

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# **Auditoria energética a chiller de 52 TR del Hotel Nutibara Medellín**

Carlos Mario Chaves López

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Ingeniero electromecánico

Asesor

Luis Fernando Cardona Sepúlveda

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Departamento de electromecánica y mecatrónica  
Medellín, Colombia  
2024

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RESUMEN

---

Actualmente se encuentra en funcionamiento en las instalaciones del Hotel Nutibara Medellín, un Chiller con compresores tipo scroll marca Trane de 52 TR, para climatizar las habitaciones y pasillos del hotel. Este equipo, con casi quince años de funcionamiento, representa un soporte importante y trascendental en la adecuada prestación de los servicios hoteleros (aportando la climatización de los espacios físicos); se deben cumplir condiciones de temperaturas específicas, con rangos comprendidos entre los 18 y los 24°C. El no cumplimiento de estas condiciones puede llevar a la suspensión del servicio, generando numerosas quejas de los huéspedes y viéndose reflejado en una baja ocupación e influir en un daño reputacional para el hotel.

En este trabajo se presentan los resultados de una auditoría energética al chiller del Hotel Nutibara. Esta auditoría fue motivada por diversas condiciones de funcionamiento no óptimas detectadas durante su operación. Mediante la aplicación normativas internacionales, tal como la ISO 50000, se establecieron los alcances, recursos y metodología con los que se pudo determinar el desempeño energético actual de este equipo, los cuales están soportados por cálculos termodinámicos. Finalmente, en este trabajo se proponen diferentes acciones que apuntan a la mejora del desempeño actual.

Palabras clave: Auditoria, chiller, climatización, hotel, eficiencia energética.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RECONOCIMIENTOS

---

Mis más sinceros agradecimientos, en primera instancia, al grupo de docentes de la facultad de Ingenieras del programa Ingeniería Electromecánica, en especial a los docentes del área de máquinas térmicas que tantas bases aportaron a mi formación para la elaboración del presente Trabajo de grado.

Agradezco a Dios por permitirme lograr esta meta tan importante en mi vida, sin él nada sería posible.

Al profesor Luis Fernando Cardona por su excelente disposición y paciencia para la excelente asesoría prestada.

A mi madre, Yenni, por el apoyo en transcurso de mi vida y darme bases sólidas para ser persona de bien y útil a la sociedad.

A mis hijos, para que vean que con sacrificio y disciplina se logran la metas.

A mi esposa Sandra, por tanto sacrificio y tanto apoyo que me diste, durante todo este tiempo, para ti va este logro.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## TABLA DE CONTENIDO

---

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	Objetivos.....	8
1.1.1	Objetivo general.....	8
1.1.2	Objetivos específicos.....	8
1.2	Organización de este trabajo.....	8
2.	MARCO TEÓRICO.....	9
2.1	Hotel Nutibara Medellín.....	9
2.2	Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	10
2.3	Chiller del Hotel Nutibara Medellín.....	11
2.3.1	Principales partes que conforman el chiller Trane del Hotel Nutibara Medellín	14
2.4	Auditorias energéticas y estudios previos.....	18
2.5	Modelo termodinámico de un chiller.....	20
3.	METODOLOGÍA.....	23
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1	Estado actual del chiller.....	25
4.2	Análisis termodinámico del desempeño energético del chiller de enfriamiento.....	32
4.3	Propuestas para mejorar la eficiencia energética del sistema.....	41
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	43
	REFERENCIAS.....	45

# LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Chiller Trane Hotel Nutibara Medellín. ....	7
<b>Figura 2.</b> Hotel Nutibara Medellín.....	9
<b>Figura 3.</b> Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	10
<b>Figura 4.</b> Diagrama del proceso del chiller.....	11
<b>Figura 5.</b> Vista superior (izquierda) y lateral (derecha) del chiller Trane.....	12
<b>Figura 6.</b> Placa de datos técnicos del Chiller Trane de 52 TR del Hotel Nutibara Medellín. ....	13
<b>Figura 7.</b> Interfaz para hacer control del equipo Trane. ....	13
<b>Figura 8.</b> Vista aérea - diagrama chiller Trane.....	14
<b>Figura 9.</b> Compresores del chiller Trane del hotel Nutibara. ....	15
<b>Figura 10.</b> Condensadores del chiller marca Trane.....	15
<b>Figura 11.</b> Válvula de expansión del sistema de refrigeración.....	16
<b>Figura 12.</b> Intercambiador de calor del sistema. Entrada y salida de agua y entrada de refrigerante.....	17
<b>Figura 13.</b> Periférico Navigator Trane .....	18
<b>Figura 14.</b> Bomba de agua principal (izquierda), bomba de agua reserva (derecha). ....	25
<b>Figura 15.</b> Tuberías suministro y retorno del agua - aislamientos.....	26
<b>Figura 16.</b> Mediciones con megómetro. ....	26
<b>Figura 17.</b> Sensores entrada y salida de evaporador. ....	27
<b>Figura 18.</b> Sensores traductores de flujo de agua.....	27
<b>Figura 19.</b> Error en el display debido al sensor de presión del evaporador descalibrado... ..	28
<b>Figura 20.</b> Tablero de potencia.....	28
<b>Figura 21.</b> Tablero de control. ....	29
<b>Figura 22.</b> Fancoil en habitaciones.....	29
<b>Figura 23.</b> Estado actual del Display Navigator.....	30
<b>Figura 24.</b> Circuito 2 no operativo.....	30
<b>Figura 25.</b> Válvula electrónica del circuito 2 .....	31
<b>Figura 26.</b> Serpentín incrustado. ....	31
<b>Figura 27.</b> Diagrama de presión-entalpía del proceso de refrigeración para el chiller .....	33
<b>Figura 28.</b> Programa en EES para la obtención de entalpías y entropías del chiller.....	35

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Mediciones realizadas el 16 de mayo de 2024.....	32
<b>Tabla 2.</b> Datos eléctricos medidos el 16 de mayo de 2024.....	33
<b>Tabla 3.</b> Resumen de resultados de propiedades termodinámicas.....	36

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Poder garantizar las condiciones hoteleras adecuadas y ceñidas a la reglamentación local por las autoridades competentes ha sido una premisa de importancia para la administración del Hotel Nutibara Medellín. Para lograr esas condiciones, se debe contar con el equipamiento y máquinas especializadas para tal fin. En el caso particular, en el área de las habitaciones y pasillos se cuenta con un Enfriador tipo Chiller, con el fin de poder climatizar esta área que comprende 146 habitaciones, y los pasillos de 11 pisos para la asistencial del servicio. Este enfriador tipo Chiller, mostrado en la Figura 1, se constituye en una máquina importante para la prestación del servicio. Si llega a fallar, el servicio se ve comprometido.

Con casi 15 años de puesta en marcha y operación del equipo, no se tiene medición clara ni datos de su eficiencia y desempeño actual. Aparentemente, según las descripciones visuales, algunos informes superficiales de mantenimiento y análisis de tendencias, se puede deducir que el equipo no opera en óptimas condiciones. A partir de una falla crítica presentada recientemente, surgió la necesidad de poder identificar y analizar el estado actual del equipo. Por esta razón, se propone hacer este estudio, con el fin de dar respuesta a la necesidad planteada por los responsables de mantenimiento electromecánico del hotel.



**Figura 1.** Chiller Trane Hotel Nutibara Medellín.

Fuente: autor

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo general

Realizar una auditoria energética al chiller del edificio Hotel Nutibara Medellín, con el fin de presentar aportes y sugerencias para poder aumentar el desempeño y la eficiencia del equipo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar el estado actual del chiller de enfriamiento del edificio Hotel Nutibara Medellín, recopilando cualitativa y cuantitativamente las variables que intervienen en el equipo.
- Analizar termodinámicamente el desempeño energético del chiller de enfriamiento del edificio Hotel Nutibara Medellín, con el fin de identificar posibles problemas en el desempeño del equipo.
- Proponer mejoras para mejorar la eficiencia energética del chiller de enfriamiento del edificio Hotel Nutibara Medellín.

## 1.2 Organización de este trabajo

En el primer capítulo (introducción) se presenta el contexto del estudio.

En el segundo capítulo (marco teórico) se definen y explican los conceptos fundamentales relacionados con la termodinámica, la eficiencia energética, la gestión térmica y otros aspectos relevantes.

En el tercer capítulo (metodología) se describen las técnicas y métodos utilizados para llevar a cabo la investigación. Se explica cómo se recopilaron los datos, qué técnicas o herramientas analíticas se emplearon y cómo se aplicaron los procedimientos para alcanzar los objetivos planteados.

En el cuarto capítulo (resultados) se presentan y se analizan los resultados obtenidos a través de la investigación. Se muestran los datos recolectados, los hallazgos de las mediciones, los análisis termodinámicos realizados, y se discuten en relación con los objetivos planteados, comparándolos con la teoría revisada en el capítulo 2.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Hotel Nutibara Medellín

Es un hotel con más de 70 años, ampliamente reconocido y el cual es patrimonio histórico de la ciudad. Mostrado en la Figura 2, es un hotel referente tanto en la región antioqueña, como a nivel nacional e internacional. Está localizado diagonal al Palacio de Gobierno y al Palacio Municipal, que hoy son el Palacio de la Cultura y el Museo de Antioquia.



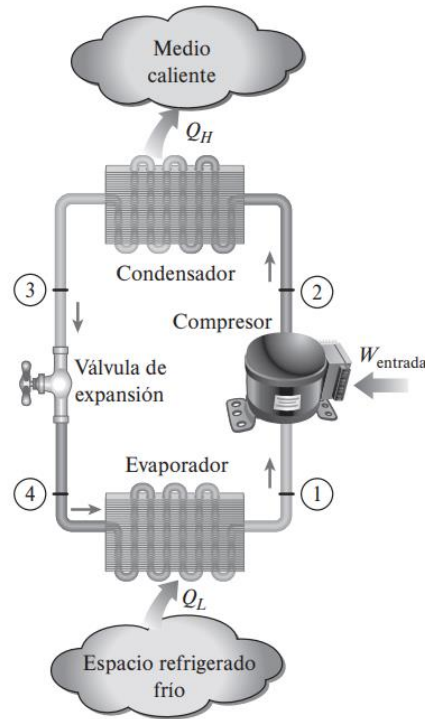
**Figura 2.** Hotel Nutibara Medellín.

Fuente: autor

El diseño del Hotel Nutibara fue encargado al arquitecto norteamericano Paul Williams, por la élite de empresarios que impulsó el crecimiento de Medellín a comienzos del siglo XX (Castaño Guzman, 2023). En 1938 la ciudad tenía 150 mil habitantes, era la segunda economía en Colombia y tenía la industria textil más grande de Latinoamérica, pero solo contaba con tres pequeños hoteles de primera categoría para recibir a los extranjeros. Por eso, la construcción de un hotel grande se convirtió en una de las obras más urgentes de la ciudad (Caraballo, 2024).

## 2.2 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

En un proceso de refrigeración se retira energía de un depósito a baja temperatura hacia un depósito a alta temperatura, lo cual solo se puede lograr realizando un trabajo en el sistema (Cengel & Boles, 2015). En la teoría básica del ciclo de refrigeración, intervienen cuatro elementos principales como se muestra en la **Figura 3**:



**Figura 3.** Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

Fuente: (Cengel & Boles, 2015)

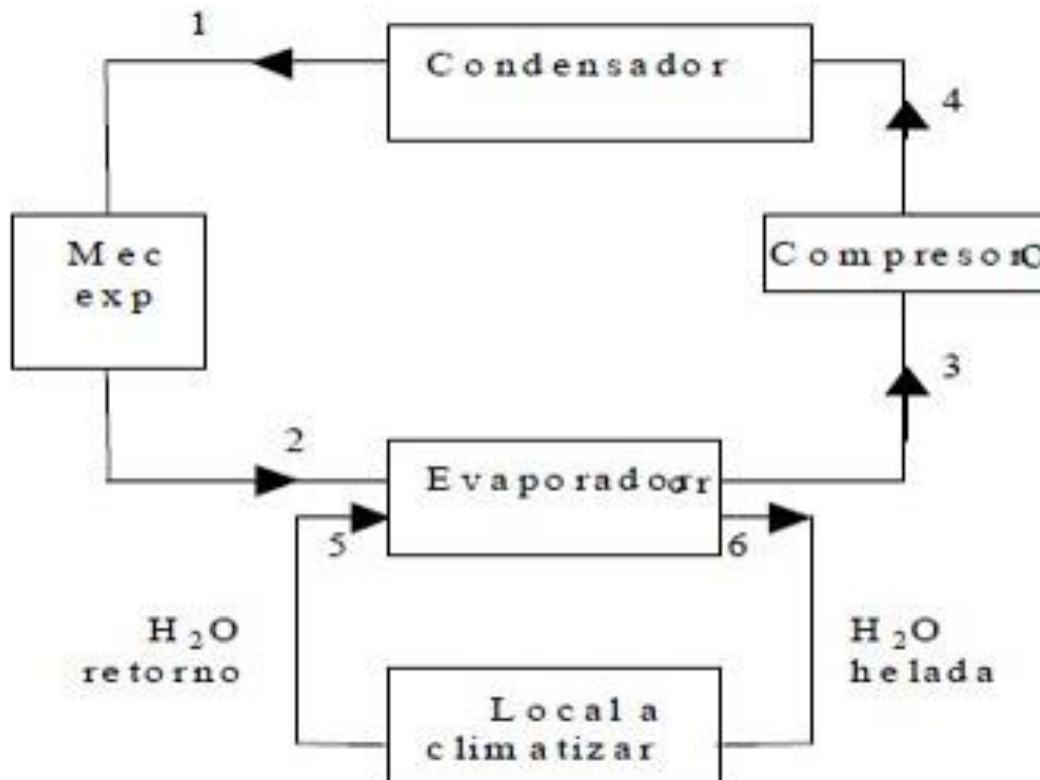
Se trata de un ciclo cerrado donde una sustancia refrigerante hace un recorrido a lo largo de la línea que une a los cuatro componentes del ciclo de refrigeración: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. Durante su paso por cada uno de estos elementos, el fluido refrigerante cambia de estado y de condiciones termodinámicas (Cengel & Boles, 2015):

- El proceso que experimenta el refrigerante en el compresor se suele aproximar como un proceso adiabático (sin pérdida de calor)
- El proceso que ocurre en el condensador y el evaporador (intercambiadores de calor) se aproxima a un proceso isobárico (presión constante), ya que hay cambio de fase al interior de estos dispositivos.

- La válvula de expansión se suele aproximar como un proceso isoentálpico (entalpía constante). Esto ocurre porque la válvula es un dispositivo pequeño donde las pérdidas o ganancias de calor se pueden despreciar.

### 2.3 Chiller del Hotel Nutibara Medellín

Un chiller es un dispositivo que permite retirar calor de un líquido (por ejemplo, agua), para acondicionar o aclimatar un espacio. Tal como se muestra en la Figura 4, el agua enfriada se usa luego para aclimatar el aire en diferentes instalaciones, tales como habitaciones y pasillos de un hotel como en este estudio, utilizando sistemas de aire acondicionado o unidades manejadoras de aire. Por lo general, los chillers utilizan ciclos convencionales de refrigeración por compresión de vapor.



**Figura 4.** Diagrama del proceso del chiller.  
 Fuente: (Armas, Lapido, & Castellan, 2006)

La capacidad nominal del chiller se mide en Toneladas de Refrigeración, TR (1 TR equivale a 3.5 kW). El chiller de este trabajo tiene una capacidad de 52 TR y se muestra en la Figura 5. En dicha figura se puede apreciar el uso de ventiladores para enfriar el refrigerante en los

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

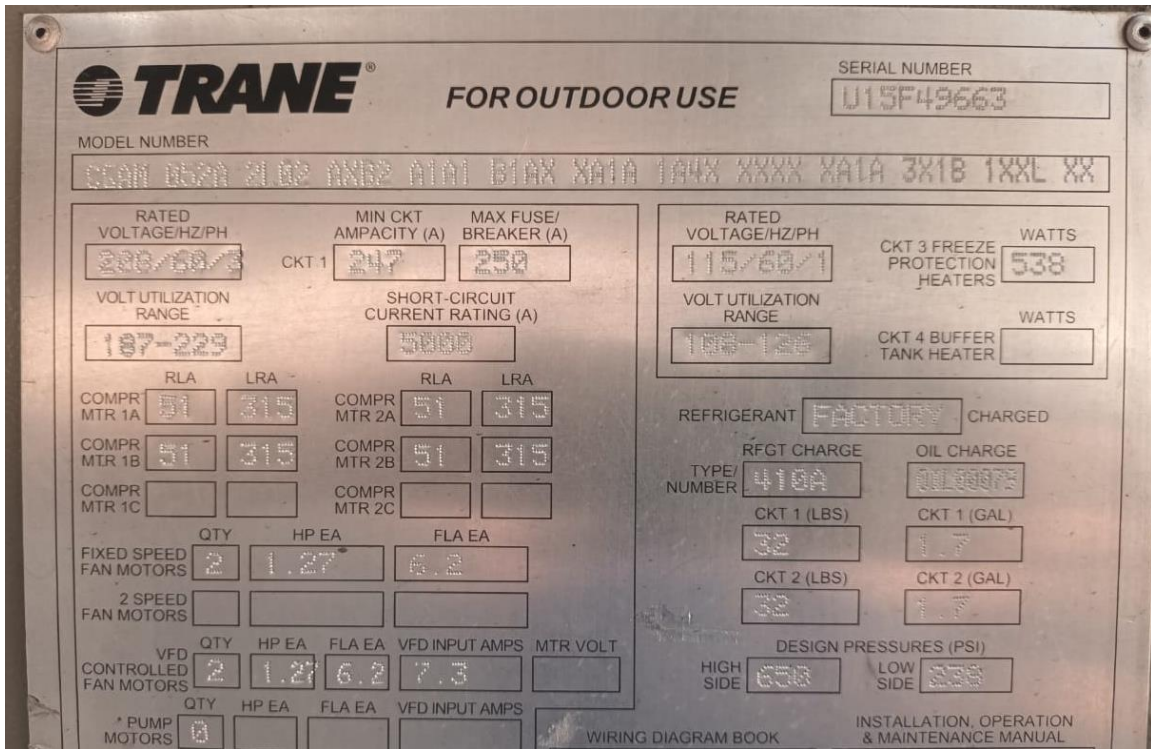
condensadores. También es posible utilizar torres de enfriamiento para eliminar el calor del ciclo a través de la evaporación del agua.



**Figura 5.** Vista superior (izquierda) y lateral (derecha) del chiller Trane.  
Fuente: autor

Tal como se aprecia en la Figura 6, la referencia comercial del equipo es **CGAM 052A 2102 AXB2**, (Chillers, 2009), la cual puede describir el equipo de la siguiente manera:

- CGAM: es la Línea de Chillers Trane, del segmento AquaForce.
- 052: Tamaño nominal de capacidad de refrigeración del equipo, cincuenta y dos toneladas de refrigeración.
- A: Chiller refrigerado por aire (Condensador refrigerado por aire con ventilación mecánica por ventiladores).
- 4: Voltaje de operación para la región sur América de 208 Voltios en corriente alterna, sistema trifásico de potencia con red a 60 Hz.
- El Chiller utiliza como sistema refrigerante R410a.



**Figura 6.** Placa de datos técnicos del Chiller Trane de 52 TR del Hotel Nutibara Medellín.  
Fuente: autor

El resto de los componentes de la referencia hacen alusión al evaporador inundado (lo cual corresponde a un intercambiador de calor tipo coraza y tubo) y comunicación de control a través de dispositivos especiales como el Display Navigator, como muestra la Figura 7.



**Figura 7.** Interfaz para hacer control del equipo Trane.  
Fuente: autor

La figura 8 muestra un diagrama más completo y detallado del chiller motivo de este estudio.

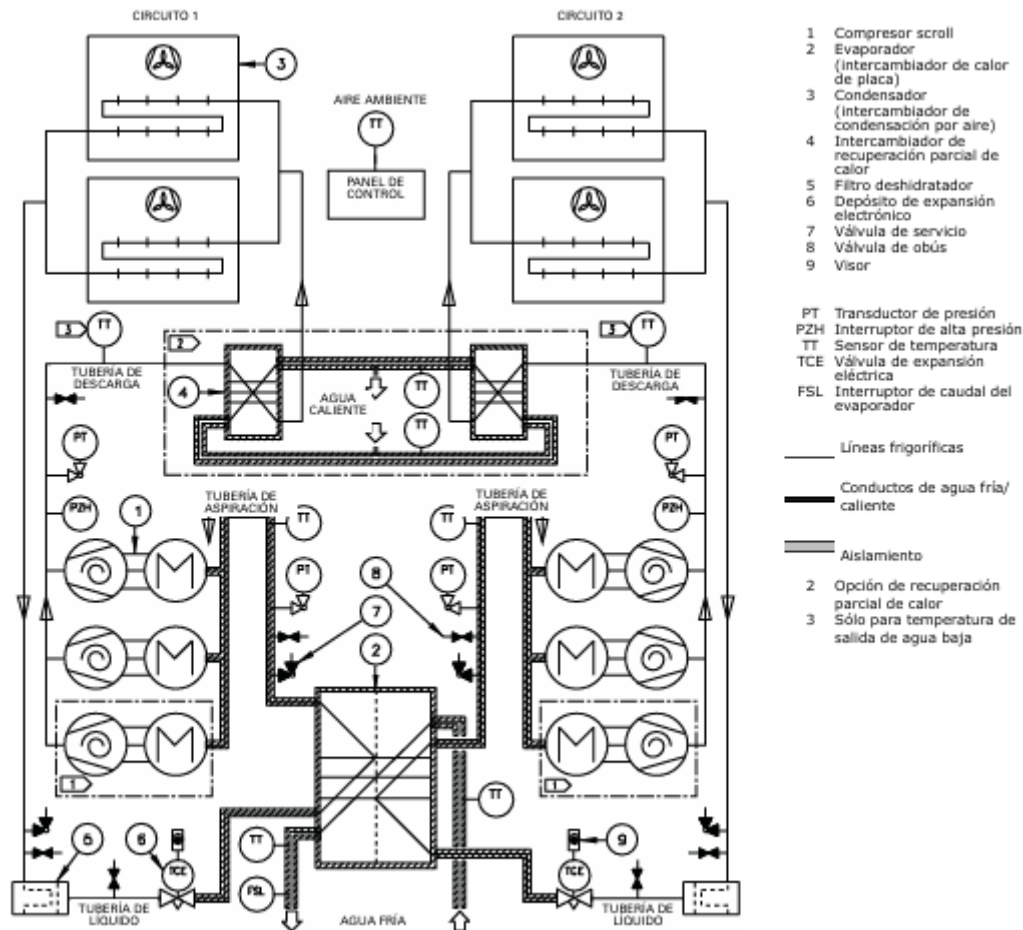


Figura 8. Vista aérea - diagrama chiller Trane.

Fuente: manual Trane

### 2.3.1 Principales partes que conforman el chiller Trane del Hotel Nutibara Medellín

- Compresor:** Este equipo eleva la presión del refrigerante, de tal manera que la temperatura de saturación del fluido sea mayor que a la temperatura del medio donde se va a enfriar el refrigerante en el condensador. Es decir, si la temperatura del aire de enfriamiento que circula por el condensador es 20°C, el compresor debe llevar la temperatura de saturación del refrigerante por encima de este valor (30°C, por ejemplo). El compresor del chiller analizado es tipo Scroll, el cual presenta baja fricción y mayor eficiencia de operación. El chiller del hotel Nutibara cuenta con 2 compresores conectados en tándem. Sin embargo, el circuito 2 se encuentra

Inhabilitado, ya que un compresor se encuentra fuera de servicio (imagen izquierda de la Figura 9).



**Figura 9.** Compresores del chiller Trane del hotel Nutibara.  
Fuente: autor.

- Condensador:** es un dispositivo donde se enfría y condensa el refrigerante una vez sale el fluido del compresor. El calor removido es desechado al medio ambiente. El refrigerante cambia de gas a líquido, mientras circula por paneles que tienen microtubos de cobre en el interior. Se hace pasar aire de manera forzada gracias a ventiladores ubicados en la parte superior, lo que disminuye la temperatura del refrigerante que pasa por estos tubos. El condensador del chiller Trane del Hotel Nutibara Medellín se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Condensadores del chiller marca Trane.  
Fuente autor

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Válvula de expansión electrónica:** es una válvula cuya apertura permite al refrigerante expandirse desde una zona de alta presión, a la salida del condensador, hasta una zona de baja presión, antes del evaporador. Esta válvula es controlada electrónicamente desde el control principal del equipo, en donde se monitorean todas las condiciones de operación del proceso y le dan apertura o cierre según la carga térmica en el momento (ver Figura 11 donde se señala la válvula de expansión y en detalle se puede observar la línea que lleva la señal de accionamiento).



**Figura 11.** Válvula de expansión del sistema de refrigeración.  
Fuente: autor

- Evaporador:** es el lugar donde el refrigerante absorbe calor del medio a enfriar (agua) y se evapora (pasa a gas). Para lograr esta transferencia de calor, la temperatura dentro del evaporador debe ser menor que la del medio que va a ser aclimatado. El refrigerante a la salida del compresor debe ser 100% gaseoso o vapor, para evitar daños en el compresor. La Figura 12 muestra el evaporador del chiller Trane.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 12.** Intercambiador de calor del sistema. Entrada y salida de agua y entrada de refrigerante.  
Fuente: autor

- Control del equipo:** Es el cerebro del equipo, que controla todo el proceso. Para esto utiliza sensores (presiones, temperaturas, flujos) conectados en diferentes etapas que monitorean continuamente el proceso. El equipo cuenta también con un panel físico con pantalla que permite hacer visualización y parametrización del equipo. La mayoría de los datos utilizados en los cálculos de este estudio se pudieron obtener mediante el uso de este panel, mostrado en la Figura 13).

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



**Figura 13.** Periférico Navigator Trane  
Fuente: autor

## 2.4 Auditorías energéticas y estudios previos

Las norma ISO 50001 y 50002 (ISO, 2011) establece los mecanismos para hacer una eficiente gestión energética y especifican los requisitos para la ejecución de una auditoría energética. Estas normas se pueden aplicar a diferentes tipos de organizaciones y/o procesos y a todas las formas de uso de energía. En la auditoría energética, se establecen unos alcances, unos objetivos, se designa un grupo de auditores (con su respectivo líder), se establece un cronograma de actividades, un plan de medición de parámetros y/o variables y un informe final de auditoría. Todos estos pasos secuenciales, tienen como finalidad, presentar al líder de la gestión del proceso (propietario o administrador) un estado real de las condiciones de operación.

En la literatura se reportan diversos estudios de auditorías energéticas y de eficiencia energética en sistemas de refrigeración y aire acondicionado a nivel nacional. En 2014 se reporta un estudio realizado en la Universidad Autónoma del Caribe. El propósito de ese proyecto fue estudiar la eficiencia energética de los equipos de aire acondicionado de la edificación del Bloque G de la Universidad, en busca de comprobar diferentes hipótesis planteadas frente a edificaciones de más de una década de funcionamiento en países como el nuestro. Se encontró que los equipos funcionaban con eficiencias por debajo de las recomendadas y que había algunos dispositivos sobredimensionados. Así mismo, se encontraron equipos operando con refrigerantes obsoletos como el R22, por lo que en

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

dicho estudio se recomendó cambiar por otro refrigerante más amigable con el ambiente como el R410A (Bolívar Hernández & Martínez Gómez, 2014).

En 2011 se reportó otro estudio titulado “Evaluación y propuesta de ahorro de energía y agua en los sistemas de aire acondicionado instalados en el edificio PS Campus Lemaitre”. Este estudio se realizó en la Universidad Tecnológica de Bolívar, en la que se analizaron una serie de equipos de refrigeración en distintos locales que componen el edificio PS, los cuales debieron ser analizados y evaluados con base a la carga térmica generada dependiendo de las distintas actividades que en estos se realizaba. En este trabajo se calcularon estas cargas de manera precisa y se evaluó la eficiencia por parte de los equipos encargados de la refrigeración de estos locales. Se encontró que los equipos tenían una demanda de 25 TR, pero realmente estaban entregando 20 TR por las diferentes ineficiencias y pérdidas del sistema (Guerra Gómez & Corrales Alvarez, 2011).

En 2015 se realizó un estudio titulado “Análisis comparativo de eficiencia energética de un sistema de expansión directa vs un sistema de agua helada con primario variable en una instalación educativa en la ciudad de Barranquilla-Colombia”. El problema que se abordó en esta investigación fue establecer como era el comportamiento energético del sistema de acondicionamiento de aire para los establecimientos educativos en la zona tropical de Colombia, además de determinar de manera operativa y económica cual era la mejor tecnología para aplicar en este tipo de edificaciones (Solano Perez, 2015). En dicho estudio se utilizó una herramienta llama computacional llamada “Cype” que apoyó los cálculos de ese trabajo. Se encontró que no era viable hacer un cambio de los sistemas actuales, ya que el ahorro de energía no era suficiente para justificar la inversión en un nuevo sistema de consumo de energía.

Finalmente, en 2022 se presentó otro trabajo titulado “Estudio energético de un establecimiento hotelero con balneario y propuesta de mejoras energéticas” realizado en España. El principal objetivo de este documento fue visibilizar las áreas y equipos sujetos al consumo de energía del hotel y balneario y consecuentemente susceptibles de la aplicación de una serie de mejoras para potenciar un ahorro energético en el hotel (Pérez Sobrino, 2022). En este estudio se hacen diferentes propuestas, las cuales se estima que son viables económicamente, pero la instalación se mantuvo igual ya que no se implementaron las mejoras.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2.5 Modelo termodinámico de un chiller

La eficiencia isentrópica del compresor del chiller ( $\eta_{\text{isent,comp}}$ ) es una medida de las irreversibilidades de este dispositivo y se puede calcular a partir de las entalpías de entrada y salida (Cengel & Boles, 2015):

$$\eta_{\text{isent,comp}} = \frac{h_{s2} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

El flujo másico del refrigerante se puede calcular a partir del dato de potencia eléctrica del compresor:

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{\text{ent}}}{(h_2 - h_1)} \quad (2)$$

El calor que se extrae del agua (la carga de refrigeración) se puede estimar a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (3)$$

El calor que el chiller desecha a la atmósfera en el condensador es:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (4)$$

Con los datos anteriores, es posible calcular el coeficiente de desempeño o rendimiento COP del equipo:

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{\text{ent}}} \quad (5)$$

El COP es muy importante, ya que es una medida de la eficiencia del chiller (mientras más alta mejor). Una alta eficiencia reduce el consumo de energía y los costos operativos. A partir del COP es posible calcular el índice de eficiencia energética EER:

$$EER = 3.1412 * COP_R \quad (6)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Es posible calcular la eficiencia de segunda ley de la termodinámica del chiller, con base al coeficiente de desempeño del equipo:

$$\eta_{II} = \frac{COP_R}{COP_{Rrev}} \quad (7)$$

Donde el COP reversible (ideal, máximo) se calcula con:

$$COP_{Rrev} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (8)$$

Donde  $T_H$  es la temperatura del depósito de alta temperatura y  $T_L$  la temperatura del depósito de baja temperatura (temperaturas absolutas en Kelvin).

Haciendo análisis por segunda ley de la termodinámica, también es posible determinar las destrucciones de exergía (Cengel & Boles, 2015):

1) Destrucción de exergía en el compresor:

$$\dot{X}_{dest,1-2} = T_0 \dot{m}(S_2 - S_1) \quad (9)$$

2) Destrucción de exergía en el condensador:

$$\dot{X}_{dest,2-3} = T_0 \left[ \dot{m}(S_3 - S_2) + \left( \frac{\dot{Q}_H}{T_H} \right) \right] \quad (10)$$

3) Destrucción de electroválvula expansión

$$\dot{X}_{dest,3-4} = T_0 \dot{m}(S_4 - S_3) \quad (11)$$

4) Destrucción de exergía en el evaporador (intercambiador de calor)

$$\dot{X}_{dest,4-1} = T_0 \left[ \dot{m}(S_1 - S_4) - \left( \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \right) \right] \quad (12)$$

El flujo de exergía es:

$$\dot{X}_{QL} = \dot{Q}_L \frac{T_0 - T_L}{T_L} \quad (13)$$

La destrucción total de exergía del sistema se obtiene de:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$\dot{X}_{\text{dest,total}} = \dot{W}_{\text{ent}} - \dot{X}_{\text{QL}} \quad (14)$$

Este valor también se puede calcular al sumar las destrucciones parciales de energía:

$$\dot{X}_{\text{dest,total}} = \dot{X}_{\text{dest,1-2}} + \dot{X}_{\text{dest,2-3}} + \dot{X}_{\text{dest,3-4}} + \dot{X}_{\text{dest,4-1}} \quad (15)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. METODOLOGÍA

---

Para empezar, se hizo una revisión de documentos, informes y artículos de investigación de bases de datos científicas, de las que se tomaron elementos conceptuales para la realización de este trabajo, los cuales se plasmaron en el capítulo 2 de este documento. También se consultó el manual de operación y mantenimiento del equipo analizado, el cual permitió entender mejor la operación, las partes y conexiones del chiller. Adicionalmente se estudiaron diferentes documentos de referencia de reconocidas entidades internacionales como el laboratorio nacional de energías renovables de Estados Unidos (Kumik & Tiessen, 2017) y la autoridad de construcción de Singapur (Building and construction authority, 2023) entre otros. Así mismo, se hizo una revisión del modelado termodinámico de un chiller, el cual sirve de base en la auditoría para determinar de manera objetiva el desempeño energético del equipo (Cengel & Boles, 2015).

A continuación, se realizó mediciones de variables en sitio, las cuales permitieron hacer un análisis del desempeño actual del equipo. Se pudieron medir o estimar las variables asociadas a flujos que entran y salen del ciclo de refrigeración, tales como energía eléctrica y calor disipado a través de los ventiladores de los condensadores. Estas variables son importantes porque intervienen directamente en el proceso de climatización. Se realizaron mediciones de las diferentes variables en diferentes momentos (días) y los resultados se compilaron en una hoja de cálculo. Esto permitió identificar con rapidez condiciones que pueden llevar a un desempeño adverso del equipo o de uno de sus componentes. El equipo se encuentra instrumentado, por lo que muchas de estas variables se pudieron obtener desde el panel de control o desde el software suministrado por el fabricante, el cual se conecta directamente con el PLC del chiller. Se utilizaron adicionalmente instrumentos de medida eléctricos (multímetro y megómetro), cámara fotográfica y un computador portátil institucional proporcionado por la empresa.

Con toda esta información se realizaron cálculos de desempeño energético, apoyados por software académico de cálculo de propiedades termodinámicas (EES). Los resultados de estos cálculos se comparan directamente con la eficiencia teórica que el fabricante reporta, por lo que fue posible determinar el comportamiento real del mismo. De igual manera, se pudo hacer un balance exergético del equipo, con el cual se pudo identificar aquella energía que no se aprovecha eficientemente en cada componente, con el fin de proponer mejoras en su desempeño.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Con estos resultados, el autor, apoyado por el administrador de mantenimiento del equipo y proveedores, pudo hacer el respectivo análisis final, con el cual se pueden emitir las conclusiones y presentar los resultados de este estudio a la administración del hotel.

Al final de trabajo se elaboró este informe con las mediciones y estado actual del equipo, con un análisis de las causas para las cuales se afecta adversamente la operación o el desempeño. Finalmente, se presentaron diferentes propuestas de mejora que se sugieren en el informe final de la auditoría energética.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Estado actual del chiller

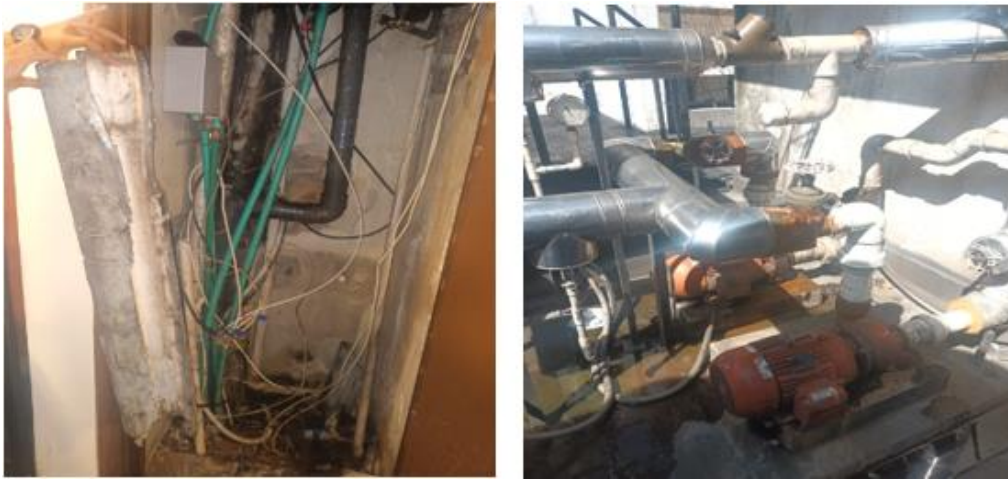
El chiller Trane actualmente presenta anomalías (con posibles fallas) en las bombas de agua principal y reserva (tal como se aprecia en la Figura 14) y escapes de agua en los sellos mecánicos. Se puede apreciar que las tuberías carecen de recubrimiento acústico con poliuretano y enchaquetado de aluminio para las cuales se requiere una tarea de mantenimiento correctiva.



**Figura 14.** Bomba de agua principal (izquierda), bomba de agua reserva (derecha).

Fuente: autor

Las tuberías del sistema presentan diferentes medidas y diámetros en el suministro y retorno del agua al chiller (de 4, 3 y 2 ½ pulgadas). Tiene mucha condensación en tramos ya que las tuberías se han ido deteriorando por la antigüedad del hotel, presentando anomalías en los buitriones del hotel y zonas concurridas como se muestra en la Figura 15. Se requiere la respectiva acción correctiva de mantenimiento.



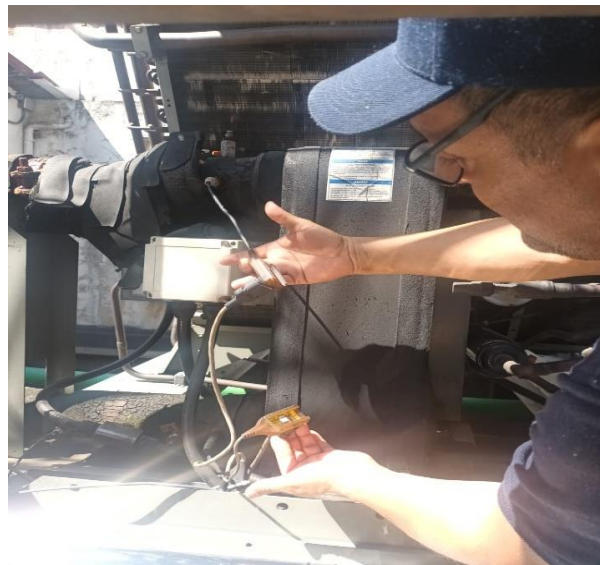
**Figura 15.** Tuberías suministro y retorno del agua - aislamientos.  
Fuente: autor

El compresor del circuito 2 presenta aterrizado en sus bobinas, por lo cual ha venido presentando sobrevoltajes en su operación. En la zona del centro de Medellín donde está ubicado el hotel se presentan picos de voltaje y esto hace que el equipo no trabaje en óptimas condiciones al no tener una protección eléctrica. En la Figura 16 se muestran diferentes mediciones con megómetro.



**Figura 16.** Mediciones con megómetro.  
Fuente: autor

Por otra parte, los sensores de temperatura (Figura 17), tanto de entrada como de salida del evaporador, se descalibran continuamente ya que son electrónicos y debido al movimiento de encendido de las bombas se apagan, lo que genera que el chiller genere alarmas por flujo de agua. Los traductores de presión de agua (mostrados en la Figura 18) generan falsa alarma por el sistema debido a la descalibración, por lo cual se cambian seguidamente y son reconocidos por el software.



**Figura 17.** Sensores entrada y salida de evaporador.  
Fuente: autor



**Figura 18.** Sensores traductores de flujo de agua.  
Fuente: autor

Por ejemplo, el sensor de presión del evaporador se encontraba descalibrado. Debido a esto

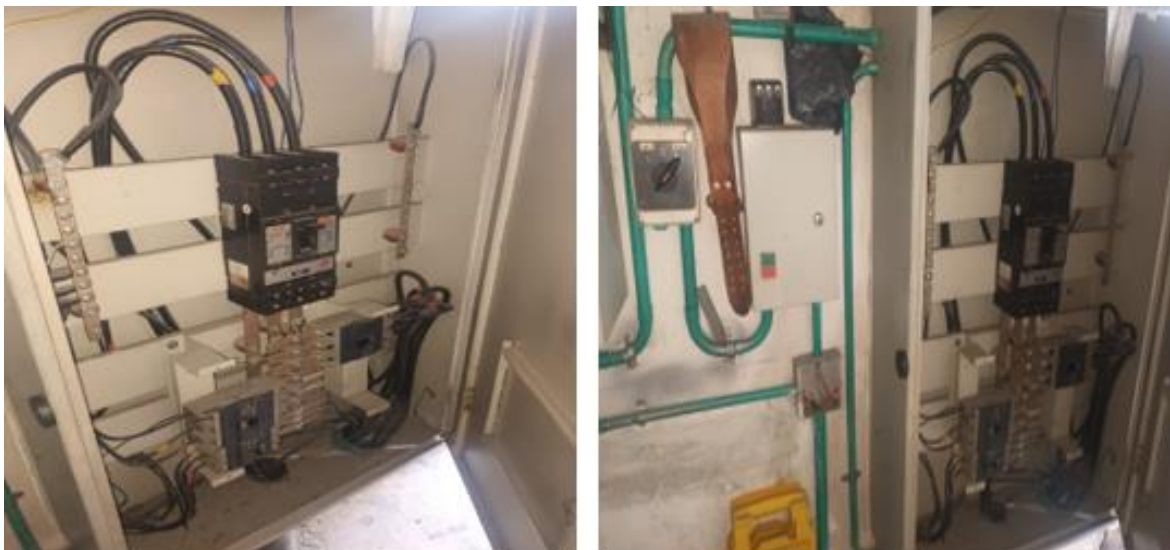
	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

generada datos erróneos en el flujo de agua, mostrando “paso del agua hacia el evaporador” (tal como se aprecia en la Figura 19) causando fallas en el sistema.



**Figura 19.** Error en el display debido al sensor de presión del evaporador descalibrado  
Fuente: autor

La parte de tensión eléctrica en los tableros, tanto de voltaje como de control, se encuentran directos y presentan picos de voltaje, por lo cual se sugiere vigilantes de tensión para el regreso de voltaje e inicien las bombas por medio de los contactores y así encienda el chiller automáticamente. En la Figura 20 y Figura 21 se muestran los tableros de potencia y control, respectivamente. Se sugiere un control con variador automatizado ya que actualmente se encuentran conectados directos a la red.



**Figura 20.** Tablero de potencia.  
Fuente: autor



**Figura 21.** Tablero de control.  
Fuente autor

En la Figura 22 se muestran los fancoil de las habitaciones con capacidad de 9000 BTU. Por la antigüedad presentan desgaste y los motores están inoperantes.



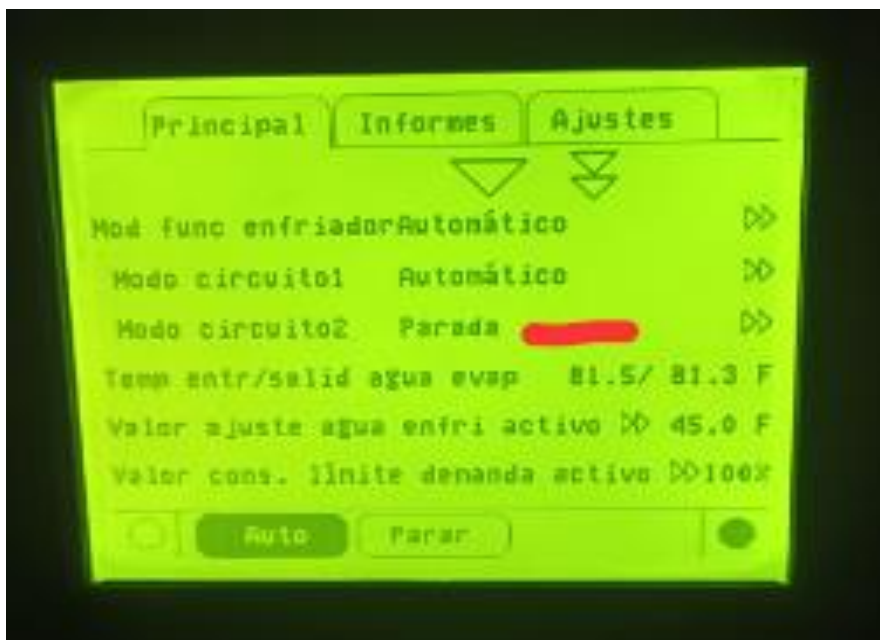
**Figura 22.** Fancoil en habitaciones.  
Fuente: autor

El Display Navigator se encuentra operando mal, ya que es hay dificultad para tomar las lecturas de los datos. No se aprecia bien la falla (Figura 23), por lo que se debe utilizar el software ENVIEW del fabricante desde un computador para acceder al sistema y ver mejor la falla que causó el inconveniente.



**Figura 23.** Estado actual del Display Navigator.  
 Fuente: autor

En la Figura 24 se evidencia que el compresor circuito 2 se encuentra bloqueado, no está operativo. El software muestra también la parada, detallando que el circuito 2 está inhabilitado según el historial de fallas.



**Figura 24.** Circuito 2 no operativo.  
 Fuente: autor

Por otra parte, la válvula de expansión circuito 2 está bloqueada, como se muestra en la

Figura 25, en el display muestra señal de no operativo, dando como resultado bloqueo en ese compresor.



**Figura 25.** Válvula electrónica del circuito 2  
Fuente: autor

Finalmente, el condensador del circuito 2 se encuentra incrustado, tal como muestra en la Figura 26. El serpentín requiere un lavado con químicos para desincrustar las partes entre las aletas y serpentín. Requiere un buen mantenimiento.



**Figura 26.** Serpentín incrustado.  
Fuente autor

## 4.2 Análisis termodinámico del desempeño energético del chiller de enfriamiento

En la Tabla 1 se presentan los resultados de temperaturas y presiones tomados en sitio para el chiller. Este es un formato sencillo que permite registrar y almacenar los datos medidos y recopilados en sitio. Las temperaturas fueron tomadas desde el panel de control del equipo y fueron verificadas externamente con una pistola térmica. La tabla tiene unidades de sistema internacional y unidades inglesas. La razón es que el chiller entrega los datos en sistema inglés, pero para mayor facilidad de comprensión se suministran estos datos también en unidades internacionales.

**Tabla 1.** Mediciones realizadas el 16 de mayo de 2024

	<b>Datos experimentales</b>	<b>Sistema internacional</b>	<b>Sistema inglés</b>
T_1	Temperatura en la succión del compresor	9.8 °C	49.64 °F
T_2	Temperatura de descarga del compresor	61 °C	141.8 °F
P_1	Presión en la succión del compresor	1641 kPa	238 psia
P_2	Presión en la descarga del compresor	3135 kPa	442 psia
T_amb	Temperatura ambiente	28.5°C	83.3°F
T_agua	Temperatura de salida del agua del chiller	5°C	41°F

Fuente: propia

Cabe anotar que los datos se tomaron a las horas pico de la prestación del servicio, como lo son entre las 10 am y las 7 pm de cada día: en este periodo de tiempo, hay mayor ocupación hotelera, debido a las visitas de extranjeros y acompañantes, visitas de personal de logística y apoyo (aseo, vigilancia, lavandería, alimentación) y similares.

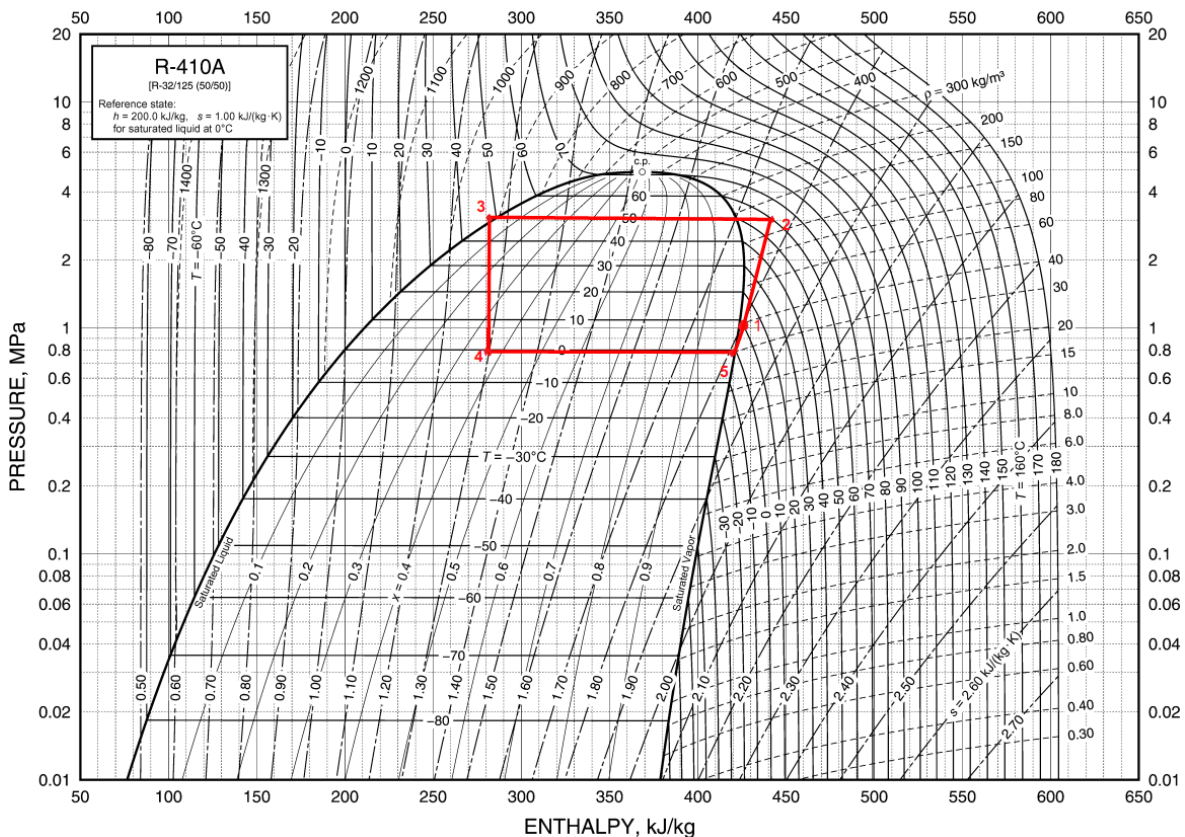
En la tabla 1, adicional a las variables del proceso, se tuvo en cuenta las condiciones ambientales externas, las cuales se necesitan en un análisis posterior. Es importante tener en cuenta las condiciones climáticas y las condiciones de ocupación hotelera en las habitaciones, las cuales son fundamentales para la operación y desempeño del equipo. Por ejemplo, durante la época de diciembre la problemática se vuelve mayor ya que la ocupación puede aumentar en más de un setenta por ciento (70%) del promedio habitual.

La Tabla 2 presenta los resultados de las variables eléctricas medidas mientras el equipo operaba con un solo compresor. A partir de esta información se pudo calcular la potencia eléctrica del compresor, el cual es un dato que se necesita para los cálculos más adelante.

**Tabla 2.** Datos eléctricos medidos el 16 de mayo de 2024

Datos eléctricos		
Corriente de línea	39.45	A
Voltaje	209	V
Factor de potencia	0.85	
Potencia eléctrica de un compresor	12.14	kW
	41443.2	Btu/h

La Figura 27 muestra el diagrama P-h para el proceso de refrigeración que ocurre en el chiller de 52 TR del Hotel Nutibara Medellín. A partir de la información recolectada se pudo identificar 5 puntos clave en el proceso, los cuales se pudieron dibujar en el diagrama. Las propiedades termodinámicas de cada punto se calcularon con el software EES, aunque de este diagrama también se pueden obtener dichas propiedades.



**Figura 27.** Diagrama de presión-entalpía del proceso de refrigeración para el chiller  
Fuente: diagrama adaptado de (Kennedy, 2021).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El ciclo de refrigeración arranca en el punto 1, el cual corresponde a la entrada de refrigerante al compresor tipo Scroll. En este equipo se hace la compresión del refrigerante (proceso de 1 a 2). La descarga del compresor, punto 2, es el punto donde el refrigerante se encuentra a mayor temperatura en todo el sistema.

La salida del compresor se conecta con la entrada del condensador, en el cual ocurre el proceso de cambio de fase de gas a líquido del refrigerante (proceso de 2 a 3). Este proceso se logra gracias a los ventiladores ubicados en la parte superior de los intercambiadores en V, permitiendo retirar el calor del refrigerante. A la salida del condensador, punto 3, ya el fluido se encuentra como líquido saturado.

A continuación, el refrigerante ingresa a la electroválvula de expansión en un proceso isentálpico (proceso de 3 a 4) para posteriormente ingresar al intercambiador como mezcla saturada (líquido vapor) en el punto 4. El proceso que hace la válvula es muy importante ya que permite la expansión del refrigerante (disminuye la presión), al tiempo que disminuye la temperatura de saturación.

El respectivo intercambio de calor ocurre entre el refrigerante a baja temperatura y el agua del circuito de refrigeración en el evaporador (proceso 4 a 5). El refrigerante sale del evaporador y avanza hacia el compresor (punto 1), para comenzar de nuevo el ciclo de refrigeración.

La Figura 28 presenta los cálculos realizados en el software EES con el fin de hallar las entropías y entalpías propias de cada fase del proceso, para posteriormente hacer el balance energético del ciclo de refrigeración del equipo. De estos cálculos hay varias observaciones importantes:

- Para calcular las propiedades termodinámicas en todos los puntos, se ingresa en el software con 2 propiedades independientes entre sí. Por ejemplo, para el punto 1, se conoce temperatura  $T_1$  y presión  $P_1$ , las cuales permiten determinar el resto de las variables de interés (en este caso entalpía y entropía).
- Aunque el compresor real no es isentrópico, se debe calcular la entalpía de salida del compresor  $h_{2s}$  la cual asume que este dispositivo si es ideal. Esto se hace para posteriormente poder calcular la eficiencia isentrópica real del equipo.
- La presión 4 es la presión de saturación del refrigerante a la temperatura 4. Se obtuvo asumiendo una calidad del refrigerante (en este caso 0), aunque realmente

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

el punto 4 no tiene esa calidad. El resultado es el mismo si se utiliza una calidad diferente entre 0 y 1.

```

Equations Window

"CONDICIONES DEL CHILLER HOTEL NUTIBARA MEDELLIN"
"Refrigerante R-410a"

"PUNTO 1: ENTRADA COMPRESOR"
P_1 = 1640,95 [kPa]
T_1 = 9,8 [C]
h_1 = enthalpy(R410A; T = T_1; P = P_1)
s_1 = entropy(R410A; T=T_1; P = P_1)

"PUNTO 2: DESCARGA REAL DEL COMPRESOR"
P_2 = 3135 [kPa]
T_2 = 61 [C]
h_2 = enthalpy(R410A; T = T_2; P = P_2)
s_2 = entropy(R410A; T = T_2; P= P_2)

"PUNTO 2 ISENTRÓPICO: DESCARGA IDEAL DEL COMPRESOR"
s_2s = s_1
h_2s = enthalpy(R410A; T = T_2; s = s_2s)

"PUNTO 3: SALIDA DEL CONDENSADOR"
X_3 = 0
P_3 = P_2
h_3 = enthalpy(R410A; P = P_3; X = X_3)
s_3 = entropy(R410A; P = P_3; X = X_3)
T_3 = temperature(R410A; P=P_3; x=x_3)

"PUNTO 4: ENTRADA DEL EVAPORADOR"
DeltaT_approach = 12,2 [C]
T_agua_salida = 5 [C]
T_4 = T_agua_salida - DeltaT_approach
P_4 = pressure(R410A; X = 0; T = T_4)
h_4 = h_3
s_4 = entropy(R410A; P = P_4; h = h_4)

"PUNTO 5: SALIDA DEL EVAPORADOR"
X_5 = 1
P_5 = P_4
h_5 = enthalpy(R410A; x=X_5; P=P_5)
s_5 = entropy(R410A; x=X_5; P=P_5)
T_5 = temperature(R410A; x=X_5; P=P_5)

```

Figura 28. Programa en EES para la obtención de entalpías y entropías del chiller

Fuente: autor

Cabe anotar que la temperatura 4 del proceso se obtuvo al tener en cuenta primero la temperatura de aproximación o “approach”, la cual es la diferencia entre la temperatura de salida del agua helada del chiller y la temperatura de saturación del refrigerante en el evaporador. La temperatura del agua es un dato conocido, ya que corresponde al set-point del equipo (5°C que corresponden a 41°F), mientras que la temperatura de aproximación la suministra el fabricante por catálogo y es de 10°F (para este caso serían 12.2°C por debajo de la temperatura del set point). Los resultados obtenidos del cálculo del EES se describen en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Resumen de resultados de propiedades termodinámicas

Punto	Entalpía (h) [kJ/kg]	Entropía (s) [kJ/kg.K]	Temperatura (T) (°C)
1	215.1	1.052	9.8
2	441.3	1.759	61
2s	345.5	1.052	61
3	287.7	1.286	50.9
4	287.7	1.331	-7.2
5	419.1	1.825	-7.2

Fuente: propia

A continuación, se plantea el cálculo de la tasa de enfriamiento suministrado al refrigerante y el coeficiente de desempeño (COP) estimado del equipo. También la destrucción exérgica, en especial en cada fase o componente del equipo, y la total. Así mismo, el suministro mínimo de potencia y la eficiencia de segunda ley de termodinámica del ciclo.

Dadas las condiciones presentadas en la tabla anterior, se puede comenzar con la determinación de la eficiencia iséntropica del compresor, la cual es una comparación de la operación del equipo respecto a un caso ideal de entropía constante:

$$\eta_c = \frac{h_{s2} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{345.5 - 215.1}{441.3 - 215.1} = 0.576 \quad (16)$$

La eficiencia en este caso es significativamente inferior a 1. Esto indica que existe una cantidad importante de irreversibilidades (tales como la fricción o la transferencia de calor) que limitan el desempeño del compresor.

El flujo másico del refrigerante se calcula del dato de potencia del compresor, es decir:

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{ent}}{(h_2 - h_1)} = \frac{12.14 \text{ kW}}{(441.3 - 215.1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0.0537 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (17)$$

El calor transferido a la carga,  $\dot{Q}_L$ , se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_5 - h_4) = 0.0537 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (419.1 - 287.7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 7.06 \text{ kW} \quad (18)$$

La tasa de rechazo de calor del condensador al medio ambiente se puede calcular con:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_3) = 0.0537 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (441.3 - 287.7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 8.24 \text{ kW} \quad (19)$$

El coeficiente de desempeño  $COP_R$  del ciclo de refrigeración se calcula como:

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{ent}} = \frac{7.06 \text{ kW}}{12.14 \text{ kW}} = 0.58 \quad (20)$$

El índice de eficiencia energética del chiller es:

$$EER = 3.1412 COP_R = 3.1412 * 0.58 = 1.821 \quad (21)$$

Ambos resultados son muy bajos si se comparan con datos reportados en la literatura. En un estudio realizado en un chiller del hospital San Vicente Fundación, el EER mínimo que reporta el fabricante Carrier es de 10.9 (Alzate, 2018). Esto es una señal de que el equipo del hotel actualmente no se está desempeñando adecuadamente.

La temperatura ambiente en unidades absolutas es:

$$T_H = 28.5 + 273.15 = 301.65 \text{ K} \quad (22)$$

De manera similar, la temperatura de set point del proceso es:

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$T_L = 5 + 273.15 = 278.15 \text{ K} \quad (23)$$

El COP máximo que puede tener un sistema de refrigeración es el de Carnot. Este se calcula a partir de las temperaturas  $T_L$  y  $T_H$  (las temperaturas de la fuente/sumideros térmicos):

$$\text{COP}_{\text{Rrev}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{278.15}{301.65 - 278.15} = 11.84 \quad (24)$$

La eficiencia de segunda ley de la termodinámica se puede calcular al comparar el COP real con el COP máximo posible:

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\text{COP}_R}{\text{COP}_{\text{Rrev}}} = \frac{0.58}{11.84} = 0.049 = 4.9\% \quad (25)$$

En esta definición de eficiencia de la segunda ley para este ciclo de refrigeración toma en cuenta todas las irreversibilidades dentro del Chiller, incluyendo las transferencias de calor con el espacio refrigerado y el ambiente de cada uno de los componentes. De ahí su importancia a un dato real de las condiciones del equipo.

La eficiencia de segunda ley de la termodinámica también se puede obtener de un análisis de la destrucción de exergía en cada proceso del sistema, el cual se presenta a continuación. La exergía es la capacidad o el potencial para realizar trabajo. Esta se puede destruir por irreversibilidades del sistema, tales como fricción, desgaste, compresión/expansión rápida entre otros motivos. Si se cuantifica la destrucción de exergía se puede determinar para cada paso cual genera mayores irreversibilidades y al final se puede determinar la eficiencia de segunda ley.

Como primer paso, se calcula la temperatura de estado muerto ( $T_0$ ) en este caso se supone que es la misma temperatura ambiente:

$$T_0 = T_{\text{amb}} + 273 = 28.5 + 273.15 = 301.64 \text{ K} \quad (26)$$

La destrucción de exergía en el compresor es:

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_{\text{dest},1-2} &= T_0 \dot{m}(s_2 - s_1) \\
 &= 301.64 \text{ K} * 0.0537 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (1.759 - 1.052) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad (27)
 \end{aligned}$$

$$\dot{X}_{\text{dest},1-2} = 11.45 \text{ kW}$$

La destrucción de exergía en el condensador es:

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_{\text{dest},2-3} &= T_0 \left[ \dot{m}(s_3 - s_2) + \left( \frac{\dot{Q}_H}{T_H} \right) \right] \\
 &= 301.64 \text{ K} * \left[ 0.0537 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1.759 - 1.286) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right. \\
 &\quad \left. + \left( \frac{8.24 \text{ kW}}{301.65 \text{ K}} \right) \right] \quad (28)
 \end{aligned}$$

$$\dot{X}_{\text{dest},2-3} = 15.9 \text{ kW}$$

La destrucción de exergía en la válvula electrónica de expansión:

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_{\text{dest},3-4} &= T_0 \dot{m}(s_4 - s_3) \\
 &= 301.64 \text{ K} * 0.0537 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (1.331 - 1.286) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad (29)
 \end{aligned}$$

$$\dot{X}_{\text{dest},3-4} = 0.729 \text{ kW}$$

De manera similar, la destrucción de exergía en el evaporador es:

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_{\text{dest},4-5} &= T_0 \left[ \dot{m}(s_5 - s_4) - \left( \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \right) \right] \\
 &= 301.64 \text{ K} * \left[ 0.0537 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1.052 - 1.331) \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right. \\
 &\quad \left. - \left( \frac{7.06 \text{ kW}}{278.15 \text{ K}} \right) \right] \quad (30)
 \end{aligned}$$

$$\dot{X}_{\text{dest},4-5} = -12.18 \text{ kW}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Se puede ver que, de los 4 procesos analizados, el que más destruye exergía es el compresor, lo cual también es una indicación de que este equipo es la parte del ciclo de refrigeración con más problemas, irreversibilidades e ineficiencias.

El flujo de exergía debido al calor transferido del medio de baja temperatura es equivalente a la potencia que se puede producir por una máquina que recibe calor de un entorno a  $T_0$  y rechaza calor a un medio de baja temperatura a  $T_L$ :

$$\dot{X}_{QL} = \dot{Q}_L \left( \frac{T_0 - T_L}{T_L} \right) = 7.06 \text{ kW} \left( \frac{301.64 \text{ K} - 278.15 \text{ K}}{278.15 \text{ K}} \right) = 0.59 \text{ kW} \quad (31)$$

Por definición de reversibilidad, la anterior cantidad es también es el suministro mínimo de potencia reversible del ciclo, necesaria para retirar el calor del espacio a climatizar y poderlo rechazar al ambiente:

$$\dot{X}_{QL} = \dot{W}_{\text{min-ent}} = 0.59 \text{ kW} \quad (32)$$

La eficiencia de segunda ley del ciclo está dada por:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{X}_{QL}}{\dot{W}_{\text{in}}} = \frac{0.59 \text{ kW}}{12.14 \text{ kW}} = 0.049 = 4.9\% \quad (33)$$

La eficiencia de segunda ley de la termodinámica da similar en la ecuación 33 por análisis de exergía y por la ecuación 25 por análisis de COP. En ambos casos es un valor muy bajo.

Finalmente, se calcula la destrucción total de exergía, la cual se define como la diferencia entre la energía gastada (suministro o entrada de potencia) y la energía recuperada (la energía del calor que se quita desde el medio de baja temperatura):

$$\dot{X}_{\text{dest,total}} = \dot{W}_{\text{in}} - \dot{X}_{QL} = 12.14 \text{ kW} - 0.59 \text{ kW} = 11.55 \text{ kW} \quad (34)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 4.3 Propuestas para mejorar la eficiencia energética del sistema

- Establecer en operación todos los parámetros de funcionamiento de cada uno de los componentes (compresor, parte eléctrica, sensores y traductores de presión para el sistema del flujo de agua).
- Para las bombas de agua principal y reserva se sugiere un sistema automático en operación de acuerdo con los picos de voltaje.
- Efectuar mantenimientos en las fechas establecidas en el cronograma mensual (serpentines, tableros, ventiladores axiales). En general realizar un buen mantenimiento en la parte operativa.
- Corregir las posiciones de los tanques de expansión en la parte alta del edificio, ya que es indispensable en el llenado de agua y así abastecerlo.
- Verificar semanalmente que el chiller mantenga el refrigerante y las presiones en los compresores y manómetros de flujo de agua.
- Mantener las habitaciones del hotel secas, con ventanas cerradas y configurar los termostatos a las temperaturas adecuadas ya que son fundamentales para una buena temperatura.
- Tener buenas prácticas de contratación y realizar revisiones del rendimiento con el fin de aumentar la eficiencia buscando así su buen funcionamiento.
- Verificar el balance energético teniendo en cuenta los parámetros de operación en las condiciones de fábrica.
- El componente del sistema que presenta mayor sensibilidad por la irreversibilidad que aporta al sistema es el compresor, ya que este dispositivo tiene una destrucción de exergía elevada. Debido a que el componente es sellado para manipulación en rutina de mantenimiento, se puede concluir que no hay estrategia de recuperación en este componente del equipo que se pueda aprovechar para el desempeño general del mismo. Se propone evaluar el cambio del compresor por uno de mayor eficiencia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Es importante tener claro como administrador/responsable de la operación del equipo, que al momento de establecer la temperatura de set point del equipo (temperatura a la cual el equipo opera para mantener la edificación a climatizar), se debe tener un criterio claro y fundamentado en estándares de operación certificados, ya que si se asigna una temperatura de operación errónea o excesiva puede llevar a incremento en el consumo eléctrico del compresor y demás componentes que demanden trabajo eléctrico en el equipo.
- Como renovación final, el auditor propone a la organización (de gran tamaño por el número de equipos y sistemas), establecer las auditorías energéticas, como una parte esencial en su gestión de mantenimiento. En los tiempos modernos es importante aportar en la reducción de emisiones y el consumo de energía a nivel mundial.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Al realizar la auditoria energética al chiller de 52 TR del Hotel Nutibara Medellín, aplicando herramientas de análisis teóricas, instrumentos básicos de medición electromecánicos y los mismos dispositivos periféricos que trae consigo el equipo, se pudo determinar el desempeño energético y exergético de sus componentes principales. Esto permitió una visión de aquellos componentes más críticos, con la idea de poder intensificar rutinas y buenas prácticas de mantenimiento en la gestión de su propietario/administrador.

Al inicio de la propuesta del presente estudio, se planteó la auditoria, debido a una percepción superficial por parte del administrador del equipo, del estado actual y funcionamiento del equipo. El Chiller cuenta con dos circuitos de refrigeración (circuito 1 y circuito 2), de los cuales, solo está en operación el 1. El 2, se encuentra fuera de servicio, debido a una falla de operación en el compresor. Con esta novedad, se tenía ya una premisa para describir que probablemente el equipo no estaba operando eficientemente, sumado a la identificación de malas prácticas en su mantenimiento, presiones y mediciones eléctricas, por la falta de experiencia e información del contratista responsable de su mantenimiento. No obstante, que el circuito 1 es el único en operación, la medición de su eficiencia arroja que el equipo se encuentra operando con una eficiencia isentrópicas y de segunda ley muy bajas. Este compresor todavía dentro del umbral de vida útil; se podría estimar una vida útil de los componentes de cuatro años más.

Al ser la primera vez que una auditoria energética se realiza a un equipo o sistema del Hotel Nutibara Medellín, marca la pauta para posibles y futuras auditorias que se pueden plantear para la medición del estado de eficiencia energética de los diferentes equipos que allí operan. El responsable de mantenimiento, posterior a este estudio, puede escalar el informe a la administración del hotel.

Se concluye que es útil implementar formatos para el registro de los datos en sitio, ya que facilita las labores del auditor. Esta práctica se puede establecer como parte de la rutina de mantenimiento por parte del personal operativo y para contar en un futuro con registros históricos para la proyección del desempeño del equipo y retrospectivamente como ha sido el mismo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El balance de energía y exergía del sistema permitió calcular las irreversibilidades de cada proceso, lo que puede ayudar a identificar dónde se debe intensificar en mejor manera las rutinas de mantenimiento preventivo de dichos componentes (frecuencia, repuestos, estudios previos, etc.), para lograr un mejor desempeño.

Del análisis de balance energético del proceso, se pudo identificar que el componente más crítico del equipo es el compresor. Un ejemplo de operaciones clave de mantenimiento para este componente, sería establecer la frecuencia de inspección de este, por ejemplo, cada mes (actualmente no se tiene a ciencia cierta claridad con qué frecuencia se realiza esta actividad). Esta actividad de inspección consiste en verificar el estado de las borneras, la limpieza de estos utilizando equipo adecuado y agente químico especial para desincrustar el condensador (verificando que este agente no afecte químicamente la estructura superficial de los mismos) y cepillos de alambre especiales para lograr un correcto “peine” de los microtubos de cobre. También es importante revisar con la misma frecuencia el estado de los ventiladores del condensador, pues son los que crean el flujo forzado para extracción del calor en el interior del condensador. De esta manera se garantiza una adecuada transferencia de calor entre el Refrigerante R410a y el medio ambiente, permitiendo que el refrigerante entre con menos temperatura en la etapa de la válvula de expansión (proceso isotérmico) y en el intercambiador de calor para lograr la temperatura de set point del agua en menor tiempo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## REFERENCIAS

---

- Alzate, S. (2018). *Auditoría energética a chiller de 80 TR hospital universitario San Vicente Fundación*. Medellín: ITM.
- Armas, J. C., Lapidó, M. J., & Castellán, J. A. (2006). Análisis exergetico de un sistema de climatización centralizado por agua helada. *Energéticas*, 35-40.
- Bolívar Hernández, L. P., & Martínez Gómez, M. A. (2014). *Estudio de eficiencia energética de equipos y sistemas de aire acondicionado en la edificación del bloque G de la Universidad Autónoma del Caribe*. Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe. Obtenido de <http://repositorio.uac.edu.co/bitstream/handle/123456789/803/TMEC%201136.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Building and construction authority. (2023). *Code on periodic energy audit of building cooling systems*. Singapur: BCA. Obtenido de [https://www1.bca.gov.sg/docs/default-source/docs-corp-buildsg/sustainability/periodic-energy-audits-code\\_edition-4-0s.pdf](https://www1.bca.gov.sg/docs/default-source/docs-corp-buildsg/sustainability/periodic-energy-audits-code_edition-4-0s.pdf)
- Caraballo, J. (30 de 04 de 2024). *La metamorfosis del Hotel Nutibara*. Obtenido de <https://www.centrodedemellin.co/ArticulosView.aspx?id=57&type=A&idArt=59>
- Castaño Guzman, Á. (27 de Mayo de 2023). Paul R. Williams, el arquitecto afro del Hotel Nutibara. *El Colombiano*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/cultura/paul-r-williams-el-arquitecto-afro-del-hotel-nutibara-MF21539162>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica* (8va ed.). Mexico: McGraw Hill.
- Guerra Gómez, E. R., & Corrales Alvarez, V. H. (2011). *Evaluación y propuesta de ahorros de energía y agua en los sistemas de aire acondicionado instalados en el edificio PS campus Lemaitre*. Cartagena: Universidad Tecnológica de Bolívar. Obtenido de <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0062702.pdf>
- Kennedy, H. (2021). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Norcross: ASHRAE.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

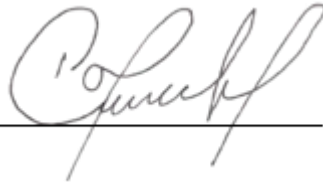
Kumik, C. W., & Tiessen, A. (2017). *Chapter 14: Chiller Evaluation Protocol. The Uniform Methods Project: Methods for Determining Energy Efficiency Savings for Specific Measures*. Golden: U.S Department of energy.

Pérez Sobrino, Á. (2022). *Estudio energético de un establecimiento hotelero con balneario y propuesta de mejoras energéticas*. Cantabria: Universidad de Cantabria. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/25417/APS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Solano Perez, J. D. (2015). *Análisis comparativo de eficiencia energética de un sistema de expansión directa vs un sistema de agua helada con primario variable en una instalación educativa en la ciudad de Barranquilla-Colombia*. Barranquilla: Universidad del Norte. Obtenido de <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9024/124236.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTE



---

FIRMA ASESOR



---

---

Informe final de trabajo de grado  
aprobado

FECHA ENTREGA: 2024-06-12 6:00 pm