



UNIVERSIDAD  
DE CIENFUEGOS  
CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ

REPUBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA MECANICA

# Trabajo de Diploma

**Tema: Selección de alternativas de sistemas HVAC en instalaciones hoteleras.**

**Autor: Luis Felipe Menéndez Clavijo**

**Tutor(es): MCs. Yamilé Díaz Torres**

*Cienfuegos 2019*

## DECLARATORIA DE AUTORIDAD



Por la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma titulado:

“ Selección de alternativas de sistemas de climatización en instalaciones hoteleras. ”

Que constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución. Para que así conste firmamos la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Autor: Luis Felipe Menéndez Clavijo

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referente a la temática señalada.

\_\_\_\_\_  
Información Científico Técnico  
Nombre y Apellidos. Firma.

\_\_\_\_\_  
Firma del Vice Decano.

\_\_\_\_\_  
Firma Tutor

\_\_\_\_\_  
Sistema de Documentación y Proyecto

## **Dedicatoria:**

Este trabajo va dedicado mis abuelos, a mis padres, a mi hermano, a mi novia y a toda mi familia.

## **Agradecimientos:**

Agradecer a todos los que de una forma u otra contribuyeron a mi formación como ingeniero. A mi familia por su sacrificio, a mi novia por su constancia y a mi tutora por sus ideas.

## Resumen

La presente investigación propone una metodología para la selección de alternativas de sistemas de climatización para un hotel. Se consideró las características de funcionamiento de los hoteles, así como, el estudio de 8 perfiles de carga que reflejan la variación de las mismas por el fenómeno de ocupación. Se identificaron varios sistemas de climatización centralizada capaces de adaptarse a la fluctuación de las cargas presentes en este tipo de instalación empleando como base una planta de enfriadoras de agua. Se proponen 4 alternativas de sistemas de climatización: (1) Sistema de 2 enfriadoras de igual capacidad, (2) Sistema de 2 enfriadoras de distintas capacidades, una enfriadora con flujo refrigerante variable y una constante, (3) Sistema de 3 enfriadoras de agua de flujo constante y distinta capacidad; (4) Es la (3) con un depósito de acumulación térmica. Para la selección de las alternativas se emplearon las técnicas de selección multicriterio para la selección de sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés). Se utilizaron los métodos Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y el método Técnica de Preferencia de Orden por Similitud para Soluciones Ideales (TOPSIS). Para la aplicación de los mismos se emplearon criterios técnicos, económicos y medio ambientales. La mejor alternativa fue la (4) con un coeficiente de cercanía de 0,66072, comprobándose este resultado en el 66,18 % de los escenarios analizados en el análisis sensitivo.

Palabras claves: enfriadora, hotel, multicriterio

## Abstract

The current research proposes a methodology for the selection of alternatives of air conditioning systems for a hotel. The working characteristics of the hotels were considered, as well as the study of 8 load profiles that reflect their variation due to the occupation phenomenon. Several centralized air conditioning systems, adaptable to the fluctuation of the loads present in this type of facility, were identified, using a water chiller plant as a base. Four alternatives of air conditioning systems are proposed: (1) System of 2 chillers with equal capacity, (2) System of 2 chillers with different capacity, a chiller of variable refrigerant flow and a chiller of constant flow; (3) System of 3 chillers of constant flow with different capacity; (4) It is (1) with a thermal storage tank. In order to select the alternatives, multi-criteria selection techniques were used for the selection of Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems. The methods of Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS) were used. For the application of these methods, technical, economic and environmental criteria were used. The best alternative was (4) with a closeness coefficient of 0.66072, this result was verified in 66.18% of the analyzed scenarios during the sensitive analysis.

Key words: chiller, hotel, multi-criteria

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I:</b> Estado del arte de selección de alternativas HVAC.....	1
I.1 Situación actual de los sistemas de climatización. Perspectivas internacionales y nacionales.....	1
I.2 Configuración de los sistemas HVAC .....	4
I.2.1 Clasificación de los sistemas HVAC.....	4
I.2.2 Configuraciones alternativas e innovadoras del sistema.....	8
I.3 Rendimiento y eficiencia energética de los chillers.....	10
I.4 El proceso de selección de los esquemas de HVAC .....	12
I.5 Procedimiento de dimensionamiento de los sistemas HVAC .....	13
I.6 Procedimientos de optimización para el proceso de diseño .....	14
I.7 Métodos multi-criterios y sus aplicaciones prácticas en sistemas HVAC.....	16
I.7.1 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP).....	17
I.7.2 Técnica de Preferencia de Orden por Similitud para Soluciones Ideales (TOPSIS).....	19
I.8 Validación del método combinado de AHP y TOPSIS .....	23
I.9 Criterios estudiados de toma de decisiones en sistemas HVAC .....	25
I.10 Conclusión parcial .....	26
<b>CAPITULO II:</b> Generación de alternativas .....	27
II.1 Metodología para la selección de alternativas .....	27
II.2 Simulación de cargas térmicas asistido por software UABC .....	29
II.3 Pantalla de control .....	33
II.3.1 Entrada de datos al simulador (DATA2).....	33
II.3.2 Cálculo de la carga de enfriamiento (SCRW4).....	33
II.3.3 Cálculo de temperaturas horarias (MEX1TH) .....	34
II.3.4 Cálculo de radiación solar y factor temperatura aire-sol (MEX2TAS) ...	34
II.3.5 Cálculo de ganancia de calor en techo (GT4SW), muro norte (GN4SW), muro sur (GS4SW), muro este (GE4SW) y muro oeste (GO4SW). .....	34
II.3.6 Ganancia de calor a través de puertas y ventanas (GVP4SW).....	34
II.3.7 Ganancia de calor debida a personas, iluminación, equipo, infiltración y ventilación (EQ4W) .....	35

II.3.8 Retiro de calor del aire acondicionado (RCAA) .....	35
II.3.9 Integración de ganancias de calor y potencia de enfriamiento (CE4SW) .....	35
II.3.10 Correlaciones fundamentales (H-G–2000).....	36
II.4 Análisis estadístico de los perfiles de carga .....	36
II.5 Criterios a evaluar en las alternativas .....	37
II.6 Descripción del proceso de toma de decisiones .....	42
II.7 Modelo AHP.....	44
II.8 Modelo TOPSIS .....	47
II.9 Conclusión parcial .....	49
<b>CAPITULO III: Caso de estudio .....</b>	<b>50</b>
III.1 Determinación de las cargas térmicas .....	50
III.2 Resultados de la simulación de las cargas térmicas .....	54
III.3 Alternativas evaluadas.....	55
III.4 Aplicación de la selección multicriterio.....	59
III.4.1 Resultados de las alternativas y criterios .....	60
III.4.2 Aplicación del AHP .....	61
III.4.3 Aplicación del TOPSIS .....	64
III.4.4 Análisis sensitivo .....	68
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>79</b>

# INTRODUCCIÓN

El confort térmico en las edificaciones es una premisa de la vida moderna. Las personas pasan del 80-90 % de su tiempo en espacios cerrados y el ambiente interior tiene efectos importantes en la salud humana y la eficiencia del trabajo (Yu, Hu, Liu, Yang, & Kong, 2009). Los sistemas actuales de aire acondicionado en sectores residenciales, comerciales e industriales alrededor del mundo consumen más de un millón de millones kilowatt-horas de energía, (Global Industry Analysts, Inc, 2015) lo que representa el 15 % de toda la electricidad que se consume en el mundo y el 45 % del consumo total de los hogares y edificios comerciales (Fan , Luo, & Souyri, 2007). Otros estudios indicaron que el sistema de aire acondicionado fue el responsable del 10% al 60 % del consumo de energía total de una edificación, según el tipo de esta. (Kalkan , Young , & Celiktas, 2012).

El sector del turismo se caracteriza por incurrir en altos consumos energéticos. En un hotel tropical cerca del 60 % de la energía es consumida por el sistema de aire acondicionado (Ali, 2013). Además, según (Cerutti, Beccaro, Bruun, & Bongavegna, 2014) el turismo es el responsable del 5 % de las emisiones globales de dióxido de carbono. Las características de los hoteles influyen profundamente en el funcionamiento de los sistemas HVAC; primeramente, su operación continua, los requerimientos de confort que posee cada área funcional (Deng, 2003); la fluctuación de las cargas térmicas debido a la cambiante dinámica de los patrones de ocupación y finalmente las diferentes percepciones de los clientes con respecto a la comodidad interior, así como la cultura y la conciencia del consumo de recursos. Debido a esto, varios autores afirman que en estas instalaciones los sistemas HVAC trabajan a cargas parciales, (Ryu, Hong, & Seo, 2014) (Wang, Lin, Tu, Wang, & Huang, 2015) (Önüt & Soner, 2006) derivando este fenómeno, problemas de ineficiencia energética.

En Cuba existen indicaciones para el uso eficiente de la energía recogidas en diversos documentos como los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el Período 2016-2021 y otros con diferentes rangos

legales; políticas para disminuir el índice de portadores energéticos, de consumo de agua e incrementar la utilización de fuentes de energía renovable y el reciclaje de los desechos que se generan en la prestación de servicios.

Se cuenta con varios Comités Técnicos de Normalización (CTN), como el CTN 40 “Diseño Bioclimático y Sostenible en la Construcción” del MICONS, el CTN 88 “Climatización y Refrigeración” del Instituto de Refrigeración y Climatización (IRC) del MINDUS, el Comité Electrotécnico (CEC) y el CTN 107 del MINEM, entre otros que han elaborado varias normas cubanas (NC 220:2009 y la Resolución 316:2008 del Ministro de la Construcción; NC 1072:2015 “Climatización industrial”; la NC ISO 50001:2011 “Sistema de gestión de la energía”) que establecen requisitos a las inversiones en el campo de la Eficiencia Energética (EE) y la Energía Renovable (ER) que aportan importantes beneficios para el uso eficiente de la energía. (Lacera Linde, 2018)

Las causas principales que contribuyen a incumplir las normas por parte de los proyectistas están relacionadas con el sistema de organización de la producción, premuras injustificadas, entre otras razones. Por su parte los inversionistas toman decisiones ignorando o rechazando las soluciones eficientes de proyecto argumentando falta de presupuesto, apuros, dificultades con los suministros, etc. Además, las normas existentes no son suficientes para evaluar las nuevas inversiones en el proceso de otorgamiento de la Licencia Energética. (Lacera Linde, 2018)

Teniendo en cuenta las reglas de diseños anteriores, no existe una metodología que permita diseñar los sistemas HVAC y a su vez optimizarla para que se ajuste lo mejor posible a las cargas de la edificación. En este escenario se hace necesario un nuevo enfoque para el dimensionamiento del sistema de climatización de una instalación hotelera desde su fase de diseño. Asumiendo la gestión inadecuada de diseño planteada y el sobredimensionamiento del sistema HVAC son fenómenos comunes para estas instalaciones, se plantea el siguiente problema científico.

**Problema Científico:**

En el área de inversiones del MINTUR relacionada con la instalación de sistemas HVAC para los hoteles no siempre tienen en cuenta las soluciones más eficientes y no tienen implementado ningún procedimiento multicriterio para la selección de alternativas.

**Hipótesis:**

La aplicación de un método de selección multicriterio permitirá elegir la configuración HVAC para un hotel que más se ajuste a criterios de alta eficiencia, económicos y ambientales.

**Objetivo general:**

Establecer una metodología para la selección multicriterio de alternativas HVAC para un hotel.

**Objetivos específicos:**

1. Analizar el estado del arte de las metodologías para la selección de alternativas de sistemas de climatización.
2. Elaborar metodología de selección de alternativas empleando los métodos AHP y TOPSIS.
3. Definir y analizar atributos e indicadores energéticos, económicos y ambientales para evaluar las alternativas de diseño.
4. Determinar los perfiles térmicos de trabajo asistido por software.
5. Ponderar y seleccionar la mejor alternativa HVAC para el hotel caso de estudio.

# CAPITULO I: Estado del arte de selección de alternativas HVAC

## I.1 Situación actual de los sistemas de climatización.

### Perspectivas internacionales y nacionales.

Actualmente se vive en una sociedad cuyo desarrollo viene de la mano de un consumo insostenible, donde se exigen unos estándares de calidad y confort cada vez mayores, los cuales deben ser suplidos a través de las fuentes actuales de producción de energía; y con el ritmo actual de crecimiento, su sostenibilidad es discutible. En la figura 1 se presenta la demanda energética en mega toneladas de petróleo equivalente (Mtoe) primaria prevista para el año 2035 y la cuota de crecimiento que se espera en el período 2012-2035. La zona geográfica con mayor cuota de crecimiento la representan los países asiáticos no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés), entre los que se desatacan países con altos estándares de consumo energético como China e India.



(a)

(b)

Figura 1 (a) Demanda primaria de energía, 2035 (Mtoe); (b) cuota de crecimiento mundial 2012-2035. Fuente: (Jonge, 2017)

Se proyecta que la demanda mundial de equipos HVAC aumentará 6.2% por año, alcanzando un total de \$ 93,2 mil millones en 2014 como se muestra en la figura 2 (Freedonia Group, Inc., 2012). Los equipos de refrigeración continuarán superando a los equipos de calefacción en todo el mundo con condiciones climáticas cada vez más altas.

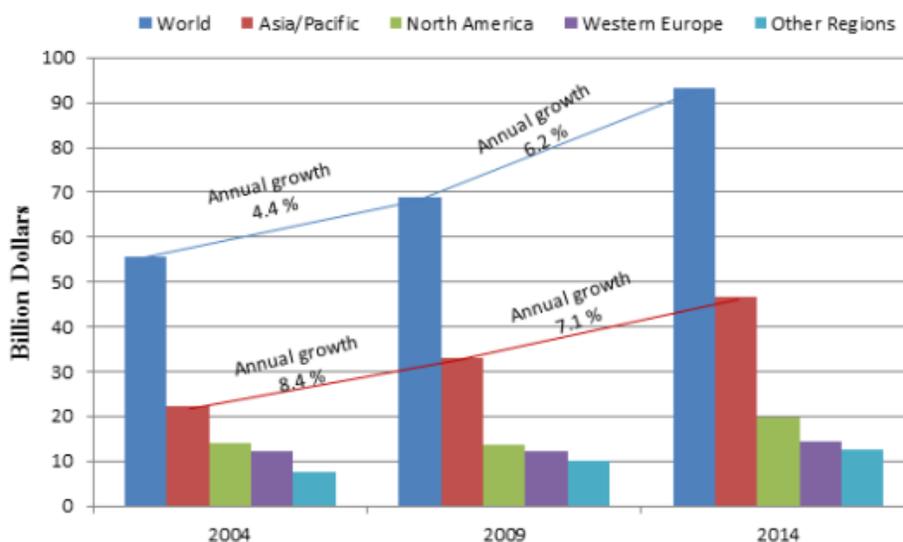


Figura 2 Demanda de equipos de climatización y crecimiento anual. Fuente: (Freedonia Group, Inc., 2012)

También se prevé que la demanda en la región de Asia y el Pacífico superará la demanda global promedio, con un incremento anual del 7,1% hasta 2014. China será el mercado nacional de más rápido crecimiento, que comprende el 40% de la demanda mundial. China se ha convertido en un productor líder en el segmento de acondicionadores de aire para habitaciones, exportando productos a los Estados Unidos, Europa Occidental y Asia. (Ali, 2013)

Además, los EE. UU. y Japón también se consideran productores importantes, cada uno con envíos anuales de más de \$ 5,5 mil millones durante el 2007. Se espera que la demanda en los EE. UU de equipos HVAC aumente un 8,1% anual hasta 2014. Se proyecta una demanda anual de crecimiento del equipo HVAC en 3,0% y 4,9% de 2009 a 2014 en Europa Occidental y otras regiones, respectivamente (Freedonia Group, Inc., 2012). En Europa, Alemania e Italia

lideraron con más de \$ 2 mil millones de envíos en el 2007. En la Unión Europea (UE), la venta anual de equipos HVAC fue de más de \$ 2.4 mil millones durante 2009 (BAXI, 2010).

Los datos estadísticos presentados para diferentes regiones del mundo mostraron que el sector de la construcción es un contribuyente clave para el consumo de energía. Teniendo en cuenta la importancia del sector de los edificios, el Consejo Europeo adoptó en 2007 los objetivos de energía y clima para 2020. El objetivo de ahorrar un 20% de consumo de energía a través de la eficiencia energética es una parte crucial y el foco principal es el sector de los edificios. Se estima que el mínimo ahorro energético en edificios genere una reducción de 60-80 Mtep / año en el consumo final de energía para 2020 (Ali, 2013).

En los edificios, la cuota de los sistemas de climatización es dominante para el consumo total de energía. Para un edificio nuevo, alrededor del 30% al 50% del costo total se relaciona con los sistemas HVAC en edificios no residenciales, y aproximadamente del 5% al 10% en el caso de edificios residenciales (Hensen, 1996). Por lo tanto, los sistemas HVAC serían el elemento vital para el ahorro energético mundial y la economía. A pesar de los diversos esfuerzos para reducir el consumo de energía, el acondicionamiento del espacio sigue siendo una porción muy grande del uso total de energía. En Cuba el consumo total de energía eléctrica se muestra en la figura 3, en la cual se refleja cómo este consumo ha ido incrementándose paulatinamente.

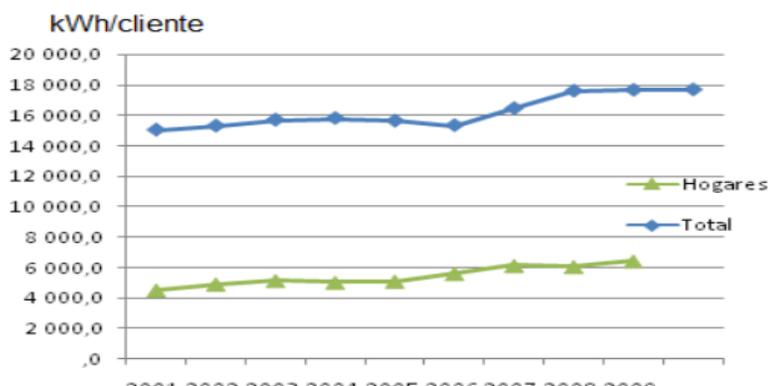


Figura 3 Consumo per cápita (kWh/cliente) global y residencial Fuente: (Oficina Nacional de Estadística, 2012)

De este consumo, una parte es debida a la demanda de aire acondicionado en los edificios administrativos, centros comerciales, hoteles, laboratorios, hospitales, etc., el cual oscila entre el 55 y 65% de la energía total que consumen esos edificios. (Oficina Nacional de Estadística, 2012)

## **I.2 Configuración de los sistemas HVAC**

La configuración del sistema HVAC es un diseño esquemático que determina el tipo, el número, la disposición de los diferentes componentes y la estrategia operativa para cumplir con los requisitos de comodidad del edificio. La disposición incluye la conexión entre los componentes, el suministro de fuentes externas y el esquema de control asumido. La topología de cómo se conectan los componentes es crucial para el rendimiento del sistema. Cada componente de la configuración está dedicado a realizar una determinada tarea del sistema en general. Sin embargo, el diseño del sistema de HVAC también se basa en una serie de criterios diferentes, como los costos, el consumo de energía, la calidad del aire interior y el confort térmico.

### **I.2.1 Clasificación de los sistemas HVAC**

Existen varios criterios que permiten clasificar los sistemas HVAC. Por ejemplo según (Balén, 2005) se pueden clasificar en dos categorías principales: sistemas convencionales e innovadores/alternativos. Los sistemas convencionales generalmente son eléctricos y están basados en refrigerantes de CFC y HCFC. En vista de las crecientes demandas de energía y los problemas ambientales asociados con los sistemas convencionales, los sistemas innovadores/alternativos operados con recursos de energía renovable y de bajo grado se demuestran como una opción obvia para lograr condiciones de confort.

Por otro lado (Guerra Plasencia & Rodríguez Santos, 2009) plantea que toda instalación de climatización se compone de tres partes diferenciadas: PRODUCCION TERMICA, DISTRIBUCION y EMISION EN LOS LOCALES

## PRODUCCIÓN:

Existen varias formas de producción de frío, siendo la más extendida la que corresponde al ciclo de compresión que dispone de una zona de evaporación y otra de condensación unidas mediante el compresor y cerrándose el ciclo mediante una estrangulación. Atendiendo a estos factores los equipos de producción se denominan con dos palabras, indicando en primer lugar el medio en el que se realiza la evaporación y después el medio condensante como se muestra a continuación:

- ✚ Aire-Aire.
- ✚ Aire-Agua.
- ✚ Agua-Aire.
- ✚ Agua-Aire (basados en refrigerantes)

## DISTRIBUCIÓN

El frío producido en el equipo frigorífico debe ser transportado a los locales a climatizar mediante alguno de los fluidos siguientes: REFRIGERANTE, AGUA o AIRE, empleándose para ello tuberías o conductos.

## EMISIÓN

El frío se emite en los locales a través de rejillas y difusores, que pueden estar incorporados en los propios equipos, o bien formar parte de una red de conductos de distribución. Lo más habitual es clasificar los sistemas de climatización según sea el fluido que entra en el local para producir el efecto de enfriamiento o calentamiento. Según esto pueden ser:

- ✚ Todo refrigerante: sistemas de expansión directa en el interior del local
- ✚ Refrigerante-aire: al local llega refrigerante y aire
- ✚ Todo agua: al local llega solo agua
- ✚ Todo aire: el único fluido que entra en el local es aire

Además de la clasificación anterior se podrían introducir la diferenciación entre los equipos compactos (cuando en un mismo equipo están incluidos todos los elementos) o sistemas centralizados como se muestra en la tabla 1.

*Tabla 1 Clasificación de los sistemas de climatización. Fuente: (Guerra Plasencia & Rodríguez Santos, 2009)*

Tipo	Equipos	Características	Sistemas
<b>Autónomos</b>	Exteriores enfriados por aire	Individual de ventana	Compactos
		Roof-top	Compactos o todo aire
	Interiores	Montado en pared enfriado por aire	Compactos o todo aire
		Compacto individual con torre de refrigeración separada	Compactos
		Compacto central de condensador exterior por aire o agua	Compactos o todo aire
		Bombas de calor individuales y red de agua central	Compactos
	<b>Centralizados</b>	Partidos enfriados por aire	Split
Multi-split VRV (volumen de refrigerante variable)			Todo Refrigerante
Planta enfriadora de bomba (chiller) o bomba de calor		Fan coil individual 2, 3 ó 4 tubos	Todo Agua
		Climatizador (UTA) Unizona o Multizona de volumen constante o variable (VAV)	Todo Aire
		Fan coil individual y climatizador	Agua-Aire
	Inducción	Agua-Aire	
Techo Frío	Agua-Aire		

### I.2.1.1 Sistemas todo aire

Un sistema de aire completo proporciona enfriamiento tanto sensible como latente, y posiblemente humidificación. Los sistemas se utilizan a menudo en los edificios que requieren el control individual de múltiples zonas, por ejemplo, hoteles, hospitales, escuelas y edificios de oficinas. Estos sistemas pueden clasificarse además en: sistemas de conducto simple/doble y sistemas multizona con volumen de aire constante o variable. Un solo conducto normalmente consume menos energía que el sistema de dos conductos. Sin embargo, los sistemas de volumen

variable son más eficientes que los sistemas de volumen constante. El mayor beneficio de estos sistemas es el mayor potencial para el uso del aire exterior para la refrigeración "libre". Los sistemas de recuperación de calor también se pueden integrar fácilmente en las unidades principales de aire acondicionado. Sus desventajas incluyen el requisito adicional de espacio en el conducto y mayores costos de instalación y operación (Henning, 2003).

### **I.2.1.2 Sistemas aire-agua**

En los sistemas aire-agua, tanto el aire como el agua se distribuyen a las unidades terminales instaladas en las zonas que se acondicionarán en todo el edificio. El aire y el agua se enfrían o se calientan en el sistema central de HVAC y desde allí se distribuyen a los espacios con aire acondicionado. Los sistemas de aire y agua generalmente se clasifican en tres tipos: sistema de inducción con dos o cuatro sistemas de tuberías, sistemas de fan-coil y paneles radiantes. En tales sistemas, es posible proporcionar enfriamiento y control simultáneos en una zona individual de manera económica a través de los termostatos. Sin embargo, la operación y el control en general son complicados debido al manejo tanto del aire primario como del agua secundaria. En general, tales sistemas están limitados a zonas perimetrales. El costo inicial de estos sistemas podría ser alto en comparación con todos los sistemas aéreos (Henning, 2003).

### **I.2.1.3 Sistemas todo agua**

En los sistemas toda agua, el agua se utiliza en el sistema de distribución térmica para calentar y/o enfriar un espacio. El proceso de transferencia de calor directo ocurre entre el agua y el aire interior. Estos sistemas pueden satisfacer las cargas de refrigeración y calefacción interiores, excepto las cargas de ventilación. Las unidades terminales más comunes que se utilizan con sistemas de agua refrigerada incluyen fan coils, techos refrigerados y pisos refrigerados. Dichos sistemas también pueden usarse con sistemas que utilizan convección natural en combinación con serpentines de enfriamiento, como enfriamiento silencioso y vigas frías. En los sistemas de agua, el sistema de distribución térmica requiere un espacio significativamente menor en comparación con los sistemas

completamente aéreos. El control individual de la habitación y el enfriamiento y la calefacción simultáneos también son posibles. Sin embargo, estos sistemas requieren un mayor mantenimiento en comparación con los sistemas totalmente aéreos (Henning, 2003).

Las ventajas de operar con una planta de enfriadoras de agua o chiller (en inglés) son: flexibilidad operacional, corriente de arranque reducida, capacidad de reserva elevada, mantenimiento planificado sin interrupción de la planta; capacidad de trabajar con altos niveles de eficiencia bajo el régimen de carga parcial y los costos energéticos viables (ASHRAE, 2008) (Ardakani, Ardakani, & Hosseinian, 2008). De acuerdo con (Bhatia, 2012) algunas consideraciones importantes a tenerse en cuenta para alcanzar la mayor eficiencia posible del sistema desde su fase de diseño son: la capacidad total del sistema es determinada por la carga máxima de enfriamiento y el régimen de carga parcial determina el número de enfriadoras a instalar, así como capacidad de cada uno.

#### **I.2.1.4 Sistemas basados en refrigerantes (sistemas unitarios)**

En estos sistemas, el proceso de enfriamiento se realiza a una distancia muy corta de los terminales de entrega. Estos sistemas son en su mayoría montados en la ventana o en la pared y ensamblados de fábrica con capacidad y tipo diferentes. Ejemplos de tales sistemas son los acondicionadores de aire de ventana, divididos y empaquetados. Las ventajas asociadas con dicho sistema son: control de la habitación simple y económico y menor costo inicial en comparación con los sistemas centrales. Pero estos sistemas son menos flexibles en términos de caudal de aire, tamaños de condensador y evaporador. El consumo de energía por kW podría ser mayor en comparación con el sistema central (Ali, 2013).

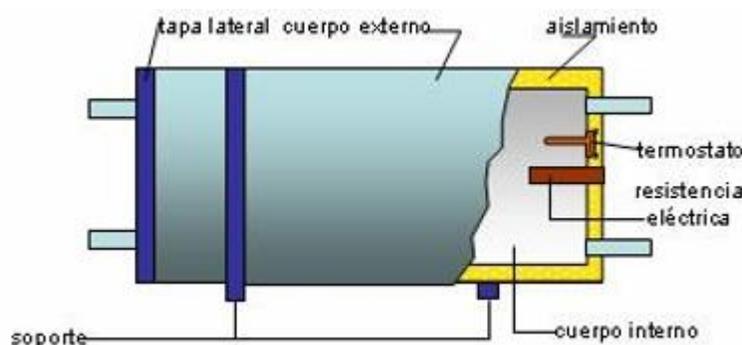
### **I.2.2 Configuraciones alternativas e innovadoras del sistema**

Las demandas de energía pueden reducirse mediante la implementación de enfoques de conservación de energía. Se toman algunos pasos hacia el uso de fuentes de refrigeración baratas. Por ejemplo, el uso de disipadores de calor como el aire exterior para el enfriamiento nocturno, el enfriamiento por evaporación, el enfriamiento por radiación, el enfriamiento por tierra utilizando intercambiadores de

calor de tierra a aire, etc. Pero estas técnicas de enfriamiento pasivo no pueden satisfacer las demandas de enfriamiento de todos los tipos de edificios a su limitada capacidad de enfriamiento. Por lo tanto, los investigadores están tratando de explorar tecnologías alternativas e innovadoras en términos de sus menores requerimientos de energía operacional y beneficios ambientales. (Ali, 2013)

### I.2.2.1 Sistemas de almacenamiento térmico

Los sistemas de acumulación térmica (TES) por sus siglas en inglés, consisten en un medio de almacenamiento; contenedor y dispositivo de entrada – salida que permite la acumulación de energía en un horario determinado para su posterior uso en otro diferente, contribuyendo a lo que se denomina volante térmico como se muestra en la figura 4. (Hidalgo, 2006)



*Figura 4 Tanque térmico y sus componentes principales. Fuente : (H.Lin, 2014):*

Es considerado una tecnología muy factible para el ahorro energético en las edificaciones, siendo este uno de los medios más utilizados para corregir el desfase entre las fuentes y la demanda de energía. Además, contribuye significativamente a encontrar una alternativa más eficiente ante las necesidades globales, cumpliendo con los principios ambientales. En la actualidad gracias al gran número de beneficios de los TES, estos se utilizan en todo el planeta ya sea en edificios residenciales, hospitales, escuelas, hoteles e industrialmente.

Los sistemas TES traen como beneficio el aprovechamiento de las tarifas eléctricas más bajas estimulando el uso eficiente de la energía, así como el ahorro de la misma y permiten una mayor fiabilidad en la generación debido a que la

energía proviene de dos fuentes; las plantas enfriadoras y los tanques de acumulación. Además, cuando ocurren cortes de suministro de energía eléctrica se cuenta con determinado tiempo de confort gracias a la carga térmica almacenada, así como paradas en la instalación para su mantenimiento. También estos sistemas favorecen a la fiabilidad y calidad del suministro, la estabilidad de la red de transmisión y una reserva de energía de rápida disponibilidad. (Schutz, 2015)

Estos sistemas a partir de las crecientes preocupaciones ambientales pueden jugar un papel vital en la reducción de la contaminación ambiental pues al reducir el consumo de energía favorece a la conservación de combustibles fósiles y a una menor emisión de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, etc.

### **I.3 Rendimiento y eficiencia energética de los chillers**

Las plantas de enfriadoras son sistemas centralizados Todo Agua que a su vez es un tipo de esquema de HVAC que permite satisfacer la demanda térmica de acondicionamiento del espacio interior de las edificaciones. Estos se caracterizan fundamentalmente por emplear agua como fluido calo-portador, extrayendo el calor del medio y por consiguiente disminuyendo la temperatura del aire mediante un proceso de termo-transferencia.

(Wang S. , 2010) plantea que la energía consumida por un chiller se utiliza básicamente para transferir el refrigerante de baja presión (temperatura de evaporación) a una alta presión (temperatura de condensación) tal como se ilustra en la Figura 5.

Al tener en cuenta la eficiencia del chiller, la temperatura de condensación debe mantenerse en el valor más bajo posible y la temperatura de evaporación debe mantenerse en el valor más alto permitido para minimizar la cabeza refrigerante que significa menos consumo de energía del compresor. Una disminución de 1 °C en la temperatura de condensación o un incremento de 1 °C en la temperatura de evaporación puede resultar en un aumento de aproximadamente 3 % del COP (coeficiente de funcionamiento) (Wang S. , 2010).

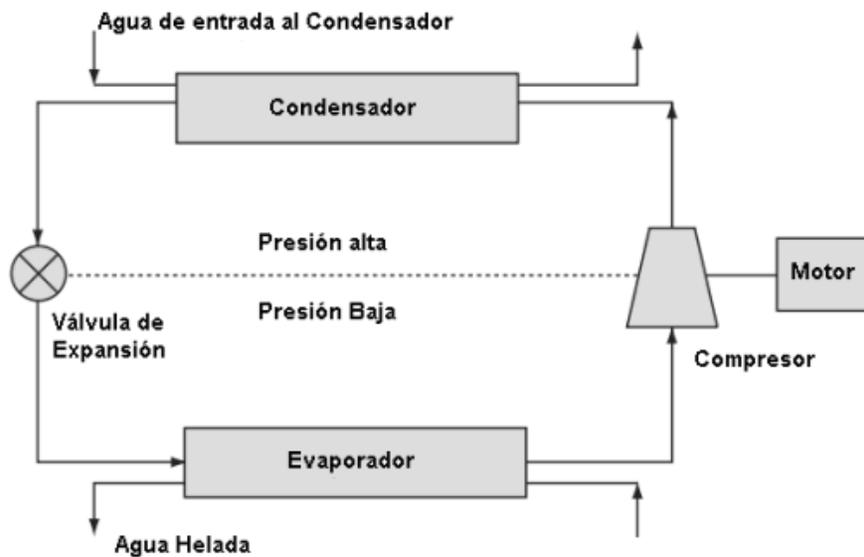


Figura 5 Diagrama esquemático de un sistema de enfriamiento refrigerado por agua.  
Fuente: (Hernández Y. , 2013)

Las temperaturas de condensación y evaporación establecen la presión de refrigerante y por lo tanto la energía necesaria por unidad de carga de refrigeración (véase la figura 6)

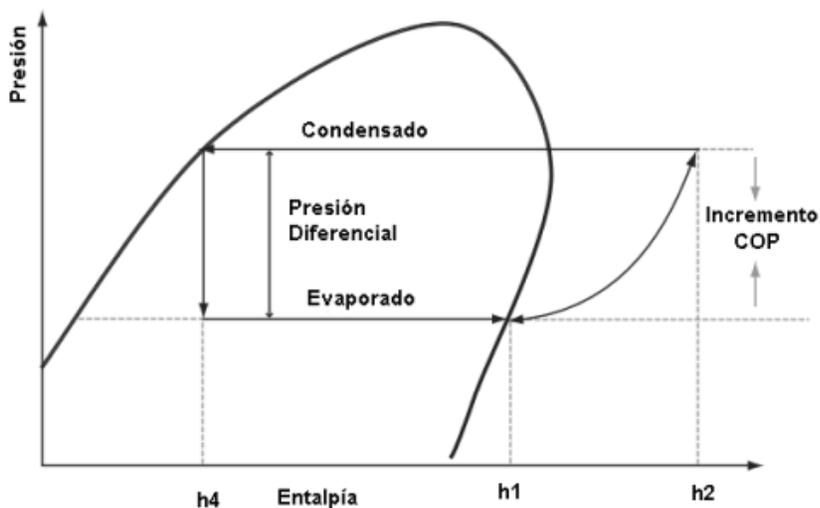


Figura 6 Diagrama de presión-entalpía para un ciclo de refrigeración ideal. Fuente: (Hernández Y. , 2013)

Según (Hernández Y. , 2013) mediante la reducción de la temperatura de condensación en 1 °C o el aumento de la temperatura de evaporación en 1 °C se puede lograr un ahorro de 1.5-2.5 %. Existe un límite mínimo de temperatura de condensación de los enfriadores que varía de acuerdo a los diseños de enfriadores diferentes.

El punto óptimo de carga de una enfriadora está influenciado por la curva de COP vs coeficiente de carga parcial (PLR). De forma general una enfriadora alcanza su mejor COP cuando trabaja a su máxima carga de diseño, que es cuando el PLR definido como la carga que asume las enfriadoras, dividido por su carga nominal, es igual a 1. Pero existen modelos de enfriadoras atendiendo a su tipo de compresor donde lo anterior expuesto no sucede; por ejemplo: en enfriadoras centrífugas ocurre entre el 40-80 % (ASHRAE, 2015) (Chan & Yu, 2002); en una enfriadora de tornillo el COP depende del número de circuitos de refrigeración, donde a más circuitos se alcanza mejor COP; las enfriadoras que emplean la tecnología Inverter entre el 15 y el 40 % de su máxima capacidad de diseño (ASHRAE, 2015); las enfriadoras reciprocantes cerca del 100 % de la carga y finalmente las enfriadoras de desplazamiento, para un solo circuito de refrigeración también cerca del 100 % de la carga. Otros factores son las condiciones meteorológicas y la fluctuación del perfil de carga influenciada por las dinámicas de la edificación.

## **I.4 El proceso de selección de los esquemas de HVAC**

La selección de sistemas de HVAC es un proceso variado que requiere un trabajo colaborativo entre el ingeniero de diseño y el propietario del proyecto para identificar y priorizar los criterios y considerar las diferentes opciones evaluadas que cumplan con la meta y el rendimiento del proyecto como se desee. Un enfoque multidisciplinario es mejor, por ejemplo, si el proyecto tiene un servicio de pre-construcción, el diseño y el operador tienen que consultar con el gerente de construcción para aprovechar las capacidades constructivas y considerar las opciones de las técnicas de evaluación las cuales tienen como objetivo tratar de

eliminar cualquier costo innecesario que no contribuya al valor o rendimiento de un producto. (ASHRAE, 2008)

En una primera etapa, el proceso de diseño tiene que definir los aspectos tales como: criterios objetivos y requisitos estándares. Los aspectos principales que influyen en el confort térmico de la instalación en cuestión son: limitaciones de la infraestructura, limitaciones de rendimiento (por ejemplo, temperatura, humedad, presión espacial), capacidad disponible (derivada de los cálculos de la carga térmica), fuente de utilidad del lugar e infraestructura, la arquitectura de las edificaciones y finalmente, las limitaciones presupuestarias de construcción que también influyen en la selección del sistema HVAC.

El propietario puede lidiar con diferentes criterios y la independencia de la solución de las técnicas de evaluación puede ofrecerle al proyecto, por ejemplo: (1) un rendimiento basado en costos que puede proporcionar una mejor solución para un primer costo más bajo; (2) una solución más sostenible durante la vida útil del equipo o (3) un mejor valor basado en una recuperación razonable de la inversión. Por ejemplo, la tabla I.1 (ver anexo 1) muestra diferentes estándares y directrices que podrían ser consultados por un especialista. (Diaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018)

## **I.5 Procedimiento de dimensionamiento de los sistemas**

### **HVAC**

La selección del tamaño apropiado de los equipos de aire acondicionado es fundamental para un sistema eficiente de HVAC. El dimensionamiento siempre debe hacerse utilizando un cálculo minucioso de las cargas máximas frigoríficas del espacio y las cargas del proceso. Las cargas para la refrigeración de espacios se calculan en función de las condiciones de diseño exterior, las cargas solares, las cargas de ventilación e infiltración y las cargas frigoríficas estimadas asociadas con las cargas internas de las personas y los equipos. Una vez que se determinan las cargas frigoríficas máximas, se puede determinar el tamaño total, en toneladas (TR). Este paso es muy importante y afecta el costo de capital y el rendimiento

operativo de los sistemas frigoríficos durante la vida útil. (Diaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018)

Para garantizar esto, existen varios métodos: cargas instantáneas, E20 Carrier y CLTD / ASHRAE CLF, Funciones de Transferencia, Balance Térmico y RTS (radiant time series). Actualmente, la simulación de cargas térmicas es uno de los recursos más extendidos disponibles para su determinación en las edificaciones. Es respaldado por metodologías integradas de paquetes de software. Estos programas pueden reducir el tiempo de ejecución de las tareas y analizar un gran número de soluciones posibles con recursos mínimos. Para estas aplicaciones en el mercado, hay un conjunto de paquetes para la simulación térmica de las edificaciones tales como: TRNSYS, DOE-2, ENERGY PLUS, COOL PACK, simulador UABC, Trane TRACE, DP-AIR (Universidad Politécnica de Valencia), Saunier Duval, DeST, entre otros. Los diferentes programas de simulación y la disponibilidad de software para la construcción de los modelos de energía fueron resumidos por (Harish & Kumar, 2016).

Pero las cargas frigoríficas obtenidas de estos métodos son determinantes debido a que los parámetros utilizados son constantes y no toman en cuenta las incertidumbres que pueden afectar el resultado. Muchos sistemas de ingeniería en las edificaciones y sus rendimientos se encuentran estrechamente asociadas con las condiciones externas y las cargas de los ocupantes. Diferentes autores como se muestran en la tabla I.2 (ver anexo 2) estudiaron y propusieron metodologías con el objetivo de asegurar los desafíos derivados de la variación de ocupación, tiempo y desviaciones determinantes etc.

## **I.6 Procedimientos de optimización para el proceso de diseño**

Como práctica habitual entre los diseñadores, se utiliza la carga frigorífica máxima calculada y se multiplica con un factor de seguridad como la capacidad del sistema frigorífico. Esta estrategia permite acomodar las incertidumbres y garantizar el confort bajo todas las condiciones, pero el riesgo de un tamaño

excesivo podría ser importante. Según (Verhelst, Van Ham, Saelens, & Helsen, 2017) el sobredimensionamiento puede reducirse si se aplican otros tipos de factores de seguridad debido a un mejor aislamiento, una mejor capacidad de control de HVAC y una mayor conciencia de los efectos en el rendimiento energético de la edificación. (Lu , Chen, Gao, & Ding, 2008) refieren que no existe un método cuantitativo para la selección adecuada del número y tamaño de los chillers para una planta grande multi-chiller. Como otra práctica entre los ingenieros, hay tres enfoques principales, el primero consiste en determinar el número de chillers según la regla individual de la aprobación de los diseñadores o la demanda de los usuarios y considerando solo la carga máxima, ignorando el perfil de carga. En el segundo método, los chillers se dimensionan de manera desigual, para cubrir el 90% de la carga frigorífica y el 10% de la carga máxima, pero las reglas generales solo se aplican para dos condiciones de funcionamiento, una de condición de stand-by. Y el tercero enfoque más empleado es diseñar la planta con enfriadoras de igual capacidad. A pesar que varios autores sugieren que las plantas que operan con enfriadoras de diferentes capacidades son más eficientes. (Lu Lu & Wenjian Cai. , 2001)

Los problemas de optimización del diseño de HVAC se pueden clasificar en dos tipos. El primer tipo es la optimización de los parámetros de diseño estático como envolventes de construcción, sistemas y componentes de HVAC, conductos y sistemas hidráulicos y el segundo tipo es la optimización de las variables dinámicas de entrada, que generalmente comprenden la programación de control y los puntos de ajuste. Optimizar un componente HVAC requiere la evaluación de diferentes alternativas de sistema en la etapa inicial de diseño mediante técnicas de modelado, simulación y optimización. Por ejemplo, el uso de un perfil de carga arbitrario (Lu Lu & Wenjian Cai. , 2001) optimizó la selección de chillers en una planta de chillers mediante algoritmos genéticos aplicados. El objetivo de la optimización era minimizar los costos del ciclo de vida (capital + operación) mientras que todos los chillers constituían un puente en buenas condiciones de carga parciales para evitar cualquier sobretensión de los chillers.

(Gang, Augenbroe, Wang, Fan, & Xiao, 2016) Refiere que los estudios sobre el diseño optimizado del Sistema de Enfriamiento del Distrito (DCS), por sus siglas en inglés, son muy limitados, en sus artículos se examinó de acuerdo a varios aspectos la aplicación del método de optimización del diseño basado en la variabilidad según: la evaluación del rendimiento, el dimensionamiento del sistema, la selección de la configuración y la integración de la tecnología. En el caso específico del dimensionamiento de los sistemas, la capacidad de la DCS se determinó a diferentes niveles de riesgo. Sobre la base de la distribución anual de la carga frigorífica, se obtuvo la distribución del rendimiento del DCS con diferentes configuraciones y tecnologías. El DCS optimizado se determinó al equilibrar el riesgo y el beneficio.

Trabajos realizados recientemente de optimización (Gang, Wang, Yan, & Xiao, 2015) (Huang , Huang, Augenbroe , & Li , 2018) (Niu, Tian, Lu, Zhao, & Lan, 2019) (Li, Wang, & Xiao, 2019) reflejan en sus estudios la utilización de varios esquemas de sistemas HVAC centralizados a través del empleo de diagramas de frecuencia derivando las incertidumbres de las cargas térmicas y de las enfriadoras en relación con el edificio y aplicando una curva de COP-PLR.

## **I.7 Métodos multi-criterios y sus aplicaciones prácticas en sistemas HVAC**

La selección de la configuración del sistema HVAC suele decidirse en la etapa inicial del proceso de diseño cuando se producen las oportunidades máximas para la eficiencia energética. Todas las tecnologías tienen ciertos beneficios técnicos y económicos, pocas son mejores que otras para una aplicación específica y se pueden usar muchas alternativas para propuestas de climatización. En general, una vez que todos los objetivos se analizaron e identificaron uno o dos sistemas HVAC, se debe realizar una evaluación cualitativa detallada.

Se pueden utilizar diferentes métodos para completar el análisis analítico. El primero es calificar cada elemento en forma cualitativa y el otro más complejo como una calificación numérica. Estos métodos son llamados MCDM (Multi-

Criteria Decision Making) por sus siglas en inglés. Los métodos MCDM cubren una amplia gama de enfoques distintos.

En las últimas décadas se ha intensificado el interés de la aplicación de herramientas formalizadas de análisis de decisiones debido a la complejidad de problemas y a una mayor disponibilidad de datos. Los métodos disponibles se clasifican como (Tscheikner-Gratl & Egger, 2017):

- Modelos de medición de valor: se construye una puntuación numérica para cada alternativa. Además, se asigna un peso  $w$  a cada criterio, que representa la importancia del criterio, por ejemplo: WSA (Modelo de Suma Ponderada), AHP (Proceso de Jerarquía Analítica), por sus siglas en inglés respectivamente.
- Modelos de objetivos, aspiraciones y niveles de referencia: estos métodos miden como llegan las buenas alternativas, objetivos o aspiraciones, por ejemplo: TOPSIS (La técnica de preferencia de orden por similitud para soluciones ideales).
- Modelos de outranking: estos métodos comparan las alternativas por pares para cada criterio, encontrando la fuerza de preferir una sobre la otra, por ejemplo: ELECTRE (La eliminación y elección traduciendo la realidad) y PROMETHEE (Método Organizativo de Clasificación de Preferencias para la Evaluación de Enriquecimiento).

### **I.7.1 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)**

El método Proceso de Jerarquía Analítica AHP, (por sus siglas en inglés), fue desarrollado por Thomas Saaty en la década 1970 (Jureen, Siew-Hong, & Shahrul, 2013). La técnica AHP rompe el complicado problema de decisión de una manera lógica, en pequeños pero relacionados sub-problemas, en una estructura jerárquica de varios niveles. Este método permite a los responsables de la toma de decisiones (DMs en inglés) realizar comparaciones por pares para obtener una importancia relativa de la variable en cada nivel de la jerarquía y/o evalúa las alternativas en el nivel más bajo de la jerarquía para poder tomar la mejor decisión entre todas las alternativas. El AHP puede involucrar discusiones grupales y

modificaciones para finalmente lograr un acuerdo. Además, este método elimina juicios inconsistentes realizando una verificación de consistencia.

Como aplicación práctica, (Shahrestani, HVAC, 2012) propone un enfoque robusto de toma de decisiones para la selección del sistema HVAC & R. El desempeño técnico, los impactos económicos y ambientales de 36 permutaciones de los sistemas primario y secundario se toman en cuenta para elegir el sistema de HVAC & R más adecuado para un edificio de oficinas de estudio de caso. El edificio es un representante de la forma dominante de edificios de oficinas en el Reino Unido. Se realiza una evaluación dinámica del desempeño de las alternativas de HVAC & R utilizando el paquete TRNSYS junto con el análisis del costo energético del ciclo de vida para proporcionar una base confiable para la toma de decisiones. Los seis escenarios considerados en este documento cubren ampliamente las actitudes de los tomadores de decisiones sobre la selección del sistema HVAC & R. Estos escenarios se analizan a través de un Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y análisis de sensibilidad que demuestran la solidez de la decisión final para cada escenario. Uno de los resultados significativos de este estudio revela que el sistema de cogeneración que involucra la generación de energía eléctrica, calefacción y climatización, a pesar del alto nivel de demanda de energía y también de una mayor inversión inicial, es una de las alternativas mejor clasificadas debido al menor costo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>.

(Chiness, Nardin, & Saro, 2011) realizaron un estudio de toma de decisiones para la selección de sistemas de calefacción en naves industriales. En este estudio, se investigaron ocho combinaciones de sistemas de calefacción mediante la consideración de nueve criterios que incluyen: confiabilidad, tiempo de reparación, tiempo de entrega (el tiempo entre el pedido y la instalación del sistema), la flexibilidad de la fuente de energía y la flexibilidad del diseño, confort e incertidumbre económica, costos de operación e inversión. Para la parte de toma de decisiones de este estudio, se adoptó un AHP. Para cada sistema alternativo, todos los criterios, excepto el consumo de energía y las estimaciones de costos, se evaluaron cualitativamente a través de un proceso de entrevista que involucró

expertos en el diseño de sistemas HVAC & R. La ponderación de los criterios se basó en las opiniones subjetivas de los expertos. A pesar de considerar ocho alternativas y una amplia gama de criterios para la selección de sistemas, se encontraron deficiencias en este estudio:

- Existe una preocupación acerca de la confiabilidad de la evaluación cualitativa de los criterios para cada sistema alternativo, en muchos casos, no existe un acuerdo general sobre la preferencia de los sistemas entre los expertos y los que se muestran en la literatura.
- Para evaluar el consumo de energía de los sistemas alternativos, se utilizó el método de días de grado. Sin embargo, ni la eficiencia del diseño ni la eficiencia fuera del diseño de los sistemas alternativos HVAC & R fue especificado. Además, no se proporcionó información sobre cómo la temperatura base se definió en el edificio estudiado. Estas deficiencias suscitan inquietudes acerca de la confiabilidad de la evaluación del criterio de consumo de energía en este estudio.
- La consistencia de la matriz de comparación para la toma de decisiones no se examinó claramente. Esto es de importancia significativa en un proceso de toma de decisiones que utiliza el método AHP.
- La influencia del cambio climático y el calentamiento global no se tuvieron en cuenta en la toma de decisiones.
- No estaba claro si los resultados de este estudio son aplicables a un clima / región específica o podría extenderse a otras regiones.

### **I.7.2 Técnica de Preferencia de Orden por Similitud para Soluciones Ideales (TOPSIS)**

El método TOPSIS es desarrollado como una alternativa al ELECTRE y fue desarrollado por Yoon and Hwang en la década de 1980 (Jureen, Siew-Hong, & Shahrul, 2013). El concepto básico de este método es que la alternativa seleccionada debería tener la distancia más corta desde la solución ideal en sentido geométrico. El método asume que cada atributo tiene un incremento

monótono o una utilidad decreciente, lo que facilita la localización de las soluciones ideales y de las soluciones negativas ideales.

El orden de preferencia de las alternativas se obtiene comparando las distancias euclidianas. En primer lugar, se formula una matriz de decisión con  $M$  alternativas y  $N$  criterios. La matriz de decisión normalizada y la construcción de la matriz de decisión ponderada se llevan a cabo. Esto es seguido por las soluciones ideales y las soluciones negativas ideales. Para criterios de beneficios el tomador de decisiones quiere tener el máximo valor entre las alternativas y para los criterios de costo quiere valores mínimos entre alternativas. Esto es seguido por una medida de separación y por el cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal. La mejor alternativa es la que tiene la distancia más corta a la solución ideal y la más larga a la solución negativa ideal. (Cristóbal, 2010)

Como aplicación práctica, (Wang, Jing, & Zhang, 2009) desarrollaron un modelo impreciso (Fuzzy) TOPSIS de toma de decisiones para la selección de sistemas HVAC. En este estudio, se consideraron seis sistemas alternativos, incluidos: CAV y VAV, bobina de ventilador, unidad de inducción, sistema de HVAC y R distribuido (aire acondicionado) y volumen de refrigerante variable (VRV). Estas alternativas se evaluaron considerando 16 tablas de criterios cualitativos y cuantitativos diferentes, del conocimiento de expertos en el campo. Estos son: madurez, control de temperatura, control de humedad, costo de inversión, costo de operación y mantenimiento, vida útil, contaminación por el ruido, impacto visual, espacio utilizado, limpieza, aire fresco, comodidad térmica, conveniencia, simplicidad, concentración y flexibilidad.

Estos criterios fueron ponderados posteriormente frente a un conjunto de factores subjetivos. Las alternativas se evaluaron con respecto a cada uno de los criterios basados en el conocimiento de los expertos. Finalmente, se utilizó un método impreciso (por su nombre) TOPSIS de toma de decisiones para clasificar los sistemas alternativos. A pesar del análisis detallado involucrado en el proceso de toma de decisiones de este estudio, existen algunas deficiencias (Shahrestani, Yao, Cook, & Clements-Croome, 2018):

- El consumo de energía y las emisiones de carbono de los sistemas no fueron consideradas.
- No estaba claro si el resultado de este estudio es aplicable a un clima o región específica o podría extenderse a otras regiones.
- No estaba claro cómo se realizó la evaluación de los sistemas alternativos con respecto a cada criterio.

(Wang, Alp, & Shi, 2017) muestra la habilitación de una sólida evaluación comparativa de la energía para localizar de manera confiable la ineficiencia del rendimiento, lo cual es fundamental para el éxito de los programas de modernización de edificios en el sector de la construcción. La evaluación comparativa de criterios múltiples surge como una opción más racional sobre el método tradicional de ángulo único para evaluar el rendimiento del edificio que es fundamentalmente de naturaleza multifactorial. Combinando con la entropía de Shannon orientada a la información, este documento desarrolla un enfoque iterativo de TOPSIS ponderado basado en variables latentes (CLV) fundamentado en la entropía objetiva basada en variables para la evaluación comparativa del rendimiento energético de edificios de manera multifactorial. Básicamente, integra los beneficios de la agrupación variable para abordar la multicolinealidad con la teoría de la información para ponderar objetivamente los atributos de decisión con el fin de alcanzar la precisión de la evaluación comparativa de TOPSIS. Un caso de 324 viviendas muestra la robustez del procedimiento construido en un contexto temporalmente dinámico.

En el trabajo de (Wang, Jing, & Zhang, 2009) se evaluaron y compararon en múltiples criterios los seis esquemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), volumen de aire constante, volumen de aire variable, fan-coil, unidad de inducción, volumen de refrigerante variable y sistema de HVAC distribuido. Debido a la incertidumbre de los criterios cualitativos, este artículo presenta un modelo difuso de criterios múltiples para seleccionar el sistema HVAC óptimo. Los métodos de la teoría de conjuntos difusos, el valor lingüístico, el proceso de jerarquía analítica, la ponderación de entropía y la ponderación óptima

se utilizan para obtener los criterios de ponderación. La técnica de preferencia de orden por similitud con el método de solución ideal (TOPSIS) se emplea para obtener la clasificación de los esquemas de HVAC. Finalmente, la aplicación del modelo de evaluación de criterios múltiples difusos demuestra detalladamente el procedimiento de cálculo y evaluación en la selección de esquemas de HVAC.

(Jurelionis , Valancius, & Dorosevas, 2013) se centra en la relación entre los costos de inversión para la modernización de equipos de HVAC, así como la disminución del uso de energía y el mejor desempeño de los ocupantes en edificios de oficinas. El algoritmo de implementación del análisis de costo-beneficio se presenta en la actual investigación, que incluye una encuesta energética del edificio y una estimación de los ocupantes que no están satisfechos con los indicadores clave del clima interior mediante encuestas y mediciones de cuestionarios. La técnica para el análisis de preferencia de orden por similitud con la solución ideal (TOPSIS) se utiliza en el método propuesto para el procesamiento de datos.

(Mardani & Jusoh, 2016) propone un marco basado en el método difuso de Delphi, toma de decisiones de criterios múltiples difusos, incluido el proceso de jerarquía analítica difusa y técnicas difusas para el desempeño de los pedidos por similitud con la solución ideal. En el paso del método difuso de Delphi del estudio, se seleccionaron 17 factores energéticos claves entre un total de 40 factores energéticos y se categorizaron en cinco grupos. El proceso de jerarquía analítica difusa se utilizó para la clasificación de 17 factores energéticos clave, y las técnicas difusas para el desempeño de los pedidos por similitud con la solución ideal empleada para la clasificación de los 10 hoteles iraníes más grandes en diferentes provincias.

(Ning, Mengjie, Dongmei, & Shiming, 2017) informó que los parámetros operativos de los sistemas de aire acondicionado de tarea / ambiente (TAC), incluyendo la temperatura del aire de suministro ( $t_s$ ) y la tasa de flujo de aire ( $Q_s$ ), tienen efectos críticos sobre el ahorro de energía y un ambiente térmicamente cómodo. Debido a las contradicciones existentes entre estos dos aspectos, se debe realizar un

estudio de objetivos múltiples para lograr un consumo mínimo de energía y al mismo tiempo garantizar el nivel de confort térmico en el rango adecuado. Se adoptaron dos métodos de optimización en este estudio, uno es la metodología de superficie de respuesta (RSM) y el otro es la técnica para las preferencias de orden por similitud con el método de solución ideal (TOPSIS). El objetivo de este estudio fue comparar los pros y los contras de estos dos métodos.

(Zhang, Lin, Ai, & Huan, 2019) propone un estudio de la operación de ventilación del estrato para calefacción que se optimiza mediante el uso de una tecnología de toma de decisiones de criterios múltiples, es decir, una técnica de preferencia de orden por similitud con la solución ideal (TOPSIS). Se lleva a cabo un experimento sobre ventilación de estrato para calentar una oficina típica. Basados en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) validadas experimentalmente, los modelos de superficie de respuesta del rendimiento de ventilación se desarrollan para promover la eficiencia computacional de la optimización de TOPSIS.

(Yang, Ren, Solgaard, Xu, & Nguyen, 2018) investiga los impulsores de toma de decisiones cuando adoptan diferentes tecnologías de calefacción renovable. Se identificaron un total de 11 factores que abarcan el aspecto económico, tecnológico y ambiental de la tecnología alternativa de calefacción renovable, y estos se utilizaron para la selección de las tecnologías alternativas de calefacción renovable. En la estimación se utilizan tres tecnologías de calefacción renovable: calefacción solar, bombas de calor y calderas de pellets de madera.

## **I.8 Validación del método combinado de AHP y TOPSIS**

Según (Nadaban, Dzitac, & Dzitac, 2016) TOPSIS es la técnica de toma de decisiones multicriterio más conocida actualmente.

El método TOPSIS aparece como la tecnología multicriterio más conveniente en términos de sus capacidades ventajosas de la evaluación de alternativas

simultáneamente. (Wang, Alp, & Shi, 2017) (Lee & Lin , 2011) (Hwang & Yoon, 1981)

La comunidad científica internacional declaró la metodología AHP como una herramienta robusta y flexible de toma de decisiones multicriterio para tratar problemas complejos de decisión. (Qazi, 2018)

Según (Jureen, Siew-Hong, & Shahrul, 2013) los métodos AHP y ELECTRE muestran una controlada consistencia a diferencia del TOPSIS. Sin embargo, TOPSIS no es inferior a AHP ni a ELECTRE porque este usa una idea comprometedora en la cual una solución óptima es la mejor entre todos los atributos. Por lo tanto, los argumentos de consistencia no lo limitan porque cada alternativa es comparada con la solución ideal en un algoritmo. AHP es claramente inferior a ELECTRE y TOPSIS en términos de problemas estructurales porque este no puede ser usado cuando son involucrados en el problema numerosos criterios y alternativas. Entre todos los métodos, TOPSIS es aplicable a datos de larga escala y relativamente simples, así como a una gran cantidad de alternativas y criterios porque su algoritmo es directo y no causa complicación en los cálculos a pesar de la gran escala de los datos, por los que su utilización es fácil de implementar.

Estudios recientes de TOPSIS tienen como tendencia utilizarlo combinado con otras herramientas y técnicas multicriterio, llegando hasta 26 distintas como se muestra en la tabla 2. Estas combinaciones hacen al método clásico más representativo y funcional cuando se trata de problemas prácticos y teóricos. Entre las combinaciones más usadas están: AHP (23.3%) seguido de los grupos de tomas de decisiones (28.6%) y del enfoque de números difusos (52.2%) (Behzadian, Otaghsara, Yazdan, & Ignatius, 2012). El enfoque de números difusos se propone para futuros trabajos como un robusto complemento.

La selección del tipo de método a utilizar (AHP y TOPSIS) está basado además en el diagrama propuesto por (Davood , Erkoyuncu, & Rajkumar, 2015) en función de

los objetivos generales que se desean en la toma de decisiones multicriterio en el anexo 3.

*Tabla 2 Distribución de las técnicas combinadas o comparadas con TOPSIS. Fuente: (Behzadian, Otaghsara, Yazdan, & Ignatius, 2012)*

Técnicas combinadas o comparadas	N	%	Técnicas combinadas o comparadas	N	%
Enfoque difuso (fuzzy)	139	55.2	Análisis/teoría Grey	7	2.6
Grupos de toma de decisiones	76	28.6	Método Delphi	6	2.3
AHP	62	23.3	ELECTRE	5	1.9
Método Entropía	20	7.5	Redes Neuronales	5	1.9
Optimización multi objetivo	15	5.6	Compromiso planificado	4	1.5
Otras programaciones matemáticas	14	5.3	DEMATEL	4	1.5
Algoritmos Genéticos	14	5.3	QFD	4	1.5
ANP	13	4.9	Análisis principal de componentes	4	1.5
Método Taguchi	12	4.5	Técnica nominal de grupo	3	1.1
DEA	8	3	Tasa de señal para ruido	3	1.1
Métodos de simulación	8	3	PROMETHEE	3	0.8
VIKOR	7	2.6	MAUT	2	0.8
SAW	7	2.6	SERVQUAL	2	0.8

Por todo lo antes expuesto se escogerá un método de toma de decisiones combinado AHP y TOPSIS.

## **I.9 Criterios estudiados de toma de decisiones en sistemas HVAC**

Varios son los criterios que se han empleado en la toma de decisión de los sistemas HVAC. Estos se engloban en la esfera energética, técnica, medio ambiental, de salud, económica y de gestión. En la tabla I.4 se muestran los criterios más utilizados en la toma de decisiones en sistemas HVAC. (Augelis & Papadopoulos, 2009) (Arroyo, Tommelein, Ballard, & Rumsey, 2016) (Camejo & Hittle, 1989) (Wang, Jing, & Zhang, 2009) (Wang, Lin, Tu, Wang, & Huang, 2015) (Shahrestani, Yao, Cook, & Clements-Croome, 2018) (Yang, Ren, Solgaard, Xu, & Nguyen, 2018)

Tabla 3 Criterios utilizados en la toma de decisiones de sistemas HVAC. Fuente: Elaboración propia

Energéticos	Técnicos	Medio Ambiente	Salud	Económicos	Gestión
Uso energético	Tipo y tamaño de construcción	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Concentración de CO <sub>2</sub>	Costo de ciclo de vida	Simplicidad
Fuentes energéticas disponibles	Calendario de operación	Nivel de ruido	Confort térmico	Costo de operación	Flexibilidad
Flexibilidad de fuente energética	Condiciones de diseño internas/externas	Espacio total requerido	Satisfacción del usuario	Costo de mantenimiento	Confiabilidad
Capacidad frigorífica	Mantenibilidad	Espacio de techo requerido	Líneas limpias	Costo de seguro	Conveniencia de manejo
Coefficiente de refrigeración	Madurez	Impacto visual		Costo de inversión	Concentración
Eficiencia total de calor	Control de temperatura			Huella económica social	Dificultades de implementación
Energía cero neto	Control de humedad			Incertidumbre económica	
				Tiempo de vida útil	

## I.10 Conclusión parcial

- ✓ La selección del tamaño apropiado de los equipos de aire acondicionado es fundamental para un sistema de climatización eficiente. Este afecta el costo de capital y el rendimiento operativo de los sistemas de refrigeración durante toda la vida útil.
- ✓ Cuando se identifican uno o dos sistemas HVAC como una opción óptima, se debe realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa detallada que brinde el valor idóneo, el cual se convertirá en el sistema HVAC recomendado para lograr el objetivo.
- ✓ Para definir la mejor alternativa se precisó como herramienta, la toma de decisiones multicriterio, con los métodos AHP y TOPSIS.
- ✓ Se identificaron los criterios energéticos, técnicos, medio ambientales, de salud, económicos y de gestión para evaluar el comportamiento de los sistemas HVAC.

# CAPITULO II: Generación de alternativas

## II.1 Metodología para la selección de alternativas

La metodología cuenta con tres etapas fundamentales. La primera transcurre mediante el cálculo de cargas térmicas y su análisis estadístico. El segundo pasa por la identificación de los criterios y alternativas HVAC a evaluar. El tercero comprende la toma de decisiones que dará la decisión ideal a escoger como se muestra en la figura 7.

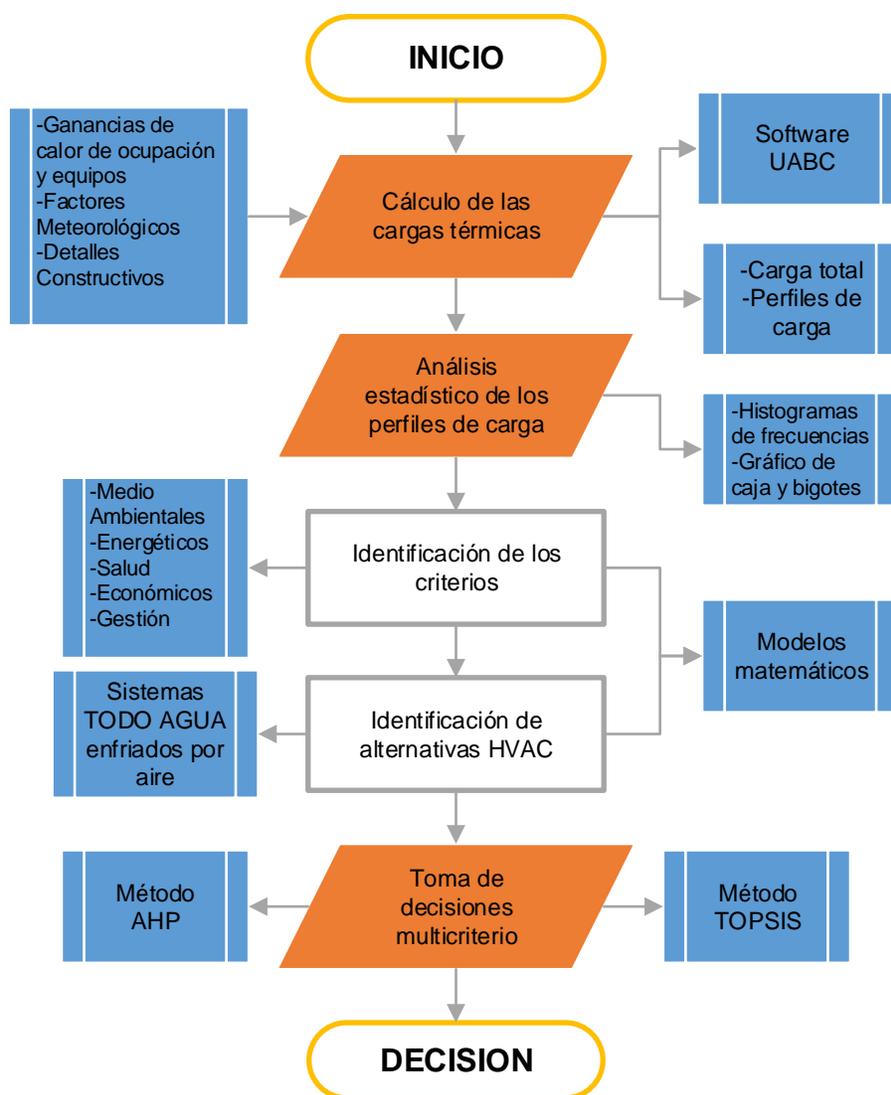


Figura 7 Proceso de selección de alternativas. Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de cargas térmicas es el paso inicial del proceso de selección de alternativas, utilizando el software UABC (Universidad Autónoma de Baja California) para hallar las cargas instantáneas de local a estudiar, con este fin se introducen detalles de ganancias de calor de equipos y ocupacionales, así como, factores meteorológicos y detalles constructivos de un hotel tipo. Esto da como resultado la carga total del sistema y perfiles de carga diferenciados por variaciones de los datos de entrada.

Los perfiles de carga hallados son sometidos a un análisis estadístico que desvela mediante un histograma de frecuencias la cantidad de veces que se repiten los valores de carga durante un día. Además de ser asistido por un diagrama de caja y bigotes para representar visualmente mejor su dispersión y simetría en dependencia de la ubicación de los cuartiles.

Estos análisis estadísticos favorecen la selección de las capacidades de las enfriadoras de Todo Agua condensadas por aire, que son las más utilizadas en los complejos hoteleros cubanos por sus altos valores de capacidad y eficiencia y auxiliado de la búsqueda bibliográfica se identifican alternativas de climatización utilizando estas enfriadoras empleando variaciones en su distribución, tecnología y manejo.

La identificación de los criterios de selección de alternativas HVAC (medioambientales, energéticos, salud, económicos y gestión) y el uso de los datos del proceso de enfriamiento en los catálogos del fabricante de las enfriadoras de agua permite hallar los modelos matemáticos que describen el funcionamiento de esta.

Con la ayuda bibliográfica y de expertos en el tema se da paso a la toma de decisiones multicriterio. Esta tiene como seno la utilización de un proceso combinado de 2 métodos multicriterio, primeramente, el AHP en la ponderación de los criterios (Saaty), y después para determinar la mejor alternativa el TOPSIS

## II.2 Simulación de cargas térmicas asistido por software

### UABC

Los simuladores térmicos de edificios son programas computacionales que permiten determinar el comportamiento energético y describir características importantes de edificaciones. Tienen un costo inicial elevado además de tener que pagar una patente mientras esté siendo usado. Los paquetes de modelación no permiten el cambio de algunas de las variables que influyen en el cálculo de las cargas térmicas.

El simulador desarrollado por la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) es utilizado en esta investigación por cortesía del Instituto de Ingeniería de dicha Universidad en base a los programas de colaboración entre la UABC y la UCF; está basado en el método de las transferencias, y ha sido utilizado con resultados satisfactorios en previos estudios (Pérez Tello, 2003) (Perez Tello & Campbell Ramírez, 2004). Este programa permite entrar en los archivos de datos primarios y configurar todos los parámetros climatológicos y constructivos del local, así como hacer todas las corridas pertinentes variando los datos que se requieran y obteniendo diferentes comportamientos de las cargas de enfriamiento.

Los aspectos conceptuales y los procedimientos de cálculo que se utilizan en este simulador están basados principalmente en manuales de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés). Estos conceptos y procedimientos, así como la metodología que proponen en el método de Funciones de Transferencia, han sido adaptados a las condiciones y requerimientos regionales, instrumentados con sistemas computacionales e integrados con datos climatológicos y parámetros técnicos y económicos locales, de tal forma que permiten construir paquetes de simulación para casos específicos.

La metodología requiere del uso de funciones de transferencia por conducción y de factores de ponderación, de coeficientes para el cálculo de transmisibilidad y absorción en vidrio y de coeficientes normalizados para funciones de transferencia

al aire del espacio, entre otros. Estos factores y coeficientes son obtenidos de bases de datos y de manuales de ASHRAE. (ASHRAE, 2007)

Esta metodología ha sido aplicada a casos específicos en diversas regiones, y sus resultados parciales y totales han sido validados mediante medición y monitoreo de campo, así como por la reproducción de demandas, consumos y facturaciones históricas de energía eléctrica. En el trabajo realizado *in situ* se reportan medición y monitoreo de temperaturas y humedades ambiente exteriores e interiores, medición y monitoreo de temperaturas en superficies externas, internas y de interface (aislante-techo, aislante-muro) para techos y muros aislados y no aislados, medición y monitoreo de variables eléctricas en centros de acometida, medición en tableros de distribución y en equipos, medición de temperaturas, humedades y flujos de aire a la entrada y salida del equipo de acondicionamiento ambiental (manejadoras, equipo paquete, equipo de ventana), descarga y retorno en conductos y rejillas, y medición y monitoreo de radiación solar en vidrios con y sin películas reflectivas. El trabajo está orientado tanto para profesionales con experiencia en cálculo y diseño de sistemas de aire acondicionado, como para aquellos que se inician en este campo. (Hernández L. , 2006)

Realizar la ejemplificación detallada de todos de los pasos de la metodología incluyendo el desarrollo de los paquetes computacionales para simulación de casos específicos, produciría un material sumamente extenso para los objetivos del presente trabajo, pero se proporcionan las bases para que los lectores puedan abordar un estudio completo y en caso necesario recibir la asesoría requerida. En la figura 8 se describe gráficamente la metodología general orientada a la evaluación de aislamientos. Dicho esquema metodológico ha sido utilizado por los autores en diversas ocasiones para caracterizar edificios en regiones de clima cálido y seco, y ha mostrado gran confiabilidad en la generación de resultados a partir de los cuales se realiza la evaluación de alternativas y toma de decisiones.

Los procedimientos de cálculo establecidos por el Método de Funciones de Transferencia por Conducción (MFTC) son ampliamente utilizados (en diferente grado) por una buena parte de los simuladores comerciales, en especial por

aquellas firmas dedicadas a proyectar sistemas de acondicionamiento ambiental, bufetes de ingeniería, proveedores y fabricantes de equipos de aire acondicionado. Sin embargo, cada versión se ha adaptado para considerar las condiciones de las zonas de interés y se limitan, por lo general, a dimensionar capacidades bajo condiciones de diseño y efectuar estimaciones gruesas de perfiles de beneficios potenciales en ahorro de energía y facturación. El esquema aquí presentado pretende adecuar los resultados proporcionados por esta metodología a las particularidades constructivas y económicas de nuestra región. (Hernández L. , 2006)

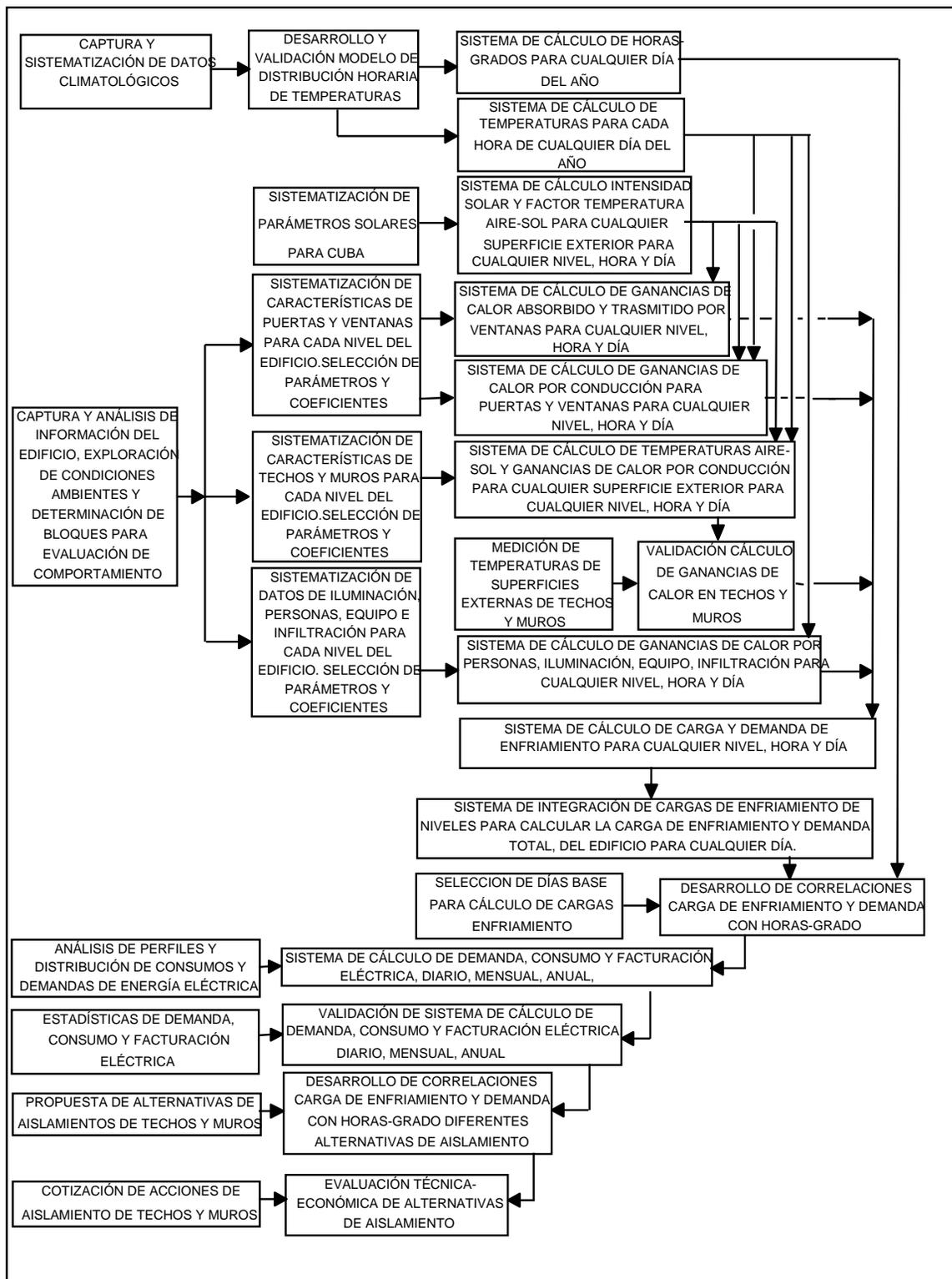


Figura 8 Metodología general. Fuente : (Hernández L. , 2006)

## II.3 Pantalla de control

El software UABC está compuesto por varias hojas de cálculo de Microsoft Excel que comandan el cálculo de las cargas térmicas. Estos se emplean para calcular de manera independiente los parámetros necesarios a través de la hoja principal de datos.

### II.3.1 Entrada de datos al simulador (DATA2)

Este nombre corresponde al archivo de entrada de datos constructivos del edificio, aquí se necesita introducir la altura y longitud de los diferentes muros y techos, la cantidad de ventanas y puertas, así como la ubicación en los puntos cardinales; se definen si las paredes son interiores o si reciben asoleamiento directo y en el caso del techo si este se encuentra en un piso intermedio o planta baja; y si posee algún agujero de traga luz, se introducen además los materiales de los diferentes muros con los coeficientes de transferencia de calor respectivos de cada uno, se calculan los coeficientes  $b_n$  y  $d_n$  de transferencia de calor de las paredes de los locales y los factores de ponderación de las habitaciones. (Hernández L. , 2006)

### II.3.2 Cálculo de la carga de enfriamiento (SCRW4)

**SCRW4** es el nombre del archivo que se emplea como pantalla de control de alimentación de información, así como de presentación de los resultados de potencia (o también llamada carga de enfriamiento horaria) para cada día analizado. Aquí se reportan los requerimientos de enfriamiento una vez integradas todas las ganancias de calor instantáneas y convertidas en potencia de enfriamiento horaria. En este archivo se requiere introducir la temperatura máxima y mínima de diferentes días seleccionados a conveniencia. Estos datos se utilizan junto con algunas ecuaciones para obtener el perfil de temperatura horaria del día en cuestión. Asimismo, se requerirán para obtener las correspondientes temperaturas horarias aire-sol. (Hernández L. , 2006)

### **II.3.3 Cálculo de temperaturas horarias (MEX1TH)**

Corresponde al nombre del archivo que contiene la función de Fourier, empleada para calcular la temperatura horaria ambiente a partir de los datos de temperaturas máxima y mínima del día obtenido en el archivo SCRW4.

### **II.3.4 Cálculo de radiación solar y factor temperatura aire-sol (MEX2TAS)**

Es el nombre del archivo donde se realiza el cálculo de la radiación solar incidente sobre cada superficie de la envolvente del edificio. Calcula así mismo la cantidad de radiación difusa y las convierte, a su vez, en el factor de temperatura aire-sol correspondiente. Para ello se requiere introducir datos de referencia y longitud local (en grados). Los datos anteriores y la aplicación de diferentes ecuaciones producen los resultados de la intensidad total absorbida en ( $\text{Btu/hft}^2$ ) para este día dado. (Hernández L. , 2006)

### **II.3.5 Cálculo de ganancia de calor en techo (GT4SW), muro norte (GN4SW), muro sur (GS4SW), muro este (GE4SW) y muro oeste (GO4SW).**

La ganancia de calor o rapidez de cambio instantánea de ganancia de calor, es la rapidez a la cual el calor entra o es generado en el espacio en un instante de tiempo dado. La ganancia de calor se clasifica por la manera en la cual el calor entra al espacio y el tipo de ganancia del mismo. El calor entra al espacio a través de superficies expuestas al ambiente exterior, por las personas en el interior, por la iluminación y el equipo en operación, así como por la ventilación y/o infiltraciones de aire. (Hernández L. , 2006)

### **II.3.6 Ganancia de calor a través de puertas y ventanas (GVP4SW)**

En puertas y ventanas se requieren los coeficientes de conducción para el vidrio, así como de transmisibilidad y absorción de energía. Adicionalmente, con la

información de orientación, superficie total y los denominados coeficientes de sombreado, se pueden obtener los factores SC, los cuales corresponden a los coeficientes de sombreado. Luego, aplicando las diferentes ecuaciones se pueden obtener los factores de ganancia solar transmitida y absorbida. Es preciso destacar que los valores positivos de estos factores sólo ocurren en el período diurno y son cero una vez que el sol se oculta. Por otra parte, las ganancias de calor a través de puertas y ventanas se dan a través de tres mecanismos: conducción, transmisión y absorción. (Hernández L. , 2006)

### **II.3.7 Ganancia de calor debida a personas, iluminación, equipo, infiltración y ventilación (EQ4W)**

En el archivo se determinan las ganancias de calor horarias debido a personas, equipos diversos (motores, aparatos de oficina, cafeteras, computadoras, etc.), iluminación, infiltración de aire exterior, y ventilación controlada del edificio. También se necesita el número de personas y la actividad que estas realizan. (Hernández L. , 2006)

### **II.3.8 Retiro de calor del aire acondicionado (RCAA)**

En este archivo es donde se entra la capacidad de enfriamiento requerida para el recinto en estudio y se obtienen los valores del retiro de calor por hora en un día específico. Este valor obtenido en la simulación es de mucha importancia desde el punto de vista verificativo pues permite comparar el valor obtenido con la capacidad real instalada. (Hernández L. , 2006)

### **II.3.9 Integración de ganancias de calor y potencia de enfriamiento (CE4SW)**

En el archivo CE4SW se realiza la integración de los resultados anteriores para convertir todas las ganancias de calor en potencia (carga) de enfriamiento. Para ello deben especificarse los parámetros de zona que, a su vez, definen el comportamiento térmico del edificio como un conjunto y que permiten establecer la

respuesta dinámica del mismo, es decir, lo que se conoce como inercia térmica. Esto hace posible conocer de una manera muy precisa la cantidad de energía (y a qué hora) es necesaria retirar del espacio, a través de los sistemas de acondicionamiento ambiental, para mantener las condiciones de confort en el interior. (Hernández L. , 2006)

### **II.3.10 Correlaciones fundamentales (H-G-2000)**

En este archivo se calculan las cargas de enfriamiento y el retiro de calor a partir de los valores que se obtienen de las correlaciones del gráfico después que se corren los macros. Para obtener estos valores se necesitan introducir los valores de las temperaturas máximas y mínimas de los meses de mayo a octubre. (Hernández L. , 2006)

## **II.4 Análisis estadístico de los perfiles de carga**

El análisis estadístico de los perfiles de carga se realizó con la ayuda del paquete estadístico STATGRAPHICS en el cual se utilizaron el histograma de Frecuencias y el gráfico de Caja-Bigotes. Algunos autores sugieren construir la distribución de frecuencia de las cargas de enfriamiento del edificio y a partir sus resultados, establecer la potencia instalada de cada máquina, así como la distribución de la potencia nominal de cada enfriadora. Tal es el caso de (Deng, 2003); (Chan & Yu, 2002); (Tai & Wing, 2004); (Lee & Lee, 2007)

Un histograma de Frecuencias es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Sirve para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la población, o de la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua, permitiendo observar una preferencia, o tendencia, por parte de la muestra o población por ubicarse hacia una determinada región de valores dentro del espectro de valores posibles (sean infinitos o no) que pueda adquirir la característica. Así pues, podemos evidenciar comportamientos, observar el grado de homogeneidad, acuerdo o concisión entre

los valores de todas las partes que componen la población o la muestra, o, en contraposición, poder observar el grado de variabilidad. (Howitt & Cramer, 2008)

Los diagramas de Caja-Bigotes (Boxplots o Box and Whiskers) son una presentación visual que describe varias características importantes como la dispersión y simetría. Para su realización se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos, sobre un rectángulo, alineado horizontal o verticalmente. Este consiste en una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico. Este rectángulo está dividido por un segmento vertical que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero (recordemos que el segundo cuartil coincide con la mediana). Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes. Estos bigotes tienen un límite de prolongación, de modo que cualquier dato o caso que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente. (McGill & Tukey, 1978)

## II.5 Criterios a evaluar en las alternativas

De los criterios utilizados en la toma de decisiones HVAC estudiados como se aprecia en el anexo 4 se seleccionaron los siguientes como se muestra en la tabla III.2

*Tabla 4 Criterios a analizar. Fuente: Elaboración propia*

No	Criterios	Subcriterios
1	Energético	Consumo eléctrico COP Capacidad frigorífica
2	Técnico	Facilidad en el mantenimiento Tiempo de vida útil Espacio requerido
3	Económico	Costo inicial Costo de mantenimiento Costo de ciclo de vida
4	Medio Ambientales	Emissiones de CO <sub>2</sub>

### **Consumo Energético:**

Cantidad de energía absorbida para realizar un determinado servicio. En el caso de estudio el consumo eléctrico fue determinado por un modelo matemático tipo caja negra mediante la regresión lineal múltiple (ver ecuación 2.1). Para determinar los coeficientes de correlación se emplearán los datos de operación ofrecido por el fabricante utilizando el paquete estadístico STATGRAPHICS para la confección de dicho modelo (ver ecuación 2.2).

$$Pe(kW) = a + b * t_1 + c * t_2 \quad (2.1)$$

$$Pe(kW) = f\{(T_{ret,i} - T_{sup,i}), T_{cond,i}\} \quad (2.2)$$

Donde  $t_1$  es la diferencia de temperatura del agua a la entrada y salida del evaporador y  $t_2$  es la temperatura del aire a la entrada del condensador; **a**, **b**, **c** son los coeficientes de correlación. La efectividad de los modelos se evalúa a través de las siguientes métricas:

$$R^2 = 100 \left( 1 - \frac{SS_{error}}{SS_{total}} \right) 100 \% \quad (2.3)$$

$$MAE = \frac{SAE}{N} = \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - \hat{x}_i|}{N} \quad (2.4)$$

Donde:

$R^2$  - Porcentaje de variabilidad en Y por el modelo de regresión ajustado

MAE - Media del error absoluto o valor absoluto promedio de los residuos e (indica el error promedio en la predicción de la respuesta usando el modelo ajustado)

El costo de la energía eléctrica se estimará mediante el cálculo de un promedio ponderado, según la tarifa eléctrica del hotel, el cual es 0,249 \$/kWh.

### **Capacidad frigorífica:**

La capacidad nominal del sistema es un rango de valores que varía según las distintas condiciones trabajo. Los modelos de capacidad nominal, serán

igualmente elaborados a través del paquete estadístico STATGRAFIC. En este caso estará en función de la temperatura de suministro de agua a la salida del evaporador  $t_{sup}$  y la temperatura del aire a la entrada del condensador  $t_{cond}$  como se observa en la expresión

$$CAP_i(kW) = f\{T_{sup,i}, T_{cond,i}\} \quad (2.5)$$

$$Cap(kW) = a + b * t_{sup,i} + c * t_{cond,i} \quad (2.6)$$

### ***Coefficiente de funcionamiento del ciclo (COP):***

Se define como la razón entre la carga frigorífica real y la potencia eléctrica consumida por el compresor; sustituyendo las expresiones (2.1) y (2.6) en la expresión (2.7) se obtiene la ecuación (2.8). Para su utilización de este criterio se halla la media aritmética de la planta en todas las horas de trabajo.

$$COP = \frac{CAP}{Pe} \quad (2.7)$$

$$COP = \frac{a+b*t_{sup,i}+c*t_{cond,i}}{a+b*t_1+c*t_2} \quad (2.8)$$

### ***Facilidad en el mantenimiento:***

Capacidad, cobertura y disposición para realizar el mantenimiento de la planta, este variará con respecto a la dificultad tecnología implementada.

### ***Tiempo de vida útil:***

Tiempo total que la planta enfriadora va a trabajar a plena capacidad. (TVU)

### ***Espacio requerido:***

Área utilizada para el montaje de la planta enfriadora. Para este estudio se utilizarán los catálogos de los fabricantes de los chillers utilizados, para la

alternativa de almacenamiento térmico se disponen 2 tanques de almacenamiento de 5.45 m de diámetro.

### **Costo inicial:**

Costo inicial que tendrá la planta para su explotación. Para este estudio se tomará como el costo de la tecnología de refrigeración equivalente. El costo equivalente por tonelada de refrigeración para chillers enfriado por aire menor que 150 TR es de 700 USD. (Enersion, 2017)

### **Costo de mantenimiento:**

El mantenimiento es indispensable para alargar la vida útil de la planta. Se estima como el 1% del costo inicial del sistema.

### **Emisiones de Contaminantes:**

Para este estudio se analizarán las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante el proceso en combustión que ocurre en una termoeléctrica nacional por cada kW de energía consumido en el proceso de climatización. El efecto de contaminación directa derivado de la quema de combustibles fósiles queda expresado de la manera siguiente:

$$I = Pr * \epsilon_{CO_2} \quad (2.9)$$

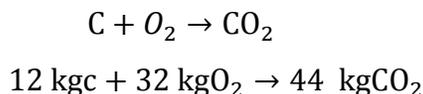
Siendo:

I= Impacto ambiental asociado  $\frac{\text{kg CO}_2}{\text{año}}$

Pc= Energía consumida  $\frac{\text{kWh}}{\text{año}}$

$\epsilon_{CO_2}$ = Índice de emisiones de CO<sub>2</sub>  $\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$

Cálculo de la cantidad de kg CO<sub>2</sub> que se desprende durante el proceso de combustión.



De acuerdo al contenido de carbono que posee el petróleo crudo cubano:

$0,81 \frac{\text{kgC}}{\text{kgPetróleo}}$  utilizado en las termoeléctricas de Cuba.

$$3.67 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kgC}} * 0.81 \frac{\text{kg C}}{\text{kg Petr6leo}} = 2.97 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg Petr6leo}}$$

$$2.97 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg Petr6leo}} * 0.310 \frac{\text{kg Petr6leo}}{\text{kg CO}_2} = 0.921 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$$

$\epsilon_{\text{CO}_2} = 0.921 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$ , según tipo de combustible quemado en las termoeléctricas de Cuba. (Landa, 2004)

### **Costo de ciclo de vida:**

El costo del ciclo de vida (CCV) de cualquier equipo es el costo total de toda su vida, desde la adquisición, instalación, operación y mantenimiento hasta el desmontaje y disposición final del mismo. La metodología a utilizar en esta investigación es tomada de la Norma Europea (Comité Europeo de Normalización, 1997) y de manera muy general de otras bibliografías. En este estudio se realizarán los cálculos de CCV en Microsoft Excel 2016. Este método de análisis compara el total acumulativo de costos de instalación, operación y mantenimiento de 5 alternativas según:

$$CCV = k_o + \sum_{i=1}^n \frac{Fc_i}{(i+D)^i} \quad (2.9)$$

En este caso en flujo de caja ( $Fc_i$ ) incluye: costo inicial ( $K_o$ ), costo de instalación, costo de la energía, costo de operación, costo de mantenimiento, que se considerarán positivos.

Donde  $I$ ,  $G$  y  $t$  son los ingresos (\$), gastos (\$), tasa de impuestos (%) y depreciación del equipamiento en el año  $i$ , quedando la expresión:

$$CCV = - \left[ K_o + \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{(i+D)^i} \right] \quad (2.10)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones y tasas en las tablas siguientes:

*Tabla 5 Ecuaciones utilizadas en el CCV. Fuente: Elaboración propia*

Nombre	Ecuación
Depreciación (USD)	$Dep = K_o/V_e$
Flujo de caja (USD)	$F_c = (I - G - Dep) * (1 - t/100) + Dep$
Tasa de interés real	$R = (1 + r/100)/(1 + f/100) - 1$
Tasa de descuento real	$D = R + g/100$
Factor de descuento	$De = 1/(1 + D)^i$
Factor de caja descontado	$F_d = F_c * De$
Factor descontado acumulado	$F_{da} = F_d + F_{dai}$

*Tabla 6 Tasas utilizadas en el CCV. Fuente: Elaboración propia*

Nombre	Valor
Tasa de interés (r), %	8*
Tasa de inflación (f), %	7
Margen de riesgo (g), %	3
Tasa de impuestos (t), %	0
Vida estimada ( $V_e$ ), años	20

\*Dato de la Dirección General de Tesorería del Banco General de Cuba en las circulares 5/2011 y 2/2012

## II.6 Descripción del proceso de toma de decisiones

El proceso de toma de decisiones (figura 9) es la base de este estudio, este contiene un algoritmo de pasos que ejerce como guía en la solución, así como su repercusión

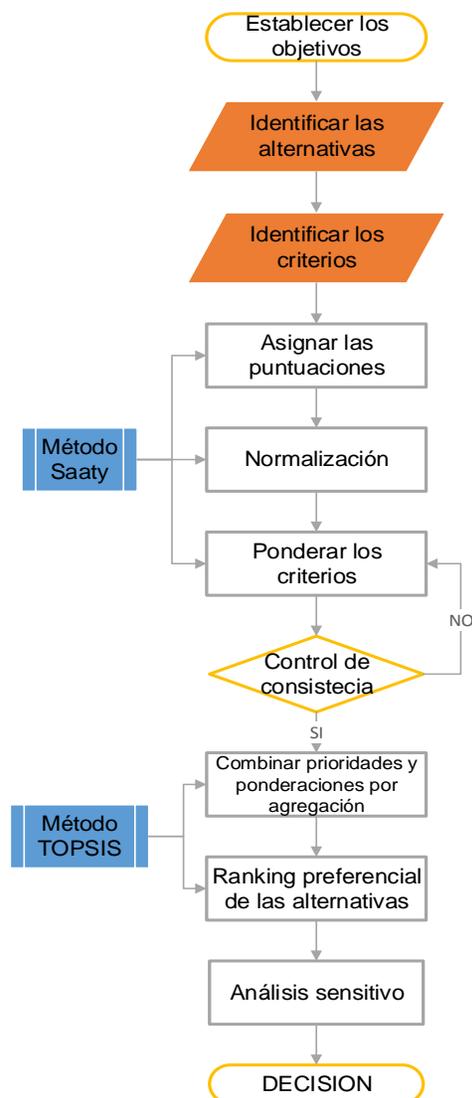


Figura 9 Proceso de toma de decisiones. Fuente: Elaboración propia

### ***Establecer objetivos:***

Determinar la precisión, idoneidad y relevancia de los criterios y las alternativas para verificar la validez de su contenido en cuanto a la evaluación de los sistemas HVAC.

### ***Identificar las alternativas:***

Las alternativas están dadas por plantas de chiller que su capacidad total cubre todas las demandas de todos los escenarios simulados variando la tecnología en cada una de ellas.

#### ***Identificar los criterios:***

Se identificaron los criterios expuestos en el epígrafe I.9 en la toma de decisiones de sistemas HVAC.

#### ***Asignar puntuaciones, Normalización y Ponderar criterios:***

Las puntuaciones normalizadas y las ponderaciones de los criterios, así como su validación se harán por el método Saaty de AHP, ya que este proporciona una mayor precisión para la obtención de la consistencia.

#### ***Combinar prioridades y ponderaciones por agregación y Ranking preferencial de las alternativas:***

Estas combinaciones de ponderaciones, así como su ranking se realizará por el método TOPSIS, proporcionando una mayor claridad en la selección de la mejor alternativa.

#### ***Análisis sensitivo:***

El análisis sensitivo se basa en cambiar las ponderaciones de cada criterio con otro aleatoriamente, para comparar los resultados nuevamente y sacar conclusiones sobre la robustez del modelo seguido.

## **II.7 Modelo AHP**

Para aplicar el modelo AHP, se hace necesario establecer un sistema de asesoramiento de expertos para identificar/modificar las alternativas de climatización de un hotel y los criterios que perturban su selección. Este proceso de consulta debe incluir diferentes sectores, incluyendo departamentos de decisión, industrias e institutos de investigación, además de formarse sobre la

base de los antecedentes en el conocimiento del problema por bibliografías consultadas. Se realizarán diferentes variantes de evaluación, proporcionando en cada una de estas, diferentes pesos a los parámetros involucrados.

### **Construir estructura de jerarquía**

Estructurar el problema bajo la consideración de una jerarquía, que desglosa el objetivo, los criterios, los sub-criterios y las alternativas del problema en varios niveles.

### **Hacer comparaciones por pares para generar matrices**

Después de la formación de la jerarquía se realiza la comparación por pares entre los criterios con respecto a la meta. Los juicios se basan en una comparación estandarizada de la escala de nueve niveles Saaty, que figura en la Tabla II.3 (Qazi, 2018). El vector de prioridad local (PVE o  $w$ ) para los juicios matriciales se obtiene normalizando por la ecuación 2.1 los vectores en cada columna de la matriz, y luego calculando el promedio de las filas de la matriz resultante.

$$w = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2.11)$$

Donde  $m$  es los valores de la columna

Tabla 7 Escala de nueve puntos Saaty para la comparación por pares. Fuente: (Qazi, 2018)

Valoración numérica	Juicios verbales de preferencias entre alternativas $i$ y alternativas $j$
1	$i$ es igualmente importante a $j$
3	$i$ es ligeramente más importante que $j$
5	$i$ es fuertemente más importante que $j$
7	$i$ es rotundamente más importante que $j$
9	$i$ es extremadamente más importante que $j$
2,4,6,8	Valores intermedios

### **Control de consistencia**

Esto garantiza que los juicios de comparación por pares sean lo suficientemente consistentes al calcular la relación de consistencia ( $CR$ ). Primero, se debe calcular el principio de valor propio ( $\lambda_{máx}$ ) para cada matriz usando la ecuación:

$$Aw = \lambda_{m\acute{a}x} w \quad (2.12)$$

donde  $A$  es la matriz de comparaci3n,  $\lambda_{m\acute{a}x}$  es el principio del valor propio y  $w$  es el vector propio correctamente normalizado (vector de prioridad).

Segundo, se estima el 3ndice de consistencia ( $CI$ ) para cada matriz con la dimensi3n " $n$ " utilizando la ecuaci3n:

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (2.13)$$

Entonces finalmente se calcula el  $CR$  usando la ecuaci3n:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.14)$$

donde  $RI$  es el 3ndice aleatorio. El valor de  $RI$  se selecciona seg3n la dimensi3n de la matriz de comparaci3n ( $n$ ). La Tabla II.3 ilustra los diferentes valores de  $RI$  para matrices que tienen un orden  $n$  de 1 a 10. El l3mite aceptable de los valores de  $CR$  depende del tama1o de la matriz, por ejemplo, el valor de  $CR$  aceptable para la matriz de 3x3 es 0.05, la matriz de 4x4 es 0.08 y para matrices que tienen un tama1o  $\geq 5 \times 5$  es 0.1. (Sindhu, Nehru, & Luthra , 2016)

*Tabla 8 Valores de 3ndice aleatorio (RI) para diferentes tama1os de matrices. Fuente: (Qazi, 2018)*

Tama1o de la matriz ( $n$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3ndice aleatorio	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

En caso de que estas relaciones de consistencia ( $CR$ ) fuesen mayor que su l3mite aceptable se deber3 replantear en las matrices hechas por las comparaciones por pares.

## II.8 Modelo TOPSIS

Para llevar a cabo este método se requiere seguir este algoritmo (Hwang, Lai, & Liu, 1993) (Yoon & Hwang, 1995) (Huang, Keisler, & Linkov, 2011):

1. Crear la matriz a evaluar que contenga (m) alternativas y (n) criterios con la intersección de cada alternativa con los criterios  $x_{ij}$  donde se obtiene la matriz  $(x_{ij})_{m \times n}$ .

2. La matriz  $(x_{ij})_{m \times n}$  es normalizada para formar la matriz

$$R = (r_{ij})_{m \times n}$$

usando el método de normalización

$$(r_{ij})_{m \times n} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2.15)$$

, donde  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$

3. Calcular la matriz de decisión de los valores ponderados normalizados

$$W = (t_{ij})_{m \times n} = (w_j * r_{ij})_{m \times n}; i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.16)$$

Donde

$$w_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^n W_j}; j = 1, 2, \dots, n \text{ y } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (2.17)$$

siendo  $W_j$  el valor ponderado inicial.

4. Determinar la mejor y peor condiciones  $A_w; A_b$  respectivamente

$$A_w = \{[\max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_-]\}; \{[\min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_+]\} \equiv \{t_{wj} | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2.18)$$

$$A_b = \{[\min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_-]\}; \{[\max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_+]\} \equiv \{t_{bj} | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2.19)$$

$$\text{Donde } J_+ = \{j = 1, 2, \dots, n | j\} \quad (2.20)$$

son los valores asociados a los criterios que tienen un impacto positivo, es decir, que mientras mayores sean mejor, y

$$J_- = \{j = 1, 2, \dots, n | j\} \quad (2.21)$$

son los valores asociados a los criterios con un impacto negativo, es decir, mientras menores mejor.

5. Determinar la distancia entre cada alternativa  $i$  y la peor y mejor condición respectivamente  $A_w; A_b$

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (2.22)$$

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (2.23)$$

Donde  $d_{iw}$  y  $d_{ib}$  son las distancias normalizadas de cada alternativa  $i$  con respecto a la peor y mejor condición.

6. Calcular la similitud con respecto a la peor condición

$$s_{iw} = \frac{d_{iw}}{(d_{iw} + d_{ib})}; 0 \leq s_{iw} \leq 1; i = 1, 2, \dots, m \quad (2.24)$$

$S_{iw} = 1$  si la solución a la alternativa tiene la mejor condición

$S_{iw} = 0$  si la solución a la alternativa tiene la peor condición

7. Plantear el ranking atendiendo a  $S_{iw}$

Con esta base matemática se utilizará en MS Excel 2016 con la herramienta SANNA desarrollada por (Jablonský, 2014) para analizar la selección multicriterio por el método TOPSIS.

## II.9 Conclusión parcial

- ✓ Se describió una metodología del proceso de la toma de decisiones, especificando el algoritmo de pasos compuesto por modelos AHP y TOPSIS.
- ✓ Se describió el procedimiento del software UABC para el cálculo de los perfiles de carga.
- ✓ Se detallaron criterios técnicos, económicos y medio ambientales para evaluar las alternativas HVAC.
- ✓ Para evaluar estadísticamente los perfiles de carga se utilizaron el histograma de frecuencias y el diagrama de caja y bigotes.

## CAPITULO III: Caso de estudio

### III.1 Determinación de las cargas térmicas

A la hora de implementar un sistema de climatización es necesario determinar los perfiles de carga para así saber cuánto podemos almacenar y tener como referencia los picos de demanda para cada escenario descrito. Estos perfiles se calcularán para ocho situaciones de estudio diferentes que pueden ocurrir hipotéticamente en instalaciones hoteleras

Para determinar las cargas térmicas se considera que la edificación principal está construida con una estructura de concreto, con paredes exteriores de bloque doble de quince centímetros, un espacio de aire en el centro para que estas paredes sean acústicas y paredes interiores de bloque sencillo, con ventanas de cristal en el edificio principal con vista a la parte norte y puertas de madera en el pasillo sur. Las cabañas están construidas de forma similar sólo que la pared del lado sur de estas es de cristal, la tienda y el restaurante también poseen áreas acristaladas muy grandes. La descripción detallada de los tipos de pared se encuentra en la tabla 9

*Tabla 9 Propiedades térmicas para los tipos de pared. Fuente: (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018)*

Pared	Capas	Conductividad térmica (W/mK)	Coefficiente global de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)	Espesor (m)
	Bloque			0.15
Exterior	Cemento Arcilla	2.05954	11.40879	0.02
	Cemento Arcilla			0.01
	Bloque			0.15
Interior	Cemento Arcilla	2.09029	11.67302	0.01
	Cemento Arcilla			0.01
Piso	Concreto	3.40909	29.18919	0.24

	Cerámica			0.01
	Cemento Arcilla			0.01
Techo	Concreto			0.24
	Rasilla	3.25960	26.31854	0.02
Ventana	Cristal sencillo	5.8	5400	0.008

En la construcción de los distintos perfiles de carga se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Asumir el estado de confort para una humedad relativa dentro de las zonas del 50% y una temperatura máxima de 24°C. Simular la demanda térmica para 24 horas correspondiente a un día típico de verano. (figura 10)

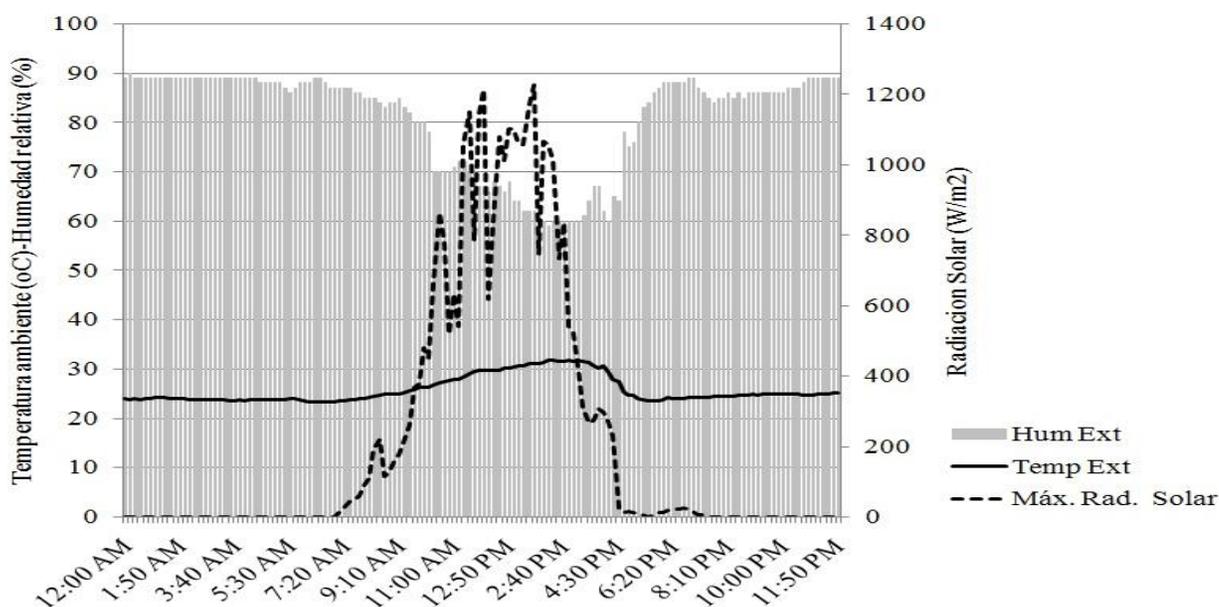


Figura 10 Datos meteorológicos (temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar) correspondiente a un día típico de verano. Fuente: (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Álvarez Guerra, & Gómez Sarduy, 2018)

- Aplicar el concepto de habitación "parcialmente cargada" (habitaciones desocupadas pero acondicionadas con una temperatura de 26 °C) con el

objetivo de minimizar el impacto de los altos niveles de humedad que afectan a las instalaciones construidas en zonas de clima tropical.

- Simular tasas de ocupación del 50 %, 75 % y 100% para el hotel.
- Eliminar diversidad de las cargas aplicando las siguientes estrategias operacionales: Con el 75% de ocupación, (65 habitaciones) ocupar las habitaciones de menor demanda térmica: Los módulos 1,2,3 y 20 habitaciones de las cabañas intermedias, el resto de las habitaciones parcialmente cargadas. Con el 50 % de ocupación, (44 habitaciones) los módulos bungalow 1,2,3 ocupados. El resto serán habitaciones parcialmente cargadas. (ver anexo 6)
- Concepto de hotel de tránsito: ofrece servicios de desayuno y comida para los huéspedes, hotel que generalmente no se ocupa en horario diurno (habitaciones)

Las ganancias de calor interna se definieron para una ocupación en dependencia de la zona térmica, definiendo las ganancias de calor sensible y latente por la norma ISO 7730. Se definieron además las ganancias por luz artificial y los diferentes equipos electrónicos. Para las ganancias por infiltración se asumió un factor de 0.8. Un resumen de los datos que se emplearon en el cálculo se muestra en la tabla 10.

Tabla 10 Características principales de las zonas térmicas. Fuentes: (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Álvarez Guerra, & Gómez Sarduy, 2018)

Área	Habitación tipo	total	Dimensiones (m x m x m)/ Orientación de la zona acristalada	Ganancias de calor Tipo/cantidad/potencia
<b>Habitaciones edificio principal</b>	Planta alta (este)	3	9 x 4 x 3 (Norte)	(ventilador,1,230)(Televisor,1,113) (Secador de pelo,1,1300) (Iluminación, 9,20); Capacidad máx. personas (3)
	Planta alta (oeste)	3	9 x 4 x 3 (Norte)	
	Planta alta (habitaciones intermedias)	9	9 x 4 x 3 (Norte)	
	Planta baja (habitaciones intermedias)	18	9 x 4 x 3 (Norte)	
	Planta baja (habitaciones intermedias esquina este-oeste)	12	9 x 4 x 3 (Norte)	
<b>Habitaciones Cabañas</b>	Esquina oeste	3	7.8 x 4.2 x 3.4 (sur)	
	Esquina este	3	7.8 x 4.2 x 3.4(sur)	
	Habitaciones intermedias	36	7.8 x 4.2 x 3.4(sur)	
<b>Áreas publicas</b>	Restaurante	1	31.1 x 13.3 x 2.3 (sur)	(ventilador,2,1000); (refrigerador,1,300); (mesa fría,2,500); (mesa caliente,3,3900); (Extractor,1,100);(cafetera,1,280);( tostadora de pan,2,3200); (Computadora,2,100); Iluminacion,60,1581)(Capacidad máxima personas, 67
	Cabaret	1	14 x 19 x 5.5 (sur)	(ventilador,2,1000); (nevera,1,117.61); (extractor, 1,100); (baffles,4,1250); (computadora,1,100) ; (Iluminacion,35,2815); (capacidad máxima de personas, 500)
	Tiendas	2	7.8 x 4.2 x 3.4(Norte)	(Ventilador,3,200);(computadora,2,100);(iluminación,15, 421); capacidad máxima de personas, 15)
<b>Áreas servicios</b>	Oficina doble	3	3.9 x 5.1 x 2.4(Norte)	(ventilador,1,200); (televisor,1,113); (computadora,1,100) (iluminación,4,80) (capacidad máxima de personas, 2)
	Oficina esquina este	1	3.9 x 2.5 x 2.4 (sur)	
	Oficina esquina oeste	1	3.9 x 2.5 x 2.4(Norte)	
	Oficinas intermedias	4	3.9 x 2.5 x 2.4(Norte)	

### III.2 Resultados de la simulación de las cargas térmicas

El objeto de este estudio es un hotel ubicado en clima tropical, compuesto por 87 habitaciones: 3 edificios principales; 3 módulos habitacionales tipo cabañas, un lobby, un módulo de servicios compuesto por: una tienda especializada, un restaurante-cocina, cabaret, y finalmente un área de oficinas.

Al introducir todos los datos constructivos y de operación en el simulador térmico de la UABC se obtienen 8 perfiles de carga térmica del hotel evaluados a partir de los supuestos anteriores. (Ver figura 11).

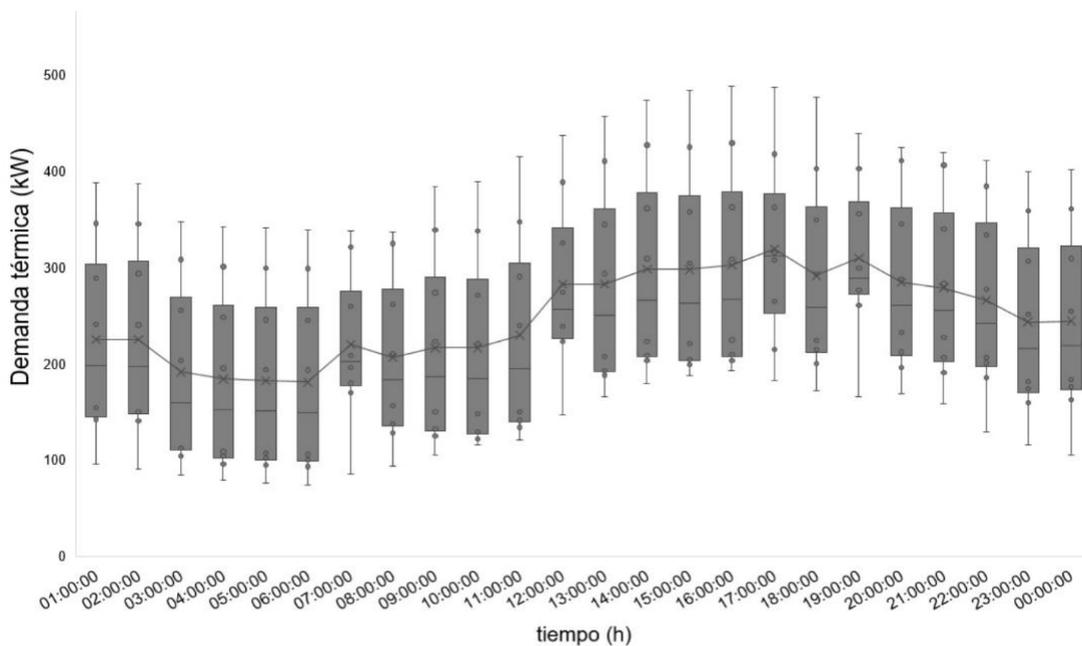


Figura 11 Perfiles de carga para un 24 h de trabajo en un hotel considerando escenarios del anexo 6. Fuente: (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Álvarez Guerra, & Gómez Sarduy, 2018)

En la gráfica de caja y bigotes de los 8 perfiles se observa una gran dispersión entre los valores de carga donde oscilan entre 73,67-488,26 kW (ver anexo 7). Los primeros escenarios son los escenarios críticos, el 1ero está diseñado para las peores condiciones de ocupación y clima posible y el 2do es el escenario con condiciones ideales de carga térmica, diferenciadas de las restantes que son más reales, este efecto es creado para ver los extremos de condiciones para la selección del perfil a evaluar.

Continuando con la metodología expuesta se efectúa el análisis de frecuencia de las cargas de enfriamiento a través del histograma con rango igual a 100 y se le agrega además el gráfico de cajas y bigotes ver figura 12.

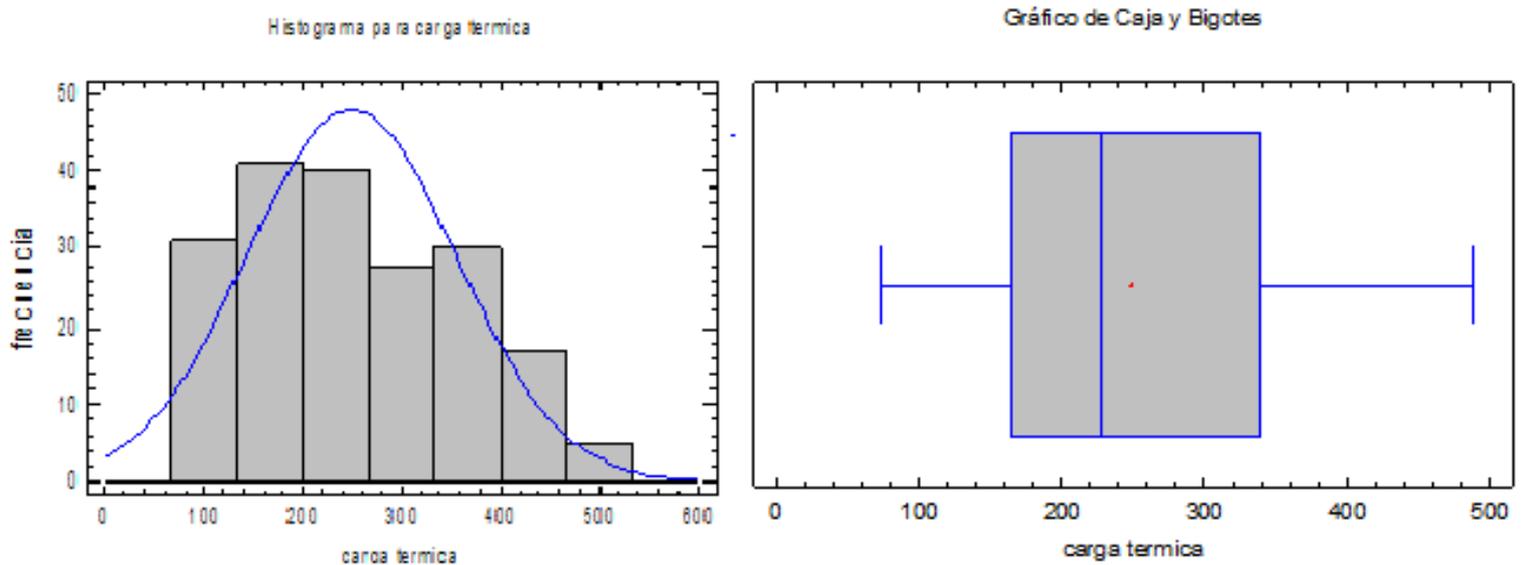


Figura 12 Análisis estadístico de los perfiles de demandas a) Histograma de cargas térmicas b) Gráfico de cajas y bigotes. Fuente: (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018)

La información estadística revela que las cargas de enfriamiento muestran una distribución normal. Las mayores frecuencias se encuentran entre 200 kW-250 kW (33%); 150 kW (28%); 350 kW (28%) y finalmente 300 kW con el (23%) de cargas acumuladas. Por lo que esta información se tomó como base para la selección de las capacidades de las enfriadoras. Las capacidades nominales fueron halladas bajo las condiciones del fabricante : temperatura de set point 6,7,8 y 9 °C y temperatura del aire a la entrada del condensador 30,35 y 40 °C.

### III.3 Alternativas evaluadas

Las siguientes alternativas de enfriadoras de agua condensadas por aire son investigaciones realizadas como se muestra en la tabla 11. Para cada alternativa se obtuvieron los criterios de capacidad frigorífica y consumo eléctrico, dando los valores de correlación siguientes (tabla 12 y 13):

Tabla 11 Alternativas de plantas de chiller a analizar. Fuente: Elaboración propia

No	Alternativas de plantas de chiller	Enfriadoras
1	Chiller Reciprocante x 2	1
2	Chiller Reciprocante + Chiller Tornillo Inverter	5 y 6
3	Chiller Reciprocante x 3	2, 3 y 4
4	Chiller Reciprocante x 3 + Almacenamiento Térmico	2, 3 y 4

Tabla 12 Coeficientes de regresión múltiple y de observación del modelo para el consumo eléctrico de las enfriadoras. Fuente: Elaboración propia

Enfriadoras	Consumo eléctrico				
	Coeficientes de regresión múltiple			Observación del modelo	
	a	b	c	R <sup>2</sup>	MAE
1	17,076	5,434	1,472	99,74	0,213
2	4,113	2,476	0,836	99,81	0,099
3	4,725	3,984	1,109	99,66	0,181
4	14,601	2,835	1,437	99,75	0,220
5	15,923	1,679	2,913	99,89	0,158
6	35,752	5,84112	0,427948	99,21	0,309

Tabla 13 Coeficientes de regresión múltiple y de observación del modelo para el consumo eléctrico de las enfriadoras. Fuente: Elaboración propia

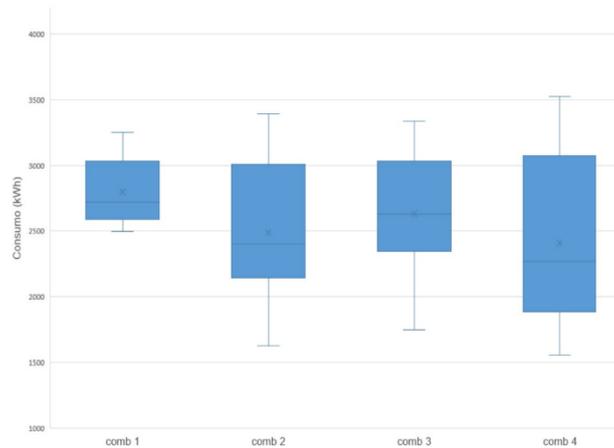
Enfriadoras	Capacidad frigorífica				
	Coeficientes de regresión múltiple			Observación del modelo	
	a	b	c	R <sup>2</sup>	MAE
1	303,403	-2,999	8,653	99,77	0,603
2	154,934	-1,938	4,266	99,81	0,34
3	205,841	-2,573	5,686	99,80	0,467
4	290,906	-3,641	7,884	99,79	0,646
5	334,041	-4,154	9,156	99,78	0,819
6	320,333	-2,9	12,367	99,13	0,542

La alternativa 1 es una de las variantes convencionales de climatizar un hotel con 2 enfriadoras (tipo 1) de la misma capacidad que cubran cada una el 50% de la demanda. En este caso se utilizaron 2 chiller de compresor recíprocante de 250 kW de capacidad frigorífica, siendo una de las variantes de la investigación de (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Álvarez Guerra, & Gómez Sarduy, 2018)

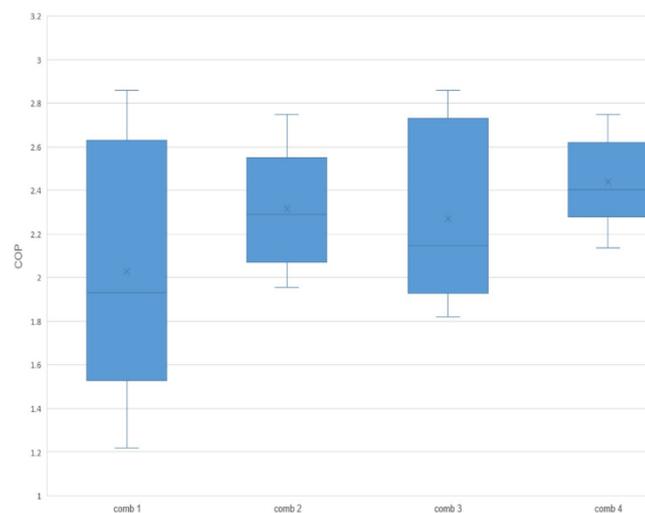
La alternativa 2 es una continuación del proyecto III del autor que se basó en la selección óptima resultante de un proceso de selección atendiendo al epígrafe I.3 sobre el funcionamiento de una planta enfriadora enmarcada en un rango ideal de operación sobre otras combinaciones aplicando las metodologías estudiadas en el epígrafe I.6. En esta se utiliza una planta de 2 enfriadoras de agua (tipo 5 y 6): una con tecnología INVERTER (Flujo Refrigerante Variable, VRF o VRV, por sus siglas en inglés) y compresor tornillo de 296 kW de capacidad frigorífica trabajando a cargas parciales y otra de compresor recíprocante de 250 kW de capacidad dispuestos en una secuencia óptima de encendido y apagado de cada enfriadora, esto se establece a través de la siguiente línea base estratégica:

- 1) Si la enfriadora no-Inverter va a trabajar a  $CL < 0.55 CL_1$  no se enciende para que su  $CL_1$  no trabaje fuera de su mejor rango y se activa la enfriadora Inverter para que este trabaje.
- 2) Si la enfriadora no-Inverter va a trabajar a  $CL > 0.55 CL_1$  y cubre toda la carga se enciende solamente trabajando lo más cerca de  $1 CL_1$
- 3) Si la enfriadora no-Inverter va a trabajar a  $CL > 0.55 CL_1$  y no cubre totalmente la carga, se enciende también la enfriadora Inverter para que trabaje lo más posible de  $0 CL_2 \leq CL \leq 0.4 CL_2$ .

Siendo  $CL$  la carga térmica existente,  $CL_1$  y  $CL_2$  son las cargas térmicas que asumen las enfriadoras. Los resultados del consumo energético (kWh) y COP obtenidos del análisis de carga óptima considerando el PLR de cada planta se reflejan en las figuras (13) y (14).



*Figura 13 Consumo eléctrico (kWh) de las diferentes combinaciones evaluadas. Elaboración propia.*



*Figura 14 Coeficientes de operación de las combinaciones. Elaboración propia.*

La gráfica de caja y bigotes de las combinaciones en función del COP refleja que la combinación o planta ideal es la que tenga los rangos y cuartiles más pequeños y a su vez mayores manifestando la 4ta (que es la utilizada) contiene las mejores prestaciones de eficiencia. Lo mismo pasa en el gráfico de consumo donde esta misma planta (4ta) posee un rango mayor de trabajo capaz de adaptarse mejor a la condición de trabajo además que el valor de su mediana es menor que los de las otras plantas

La alternativa 3 es parte de una investigación de (Diaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018) sobre la distribución optima de las capacidades de una enfriadora, está formada por 3 enfriadoras de compresor recíprocante de 117, 115 y 218 kW de capacidad

respectivamente (tipo 2, 3 y 4). La secuencia óptima de encendido y apagado de cada enfriadora, se establece a través de la siguiente línea base estratégica:

- 1) Si  $CL \leq CL_1$  entonces la enfriadora 1 asume la carga del sistema.
- 2) Si  $CL_1 \leq CL \leq CL_2$  entonces la enfriadora 2 asume la carga del sistema
- 3) Si  $CL > CL_1$  y  $CL > CL_2$  se analizan si la carga pueden asumirla las enfriadoras  $CL_1 + CL_2$ .
- 4) Si  $CL > CL_1$  y  $CL > CL_2$  se analizan si la carga puede asumirla la enfriadora  $CL_3$ .
- 5) Se compara resultado (kWh) y COP del empleo de la combinación  $CL_1 + CL_2$  y  $CL_3$ , se escoge el mejor resultado.
- 6) Si  $CL_1 + CL_2 \leq CL$  y  $CL_3 \leq CL$  entonces  $CL = CL_1 + CL_2 + CL_3$ . Se aplica el análisis de carga óptima para cada enfriadora.

La alternativa 4 es la misma planta de chiller de la alternativa 3 pero adicionándole 2 tanques de almacenamiento térmico lo que eleva el costo inicial, pero favorece a un considerable ahorro energético. La estrategia de operación que se emplea es la de acumulación completa para mover la carga al horario pico de acuerdo al perfil de carga previamente calculado.

### III.4 Aplicación de la selección multicriterio

Para realizar el análisis multicriterio se enmarcaron todos los criterios en el perfil térmico 4 (figura 13), que oscila entre 245,12 kW - 362,48 kW con el objetivo de enfocar todas las alternativas en un escenario común y racional.



Figura 15 Perfil térmico 4. Fuente: Elaboración propia.

Normalmente para el diseño de una planta chiller, el encargado de fijar los objetivos, es el comprador, porque sus preferencias van están condicionadas de lo que necesita en su hotel, así como, la tolerancia entre un criterio y otro, por ejemplo, si un hotel no tiene límites financieros, pero tiene un espacio reducido no puede establecer la compra de cualquier planta, tiene que hacer una restricción al criterio de área ocupada o espacio requerido, lo que le da una mayor preferencia con respecto a otros criterios.

En el caso de estudio atendiendo a la notabilidad, capacidad y precisión de los criterios a evaluar en los sistemas HVAC definidos se puntualizó como objetivo principal la determinación de la configuración de plantas de enfriadoras de mayor eficiencia posible con lo que implica mayor capacidades frigoríficas y menores consumos, además de que tengan un costo de ciclo de vida relativamente bajo.

### III.4.1 Resultados de las alternativas y criterios

Los resultados de los criterios destacan un alto ahorro de energía eléctrica de la alternativa 4, lo que conlleva a una menor emisión de CO<sub>2</sub>. También se aprecia un alto coeficiente de funcionamiento del ciclo en la variante 2, pues esta tiene una enfriadora con tecnología Inverter trabajando a cargas parciales. La capacidad frigorífica se mantiene con menores márgenes de diferencia para no generar un sobredimensionamiento. Se observa un espacio requerido de la variante 4 doblemente mayor a los demás, esto se evidencia por la presencia de los 2 tanques de almacenamiento térmico de 5,45 m de diámetro. El alto costo inicial de los tanques (20000 USD) manifiesta un alto costo de ciclo de vida. La complejidad y la variedad de la tecnología usada en la variante 4 desfavorece a la facilidad en el mantenimiento, dejando a la variante 1 de enfriadoras de igual capacidad como la más favorable en ese sentido.

<i>Alternativa</i>	<i>Consumo eléctrico (kWh/día)</i>	<i>COP</i>	<i>Capacidad frigorífica (kW)</i>	<i>Espacio requerido (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Emisiones de CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>/día)</i>	<i>CCV (USD)</i>	<i>Facilidad en el Mantenimiento</i>
1	3185,7	2,27	516	27.08	2934,03	127586.136	1

2	2737,4	3,65	546	16,55	2521,15	132847.411	2
3	2348,3	3,07	490	15,81	2162,8	118863.76	2
4	1284.9	3,52	490	62,47	1183,4	160712	3

*Tabla 14 Resultados de los criterios de cada alternativa. Fuente: Elaboración propia.*

### III.4.2 Aplicación del AHP

Primeramente, se obtuvo la matriz de las comparaciones por pares de todos los criterios (Tabla III.2), la cual se dispuso en función a los criterios identificados de Consumo eléctrico, Coeficiente de funcionamiento del ciclo (COP), Capacidad frigorífica (CAP), Área ocupada, Emisiones de CO<sub>2</sub>, Costo de ciclo de vida y Facilidad de mantenimiento, y la calificación numérica para la comparación de cada elemento se asignó de la escala de nueve puntos de Saaty (Tabla II.3).

En la matriz de 7x7, mostrada en la Tabla III.2, se ingresan los valores de los criterios respectivos. El valor de 1 se asigna a partir de la escala de nueve puntos cuando el criterio se compara consigo mismo, lo que hace que todos los elementos diagonales de la matriz sean 1. Por el contrario, si un criterio se compara con otros criterios en la matriz, un valor diferente a 1 se asigna de la escala de Saaty. Los recíprocos de las entradas sobre la diagonal de la matriz, se consideran las entradas de los elementos debajo de la diagonal. Por lo tanto, los juicios solo para los elementos arriba de la diagonal de la matriz deben ser solicitados. La Tabla III.2 muestra que los valores de Coeficiente de funcionamiento del ciclo son más importantes que todos los demás, ya que depende de la razón de la capacidad frigorífica y el consumo eléctrico, siendo un factor clave en la selección de una alternativa. El área ocupada contiene las menores prioridades lo que refleja una menor importancia porque generalmente no es un impedimento para la instalación de un sistema centralizado de climatización. El hecho de que un sistema tenga una mejor facilidad para el mantenimiento favorece a que este se realice, lo que aumenta el costo de ciclo de vida, pero impide que se gaste más dinero en comprar uno nuevo.

Para generar el vector de prioridad local (PVE) o el vector propio correctamente normalizado para los juicios de matriz en la Tabla 15, se normalizan los

vectores por la ecuación 2.11 en cada columna de la matriz (dividiendo cada elemento de la columna por el total de la columna) y luego el promedio de las filas de la matriz resultante se calcula como se muestra en la Tabla 16. Por lo tanto, los vectores de prioridad local resultantes de los cálculos manuales se pueden dar como: (0,193; 0,264; 0,173; 0,059; 0,074; 0,124; 0,113).

Tabla 15 Comparación por pares. Fuente: Elaboración propia

Criterio	Consumo Eléctrico	Coefficiente de funcionamiento	Capacidad frigorífica	Espacio requerido	Emisiones de CO2	Costo de ciclo de vida	Facilidad de mantenimiento
Consumo Eléctrico	1,00	0,50	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00
Coefficiente de funcionamiento	2,00	1,00	2,00	3,00	3,00	3,00	2,00
Capacidad frigorífica	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	3,00	2,00
Espacio requerido	0,33	0,33	0,50	1,00	0,50	0,33	0,50
Emisiones de CO2	0,50	0,33	0,33	2,00	1,00	0,50	0,33
Costo de ciclo de vida	0,50	0,33	0,33	3,00	2,00	1,00	2,00
Facilidad de mantenimiento	0,50	0,50	0,50	2,00	3,00	0,50	1,00

Tabla 16 Matriz normalizada. Fuente: Elaboración propia.

Criterio	Consumo Eléctrico	Coefficiente de funcionamiento	Capacidad frigorífica	Espacio requerido	Emisiones de CO2	Costo de ciclo de vida	Facilidad de mantenimiento	Vector de Prioridad
Consumo Eléctrico	0,188	0,143	0,300	0,188	0,138	0,194	0,203	0,193
Coefficiente de funcionamiento	0,375	0,286	0,300	0,188	0,207	0,290	0,203	0,264
Capacidad frigorífica	0,094	0,143	0,150	0,125	0,207	0,290	0,203	0,173
Espacio requerido	0,063	0,095	0,075	0,063	0,034	0,032	0,051	0,059
Emisiones de CO2	0,094	0,095	0,050	0,125	0,069	0,048	0,034	0,074
Costo de ciclo de vida	0,094	0,095	0,050	0,188	0,138	0,097	0,203	0,124
Facilidad de mantenimiento	0,094	0,143	0,075	0,125	0,207	0,048	0,102	0,113

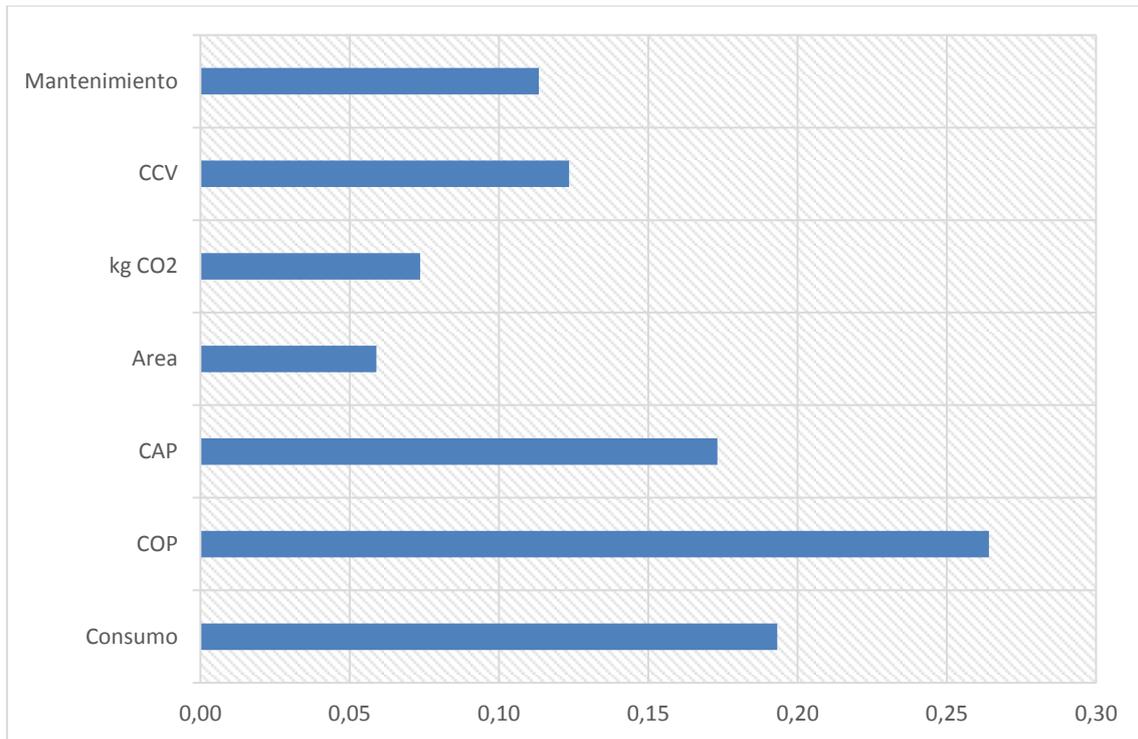


Figura 16 Vectores de prioridad o ponderaciones de los criterios. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente para realizar una verificación de consistencia de los juicios, primeramente, fue determinado el principio de valor propio ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) utilizando la ecuación (2.12):

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 3 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 3 & 3 & 3 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/2 \\ 1/2 & 1/3 & 1/3 & 2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/2 & 1/3 & 1/3 & 3 & 2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 2 & 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,193 \\ 0,264 \\ 0,173 \\ 0,059 \\ 0,074 \\ 0,124 \\ 0,113 \end{bmatrix} = \lambda_{m\acute{a}x} * \begin{bmatrix} 0,193 \\ 0,264 \\ 0,173 \\ 0,059 \\ 0,074 \\ 0,124 \\ 0,113 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1,47 \\ 1,993 \\ 1,34 \\ 0,431 \\ 0,532 \\ 0,916 \\ 0,83 \end{bmatrix} = \lambda_{m\acute{a}x} * \begin{bmatrix} 0,193 \\ 0,264 \\ 0,173 \\ 0,059 \\ 0,074 \\ 0,124 \\ 0,113 \end{bmatrix}$$

El valor de  $(\lambda_{m\acute{a}x})_{promedio}$  se obtiene resolviendo la matriz dada anteriormente,  $(\lambda_{m\acute{a}x})_{promedio} = 7,62772$ . Por consiguiente, al utilizar la ecuaci3n (2.13), el 3ndice de consistencia ( $CI$ ) se calcula como:

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} = \frac{7,62772 - 7}{7 - 1} = 0,104619354$$

Por lo tanto, la relaci3n de consistencia ( $CR$ ) se determin3 por la ecuaci3n (2.14):

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,104619354}{1,32} = 0,079257086 \approx 0,08 < 0,1$$

El valor de  $RI$  es 1,32 y se seleccion3 de la Tabla 8 para  $n = 7$  (orden de la matriz). Como el valor de  $CR$  (0,08) es menor que 0,1 (l3mite m3ximo permitido), los juicios en la matriz (Tabla 15) se consideran consistentes y l3gicamente satisfactorios. Si el  $CR$  fuese superior a 0,1, entonces los juicios ser3an inconsistentes y los tomadores de decisiones tendr3an que modificar los juicios nuevamente hasta que sean consistentes. (Qazi, 2018)

### III.4.3 Aplicaci3n del TOPSIS

Los valores del vector de prioridad calculados por el m3todo AHP son los utilizados para las ponderaciones de los criterios porque se ha comprobado que sus relaciones son consistentes y se pueden usar para aplicar el m3todo TOPSIS de una manera m3s confiable puesto que por el m3todo convencional que solo compara el porcentaje de cada valor con respecto al total se genera mucha incertidumbre.

Aplicando el algoritmo de pasos planteados en el epígrafe II.8 se obtiene la matriz inicial  $(x_{ij})_{m \times n}$  de 4 alternativas ( $m=4$ ) y 7 criterios ( $n=7$ ) y así como, sus ponderaciones antes mencionadas en una fila adicional. (Tabla 17).

Tabla 17 Matriz inicial. Fuente: Elaboración propia.

Alternativas	Consumo Eléctrico	Coefficiente de funcionamiento	Capacidad frigorífica	Espacio requerido	Emisiones de CO2	Costo de ciclo de vida	Facilidad de mantenimiento
1	3185,7	2,27	516	27,08	2934,03	127586.13	1
2	2737,4	3,65	546	16,55	2521,15	132847.41	2
3	2348,3	3,07	490	15,81	2162,8	118863.76	2
4	1284.9	3,52	490	62,47	1183,4	160712	3
Ponderaciones	0,193	0,264	0,173	0,058	0,073	0,123	0,113

Posteriormente se normaliza la matriz anterior para transformar los valores reales y equipararlos para ver sus diferencias con respecto a los datos de sus propias dimensiones por la ecuación 2.15 dando como resultado la matriz

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \text{ (Tabla 18)}$$

Tabla 18 Matiz normalizada. Fuente: Elaboración propia.

Alternativas	Consumo Eléctrico	Coefficiente de funcionamiento	Capacidad frigorífica	Espacio requerido	Emisiones de CO2	Costo de ciclo de vida	Facilidad de mantenimiento
1	0,63961	0,35762	0,50487	0,377	0,63961	0,69268	0,2357
2	0,54960	0,57503	0,53422	0,2304	0,5496	0,72124	0,4714
3	0,47148	0,48366	0,47943	0,2201	0,47148	0,00065	0,4714
4	0,25797	0,55455	0,47943	0,86968	0,25798	0,00087	0,70711
Ponderaciones	0,193	0,264	0,173	0,058	0,073	0,123	0,113

Después se transforma esta matriz por la ecuación 2.16 teniendo en cuenta el valor calculado en la ecuación 2.17 para obtener la matriz de los valores normalizados ponderados  $W = (t_{ij})_{m \times n}$  (ver tabla 20).

Tabla 19 Matriz de los valores normalizados ponderados. Fuente: Elaboración propia.

Alternativas	Consumo Eléctrico	Coefficiente de funcionamiento	Capacidad frigorífica	Espacio requerido	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Costo de ciclo de vida	Facilidad de mantenimiento
1	0,12360	0,09445	0,08743	0,02223	0,04708	0,08555	0,02672
2	0,10621	0,15188	0,09251	0,01359	0,04045	0,8908	0,05344
3	0,09111	0,12774	0,08303	0,01298	0,03470	0,00008	0,05344
4	0,04985	0,14647	0,08303	0,05129	0,01899	0,00011	0,08016
Ponderaciones	0,193	0,264	0,173	0,058	0,073	0,123	0,113

Una vez obtenida la matriz  $W$  se determinan por selección la mejor ( $A_b$ ) y peor ( $A_w$ ) condición por las ecuaciones 2.18 y 2.19, teniendo en cuenta las consideraciones 2.20 y 2.21 respectivamente, lo que se explica en dependencia de carácter del criterio (positivo o negativo) para su elección (ver tabla 20).

Tabla 20 Valores de las mejores y peores condiciones. Fuente: Elaboración propia.

Criterio	Consumo Eléctrico	Coefficiente de funcionamiento	Capacidad frigorífica	Espacio requerido	Emisiones de CO <sub>2</sub>	Costo de ciclo de vida	Facilidad de mantenimiento
<b>Carácter</b>	-	+	+	-	-	-	-
$A_b$	0,04985	0,15188	0,09251	0,01298	0,01899	0,00008	0,02672
$A_w$	0,12360	0,09445	0,08303	0,05129	0,04708	0,08908	0,0816

Consecutivamente se calculan las distancias normalizadas de cada alternativa  $i$  con respecto a la peor y mejor condición por las ecuaciones 2.22 y 2.23 respectivamente (ver tabla 21).

Tabla 21 Distancias normalizadas con respecto a las condiciones extremas. Fuente:  
 Elaboración propia.

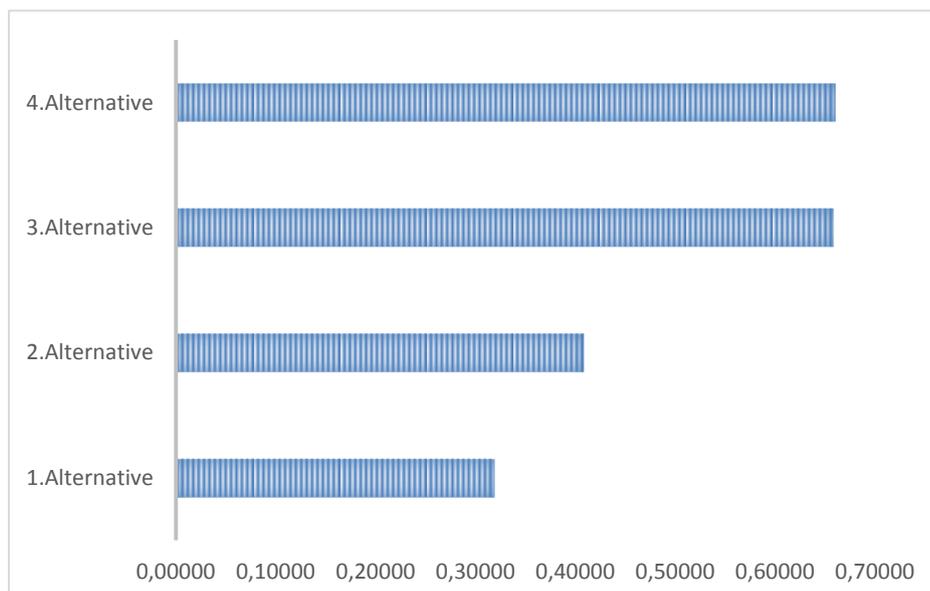
Alternativas	Distancias	
	Mejor	Peor
1	0,13016	0,6109
2	0,11078	0,07661
3	0,05776	0,11144
4	0,06666	0,12981

Una vez obtenidas todas las distancias se procede a determinar la similitud con respecto a la peor alternativa ( $S_{iw}$ ) (tabla 22) o el coeficiente de cercanía (CC) por la ecuación 2.24, teniendo en cuenta que este valor estará entre 0 y 1, indicando la mejor y peor solución posible respectivamente (Figura 17).

Tabla 22 Ranking de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.

Ranking	Alternativa	$S_{iw}$
1	4	0,66072
2	3	0,65865
3	2	0,40882
4	1	0,31943

Figura 17 Similitudes con respecto a la peor distancia. Fuente: Elaboración propia.



### III.4.4 Análisis sensitivo

Generalmente los problemas de toma de decisiones multicriterio contienen valores subjetivos. Las ponderaciones de los criterios y las preferencias de las alternativas con respecto a la subjetividad (juicios) siempre generan incertidumbres. En muchos casos es importante responder la siguiente pregunta: ¿Cuan sensibles son los valores de las preferencias de las alternativas a algunos cambios en los parámetros de entrada en el modelo de decisión? (Mardani & Jusoh, 2016), por lo que, un modelo predictivo es consistente cuando pequeños cambios en la entrada no alteran el resultado final, esto conlleva a decir que es *robusto*. En este estudio para mejorar la confianza en los resultados evaluados se hace indispensable un análisis sensitivo. Para esto se repite el análisis multicriterio, pero esta vez con diferentes CC a los criterios.

Primeramente, el coeficiente de cercanía del 1er criterio (0,193) se cambia con la del 2do (0,123) y los demás se mantienen igual; posteriormente se cambia el 1ero con el 3ero (0,173), con el 4to (0,058), 5to (0,073), 6to (0,123) y 7mo (0,113). Posteriormente se a cambiar el 2do con respecto a los demás, así como, todos los valores sucesivamente. Esta idea se utilizó generando 22 tipos de escenarios (Figura 23) lo que demostró la consistencia de la alternativa 4, ya que se mantuvo 15 veces como mejor alternativa, esto se refleja en su alto COP y bajo Consumo eléctrico; no así pasó en la alternativa 3 que tuvo sus puntos más bajos en el escenario 4 y 9. Las alternativas 1 y 2 mantuvieron los valores más bajos durante todos los escenarios, siendo peor la 1.

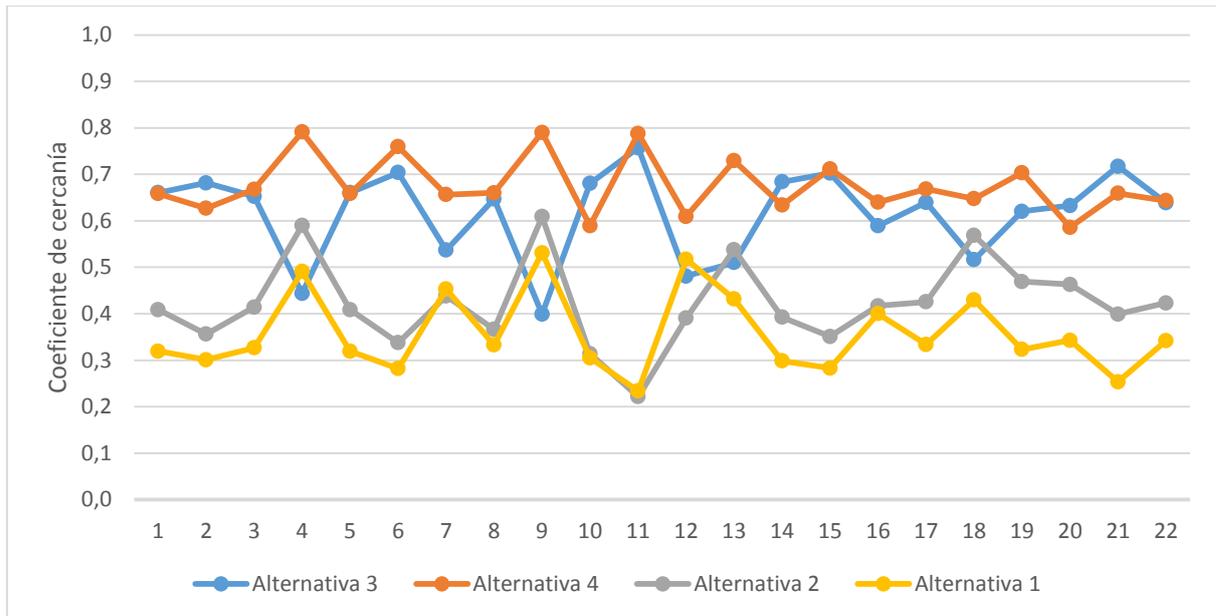


Figura 18 Coeficientes de cercanía en 22 escenarios diferentes. Fuente: Elaboración propia.

En el ranking de las alternativas (Tabla 23) se puede notar que la alternativa 4 estuvo en un 68,18% en 1er lugar de todos los 22 escenarios, dejando un 31,82% en 2do. La alternativa 3 estuvo en el 2do lugar un 45,45% a pesar de tener 13,64% y 9,09% en 3er y 4to lugar respectivamente. Las peores posiciones las llevan la alternativa 2 en el 3er lugar (68,18%) y la alternativa 1 en el 4to lugar (63,64%).

Tabla 23 Porcentajes del ranking de las alternativas en los diferentes escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Ranking	Alternativas			
	4 (%)	3 (%)	2 (%)	1 (%)
1	<b>68,18</b>	31,82	0	0
2	31,82	<b>45,45</b>	18,18	18,18
3	0	13,64	<b>68,18</b>	18,18
4	0	9,09	13,64	<b>63,64</b>

## CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ El diseño eficiente de un sistema de aire acondicionado, así como la selección de la configuración óptima permite ahorros sustanciales a la edificación.
- ✓ Existen varios métodos para la selección de alternativas de sistemas HVAC. Los métodos AHP y TOPSIS permiten utilizar la relación de consistencia entre los juicios de los criterios y determinar la mejor alternativa usando un algoritmo directo.
- ✓ La identificación de criterios energéticos, técnicos, medio ambientales, económicos para evaluar el comportamiento de los sistemas de climatización permiten una evaluación más completa para hallar la alternativa ideal.
- ✓ Se compararon cuatro alternativas de diseño de sistemas de climatización., de los cuales tres de ellas se tomaron de estudios previos y una se generó empleando el análisis de frecuencia de las cargas de enfriamiento y la secuencia óptima de trabajo a través de la curva COP-PLR
- ✓ La alternativa mejor adaptada (4) analizada por el método TOPSIS a las condiciones requeridas por la estrategia de selección estudiada es la formada por 3 enfriadoras de agua de compresor recíprocante de flujo refrigerante constante más 2 tanques de almacenamiento térmico con un coeficiente de cercanía ( $S_{iw}$ ) de 0,66072.
- ✓ El análisis sensitivo del proceso de selección se definió como robusto, por tanto, después de cambiar 22 veces los escenarios variando los juicios de los criterios, perpetuó como mejor alternativa la 4ta (68,18%), siguiéndole la 3era (45,45%), la 2da (68,18%) y la 1era (63,64%).

## RECOMENDACIONES

- ✓ Utilizar otras plantas de enfriadoras de diferentes configuraciones para buscar nuevos y mejores funcionamientos.
- ✓ Agregar nuevas tecnologías de energías renovables a las plantas de enfriadoras para comparar su rendimiento con lo estudiado.
- ✓ Aplicar otras herramientas de optimización a la metodología de selección de alternativas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Homoud, M. (1997). Optimum thermal design of office buildings. *International Journal of Energy Research*, 21.
- Ali, M. (2013). Optimization of Heating, Ventilation, and Air-Conditioning. *Engineering & Technology*.
- Ardakani, A., Ardakani, F., & Hosseini, S. (2008). A novel approach for optimal chiller loading using particle swarm optimization. *Energy and Buildings*, 40. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.010>
- Arroyo, P., Tommelein, I., Ballard, G., & Rumsey, P. (2016). Choosing by advantages: A case study for selecting an HVAC system for a net zero energy museum. *Energy and Buildings*, 111 .
- ASHRAE. (2007). *Design Guide for Cool Thermal Storage*. Recuperado de [http://www.pnm.com/customers/thech\\_guides/PDF/P\\_PA\\_28.pdf](http://www.pnm.com/customers/thech_guides/PDF/P_PA_28.pdf)
- ASHRAE. (2008). HVAC systems and equipment. *ASHRAE Handbook*.
- ASHRAE. (2015). HVAC Applications. *ASHRAE Handbook*, 42.
- Augelis, A., & Papadopoulos, A. (2009). Application of multicriteria analysis in designing HVAC systems. *Energy and Buildings*, 41.
- Balen, I. (2005). *Classifications of HVAC system*. Recuperado de [http://www.fsb.unizg.hr/NewsUpload/upload/18\\_11\\_2005\\_101\\_Classification\\_HVAC\\_III.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/NewsUpload/upload/18_11_2005_101_Classification_HVAC_III.pdf)
- BAXI. (2010). European HVAC market trends. *AIRAH 90th Anniversary conference*,. Sydney.
- Behzadian, M., Otaghsara, S., Yazdan, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39, 13051–13069.
- Bhatia, A. (2012). HVAC Made Easy – Selection Tips for Chillers Compressors. *Technical Report*. Recuperado de <http://www.pdhonline.com/courses/m119/m119content.pdf>
- Camejo, P., & Hittle, D. (1989). *An Expert System for the Design of Heating Ventilation and Air Conditioning Systems*. Chicago.
- Cerutti, A., Beccaro, G., Bruun, S., & Bongavegna, L. (2014). Assessment methods for sustainable tourism declarations: the case of holiday farms. *Journal of Cleaner Production*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.032>

- Chan, K., & Yu, F. (2002). Part load efficiency of air-cooled multiple chillers plant. *Energy and Building*. doi:10.1191/0143624402bt028oa
- Chiness, D., Nardin, G., & Saro, O. (2011). Multi-Criteria Analysis for the Selection of Space Heating Systems in an Industrial Building. *Energy*, 36, 556–565.
- Comité Europeo de Normalización. (1997). *Norma Europea UNI EN ISO 14040*.
- Cristóbal, J. (2010). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36, 498-502. doi:10.1016/j.renene.2010.07.031
- Davood, S., Erkoyuncu, J., & Rajkumar, R. (2015). A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery. *Procedia CIRP*.
- Deng, S. (2003). Energy and water uses and their performance explanatory indicators in hotels in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 35. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00238-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00238-4)
- Díaz Torres, Y. (2014). Análisis energético de un sistema híbrido de producción de frío. *Ingeniería Energética*, XXXVI, 38-49.
- Díaz Torres, Y., Reyes Calvo, R., Santana Justiz, M., Álvarez Guerra, M. A., & Gómez Sarduy, J. (2018). Selección óptima de una planta de enfriadoras para una instalación hotelera. *Ingeniería Energética*.
- Energion. (2017). *Cost of the current cooling technology*. Recuperado de [http://energion.com/wp-content/uploads/2017/02/energion\\_logo.png](http://energion.com/wp-content/uploads/2017/02/energion_logo.png)
- Fan, Y., Luo, L., & Souyri, B. (2007). Review of solar sorption refrigeration technologies: development and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*.
- Finch, E. (1989). *A Requisite Decision Model for the Selection of Mechanical and Electrical Services in Buildings*.
- Freedonia Group, Inc. (2012). *World HVAC equipment demand*. Cleveland, Ohio USA.
- Gang, W., Augenbroe, G., Wang, S., Fan, C., & Xiao, F. (2016). An uncertainty-based design optimization method for district cooling systems. *Energy*, 102.
- Gang, W., Wang, S., Yan, C., & Xiao, F. (2015). Robust Optimal Design of Building Cooling Systems Concerning Uncertainties using Mini-Max Regret Theory. *Science and Technology for the Built Environment*, 21, 789-799. doi:10.1080/23744731.2015.1056657

- Global Industry Analysts, Inc. (2015). *Air Conditioning Systems AC Market Trends*. Recuperado de [http://www.strategyr.com/MarketResearch/Air\\_Conditioning\\_Systems\\_A\\_C\\_Market\\_Trends.asp](http://www.strategyr.com/MarketResearch/Air_Conditioning_Systems_A_C_Market_Trends.asp)
- Guerra Plasencia, M., & Rodriguez Santos, O. (2009). *Temas de Refrigeración y Climatización*. La Habana: Felix Varela.
- H.Lin. (2014). Study on chilled energy storage of air-conditioning system with energy saving. *Energy and building*, 41-46.
- Harish, V., & Kumar. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 56.
- Harriman, L. (1996). Applications of Engineering Manual for Desiccant Systems. *Energy and Building*.
- Henning, H.-M. (2003). Solar-assisted Air-conditioning in Buildings: A Handbook for Planners. *Energy and Building*, 1.
- Hensen, I. (1996). Application of Modeling and Simulation to HVAC Systems. *Energy and Building*.
- Hernández, L. (2006). Predicción del consumo energético del Hotel Jagua aplicando la simulación termodinámica y la inteligencia artificial (tesis de pregrado). Cienfuegos, Cuba.
- Hernández, Y. (2013). Análisis bibliográfico sobre la aplicación de técnicas modernas del control en el ahorro de energía en procesos de climatización (tesis de pregrado). Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Hidalgo, D. (2006). *Sistema de acumulación térmica en la climatización*. Cienfuegos.
- Howitt, D., & Cramer, D. (2008). Statistics in Psychology. *Prentice Hall*.
- Huang, P., Huang, G., Augenbroe, G., & Li, S. (2018). Optimal configuration of multiple-chiller plants under cooling load uncertainty for different climate effects and building types. *Energy and Buildings*, 158, 684–697.
- Huang, I., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental science: ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, 409.
- Hwang, C., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hwang, C., Lai, Y., & Liu, T. (1993). A new approach for multiple objective decision making. *Computers and Operational Research*, 20.

- Jablonský, J. (2014). MS Excel based system for multicriteria evaluation of alternatives. *Procedia Economics and Finance*, 12, 251-258.
- Jonge, S. D. (2017). *Sustainable Energy*.
- Jureen, T., Siew-Hong, D., & Shahrul, K. (2013). Comparison of Multi Criteria Decision Making Methods From The Maintenance Alternative Selection Perspective. *The International Journal Of Engineering And Science*, 2, 27-34.
- Jurelionis, A., Valancius, R., & Dorosevas, V. (2013). Method for Cost-Benefit Analysis of Improved Indoor Climate Conditions and Reduced Energy Consumption in Office Buildings. *Energies*.
- Kalkan, N., Young, E., & Celiktas, A. (2012). Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning. *Renewable and sustainable energy reviews*. Recuperado de <http://refhub.elsevier.com/S1364-0321%2814%2901012-0/sbref>
- Lacera Linde, J. (2018). *Informe de la situación de la EE y la ER para analizar con la Dirección del MINEM*.
- Landa, J. (2004). Estimadores Cuantitativos de la Emisión de Contaminantes Atmosféricos Por Combustión del Petróleo Crudo Cubano y su Efecto Económico. *Energética*, 2.
- Lee, W., & Lee, S. (2007). Developing a simplified model for evaluating Chillers-system configuration. *Applied Energy*, 84, 290-306. doi:10.1016/j.apenergy.2006.07.006
- Lee, W., & Lin, L. (2011). Evaluating and ranking the energy performance of office building using technique for order preference by similarity to ideal solution. *Applied Thermal Engineering*, 31(16), 3521-3525.
- Li, H., Wang, S., & Xiao, F. (2019). Probabilistic optimal design and on-site adaptive commissioning of building air-conditioning systems concerning uncertainties. *Energy Procedia*, 158, 2725-2730.
- Liu, Z., & Tan, H. (2017). Optimal Chillers sequencing control in an office building considering the variation of chillers maximum cooling capacity. *Energy and Building*, 140. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017>
- Lu, J., Chen, J., Gao, D., & Ding, H. (2008). Experimental analysis on floor panel cooling systems in residential buildings. *HVAC*, 37.

- Lu Lu, & Wenjian Cai. (2001). Application of genetic algorithms for optimal chiller selection in HVAC systems. *13th International Conference on Process Control*. Slovakia .
- Mardani, A., & Jusoh, A. (2016). Using fuzzy multiple criteria decision making approaches for evaluating energy saving technologies and solutions in five star hotels. *Energy*.
- McGill, R., & Tukey, J. (1978). *Variations of Box Plots*. United States: The American Statistician.
- Meneses-Ruiz, E. (2018). Factores de emisión de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> para instalaciones generadoras de electricidad en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(1), 1-9 .
- Milojković, A., Nikolić, M., & Stanković, V. (2010). Improvement of energy efficiency in hospitality toward sustainable hotel. *IV International symposium for students of doctoral studies in the fields of civil engineering, architecture and environmental protection*. Praga.
- Nadaban, S., Dzitac, S., & Dzitac, I. (2016). Fuzzy TOPSIS: A General View. *Procedia Computer Science*, 91, 823-831.
- Navarro-Rivero, P., & Ehrismann, B. (2012). *Durability issues, maintenance and costs of solar cooling systems*.
- Ning, M., Mengjie, S., Dongmei, P., & Shiming, D. (2017). Comparative studies on using RSM and TOPSIS methods to optimize residential air conditioning systems. *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2017.11.160
- Niu, J., Tian, Z., Lu, Y., Zhao, H., & Lan, B. (2019). A robust optimization model for designing the building cooling source under cooling load uncertainty. *Applied Energy*, 241, 390–403.
- Oficina Nacional de Estadística. (2012). *Anuario estadístico de Cuba*. La Habana. Recuperado el Diciembre de 2012, de [http://www.one.cu/aec2011/esp/10\\_tabla\\_cuadro.htm](http://www.one.cu/aec2011/esp/10_tabla_cuadro.htm)
- Önüt, S., & Soner, S. (2006). Energy efficiency assessment for the Antalya Region hotels in Turkey. *Energy and Buildings*, 38. doi:10.1016/j.enbuild.2005.11.006
- Pérez Tello, C. (2003). Comportamiento Térmico de Edificios. *Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de Baja California*.
- Perez Tello, C., & Campbell Ramírez, H. (2004). Identificación y definición de la problemática del servicio eléctrico en Baja California. *Universidad Autónoma de Baja California*.

- Polanco, J., & Yousif, C. (2015). Prioritizing energy efficiency measures to achieve a zero net-energy hotel on the island of Gozo in the central Mediterranean. *Energy Procedia*, 83, 50-59. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.195
- Qazi, W. (2018). Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. *Waste Management & Research*, 36(7), 594–605. doi:10.1177/0734242X187
- Rodríguez, J. (2019). *Balance económico preliminar del 2018 en Cuba y algunas perspectivas para el 2019 (Parte II)*. Recuperado de Cubadebate: [www.cubadebate.cu](http://www.cubadebate.cu)
- Ryu, J., Hong, W., & Seo, Y. (2014). Characteristic Analysis of Peak Load in Electricity on Large Scale Hotels Considering the Energy Efficiency. *International Journal of Smart Home*, 8, 207–222. doi:10.14257/ijsh.2014.8.3.20
- Schutz, T. (2015). A comparison of thermal energy storage model for building energy. *Energy and building*, 23-31.
- Shahrestani, M. (2012). HVAC. *ASRHAE*. Recuperado de <https://www.ashrae.org/>
- Shahrestani, M., Yao, R., Cook, G., & Clements-Croome, D. (2018). Decision-making on HVAC&R systems selection: a critical review. *Intelligent Buildings International*. doi:10.1080/17508975.2017.1333948
- Shapiro, I., & Umit, S. (2011). HVAC Selection for Envelope-Dominated Buildings. *ASHARE Journal*, 53(10), 30–41.
- Sindhu, S., Nehru, V., & Luthra, S. (2016). Recognition and prioritization of challenges in growth of solar energy using analytical hierarchy process. *Energy*, 100, 332–348.
- Söderman, J. (2007). Optimization of structure and operation of district cooling networks in urban regions. *Applied Thermal Engineering*, 27 .
- Tai, C., & Wing, Y. (2004). How chillers react to building loads. *ASHRAE Journal*.
- Tscheikner-Gratl, F., & Egger, P. (2017). Comparison of Multi-Criteria Decision Support methods for Integrated Rehabilitation Prioritization. *Water*.
- Valdivia Nodal, Y., Díaz Torres, Y., & Lapido Rodriguez, M. (2015). Alternativas de producción de agua caliente sanitaria en instalaciones hoteleras con climatización centralizada. *Universidad y Sociedad*, 3, 88-94. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/>

- Verhelst, J., Van Ham, G., Saelens, D., & Helsen, L. (2017). Model selection for continuous commissioning of HVAC-systems in office building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76 .
- Wang, & Shan, K. (2000). *Handbook of air conditioning and refrigeration* (Second ed.). McGraw-Hill.
- Wang, E., Alp, N., & Shi, J. (2017). Multi-criteria Building Energy Performance Benchmarking Through Variable Clustering Based Compromise TOPSIS with Objective Entropy Weighting. *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2017.02.131
- Wang, F., Lin, H., Tu, W., Wang, Y., & Huang, Y. (2015). Energy Modeling and Chillers Sizing of HVAC System for a Hotel Building. *Procedia Engineering*, 121. doi:10.1016/j.proeng.2015.09.161
- Wang, J., Jing, Y., & Zhang, C. (2009). Fuzzy Multi-Criteria Evaluation Model of HVAC Schemes in Optimal Combination Weighting Method. *Building Services Engineering Research and Technology*.
- Wang, S. (2010). Intelligent Buildings and Building Automation. *Energy*.
- Yang, Y., Ren, J., Solgaard, H., Xu, D., & Nguyen, T. (2018). Using multi-criteria analysis to prioritize renewable energy home heating technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. doi:10.1016/j.seta.2018.06.005
- Yoon, K., & Hwang, C. (1995). *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*. California: SAGE publications.
- Yu, B., Hu, Z., Liu, M., Yang, H., & Kong, Q. (2009). Review of research on air conditioning systems and indoor air quality control for human health. *International Journal of Refrigeration*, 32 .
- Zhang, S., Lin, Z., Ai, Z., & Huan, C. (2019). Multi-criteria performance optimization for operation of stratum ventilation under heating mode. *Applied Energy*, 239, 969–980. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.248

# ANEXOS

## Anexo 1

*Figura 19 Requerimientos estándares y ejemplos de guías para la selección de HVAC Fuente: (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018).*

Standards	Guidelines
ASHRAE Standard 55(2010): Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy	Chartered Institution of Building Services Engineers, UK (CIBSE) Applications Manual10-2005, Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings
ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using the calculation of the PMV and PDD indices and local thermal comfort criteria	Green Guide for Healthcare (GGHC) (2007), Green Guide for Healthcare Version 2.2,
ANSI/ASHRAE/IES standard 90.1-2016 for buildings except for low-rise residential buildings.	Enhancements to ASHRAE standard 90.1 prototype building models. Pacific Northwest National Laboratory; 2014.
ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality	Air Conditioning Contractors of America (ACCA) Standard 5. HVAC Quality Installation Specification
ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2016. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings	<i>ASHRAE Guide for Buildings in Hot and Humid Climates</i> , American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2008
ASHRAE Standard 90.1-2013, Energy Efficient Design of Low-Rise Residential Building	Preventing Moisture and Mold Problems: Design and Construction Guidelines, CH2M HILL, 2003
ASHRAE Standard 188-2015, Legionellosis: Risk management for Building water systems	The International Energy Conservation Code
ASHRAE Standard 189.1-2014 Standard for the Design of high-performance Green Buildings	ASHRAE Handbooks
Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy	Guideline 24-2015, Ventilation and indoor air quality in low-rise residential Building
Standard 90.1-2016, Energy Standard for Buildings Except for Low-Rise Residential Buildings	Guideline 10-2016, Interactions Affecting the Achievement of Acceptable Indoor Environments
Standard 100-2015, Energy Conservation in Existing Buildings	Heating, ventilation & air conditioning energy efficiency guide for Australian hotels
Standard 161-2013, Air Quality within Commercial Aircraft	

## Anexo 2

*Figura 20 Estudios realizados por varios autores relacionados con la precisión de las cargas térmicas. Fuente: (Diaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018)*

Fuente	Descripción
[Parys, W et al 2010]	Implementó modelos estocásticos de comportamiento de los ocupantes en las simulaciones de energía de edificios para optimizar múltiples oficinas en un edificio comercial y concluyó que el consumo de energía predijo que el uso de los supuestos tradicionales es mayor que el de los modelos de ocupantes estocásticos.
[Ding, Y, et al 2016]	Estableció un modelo simplificado de evaluación de la carga de refrigeración interior basado en la variación de ocupación. Las cargas de enfriamiento evaluadas fueron adecuadas para la regulación de la operación.
[Castillo, L. R et al 2014]	Los datos de ocupación del edificio desempeñan un papel fundamental en la predicción de la carga de refrigeración del edificio y su utilización mejora significativamente la precisión predictiva de los modelos de carga de refrigeración
[Li, D. et al 2003]	Indique que las condiciones climáticas al aire libre desarrolladas para estimar la carga de enfriamiento a través de las simulaciones son menos estrictas que los datos de diseño al aire libre actuales y los enfoques adoptados por las prácticas locales de arquitectura e ingeniería. El autor también concluyó que los criterios climáticos de diseño actuales utilizados para el cálculo de la carga de refrigeración podrían llevar a un sobredimensionamiento de las plantas de aire acondicionado.
[Mui, K.W. and Wong, L.T, 2007]	Elaboró un modelo matemático para generar perfiles de carga de ocupantes de diseño utilizando una simulación de Monte Carlo. La integración del perfil de ocupante variado en el tiempo, la diferencia de la capacidad de carga de enfriamiento varía de 1% a 5%. El cambio de clima no fue significativo.
[Li. Q. Meng et al, 2009]	Se presentaron cuatro técnicas de modelado para la predicción de la carga de enfriamiento por hora en el edificio: la red neuronal de propagación hacia atrás (BPNN), la red neuronal de función de base radial (RBFNN), la red neuronal de regresión general (GRNN) y la máquina de vectores de soporte (SVM). Los resultados revelan que los métodos SVM y GRNN pueden lograr una mayor precisión y generalización que los métodos BPNN y RBFNN
[Page J,et al 2008]	Se propuso un modelo estocástico para la presencia de ocupantes con las probabilidades de transición de Markov Chains. El modelo produce una serie de tiempo del estado de presencia del ocupante utilizando el perfil de movilidad del parámetro y el período de ausencia prolongada. Las principales desventajas son: (1) como entradas al modelo, los perfiles de probabilidad de presencia y los parámetros de movilidad son demasiado complejos para especificarlos en la simulación y obtener análisis o mediciones debido a su dependencia del tiempo; (2) este modelo no simula el movimiento de los ocupantes de una zona a otra, lo que es distinto en la realidad e importante para la predicción de la ocupación.
[Feng X, et al 2011]	Desarrollo de un módulo de software para simular la ocupación basada en el concepto de cadena Markov de Wang
[Fujii H. and Tanimoto J. 2004]	Se introdujo el modelo de agente, que es un modelo computacional de un proceso cognitivo que combina la percepción y la acción.
[Lee YS, Malkawi AM, 2014]	Mostró cómo el agente se adapta a los cambios térmicos en el espacio para optimizar el multi-objetivo, la comodidad y el ahorro de energía.
[Robinson D, et al 2011]	Proponer un marco para el sistema de simulación de múltiples agentes que considere la presencia, actividad, comportamiento, comodidad e inversión de los ocupantes.
[Kim D, et al 2013]	Desarrollo de la simulación multiagente combinada con un algoritmo de movimiento usando Markov Chain.
[Wang D, et al 2005]	Se propuso un modelo probabilístico para predecir y simular la ocupación en oficinas de una sola persona, donde se utiliza un modelo de proceso de Poisson no homogéneo con dos distribuciones exponenciales diferentes para generar la secuencia de ocupación en una oficina de una sola persona.
[Liao C, et al 2011]	Se propuso un modelo basado en agentes de dinámica de ocupación en un edificio. Este modelo considera a cada ocupante como un agente y decide el estado de un agente (la ubicación de cada ocupante) en cada paso de tiempo a través de un conjunto de reglas especificadas por cuatro módulos, que luego pueden recopilarse para generar series de tiempo de ocupación a nivel de zona .

### Anexo 3

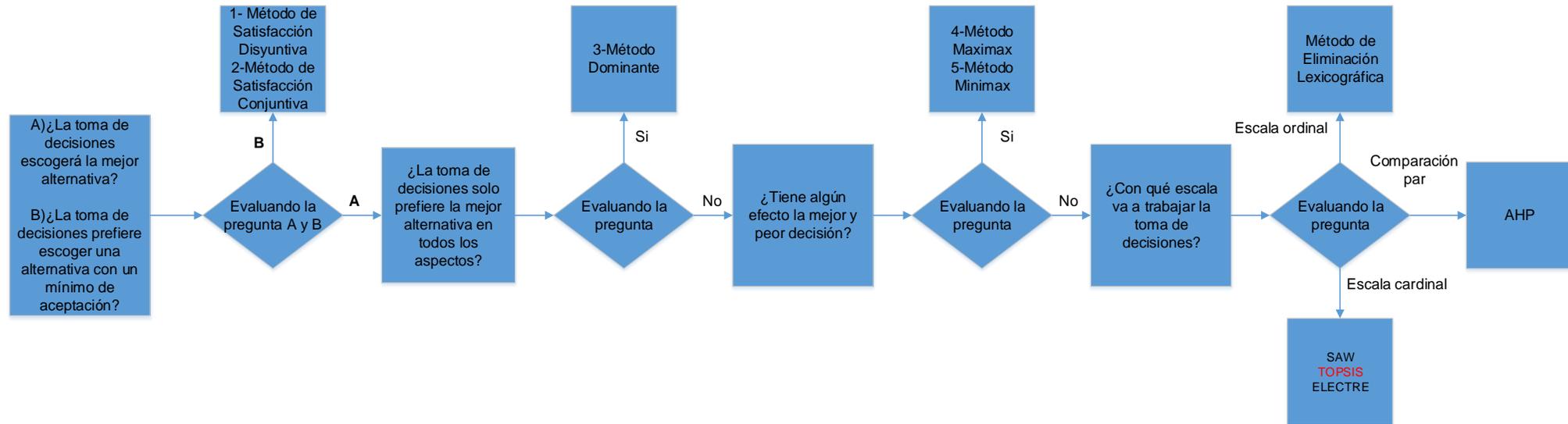


Figura 21 Proceso de selección basado en la preferencia de la toma de decisiones (Davood , Erkoyuncu, & Rajkumar, 2015)

## Anexo 4

Figura 22 Criterios utilizados en toma de decisiones multicriterio de HVAC. Fuente: (Shahrestani, Yao, Cook, & Clements-Croome, 2018)

**Table 2.** Criteria for analysis and decision-making in the previous HVAC&R systems selection studies.

Category (Note A)	Study														
	1	2	3				4								
	Avgelis and Papadopoulos (2009)	Maor, Panjapornpon, and Reddy (2004)	Finch (1989)	Camejo and Hittle (1989)	Fazio, Zmeureanu, and Kowalski (1989)	Hitchcock (1991)	Shams, Nelson, and Maxwell (1994a)	Korolija et al. (2009)	Shapiro and Umit (2011)	Thiel and Mroz (2001)	Wang et al. (2008)	Wang, Jing, and Zhang (2009b)	Wang, Jing, and Zhang (2009a)	Chiness, Nardin, and Saro (2011)	Arroyo et al. (2016)
Criteria															
Energy use	✓			✓	✓	✓		✓		✓					
CO <sub>2</sub> emissions	✓							✓	✓			✓			✓
Thermal comfort	✓												✓	✓	
Management convenience													✓		
Indoor air quality	✓						✓								
Fresh air													✓		
Clean lines													✓		
LCC		✓	✓												
Operating cost	✓			✓		✓	✓			✓		✓ <sup>E</sup>	✓	✓	
Maintenance cost	✓						✓			✓		✓			
Insurance cost										✓					
Investment cost	✓			✓			✓				✓	✓	✓	✓	
Life time				✓						✓		✓	✓		
Ceiling space requirement			✓												
Required space				✓							✓	✓			✓
Building type					✓										
Operation schedule					✓										
Building size					✓										
Indoor/outdoor design conditions					✓		✓ <sup>H</sup>								
Available energy sources					✓		✓ <sup>H</sup>								
Energy source flexibility														✓	
Ease of maintenance							✓								
Low maintenance in the occupied space							✓								
Implementation difficulties										✓					
System complexity											✓				
Simplicity													✓		
Time required of repair														✓	
Lead time															✓ <sup>G</sup>
Future flexibility							✓								

(Continued)

Figura 23 Criterios utilizados en toma de decisiones multicriterio de HVAC. Fuente: (Shahrestani, Yao, Cook, & Clements-Croome, 2018)

Table 2. Continued.

Category (Note A)	Study														
	1	2	3					4							
	Avgelis and Papadopoulos (2009)	Maor, Panjapornpon, and Reddy (2004)	Finch (1989)	Camejo and Hittle (1989)	Fazio, Zmeureanu, and Kowalski (1989)	Hitchcock (1991)	Shams, Nelson, and Maxwell (1994a)	Korolija et al. (2009)	Shapiro and Umit (2011)	Thiel and Mroz (2001)	Wang et al. (2008)	Wang, Jing, and Zhang (2009b)	Wang, Jing, and Zhang (2009a)	Chiness, Nardin, and Saro (2011)	Arroyo et al. (2016)
Criteria															
Flexibility												✓			
Layout flexibility														✓	
Outdoor appearance							✓								
Visual impact												✓			
Concentration												✓			
Noise level of quietness								✓				✓			✓
Individual zone control								✓				✓			
Temperature control												✓			
Humidity control			✓				✓					✓			
Cooling density										✓					
Cooling capacity										✓					
Refrigeration coefficient										✓					
Total heat efficiency										✓					
Reliability										✓					
Maturity												✓		✓	✓
Disruption to occupants during maintenance			✓												
Floor space encroachment (B)			✓												
Loss of usable floor space							✓								
Perimeter partition flexibility (C)			✓												
Module integration (D)			✓												
User satisfaction			✓												
Vendor viability and the continuing availability of support			✓												
Degree of compatibility with the potential expanded load requirements			✓												
Efficiency											✓				
Economic social foot print											✓				
Economic uncertainty														✓	F

## Anexo 5

Figura 24 Alternativas consideradas en selección de multicriterio de HVAC. Fuente: (Shahrestani, Yao, Cook, & Clements-

**Table 3.** Considered alternatives in the previous HVAC&R systems selection studies.

Category	Study														
	1	2	3				4								
Alternatives	Avgelis and Papadopoulos (2009)	Maor, Panjapornpon, and Reddy (2004)	Finch (1989)	Camejo and Hittle (1989) +	Fazio, Zmeureanu, and Kowalski (1989)	Hitchcock (1991) +	Shams, Nelson, and Maxwell (1994a)	Korolija et al. (2009)	Shapiro and Umit (2011)	Thiel and Mroz (2001)	Wang et al. (2008)	Wang, Jing, and Zhang (2009b)	Wang, Jing, and Zhang (2009a)	Chiness, Nardin, and Saro (2011)	Arroyo et al. (2016)
Gas fire boiler	✓	✓							✓	✓				✓	✓
Oil fire boiler	✓									✓					
Split room air conditioner	✓	✓													
Air-cooled chiller	✓	✓		✓					✓						
Water cooled chiller															
Absorption chiller		✓													✓
VAV system	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓					✓		
VAV with terminal reheat	✓	✓	✓	✓			✓								
Fan coil		✓	✓	✓			✓						✓		
Multi-zone		✓					✓								
DOAS with fan coils			✓												
CAV system		✓		✓	✓	✓	✓	✓					✓		
DX package unit		✓		✓		✓	✓								
Split air-cooled heat pump						✓							✓		
Economiser		✓						✓							
Reheat system		✓	✓				✓								
Double duct VAV			✓												
Residential equipment							✓								
Water source heat pump		✓				✓	✓		✓						✓
Air source heat pump								✓							
Ground source heat pump								✓							
Electrical heating system									✓					✓	
Four types of cooling storage										✓					
16 types of CHP unit												✓			
Induction unit			✓										✓		
VRV													✓		
Gas burner														✓	
Floor/wall radiant system														✓	
Hot water radiator panel	✓													✓	
Hot water air heater														✓	
Radiant modules														✓	
Radiant tube														✓	

Notes: Category 1 Studies which are highly detailed and examine both HVAC&R system performance evaluation and decision-making analysis. Category 2 represents the research studies that aimed to cover a broad range of alternatives. Category 3 comprises the studies that attempted to develop a comprehensive model. Category 4 covers the Studies which are mainly focused on their adopted decision-making methods.

+: All alternatives considered in this model have not been explicitly defined in the paper.

## Anexo 6

*Diferentes escenarios de ocupación empleados en un hotel para 24 horas. Fuente: (Diaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018)*

Escenarios	Esquemas de ocupación (tiempo de servicio)					Observaciones
	habitaciones	Horario			Áreas de servicio oficinas	
		restaurante	cabaret	tiendas		
1	00:00-24:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	00:00-24:00	00:00-24:00	00:00-24:00	Escenario crítico, 100 % de ocupación durante las 24 horas, altas tasas de ganancia de calor por concepto de empleo de equipos
2	libre	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	libre	09:00-22:00	08:00-17:00	Escenario crítico, mínima demanda térmica, tasa de ocupación inferior al 10 %, solo se ofrecen servicios de restaurante y tiendas.- 90 % habitaciones parcialmente cargada
3	00:00-23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00-02:00	09:00-22:00	08:00-17:00	Hotel con 100 % de ocupación, las áreas públicas y áreas de servicio con tiempo de trabajo limitado
4	00:00-23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00-02:00	09:00-22:00	08:00-17:00	Hotel con 75 % de ocupación, las áreas públicas y servicio con tiempo de trabajo limitado
5	00:00-23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00-02:00	09:00-22:00	08:00-17:00	Hotel con 50% de ocupación las áreas públicas y áreas de servicio con tiempo de trabajo limitado
6	00:00-10:00, 16:00-23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00-02:00	09:00-22:00	08:00-17:00	Hotel de tránsito. 100 % de ocupación. Las áreas de servicios ofrecen servicios generales (no solo a huéspedes) . Desde las 07:00 hasta 16:00 horas habitaciones parcialmente cargadas.
7	00:00-10:00, 16:00-23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00-02:00	09:00-22:00	08:00-17:00	Hotel de tránsito 75 % de ocupación. Las áreas de servicios ofrecen servicios generales (no solo a huéspedes) . Desde las 07:00 hasta 16:00 horas habitaciones parcialmente cargadas.
8	00:00-10:00, 16:00-23:00	07:00-10:00, 12:00-16:00, 20:00-22:00	21:00-02:00	09:00-22:00	08:00-17:00	Hotel de tránsito 50% de ocupación. Las áreas de servicios ofrecen servicios generales (no solo a huéspedes) . Desde las 07:00 hasta 16:00 horas habitaciones parcialmente cargadas.

## Anexo 7

Valores de los perfiles térmicos (kW). Fuente: (Díaz Torres, Reyes Calvo, Santana Justiz, Alvarez Guerra, & Gomez Sarduy, 2018)

Hora	Escenarios de simulación							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1</b>	387,74	96,04	345,74	289,30	241,30	154,79	146,45	142,45
<b>2</b>	387,38	90,41	345,50	293,56	240,44	154,19	150,38	141,26
<b>3</b>	347,84	84,47	308,20	255,96	203,32	117,04	112,93	104,29
<b>4</b>	342,10	79,59	300,86	248,02	195,66	109,07	104,52	96,36
<b>5</b>	340,69	76,32	299,47	245,88	194,00	107,80	102,50	94,82
<b>6</b>	339,16	73,67	299,01	245,12	193,56	105,96	100,58	93,42
<b>7</b>	338,36	85,59	321,25	259,69	208,61	196,54	180,10	170,42
<b>8</b>	337,45	94,15	324,88	261,63	211,11	156,40	137,89	128,37
<b>9</b>	383,76	105,42	339,18	273,98	223,42	150,03	132,46	125,50
<b>10</b>	388,71	115,99	337,89	270,96	220,60	148,47	129,14	122,38
<b>11</b>	415,22	120,71	347,08	290,72	239,84	150,19	141,46	134,18
<b>12</b>	436,97	147,52	388,49	325,39	274,35	239,18	227,26	223,02
<b>13</b>	456,91	166,02	410,54	344,90	293,54	207,44	193,01	188,45
<b>14</b>	473,62	179,50	427,18	361,45	309,25	223,27	208,75	203,35
<b>15</b>	483,59	187,89	425,09	357,58	304,90	220,91	204,77	199,09
<b>16</b>	488,26	192,69	429,24	362,48	309,00	225,00	209,61	203,13
<b>17</b>	487,54	182,40	417,64	362,43	307,99	315,73	264,88	214,84
<b>18</b>	476,32	171,97	402,85	349,18	293,42	224,23	215,08	200,12
<b>19</b>	439,19	165,65	402,86	356,05	299,13	278,36	276,51	260,79
<b>20</b>	424,56	168,73	410,88	345,47	288,27	232,83	212,25	196,05
<b>21</b>	418,87	158,23	406,21	340,41	283,37	227,59	206,81	190,97
<b>22</b>	411,23	129,84	384,29	333,80	277,40	206,63	200,85	185,45
<b>23</b>	399,14	115,54	358,72	306,89	251,49	181,54	174,26	159,66
<b>24</b>	401,53	105,80	360,86	309,27	254,51	183,68	176,64	162,68