de los diferentes componentes del sistema de refrigeración del chiller. Succionan el refrigerante en estado de vapor (mal denominado gas), sobrecalentado a baja presión y temperatura, para luego comprimirlo aumentando tanto la presión como la temperatura a un punto tal que se pueda condensar por medios condensantes normales (agua o aire). La secuencia de arranque-parada de los compresores depende tanto del tipo de módulo de configuración empleado, como de la posición de los interruptores. El procesador para o arranca los compresores y los abanicos de los condensadores, según la configuración del módulo e igualmente de la posición de los interruptores.

Cada unidad tiene dos secuencias de operación, A o B. El procesador selecciona la secuencia al azar para que los compresores funcionen alternativamente y el desgaste sea igual. En la secuencia A, el compresor número 1 arranca primero, mientras que en la secuencia B el compresor número 3 es el primero en arrancar. Es necesario resaltar el hecho de que los compresores no se activan siempre completamente, sino que dependiendo de la etapa de operación, trabajan con dos o tres pistones de su motor.

Por otro lado, debido al cambiante clima de la ciudad de Maracaibo, la

temperatura externa puede variar en cada instante del día, ocasionando que la temperatura interna de la edificación se torne aún más fría de lo deseado, dando lugar a un desperdicio energético por parte de los compresores de las unidades, traducido en pérdidas económicas relacionadas con la electricidad; así como también, un eventual desgaste de la vida útil de las máquinas. Considerando el hecho de que el sistema es incapaz de detectar estas variaciones de temperatura, cuyo conocimiento permitiría ajustar el set point en función de las mismas.

Coincidentemente, en el techo del bloque E, a un lado de los equipos mencionados, se encuentra la estación meteorológica marca WMR200 / WMR200A, la cual desde hace más de un año proporciona datos meteorológicos de la ciudad de Maracaibo, tales como temperatura, radiación, humedad relativa, presión atmosférica, tasa de precipitaciones, velocidad del viento, entre otros; también la temperatura interna del recinto, como se aprecia en los gráficos 1 y 2. Estos datos son muestreados y actualizados cada minuto. Toda esta información se obtuvo mediante entrevistas no estructuradas al personal de mantenimiento de estos equipos y observación directa en el campo (comunicación personal, 5 de Marzo de 2013).

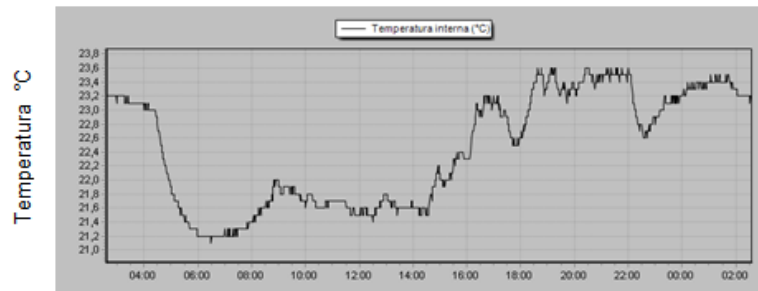


Gráfico 1. Data meteorológica Temperatura vs. Tiempo
Fuente: Estación meteorológica de URBE (2013)

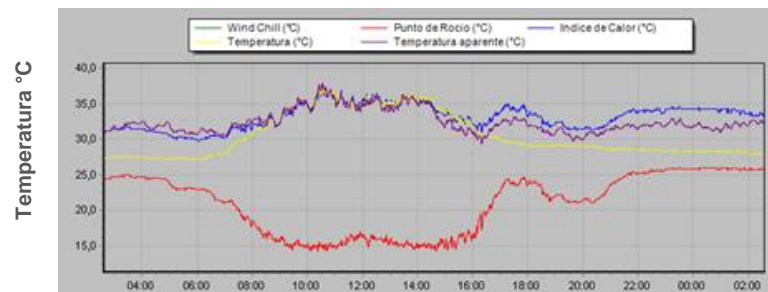


Gráfico 2. Data meteorológica Temperatura vs. Tiempo
Fuente: Estación meteorológica de URBE (2013)

Desarrollo del modelado matemático

En esta sección se abarca la obtención del modelo matemático que representa al sistema de regulación térmica de la edificación, conformada por el equipo de acondicionamiento de aire y la dinámica térmica del edificio como tal. En la Figura 2 se observa el diagrama de bloques correspondiente a dicho proceso. Para determinar la función de transferencia de cada bloque, no sólo se utilizaron como base los datos de Temperatura vs. Voltaje plasmados en el manual de funcionamiento de la unidad acondicionadora de aire tipo chiller --modelo Carrier 30GB-- (Carrier interamerica corporation, 1995), sino que también se emplearon ciertas leyes físicas de la termodinámica, a partir de las cuales se desarrollaron las respectivas representaciones matemáticas.

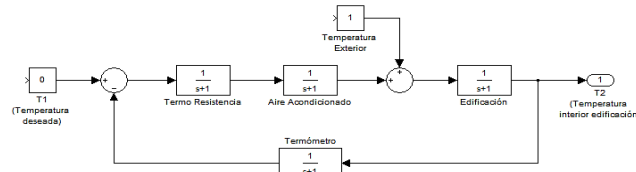


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de regulación térmica de la edificación

Modelo Matemático de la Termo Resistencia

Con base en los datos de Temperatura vs Resistencia del sensor, extraídos del manual de funcionamiento del Chiller modelo Carrier 30GB, donde aparecen plasmados en la Tabla de comportamiento de temperatura vs. Resistencia, se obtuvieron los valores de resistencia para cada ΔT resultante de la diferencia $T_1 - T_2$, considerando $T_1 = 75^\circ\text{F}$ como la temperatura óptima de confort.

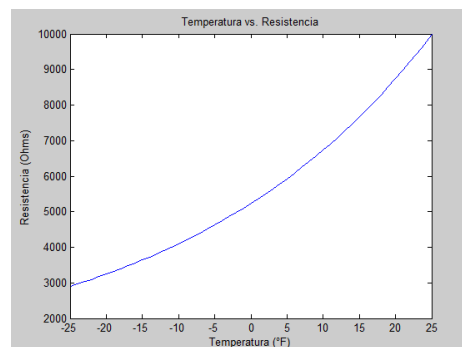


Gráfico 3. Temperatura vs. Resistencia
Fuente: Elaboración propia (2013)



Medir las temperatura con termo resistencias, se basa en la características que tienen todos los materiales de cambiar su resistencia según la temperatura; la resistencia aumenta directamente proporcional a la temperatura. Así pues, la resistencia expresada en Ohmios, podrá ser empleada a través de la ley de Ohm en su equivalente de corriente, expresado en Amperios, para regular la temperatura de salida de un sistema de acondicionamiento de aire; para cada valor de temperatura el sistema demandará una cierta cantidad de corriente que circular  por un valor de resistencia determinado. En la Gráfico 3 se observan los datos de Temperatura vs. Resistencia, mientras que en el Cuadro 1 se muestran los valores determinados de ΔT vs. Ω .

Cuadro 1
Diferenciales de Temperatura vs. Resistencia

T_2 (�F)	ΔT	OHMS	T_2 (�F)	ΔT	OHMS	T_2 (�F)	ΔT	OHMS
50�	25�	9979,3	67�	8�	6398,6	84�	-9�	4195,5
51�	24�	9716,5	68�	7�	6237,5	85�	-10�	4096,1
52�	23�	9461,3	69�	6�	6080,8	86�	-11�	3099,4
53�	22�	9213,4	70�	5�	5928,6	87�	-12�	3030,5
54�	21�	8972,6	71�	4�	5780,6	88�	-13�	2963,5
55�	20�	8738,6	72�	3�	5636,8	89�	-14�	2898,4
56�	19�	8511,4	73�	2�	5497,0	90�	-15�	2834,9
57�	18�	8290,6	74�	1�	5361,2	91�	-16�	2773,2
58�	17�	8076,1	75�	0�	5229,1	92�	-17�	2713,1
59�	16�	7867,7	76�	-1�	5100,8	93�	-18�	2654,7
60�	15�	7665,1	77�	-2�	4976,0	94�	-19�	2597,8
61�	14�	7468,3	78�	-3�	4854,8	95�	-20�	2542,3
62�	13�	7277,7	79�	-4�	4736,9	96�	-21�	2488,3
63�	12�	7091,2	80�	-5�	4622,4	97�	-22�	2435,8
64�	11�	6910,6	81�	-6�	4511,1	98�	-23�	3099,4
65�	10�	6735,1	82�	-7�	4402,9	99�	-24�	3030,5
66�	9�	6564,4	83�	-8�	4297,7	100�	-25�	2963,5

Fuente: Carrier Interamerica Corporation (1995)

Cabe destacar que la temperatura deseada debe permanecer constante en el valor mencionado debido a la resolución emanada del Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (2011), donde uno de sus artículos establece como medida de obligatorio cumplimiento, dirigida a la disminución del consumo de energía eléctrica en edificaciones e instalaciones públicas, el ajuste de los termostatos de los sistemas de aire acondicionado a una temperatura mínima de 24  Celsius (75 F).

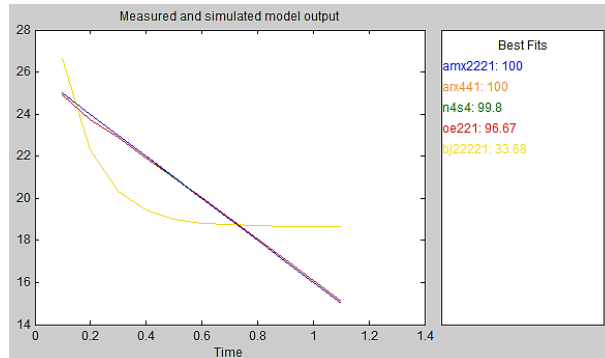


Gráfico 4. Ajustes de los modelos identificados con respecto al modelo representado por la data disponible
Fuente: Elaboración propia (2013)

A través del programa System Identification de la herramienta computacional Matlab, se aplicó el método de los mínimos cuadrados con el fin de modelar la data plasmada en el Cuadro 1 y así obtener una función de transferencia que representase adecuadamente esta parte del proceso (Bula, A. y Márquez, A., 2002). De esta manera, se identificó un modelo paramétrico perteneciente a la familia ARX de orden 441, cuyo porcentaje de ajuste con respecto al modelo representado por la data disponible es de 100%, lo cual se puede evidenciar en el gráfico 4, donde además se aprecia el porcentaje de ajuste arrojado por otras familia de modelos paramétricos que fueron menos precisos.

$$\frac{-4.918e-014 s^3 - 1.332e-015 s^2 + 1.436e-013 s + 4.178e-015}{s^4 + 0.6931 s^3 + 5.672 s^2 - 3.422e-012 s + 3.501e-014}$$

Es importante resaltar también, que el funcionamiento de los componentes del chiller es controlado electrónicamente por una tarjeta madre, de acuerdo a una secuencia programada previamente por el fabricante. Por tal motivo, según la temperatura del agua sensada, la tarjeta recibirá una señal de voltaje que se traducirá en el accionamiento combinado de los compresores. Como consecuencia de esto se demandará una determinada cantidad de corriente que precisamente fue la estudiada para la obtención del modelo.

Modelo Matemático del Chiller

De acuerdo al estudio realizado por Hernández (2010), el funcionamiento de un intercambiador de calor agua-aire corresponde a un sistema de calor dentro de un medio cerrado. Como el calor se trasmite en función de la temperatura, es decir, mediante el salto térmico y de la masa de los cuerpos que son objeto del intercambio de energía calorífica, entonces para calcular el calor absorbido o cedido por un cuerpo se utiliza la Ecuación 1:

$$Q = C_e m (t_1 - t_2) \quad (1)$$

Donde:

C_e es el calor específico de la materia que forma el cuerpo.

m es la masa del cuerpo.

t_1 es la temperatura resultante del intercambio de energía.

t_2 es la temperatura del cuerpo antes de iniciar el intercambio de calor.

De acuerdo con Martí (2000) “las unidades de Q dependen de C_e y m las cuales deben estar en concordancia, ya sea que estén expresadas en *Joule*, *Newton × metro*, *caloría/gramo* o *BTU (British Thermal Unit)*. Ahora bien, si una resistencia eléctrica R se hace pasar por una corriente de intensidad I durante un tiempo t determinado hasta alcanzar una temperatura concreta, la resistencia habrá absorbido una energía igual al producto del cuadrado de la intensidad, en amperios, por el valor de la resistencia, en ohmios, y por el tiempo, en segundos, que haya estado circulando la corriente” (p.64). Entonces el resultado quedará expresado en Joule, tal como se aprecia en la Ecuación 2:

$$Q = I^2 R t \quad (2)$$

El funcionamiento general del sistema a controlar se basa en que, debido a la dinámica térmica de la edificación, se obtendrá un calor designado de entrada, el cual es monitoreado en todo momento por un termostato encargado de medir la variación de esta temperatura interna, pero la misma se verá afectada además por la resistencia tanto del motor como del propio edificio, y la temperatura de salida del mismo motor, lo que puede representarse como se observa en la figura 3. Si se emplea la Ecuación 2 para el análisis de este sistema, suponiendo que R , R_p y C son constantes, variando en función del tiempo, se obtienen las siguientes Ecuaciones 4, 5, 6 y 7:

$$q_e(t) = R i^2(t) \quad (4)$$

$$q_a(t) = q_e(t) - q_s(t) \quad (5)$$

$$q_s(t) = \frac{T_i(t) - T_e(t)}{R_p} \quad (6)$$

$$q_a(t) = C \frac{dT_i(t)}{dt} \quad (7)$$

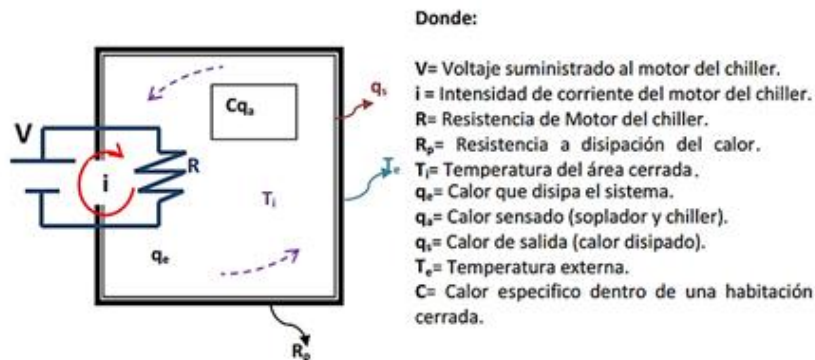


Figura 3. Circuito representativo de la temperatura dentro de un medio cerrado.

Fuente: Hernández (2010)

Al calcular las constantes R , R_p y C , se procedió a construir el modelo matemático utilizando el programa Simulink de la herramienta computacional Matlab, donde a través del método de resolución numérica para ecuaciones diferenciales Runge- Kutta (Dorf y Bishop, 2005), se obtuvo la respuesta del sistema en lazo abierto. La Figura 4 ilustra el diagrama de bloques del proceso.

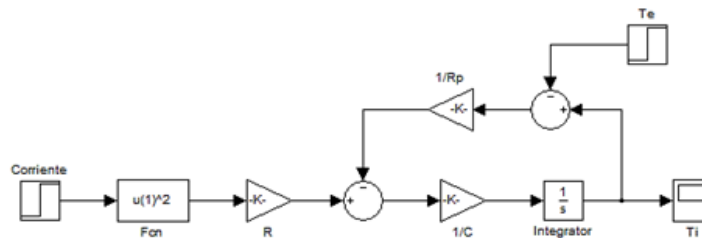


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema chiller en lazo abierto.

Fuente: Elaboración propia (2013).

Mientras que el Gráfico 5, muestra la gráfica de comportamiento del mismo (color azul), en la cual se evidencia su estabilidad a una entrada escalón de corriente, alcanzando un valor de temperatura de $60^{\circ}F$ ($16^{\circ}C$) en un tiempo de 2000 sg , lo cual es aceptable considerando el hecho de que el sistema está a lazo abierto, la carga de calor es muy grande y el sistema aún no cuenta con un controlador.

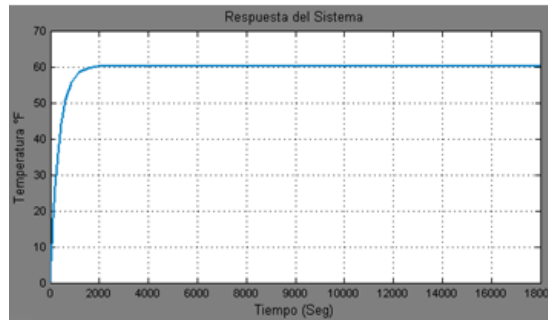


Gráfico 5. Respuesta del sistema chiller en lazo abierto.

Fuente: Elaboración propia (2013)

Modelo Matemático del Edificio

Este modelo está caracterizado por las diversas ganancias de calor responsables de marcar el balance térmico de la infraestructura, como resultado de la interacción de diversos factores tanto internos como externos, influyentes en la dinámica que se pretende controlar. Tales ganancias constituyen la llamada carga de refrigeración que todo sistema de acondicionamiento de aire debe compensar.

Ganancia de calor debido a la transmisión a través de barreras: Según los criterios expuestos por Hernandez, E. (2009), es posible considerar el edificio que fue objeto de estudio en esta investigación, como un sistema de paredes planas en series con modos de transferencia de calor en forma simultánea y congruente. Consiguientemente, el flujo de calor q , por unidad de superficie, puede ser determinado a través de la Ecuación 12, donde ΔT representa el diferencial entre la temperatura externa e interna, mientras que $\sum Rt$ es igual a la sumatoria de las resistencias térmicas respectivas del sistema. Cabe destacar, que en vista de que estas resistencias térmicas podrían ser producidas por conducción o convección, deberán calcularse dependiendo de su tipo.

$$q = \frac{\Delta T}{\sum Rt} \quad (12)$$

La Ecuación 13 corresponde al cálculo de la resistencia térmica por convección, donde h es el coeficiente de convección y A es la superficie de la barrera. Por otro lado, la Ecuación 14 equivale a la resistencia térmica por conducción, donde k es el coeficiente de conductividad térmica y L la longitud transversal del muro.

$$Rt_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (13)$$

$$Rt_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (14)$$

Como el cálculo es para cada unidad de superficie, se asumirá $A = 1m^2$, ya que posteriormente se multiplicará por el área real del edificio. Es importante acotar que los valores de k fueron determinados según el tipo de material, para el cálculo de los coeficientes conductividad térmica presentada por Cengel (2004). Igualmente el valor de h se tomó del rango considerado para la convección por medio del aire, también conocida por convección natural, el cual va de 5 a $25 W/m^2.K$. De esta manera, el cálculo de las resistencias térmicas por conducción y convección, quedó determinado a través de las Ecuaciones 15, 16, 17, 18 y 19.

$$Rt_{conv1} = \frac{1}{h_{\infty} A} = \frac{1}{9 W/m^2.K \times 1m^2} = 0.111 K/W \quad (15)$$

$$Rt_{conv2} = \frac{1}{h_{\infty} A} = \frac{1}{4W/m^2.K \times 1m^2} = 0.25 K/W \quad (16)$$

$$Rt_{cond1} = \frac{L_{concreto}}{k_{concreto} A} = \frac{0.02 m}{0.3 W/m.K \times 1m^2} = 0.066 K/W \quad (17)$$

$$Rt_{cond2} = \frac{L_{arcilla}}{k_{arcilla} A} = \frac{0.15 m}{0.15 W/m.K \times 1m^2} = 1 K/W \quad (18)$$

$$Rt_{cond3} = \frac{L_{arcilla}}{k_{arcilla} A} = \frac{0.025 m}{0.058 W/m.K \times 1m^2} = 0.43 K/W \quad (19)$$

La resistencia térmica total quedó planteada en la Ecuación 20. Luego, sustituyendo el valor obtenido en la Ecuación 21, con $\Delta T = (28 - 24)^{\circ}C = 4^{\circ}C = 4K$, se calculó la ganancia de calor debido a la transmisión a través de barreras; considerando el área total del edificio, como lo expresa la Ecuación 22.

$$\begin{aligned} \sum Rt &= Rt_{conv1} + Rt_{conv2} + Rt_{cond1} + Rt_{cond2} + Rt_{cond3} \\ \rightarrow \sum Rt &= (0.111 + 0.25 + 0.066 + 1 + 0.43) K/W = 1.85 K/W \quad (20) \end{aligned}$$

$$q = \frac{\Delta T}{\sum Rt} = \frac{4K}{1.85 K/W} = 2.16 W/m^2 \times 1140 m^2 = 2462.4 W \quad (21)$$

$$\rightarrow q = 8402.06 Btu/h \quad (22)$$

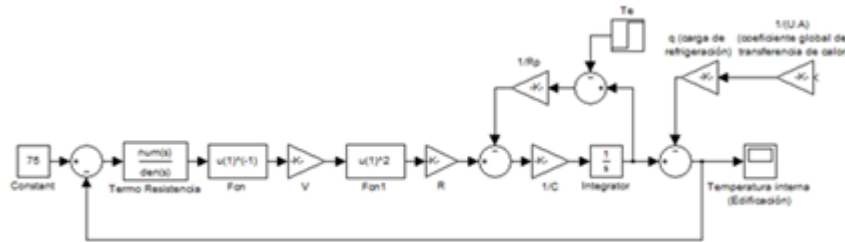


Figura 5. Diagrama de bloques resultante del sistema de regulación térmica de la edificación.

Fuente: Elaboración propia (2013).

Asimismo, la Figura 5 grafica la respuesta del sistema a lazo abierto evidenciando su estabilidad, donde se observa la salida de temperatura, expresada en °F, muestreada en un tiempo de $10 \times 10^2 \text{seg}$; lo cual es comprensible considerando el hecho de que el sistema está a lazo abierto, es decir, no cuenta con ningún controlador que regule la variable y, por tanto, le tomará mucho más tiempo alcanzar el valor de deseado. La gráfica obtenida corresponde a la respuesta de una ecuación de primer orden $G(s)$, cuya función de transferencia está dada por la Ecuación 30, donde K representa la ganancia del sistema, y ts equivale a la constante de tiempo.

$$G(s) = K * \frac{1}{ts + 1} \quad (30)$$

Como se observa en el gráfico 6, la ganancia K del sistema es igual a 75. Por otro lado, la constante del tiempo ts es el tiempo en cual el sistema alcanza el 63.2% de su valor final; éste último al ser equivalente a 47.25, definiría entonces un valor de 338.46 seg para ts . Así pues, la función de transferencia general del sistema quedaría planteada tal como lo expresa la Ecuación 31.

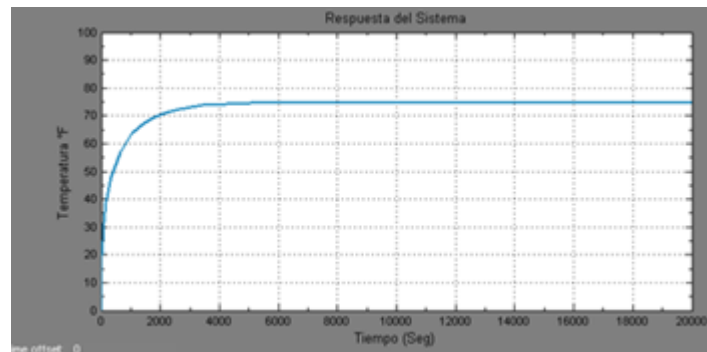


Gráfico 6. Respuesta a lazo abierto del sistema de regulación térmica de la edificación.



Fuente: Elaboración propia (2013)

$$G(s) = \frac{75}{338.46 * s + 1} = \frac{0.221}{s + 0.00295} \quad (31)$$

Finalmente, ya teniendo la función de transferencia en tiempo continuo, se procedió a convertir la misma en tiempo discreto. Mediante el empleo del comando c2d de la herramienta computacional Matlab, el cual a través del método zoh, discretiza el sistema en tiempo continuo, asumiendo que las entradas de control son seccionalmente constantes durante el tiempo de muestreo Ts.

```
>> Gz=(tf([0.221],[1 0.00295]))
Transfer function:
 0.221
-----
s + 0.00295
>> sysd=c2d(Gz,15,'zoh')
Transfer function:
 3.243
-----
z - 0.9567
Sampling time: 15
```

Cabe destacar que este modelo matemático fue obtenido en función de las características del bloque E de la Universidad, utilizando este caso específicamente para efectos del desarrollo de esta investigación. Sin embargo, es posible aplicar el mismo principio y modelo para cualquier otro caso particular donde se desee regular la temperatura de una edificación acondicionada por un equipo de climatización, simplemente variando los datos pertinentes a las características de diseño y a las condiciones meteorológicas propias de cada lugar.

Desarrollo de un sistema de control óptimo

Una vez obtenida la función de transferencia en el dominio z (tiempo discreto), se diseño el controlador óptimo del sistema de regulación térmica de la edificación, para lo cual se debió expresar previamente el modelo matemático en ecuaciones de espacio de estado a través del comando tf2ss de Matlab; el cual convierte los parámetros de la función de transferencia de un sistema dado, a los de una representación de espacio de estado equivalente.

```
>> [A, B, C, D] = tf2ss([0.221],[1 0.00295])

A = -0.0029
B = 1
```



$$C = 0.2210$$
$$D = 0$$

De igual forma se comprob  la controlabilidad, observabilidad y estabilidad del sistema. En el análisis de controlabilidad se utilizó el comando `ctrb` de Matlab, para luego comparar el rango de la matriz resultante con el de la matriz A ; sí ambos son iguales entonces esto indica que el sistema es completamente controlable. El comando `rank` permite conocer el rango de una matriz.

```
>> rank(A)
ans =
     1
>> co=ctrb(A,B)
co =
     1
>> rank(co)
ans =
     1
```

Como el rango de la matriz de controlabilidad es igual al de A , $\text{rango}(co)=1$, es posible afirmar que el sistema es de estado completamente controlable. En cuanto al análisis de observabilidad, se empleó el comando de Matlab `obsv` con el fin de comparar el rango de esta matriz con el de la matriz A ; si ambos rangos resultan ser iguales, entonces el sistema es observable.

```
>> ob=obsv(A,C)
ob =
     0.2210
>> rank(ob)
ans =
     1
```

Debido a que el rango de la matriz de observabilidad es igual al rango de la matriz determinándose como observable según lo descrito en la ecuación anterior para A , $\text{rango}(ob)=1$, el sistema es considerado de estado completamente observable. Por otro lado, para el análisis de estabilidad se utilizó el comando de Matlab `isstable`; si este arroja un resultado igual a 1 entonces el sistema es estable, por lo cual, tendremos un sistema observable y estable para la matriz de confiabilidad propuesta del controlador óptimo del sistema de regulación propuesto.

```
>> Gs=d2c(sysd)
Transfer function:
     0.221
-----
s + 0.00295
```



```
>> isstable(Gs)
ans =
    1
```

El comando `dlqr` que permite trabajar con el Diseño de reguladores lineal-cuadráticos de Matlab en tiempo discreto permite emplear técnicas de programación dinámica (Berenguel y Vargas, 2003). Este comando trabaja con un índice discretizado y utiliza la ecuación de Ricatti para resolver problemas de horizonte finito o infinito, de acuerdo a los parámetros que sean introducidos al comando, en estas ecuaciones normalmente L , P y E son variables estándares pero sus valores son cambiado de acuerdo a estimaciones del proceso y las matrices resultantes:

```
>> [L,P,E]=dlqr(A,B,eye,100)
L =
-2.9208e-005
P =
    1.0000
E =
-0.0029
```

Dónde:

- L , es la Ley de Control.
- P , es la solución de la ecuación de Ricatti.
- E , son los autovalores de P

La ley de control óptima, por su parte se divide en dos grupos:

- La ley de control óptima de realimentación de variables de estado
- Una ley de control óptima del integrador

Por consiguiente, los valores correspondientes a la ley de control para efectos del diseño del PI óptimo del sistema en estudio serían $L_R = 0$ y $L_i = 0.000029208$. Una vez calculados dichos valores, se sustituyeron en el modelo desarrollado a través del programa Simulink de la herramienta computacional Matlab, tal como se aprecia en la Figura 6.

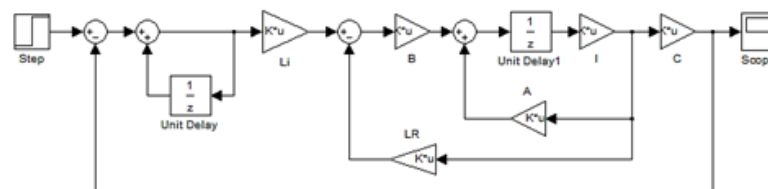


Figura 6. Controlador tipo PI óptimo.
Fuente: Elaboración propia (2013).

Así pues, en el Gráfico 7 se representó la respuesta del sistema con control PI óptimo, donde se evidencia como la temperatura alcanza su valor nominal en **1000 seg**. Es necesario acotar que la temperatura, por naturaleza, es una variable de respuesta lenta. Es decir, dicho valor correspondiente a **75 °F**, es alcanzado de manera progresiva dentro del rango de tiempo de **1000 seg**.

Por tanto, no se debe asumir que el comportamiento de la misma, observado en la gráfica, indica que esta alcanza los **75 °F (24 °C)** en un solo instante de tiempo. Pues la razón por la cual la trayectoria de la gráfica se muestra de manera lineal, es únicamente porque el PI óptimo toma unidades de retraso a un tiempo de muestreo determinado, con el fin de lograr realizar la acción proporcional - integral.

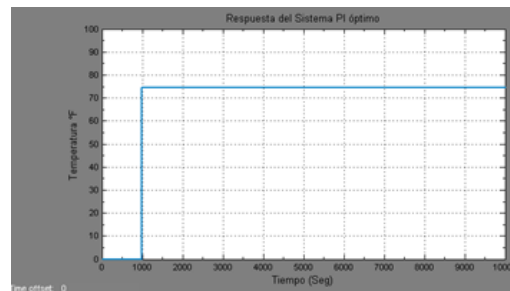


Gráfico 7. Respuesta del sistema de regulación térmica con PI óptimo.
Fuente: Elaboración propia (2013)

Adicionalmente, se realizó una comparación entre el sistema de control clásico y avanzado (óptimo), representados por un sistema de control PID y un PI óptimo respectivamente. En la Figura 7 se observa el diagrama de bloques del lazo de control de temperatura para el sistema de regulación térmica de la edificación, donde el bloque principal se reduce con las funciones de transferencia antes establecidas (termoresistencia, transmisor y ganancia de calor de la edificación), así como también, la retroalimentación.

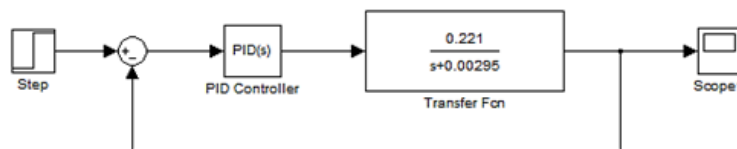


Figura 7. Controlador tipo PID.
Fuente: Elaboración propia (2013).

En el Gráfico 8 se observa que el controlador por PID realiza el efecto de regulación en la variable estudiada durante el mismo lapso de tiempo en el cual lo efectúa el PI óptimo. Sin embargo, este último lo ejecuta evitando el sobrepico producido por la acción del primero. Los parámetros del PID son los siguientes: $K_p = 0.02995$, $K_i = 0.00421$, $K_d = -89.6527$.

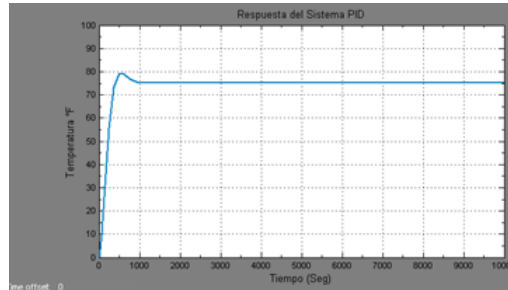


Gráfico 8. Respuesta del sistema con PID.
Fuente: Elaboración propia (2013)

Evaluación del sistema

Con el objeto de culminar la investigación, se evaluó el sistema de control óptimo para el proceso de regulación térmica de la edificación. Se retomó el diseño de control desarrollado en Simulink, a partir del cual se graficó tanto la respuesta original del sistema sin control, como la respuesta obtenida del sistema con el PI óptimo; de manera tal que se estableció una comparación entre las dos señales obtenidas y así se pudo evaluar la eficiencia del control propuesto.

En la respuesta obtenida al momento de graficar el comportamiento del sistema original versus el sistema controlado por el PI óptimo desarrollado, se observó que hay una diferencia de tiempo entre ambos. El sistema original alcanzó el valor óptimo de operación de la variable estudiada 75°F (24°C) a los 4000 seg , tal como puede apreciarse en la parte superior del Gráfico 9.

Mientras que el sistema regulado por el PI óptimo, apreciado en la parte inferior del Gráfico 9, estabilizó aproximadamente después de un lapso de tiempo de 1000 seg ; habiendo entonces una diferencia de 3000 seg , lo cual representa un 75% de mejora en el tiempo de respuesta. Esto indica una estabilización más rápida con el PI óptimo en comparación al lazo de control original sin controlador, cubriendo por tanto, el principal objetivo perseguido al diseñar un sistema de control óptimo.

Lo anterior implica que, si se puede alcanzar y mantener la temperatura deseada en un lapso de tiempo más corto, entonces el sistema por ende trabajaría de manera más eficiente, pues al regular la temperatura en función a las cambiantes condiciones climáticas externas, se estaría operando dentro de un punto considerado óptimo, el cual evitaría no sólo un aumento en la temperatura confort de los habitantes, sino también una sobredemanda en el funcionamiento de los compresores, lo cual se traduce en pérdidas económicas relacionadas con la electricidad.

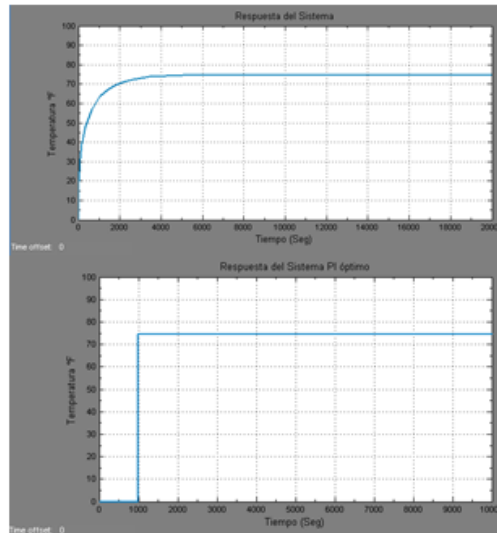


Gráfico 9. Comparación de la respuesta del sistema original y la respuesta del sistema con PI óptimo.
Fuente: Elaboración propia (2013)

Cabe destacar, que el análisis matemático realizado durante esta investigación estuvo basado en las unidades del Sistema Inglés, pues es este el sistema en el cual se fundamentan las ecuaciones propuestas por Hernández (2009), utilizadas para la obtención de la función de transferencia del proceso estudiado. Asimismo, la data empleada concerniente a los valores de Temperatura vs. Resistencia del sistema de acondicionamiento de aire modelo Carrier 30GB estaba disponible en °F por ser este un equipo europeo. Por tanto, se decidió trabajar con esta unidad para facilitar los procedimientos y mantener la mayor exactitud posible en los resultados calculados.

No obstante, con el fin de acatar los lineamientos planteados en la Norma Venezolana COVENIN 288 (ISO 1000-92) (Servicio Autónomo Nacional de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos [SENCAMER], 1998), donde se recomienda para uso general el empleo de las unidades en el Sistema Internacional SI, se realizó la conversión de los resultados finales obtenidos al mencionado sistema internacional de unidades, tal como se logra apreciar en cada uno de los mismos.

CONCLUSIONES

- El proceso de regulación térmica es lento, aunque la estrategia de control implementada mejoró el tiempo de estabilización en un 75%.
- La variable meteorológica que mayormente interviene en la dinámica térmica de una edificación es la temperatura del ambiente exterior.



- A través de una termo resistencia es posible medir la variación de temperatura de un sistema y a su vez relacionarla con la resistencia eléctrica del mismo.
- El funcionamiento de un intercambiador de calor agua-aire corresponde a un sistema de calor dentro de un medio cerrado. Por tanto, para efectos de su representación matemática es conveniente recurrir a las leyes termodinámicas que lo rigen.
- Una edificación puede ser considerada como una unidad global de transferencia de calor en la cual intervienen diversos factores, tanto internos como externos, cuya interacción dinámica definirá una determinada respuesta térmica dentro del inmueble. Dichos factores son también conocidos como ganancias de calor.
- Después de comparar los sistemas de control PID clásico y PI-Óptimo, se verificó la superioridad de este último, sin embargo, el controlador PID mostró un comportamiento igualmente satisfactorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berenguel, M. y Vargas, M. (2003). *Introducción a Matlab y su Aplicación al Análisis y Sistema de Control. Prácticas de control automático*. Recuperado en: http://www.esi2.us.es/~fsalas/asignaturas/CA3II05_06/practicas/Intro_matlab.pdf
- Bula, A. y Márquez, A. (2002). Modelación Matemática y Simulación de un Sistema de Acondicionamiento de Aire en Estado Transitorio. *Revista Científica, Ingeniería y Desarrollo*. 2002(11), 107-121. Recuperado de: <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/302>.
- Carrier Interamerica Corporation. (1995). *Air-Cooled Reciprocating Liquid Chillers*. Recuperado en: http://www.carrier.co.th/products/chiller/dl/30GTS_catalog.pdf.
- Cengel, Y.A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México, DF: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Dorf, R. y Bishop, R. (2005). *Modern Control Systems*. Singapur: Pearson Prentice Hall. Recuperado en: <http://dl.icdst.org/pdfs/files/4fd6e5ae41a6b686d1f9bbb20de891f7.pdf>.
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (2013). *Meteo Urbe – 1*. Maracaibo, Venezuela. Laboratorio de observación meteorológica de la Universidad Privada Dr. Rafael Beloso Chacín. Recuperado de: <https://www.urbe.edu/meteo/>
- Hernández, E. (2009). *Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración*. México: Limusa.



Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2006). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill.

Hurtado, J. (2012). *Metodología de la investigación guía para la comprensión holística de la ciencia*. Caracas, Venezuela: Quirón ediciones.

Supo, J. (2012). *Seminario de Investigación Científico*. Recuperado de: <http://red.unal.edu.co/cursos/ciencias/1000012/un3/pdf/seminv-sinopsis.pdf>

Hernández, V. (2010). *Implementación y Monitoreo de un Sistema Anticongelante para una Celda Dinamométrica* (Tesis especialización). Instituto Politécnico Nacional. D.F., México. Recuperado en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/9311/201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

[Martí, A. \(2000\) Sistemas de Seguridad y Confort en Vehículos Automóviles. Editorial Marcombo.](#)

[Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica. \(2011\). Resolución N°77. Caracas. Recuperado en: http://padeepro.com/pdf/resolucion-77---modificala-003.pdf. Consultado 2018](#)

[Servicio Autónomo Nacional de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos \(1998\). Norma Venezolana COVENIN 288 \(ISO 1000-92\). Recuperado en: http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/288-98.pdf.](#)