



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**POSGRADO DE INGENIERÍA**

**AHORRO Y GESTIÓN DE ENERGÍA EN CUARTOS FRÍOS DE LA TIENDA UNAM**

**TESINA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**ESPECIALISTA EN AHORRO Y USO EFICIENTE  
DE LA ENERGÍA**

**P R E S E N T A:**

**Ing. G. Iván Martínez Zarco**

**DIRECTOR DE TRABAJO:**

**Dr. Rodolfo Herrera Toledo**

**MÉXICO, D. F.**

**2015**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

**INTRODUCCIÓN..... 2**

    Objetivo general ..... 2

    Objetivos particulares ..... 2

    Justificación ..... 2

**CAPÍTULO 1: CONCEPTOS GENERALES..... 3**

    1.1) Eficiencia energética ..... 3

    1.2) Gestión energética..... 3

    1.3) Diagnostico energético ..... 4

    1.4) Ciclo de refrigeración..... 4

**CAPÍTULO 2: METROLOGÍA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE LA TIENDA DEPARTAMENTAL UNAM ..... 5**

    2.1) Descripción general del sistema de refrigeración de la tienda departamental UNAM. .... 6

    2.2) Protocolo de monitoreo de sistema de refrigeración de la tienda departamental UNAM ..... 7

    2.3) Resultados ..... 8

    2.4) Inspección general de los sistemas de refrigeración..... 10

**CAPITULO 3: ANÁLISIS DE PRIMERA LEY DE CICLO DE REFRIGERACIÓN .....12**

    3.1) Determinación de estados energéticos en los diferentes puntos de ciclos termodinámicos pertenecientes a los sistemas de refrigeración de la tienda departamental UNAM..... 13

    3.2) Balance energético de los ciclos correspondientes a sistemas de refrigeración de la tienda departamental UNAM ..... 13

    3.3) Coeficiente de refrigeración COP..... 15

**CAPÍTULO 4: REDISEÑO DE CUARTOS FRÍOS .....16**

    4.1) Calculo de carga térmica a disipar ..... 16

    4.2) Carga térmica por conducción ..... 16

    4.3) Carga térmica del producto ..... 18

    4.4) Carga térmica interna ..... 19

    4.6) Carga térmica total ..... 22

    4.7) Selección de equipo de refrigeración comercial ..... 22

    4.8) Ahorros energéticos y económicos..... 23

    4.9) Viabilidad económica del proyecto..... 23

**CONCLUSIONES .....24**

**BIBLIOGRAFÍA.....25**

## **INTRODUCCIÓN**

Un sistema de refrigeración tiene como fin el establecer flujo de calor de un sistema A a un sistema B aun cuando el sistema A presente una temperatura menor a la del sistema B, esto mediante un ciclo termodinámico conocido como ciclo de refrigeración compuesto por diferentes elementos con funciones específicas, el empleo de dichos ciclos responde a la necesidad de mantener temperaturas menores a la temperatura ambiente en un espacio determinado y para llevarlo a cabo se requiere de cierta inversión de energía, en general es deseable que la inversión energética requerida por un ciclo de refrigeración para mantenerse en operación sea mínima en relación a los beneficios proporcionados ya que en varios sectores de la industria como el médico, alimenticio y químico se invierte una importante cantidad de recursos en refrigeración. Mediante la aplicación de estudios de campo y análisis termodinámicos es posible modelar un sistema de refrigeración que se encuentre en operación y con ello localizar pérdidas de energía que son suprimibles, resultando en la reducción de costos energéticos y monetarios relacionados a la operación de un ciclo de refrigeración.

El presente proyecto plantea el estudio del sistema de refrigeración de la tienda departamental UNAM enfocado a un cuarto frío que opera mediante un ciclo de refrigeración que utiliza refrigerante R-22 como fluido de trabajo, esto con el fin de ubicar pérdidas de energía suprimibles equivalentes a oportunidades de ahorro, plantear propuestas correctivas al respecto y finalmente reducir el costo operativo del ciclo en cuestión.

### **Objetivo general**

-Plantear propuestas de reducción en el consumo energético y costos operativos de 1 cuarto frío perteneciente a la tienda UNAM sin afectar su capacidad operativa.

### **Objetivos particulares**

- Obtener eficiencias de primera y segunda ley de termodinámica para el ciclo de refrigeración y sus componentes.
- Identificar oportunidades de ahorro energético en ciclo de refrigeración de cuarto frío de la tienda UNAM
- Calcular las irreversibilidades o destrucción de exergía para ciclo de refrigeración y sus componentes
- Elaborar propuestas de ahorro para ciclo de refrigeración y sus componentes
- Elaborar una teoría de costos para propuestas de ahorro en ciclo de refrigeración y sus componentes
- Elaborar un esquema de gestión energética para ciclos de refrigeración

### **Justificación**

- Los costos de refrigeración se han incrementado por concepto de aumento en la temperatura ambiente producto del calentamiento global y el aumento del costo de la energía en todas sus formas.
- La energía gastada es función de la carga térmica del congelador la cual varía con función a diferentes parámetros.
- Los cuartos fríos son esenciales a las actividades comerciales llevadas a cabo en la tienda departamental UNAM.

## CAPÍTULO 1: CONCEPTOS GENERALES

### 1.1) Eficiencia energética

La eficiencia energética es un parámetro del aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles para un determinado proceso y se define como la relación entre el producto obtenido de dicho proceso y la energía invertida en él, mostrando valores acotados entre cero y uno, en todo proceso se busca maximizar la eficiencia ya que esto implica que el desperdicio de recursos será mínimo.

Mejorar la eficiencia deriva en una serie de beneficios tales como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la estabilidad del suministro de energía y garantizar su continuidad, reduce los costos operativos del comercio y la industria y por ende maximiza la rentabilidad económica de los mismos.

### 1.2) Gestión energética

La gestión energética se refiere al conjunto de acciones que permiten maximizar la eficiencia energética de un determinado proceso, estas acciones consideran diferentes etapas y pueden estar referidas a diferentes aspectos del proceso en cuestión, las etapas de un proceso de gestión energética se enumeran a continuación:

1) *Análisis del proceso*: Se refiere al estudio de un determinado proceso y los aspectos involucrados en su funcionamiento, dicho estudio considera la recopilación de datos operativos, mediciones y monitoreo de parámetros de interés para su posterior interpretación sustentada en métodos de base científica, de aquí surge información importante como índices energéticos que son referencias de consumo energético en función a conceptos tales como: personas, unidades de producción o tiempo.

2) *Identificación de oportunidades de mejora*: Se refiere a la ubicación de puntos de interés una vez que se ha analizado el proceso, estos puntos de interés se encuentran referidos a aspectos del proceso que representen desperdicio de energía y que dadas sus condiciones sean sujetos de modificación y por ende de mejora.

3) *Elaboración de propuestas*: Se refiere a la presentación de soluciones enfocadas a reducir el desperdicio excesivo de energía en los aspectos del proceso identificados como oportunidades de mejora.

4) *Análisis económico de propuestas*: En esta etapa se evalúa la rentabilidad económica y energética de las soluciones presentadas considerando la inversión necesaria, la relación beneficio costo, el tiempo de recuperación y la subsecuente reducción en el consumo energético.

5) *Implementación de propuestas*: En esta etapa se llevarán a cabo las propuestas presentadas a manera de soluciones al desperdicio energético, en este punto surgirán aspectos que probablemente no fueron considerados en un esquema teórico por lo que habrá que adaptarse a ellos de la forma más eficaz posible.

6) *Evaluación de impacto de propuestas*: En esta etapa se realiza un análisis similar al del punto 1 obteniendo nuevos índices energéticos que al ser cotejados con los obtenidos inicialmente mostrarán el impacto real de las propuestas presentadas e implementadas con anterioridad.

7) *Retroalimentación*: Si los resultados obtenidos no son equivalentes a los proyectados se buscará la razón del por qué y en su caso se aplicarán medidas correctivas, por otra parte si existen oportunidades de mejora en el nuevo sistema también se analizará la posibilidad de su introducción, en esta etapa también se vigilará que el ahorro energético siga siendo tomado en cuenta y por lo tanto es considerada una etapa de carácter permanente.

### 1.3) Diagnostico energético

El diagnostico energético equivale a las 4 primeras etapas de un proceso de gestión energética, en el solo se elabora el esquema teórico de un proyecto enfocado al aumento de eficiencia energética en un sistema, además en este se estructuran las bases de la implementación, en el presente proyecto se realiza un trabajo equivalente a diagnostico energético.

### 1.4) Ciclo de refrigeración

Un ciclo de refrigeración tiene como objetivo el hacer fluir calor de un sistema de menor temperatura hacia un sistema de mayor temperatura lo cual como es sabido no sucede en un proceso natural por lo que requiere de cierta cantidad de trabajo para poder llevarse a cabo, este trabajo es suministrado a un ciclo termodinámico mediante un compresor que reduce el volumen y aumenta la presión de un fluido de trabajo especializado llamado refrigerante el cual posteriormente es pasado a fase liquida en un condensador para salir a una válvula de expansión y aumentar de volumen reduciendo su presión y temperatura hasta alcanzar niveles negativos en la escala Celcius, a continuación el fluido de trabajo a baja presión es introducido a un evaporador que se encuentra en contacto con cierto espacio que se pretende refrigerar extrae calor del mismo por diferencia de temperaturas y va de vuelta al compresor para cerrar el ciclo [1].

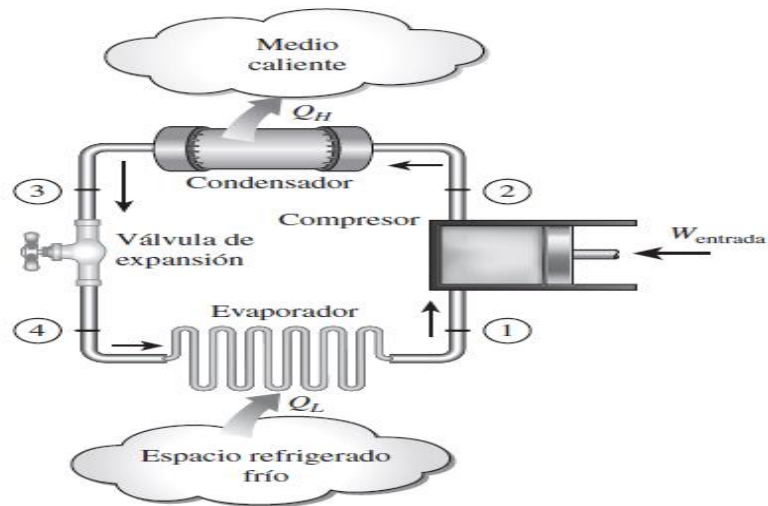


Fig. 1: Ciclo de refrigeración [1]

## **CAPÍTULO 2: METROLOGÍA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE LA TIENDA DEPARTAMENTAL UNAM**

### **Introducción**

La metrología es la ciencia que se encarga de estudiar y definir métodos de medición y monitoreo de parámetros de interés en un determinado sistema, considerando el uso de los instrumentos necesarios y metodologías estadísticas para ordenamiento de datos. Para fines del presente proyecto la metrología nos permitirá definir, medir y ordenar correctamente los datos necesarios para llevar a cabo el análisis energético del ciclo termodinámico perteneciente al cuarto frío de la tienda UNAM y así identificar oportunidades de ahorro energético además de realizar propuestas al respecto y proyectar el impacto de las mismas.

En este capítulo se describirán los sistemas de refrigeración de la tienda UNAM desde una perspectiva general, haciendo observaciones puntuales y pertinentes referentes a su desempeño energético, también se mencionará cuáles de sus parámetros fueron monitoreados, con qué equipo y con qué frecuencia.

### **2.1) Descripción general del sistema de refrigeración de la tienda departamental UNAM.**

Para el presente estudio se consideró el ciclo de refrigeración perteneciente a un cuarto frío de salchichonería perteneciente a la tienda departamental UNAM que opera mediante un ciclo de refrigeración convencional que cuenta con un compresor protegido por interruptor eléctrico trifásico, un evaporador dentro del cuarto frío y un condensador y válvula de expansión, los componentes del ciclo de refrigeración se encuentran en el ático del inmueble a una distancia de 8.5 metros del evaporador y del cuarto frío.



Fig. 2: Unidad compresora y condensadora analizada



Fig. 3: Unidad evaporadora analizada





Fig. 4: Trayectoria de tuberías de unidad analizada

## 2.2) Protocolo de monitoreo de sistema de refrigeración de la tienda departamental UNAM

Con el objeto de obtener parámetros de utilidad al análisis energético, los principales componentes del ciclo de refrigeración fueron monitoreados de forma independiente durante intervalos de tiempo distribuidos en un periodo de análisis de una semana como se describe a continuación.

### *Compresores*

El compresor fue monitoreado durante un periodo de 3 días con un analizador de redes instalado directamente en el interruptor correspondiente, obteniendo parámetros de consumo tales como, voltaje, corriente, consumo, factor de potencia y potencia máxima.

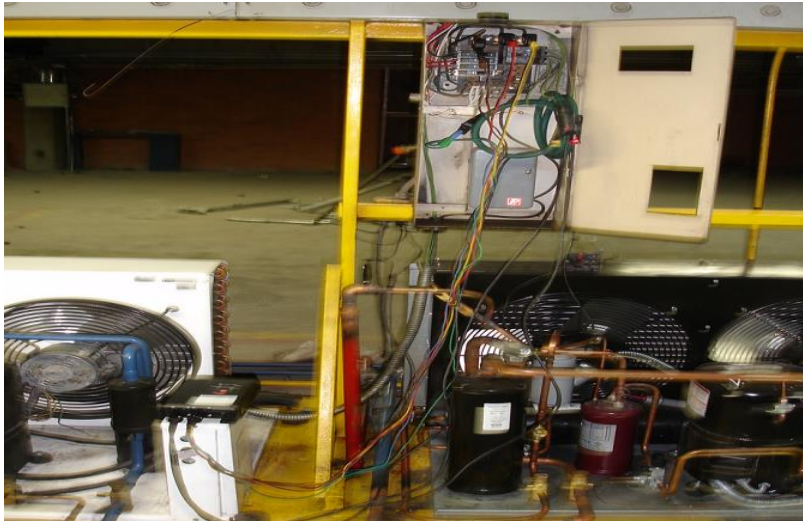


Fig. 4: Instalacion de analizador de redes en interruptor trifasico de compresor

### *Tuberías*

Con ayuda de un termómetro óptico se realizaron múltiples medidas de la temperatura del refrigerante a lo largo de cada tubería en puntos separados entre sí por una distancia aproximada de 30cm, las temperaturas en los extremos de las tuberías permiten definir la temperatura de entrada y salida de refrigerante a los diferentes componentes del ciclo.

### *Válvulas de expansión*

Las presiones de entrada y salida de las válvulas de expansión fueron monitoreadas con ayuda de un manómetro análogo, con ello es posible definir las 2 presiones involucradas en el ciclo, alta presión a la entrada de la válvula y baja presión a la salida de la válvula.

### *Condensador*

Las temperaturas a la entrada y a la salida del condensador se encuentran definidas por las temperaturas monitoreadas en los extremos de las tuberías que conectan este dispositivo al resto del ciclo de refrigeración las cuales ya fueron monitoreadas con anterioridad.

### *Evaporador*

Las temperaturas y humedades de los cuartos fríos en los que operan los evaporadores fueron medidas con ayuda de un termómetro eléctrico digital, esta información es de importancia ya que define la temperatura real a la cual se mantiene el cuarto frío con el ciclo de refrigeración operando.

### *Adicionales*

Como complemento a la metrología llevada a cabo en los cuartos fríos se midieron parámetros como volumen de cuarto frío, dimensiones de los accesos al mismo y temperatura ambiente fuera del cuarto frío.

## **2.3) Resultados**

Como resultados del monitoreo llevado a cabo se obtuvo una colección de temperaturas y presiones en las tuberías del ciclo de refrigeración correspondientes al cuarto frío de salchichonería presentadas en las siguientes tablas, en ellas se presenta la temperatura de la tubería en un determinado tramo de su longitud designado por la letra L y un número, como se mencionó anteriormente las temperaturas de los extremos de cada tubería nos permitirán conocer las temperaturas de entrada y salida de fluido de trabajo en cada componente del ciclo termodinámico.

*Temperaturas y presiones*

Monitoreo de ciclo de refrigeración de cuarto de salchichería

Tabla 1: Temperaturas en tuberías de ciclo de refrigeración

Longitud	T1 C	T2 C	T3 C	P kPa
L1	57.6	30.9	-7	27.57
L2	49.3	32.2	32.6	206.84
L3	31.6	32	32.1	
L4	39.3	30	31.1	
L5	39.8	34.5	18	
L6	37.2	35.5		

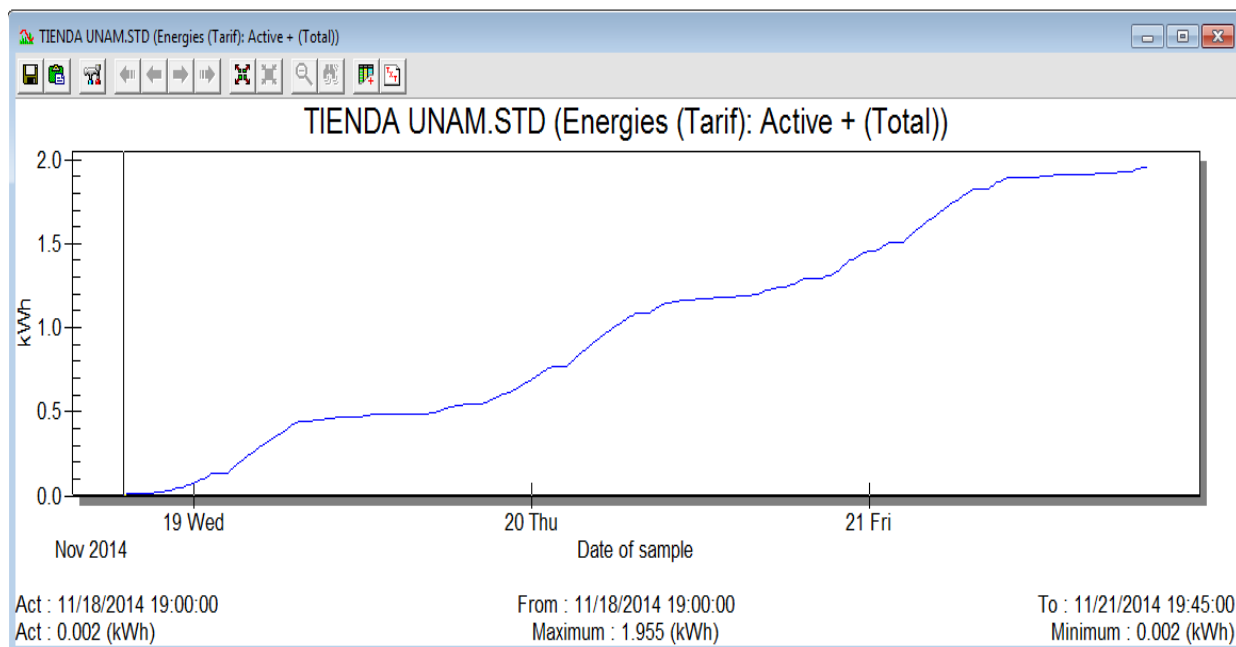
*Parámetros eléctricos*

Los datos monitoreados por el analizador de redes instalado a pie de compresor nos permitirán definir el consumo real de energía eléctrica en un periodo determinado de tiempo, así como la potencia promedio a la que opera el compresor y presentarlo en las tablas siguientes:

Tabla 2: Parámetros de consumo eléctrico

Parámetro	
Consumo	1.955 kWh
Horas	1.1 h
Promedio	1.77 kW

Tabla 2: Parámetros de consumo eléctrico



Grafica 1: Consumo de energía en compresor en periodo de 3 días

Se observa que el ciclo de refrigeración del cuarto frío de salchichonería consumió 1.955 kWh en un periodo de 1.1 horas efectivas de funcionamiento distribuidas a lo largo de un periodo de 3 días que comprenden del 18 al 21 de noviembre.

### Índices energéticos

Tabla 3: Índices energéticos

Índice	Magnitud	Unidad
<b>Energía sobre área</b>	<b>.13</b>	<b>kW/m<sup>2</sup></b>
<b>Energía sobre masa almacenada</b>	<b>.0022</b>	<b>kW/kg</b>

### 2.4) Inspección general de los sistemas de refrigeración

Adicional al monitoreo se realizó una inspección general del sistema de refrigeración en busca de irregularidades evidentes que implican la reducción de eficiencia energética, de dicha revisión derivan las siguientes observaciones.

-Las temperaturas en cuartos fríos son adecuadas a los productos almacenados en ellas por lo cual los cuartos son considerados eficaces.

-El refrigerante utilizado por los ciclos de refrigeración es R-22 el cual es considerado obsoleto en función a su composición que demanda altas relaciones de compresión, resultando en un alto consumo eléctrico que pudiese evitarse con el uso de un refrigerante de comercialización más reciente como R-404.

-Las tuberías que conectan el evaporador con el compresor no se encuentran aisladas por lo que el refrigerante adsorbe calor en su recorrido, ocasionando que el compresor demande potencia adicional al comprimir una sustancia caliente derivando en consumo innecesario de energía.

-Los ventiladores de los condensadores soplan calor adicional a la tubería que conecta al evaporador con el compresor, calentando el refrigerante que llega al compresor resultando en una mayor demanda de potencia eléctrica y un consumo innecesario de energía.

### **CAPITULO 3: ANÁLISIS DE PRIMERA LEY DE CICLO DE REFRIGERACIÓN**

#### **Introducción**

El análisis de primera ley de la termodinámica es un análisis con el cual se busca definir la energía contenida en el fluido de trabajo en cada uno de los puntos del ciclo de refrigeración y con ello determinar la eficiencia global del ciclo además de calcular la cantidad de energía intercambiada en cada uno de sus componentes, la cantidad de energía intercambiada en los diferentes componentes del ciclo se encontrará definida mediante la diferencia entre estados energéticos a la entrada y salida de cada uno, a su vez dichos estados se encuentran definidos por parámetros termodinámicos presentes en un mismo punto de interés tales como la presión, la temperatura o la calidad del fluido de trabajo, de tal manera que con una cantidad definida de puntos de interés es posible realizar una descripción del sistema a modo de balance de flujo energético lo cual permite definir en un esquema global la cantidad de energía que es aprovechada por el sistema así como las pérdidas que se presentan. Mediante dicho análisis es posible obtener una eficiencia preliminar del ciclo como eficiencia de primera ley de la termodinámica además de propiedades necesarias para un posible análisis exergetico [1,2].

En este capítulo definiremos los estados termodinámicos del refrigerante R-22 en cada uno de los puntos de interés del ciclo de refrigeración de cuartos fríos de la tienda UNAM para finalmente obtener la eficiencia de primera ley correspondiente y cuantificar la energía intercambiada en cada uno de los componentes del mencionado ciclo.

### 3.1) Determinación de estados energéticos en los diferentes puntos de ciclos termodinámicos pertenecientes a los sistemas de refrigeración de la tienda departamental UNAM

Para definir el estado termodinámico de un fluido de trabajo es necesario contar con al menos dos de sus propiedades [2], en nuestro caso dichas propiedades están definidas por la temperatura y la presión medidas en cada punto del ciclo como se explicó en el capítulo anterior, el objetivo de definir el estado termodinámico refrigerante R-22 es obtener la entalpía y/o entropía por medio de tablas de propiedades termodinámicas correspondientes al refrigerante R-22 [4].

### 3.2) Balance energético de los ciclos correspondientes a sistemas de refrigeración de la tienda departamental UNAM

Ya definidos los estados termodinámicos del fluido de trabajo en cada punto del ciclo de refrigeración es necesario determinar el flujo másico de refrigerante R-22, el cual será idéntico y constante para cada punto del ciclo ya que no se cuenta con recirculaciones o recuperaciones que lo dividan en alguna sección de su trayectoria, el realizar una medición directa de flujo másico es impráctico ya que los instrumentos necesarios son invasivos y afectarían la productividad de los cuartos fríos por ende el flujo será calculado mediante el cociente de la energía suministrada por el compresor que fue medida mediante el analizador de redes entre la diferencia de entalpías conocidas a la entrada y salida del mismo, a continuación se presenta el ciclo termodinámico tal y como fue esquematizado para su análisis con los puntos de interés designados por números [1,2,4].

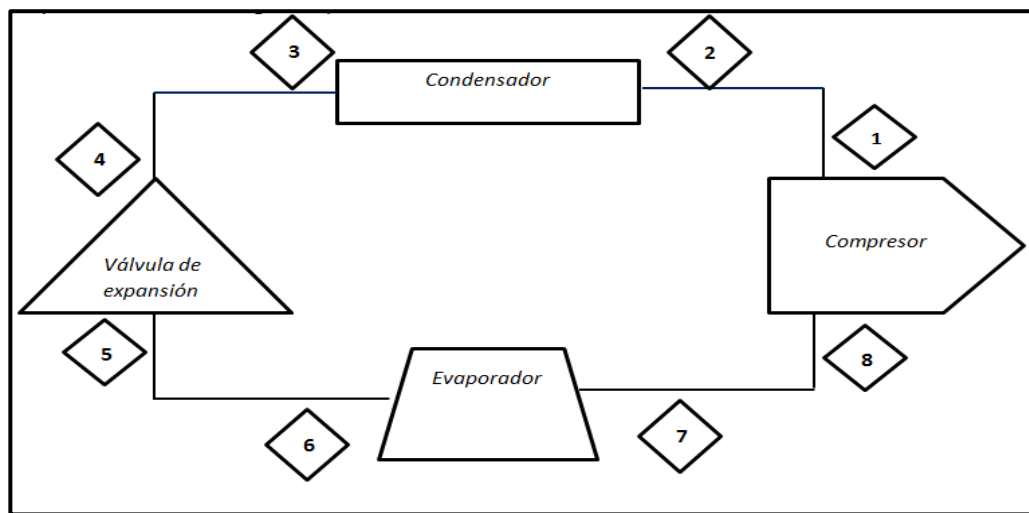


Fig. 5: Esquematización de ciclo de refrigeración para balance de energía

*Ecuaciones de balance energético*

Flujo másico

$$\dot{m} = W_{comp}/h1 - h8$$

Energía disipada en evaporador

$$E_{evp} = (h7 - h8) * \dot{m}$$

Energía disipada en condensador

$$E_{cond} = (h2 - h3) * \dot{m}$$

Calor perdido de 3-4

$$Cl_a = (h4 - h3) * \dot{m}$$

Calor ganado de 7-8

$$Cl_b = (h8 - h7) * \dot{m}$$

Calor perdido de 1-2

$$Cl_c = (h8 - h7) * \dot{m}$$

Tabla 4: Propiedades termodinámicas en puntos de ciclo de refrigeración

	<b>P</b>	<b>T</b>	<b>x</b>	<b>h</b>	<b>s</b>	<b>m</b>
	<b>kPa</b>	<b>C</b>	<b>%</b>	<b>kJ/kg</b>	<b>kJ/kg K</b>	<b>kg/s</b>
<b>1</b>	1220	57.6		321	0.96	0.00819444
<b>2</b>	1220	37.2		315	0.96	0.00819444
<b>2s</b>					0.96	0.00819444
<b>3</b>	1220	35.5	0	240	0.882	0.00819444
<b>4</b>	1220	30.9	0	285	0.887	0.00819444
<b>5</b>	599	-7		285	0.947	0.00819444
<b>6</b>	599	-7		285	0.947	0.00819444
<b>7</b>	599	18	1	62	0.202	0.00819444
<b>8</b>	812	16	1	105	0.906	0.00819444



Tabla 5: Balance de energía

Balance de energía		
Energía promedio medida en compresor	1.77	kW
Flujo másico	0.00819444	kg/s
Energía disipada en evaporador	1.82736111	kW
Energía disipada en condensador	0.61458333	kW
Calor perdido de 3-4	0.36875	kW
Calor ganado de 7-8	0.35236111	kW
Calor perdido de 1-2	0.04916667	kW
Energía calculada en compresor 8-1	1.77	kW

### 3.3) Coeficiente de refrigeración COP

El coeficiente de rendimiento de un ciclo de refrigeración es una magnitud relacionada a la eficiencia energética del ciclo y se define como el cociente de la energía suministrada al compresor entre la energía disipada del espacio a refrigerar de la siguiente manera, en este caso se buscara que el COP tenga la mayor magnitud posible ya que esto es indicativo de una alta eficiencia energética [1,4].

$$COP = Q_{dis}/W$$

$$COP = 1.03$$

El coeficiente de rendimiento del ciclo de refrigeración analizado es de 1.03, en sistemas de refrigeración es deseable contar con un mayor COP, por lo que se buscaran alternativas para poder contar con un ciclo de refrigeración que presente mejores parámetros de aprovechamiento de energía.

### 3.4) Propuestas de mejora de rendimiento energético.

Dadas las condiciones observadas en la inspección general del sistema de refrigeración así como los cálculos realizados se concluye que la alternativa más viable es sustituir el ciclo de refrigeración en su totalidad, haciendo énfasis en el correcto dimensionamiento del nuevo ciclo y la introducción de tecnologías actuales que proporcionen mayor eficiencia energética.

## CAPÍTULO 4: REDISEÑO DE CUARTOS FRÍOS

### Introducción

Con el objeto de diseñar un sistema de refrigeración eficiente, es decir que cumpla su función satisfactoriamente con el mínimo posible de recursos energéticos, es necesario aplicar una metodología de diseño basada en el cálculo de la carga térmica a disipar y una selección correcta de equipo para dicho cometido, para ello es necesario aplicar distintos modelos de cálculo proporcionados por la termodinámica y la transferencia de calor [3,6,7,10].

En este capítulo se rediseñará el cuarto frío de la tienda UNAM, el rediseño en cuestión se dividirá en dos partes, en primera instancia se calculará el total de la carga térmica considerada para el cuarto de interés, posteriormente se diseñará y/o seleccionará un sistema de refrigeración capaz de disipar dicha carga de la manera más eficiente posible mediante el uso de dispositivos comercialmente disponibles y se presentará un análisis económico del proyecto.

#### 4.1) Cálculo de carga térmica a disipar

La carga térmica a disipar equivale a la energía calorífica que debe ser extraída del cuarto frío para que este y el producto puedan alcanzar la temperatura deseada, la energía calorífica se compone de distintas cargas térmicas producto de diversos factores, estas cargas son: carga térmica por conducción, carga térmica del producto, carga térmica interna y carga térmica por filtración de aire, a continuación se mencionará a que se refiere cada una de ellas además de cómo fue posible calcularlas de forma individual [2,8,10].

#### 4.2) Carga térmica por conducción

Se refiere al flujo de calor a través de las paredes del cuarto frío establecido en función a la diferencia de temperatura entre el interior del cuarto frío y las áreas que lo rodean. La carga térmica por conducción será también función del material que compone las paredes del cuarto frío, el espesor del mismo y su área, derivando en un coeficiente global de transferencia de calor, en caso de que el cuarto frío se encuentre en contacto directo con el exterior la carga térmica por conducción será también función de su orientación con respecto al sol, la ubicación geográfica y la época del año [2,5,10].

#### *Calculo de coeficiente global de transferencia de calor*

El coeficiente global de transferencia de calor es un parámetro que describe la capacidad conductiva de una pared y varía de acuerdo a las particiones que la componen, en específico el espesor y la conductividad térmica del material de cada una, para calcularlo es necesario analizar cada partición por separado, obtener el aislamiento térmico de cada una en (W/m<sup>2</sup>K) para posteriormente sumarlo y obtener su inverso dependiendo de si las particiones se encuentran conectadas entre sí en serie o en paralelo, el resultado será equivalente al coeficiente global de transferencia de la pared [2,6,8].

$$K = 1/\Sigma M$$

$$M = CtxE$$

En donde

*K= coeficiente global de transferencia (W/m<sup>2</sup>K)*

*M= aislamiento térmico (m<sup>2</sup>K/W)*

*Ct= conductividad térmica del material de la partición obtenido de la literatura (W/mK)*

*E= espesor de la partición medido en campo (m)*

Las paredes del cuarto frío analizado se componen de ladrillo rojo con acabados de mortero al interior y al exterior TABLA, no se consideraron capas de pintura debido a que presentan un espesor mínimo y su contribución al coeficiente de transferencia es despreciable.

Tabla 6: Coeficiente de transferencia de calor

Material de partición	Espesor [m]	Conductividad térmica [W/mK]	Aislamiento térmico [m <sup>2</sup> K/w]
Mortero de cal exterior	.015	.87	.02
Ladrillo rojo	.16	.77	.021
Mortero de cal interior	.015	.7	.2
<b>Σ M</b>			.45 [m <sup>2</sup> K/w]
<b>K</b>			2.24 [W/m <sup>2</sup> K]

*Calculo de ganancia por conducción*

La ganancia térmica por conducción de calor depende de la temperatura de los cuartos adyacentes al cuarto frío analizado, dichos cuartos pueden proporcionar o retirar energía calorífica por conducción del cuarto frío analizado, dependiendo de si se encuentran a mayor o menor temperatura que el mismo, el cuarto frío analizado cuenta con cuatro muros y un techo adyacentes a diferentes áreas que presentan diferentes temperaturas, para determinar cuál es la ganancia calorífica en cada muro y en el techo fueron aplicados los siguientes modelos matemáticos [2,6,8].

$$\Phi = (T_e - T_i) * (A * K) * pA$$

$$\psi = \sum \Phi$$

En donde

*T<sub>e</sub>= temperatura equivalente obtenida mediante tablas contenidas en Nom 08 (C)*

*T<sub>i</sub>= temperatura ambiente (C)*

*A= área de la pared analizada (m<sup>2</sup>)*

*K= coeficiente global de transferencia (W/m<sup>2</sup>K)*

$pA$ = porcentaje de la componente (opaca o transparente)

$\Phi$ = ganancia por conducción de cada pared (W)

$\psi$ = ganancia por conducción en el total de las paredes (W)

Al analizar la tabla de resultados se observa que dos de los muros y el techo proporcionan un flujo de calor positivo con respecto a las fronteras del cuarto frío analizado y dos muros proporcionan un flujo de calor negativo en relación a las mismas.

Tabla 7: Resumen de ganancia calorífica por conducción

Resumen de ganancia por conducción		
Energía a disipar muro norte	0.099169	kW
Energía a disipar muro sur	-0.074376	kW
Energía a disipar muro este	0.154012	kW
Energía a disipar muro oeste	-0.154012	kW
Energía a disipar techo	0.321738	kW
<b>Total</b>	<b>0.346531</b>	<b>kW</b>

#### 4.3) Carga térmica del producto

La carga térmica del producto equivale al calor que se debe extraer del producto almacenado en el cuarto frío para hacerlo pasar de una temperatura inicial a una temperatura de refrigeración, este calor dependerá de la masa del producto, la diferencia entre las temperaturas inicial y final además del calor específico considerado para cada tipo de producto almacenado en el cuarto frío, para cada tipo de producto se aplicará la siguiente ecuación [1,2,6,8,10]:

$$Q = M C_e (T_a - T_r)$$

En donde

Q= Carga térmica por producto (W)

M= Masa del producto (kg)

C<sub>e</sub>= Calor específico del producto consultado en la literatura

T<sub>a</sub>= Temperatura ambiente (C)

T<sub>r</sub>= Temperatura de refrigeración del producto (C)

Los calores específicos de los productos contenidos en los cuarto frío fueron consultados en tablas, idealizado algunos de los mismos en función a su alto contenido de agua, tales como el yogurt, la leche y la crema [8,10].

Dado que los productos almacenados se encuentran envueltos en diferentes tipos de embalajes y apilados de forma que en algunos casos se encuentran parcialmente aislados es necesaria una mayor cantidad de energía para

disminuir su temperatura al punto deseado por lo cual se introducirá cierto factor a la carga térmica del producto, este factor es conocido como factor de embalaje y fue propuesto de acuerdo a recomendaciones presentadas por diseñadores de cuartos fríos en base a experiencia, los resultados obtenidos para el cuarto frío analizado se presentan a continuación TABLA:

Tabla 8: Carga térmica de producto almacenado

Tipo de producto	Masa de producto (kg)	CP de producto (kJ/kgK)	T1 (C)	T2 (C)	Tiempo de enfriado (s)	Q de producto (kJ)	Energía de producto (W)
Jugo de frutas	85	4.184	20	7	1800	4623.32	2.56851
Leche	113	4.146	15	7	1800	3747.984	2.082213
Yogurt y crema	92	4.332	8.5	7	1800	597.816	0.33212
Embutidos	115	2.537	13	7	1800	1750.53	0.97251
Queso	47	2.324	18	7	1800	1201.508	0.66750
<b>Total</b>							6.62286
<b>Factor de embalaje</b>						20	%
<b>Total de energía a disipar</b>						0.00794744	kW

Los cuartos fríos que se diseñarán en el presente proyecto son utilizados en productos que no requieren temperaturas de almacenaje referidas a puntos de congelación por lo que bastará disminuir su temperatura a 7 C considerando solo una etapa de remoción de calor que va desde la temperatura ambiente hasta la anteriormente mencionada.

En caso de que fuese necesario llevar los productos a su punto de congelación, será necesario calcular el calor que se debe remover por etapas de la forma considerando las siguientes [1, 2,10]:

- 1) Calor removido para enfriar desde una temperatura inicial hasta la temperatura inferior por encima del punto de congelación.
- 2) Calor removido para enfriar desde una temperatura inicial hasta el punto de congelación del producto.
- 3) Calor removido para congelar el producto.
- 4) Calor removido para enfriar desde el punto de congelación hasta la temperatura final debajo del punto de congelación.

#### 4.4) Carga térmica interna

La carga térmica interna se refiere a la ganancia térmica producto del equipo y personal que mantienen al cuarto frío funcionando, el equipo se clasifica en iluminación y motores eléctricos de grúas, sistemas de bombeo, equipos de corte, molienda o mezcla y embalaje, en el caso del cuarto frío analizado solo se cuenta con luminarias como único equipo eléctrico al interior [2,10], La carga térmica proporcionada por dichas luminarias será definida mediante la eficiencia del tipo de luminaria aplicado al cuarto frío, por ejemplo, si se cuenta con una luminaria de 58 W cuya eficiencia de ficha técnica es de 70% se asumirá que el 30% restante es energía perdida en forma de calor [10], la carga térmica producto del equipo reportada en los cuartos fríos de la tienda UNAM se reporta en las siguientes tablas:

Tabla 9: Carga térmica interna

Tipo	Cantidad	Energía de operación (W)	Eficiencia (%)	Horas de operación diarias	Ganancia calorífica (W)
Luminarias	8	56	0.8	15	11.2
Grua	0	0	0.75	0	0
Motores	0	0	0.69	0	0
Molienda	0	0	0.55	0	0
					<b>0.0112</b>

Por otra parte la carga térmica reportada por el personal que labora al interior de los cuartos fríos de la tienda UNAM fue calculada mediante el siguiente modelo matemático  $Q = (272 - 6T)$  en el cual la temperatura T en Celsius representa la temperatura a la cual se encuentra el cuarto frío, la carga térmica producto del personal que labora al interior de los cuartos fríos se reporta en la siguiente tabla [10]:

Tabla 10: Carga térmica por concepto de personal

Carga térmica de personal					
Actividad	Pertenencia	Numero	Horas diarias	Carga térmica (W)	Carga térmica total (W /h)
Empacador	UNAM	1	2	230	460
Acomodador	FUD	1	1	230	230
Acomodad	LALA	2	1.5	460	690
Acomodad	ALPURA	2	1.5	460	690
Acomodad	JUMEX	1	0.5	230	115
Acomodad	DANONE	1	1	230	230
Acomodad	VILLITA	1	1	230	230
Acomodad	BONAFINA	1	0.5	230	115
Salchichone	UNAM	1	2	230	460
Salchichone	UNAM	1	2	230	460
<b>Total</b>				<b>2760</b>	<b>3680</b>
Porcentaje de personas en activo a la vez				<b>0.1</b>	<b>0.1</b>
<b>Total efectivo</b>				<b>276</b>	<b>368</b>

La energía a disipar fue calculada considerando que solo un 10 % del personal asignado a actividades en cuartos fríos labora al mismo tiempo, por lo cual solo se deberá considerar ese porcentaje de carga térmica de personal a disipar.

#### 4.5) Carga térmica por filtración de aire

La carga térmica por filtración de aire se refiere al calor desplazado desde el exterior del cuarto frío con temperatura ambiente hacia el interior del cuarto frío con temperatura de refrigeración por acción de las corrientes de aire presentes en el sitio por aberturas tales como la puerta de acceso, este fenómeno obedece al fenómeno de transmisión de calor por convección [2,6,8]. En ocasiones la carga térmica por filtración de aire considera el 50% de la carga térmica a disipar al interior de un cuarto frío, dependiendo de factores como la temperatura exterior y el tiempo que la puerta del cuarto se encuentra abierta que deriva en la obtención de un número de recirculaciones de aire en cierto intervalo de tiempo, es por ello que se debe hacer un especial énfasis en el cálculo de este tipo de carga térmica [2,10].

Para determinar la cantidad de energía involucrada en este proceso se midieron las temperaturas al interior y al exterior del cuarto frío en el área de la entrada y se consideró una presión equivalente a la presión atmosférica, con estas propiedades y con ayuda de tablas termodinámicas de aire reportadas en la literatura fue posible determinar las entalpías del aire al interior y al exterior del cuarto frío, posteriormente se calculó la diferencia entre ellas y se multiplicó por el flujo másico de aire entre el cuarto frío y el exterior medido con ayuda de un anemómetro digital [2,6,10].

$$Q_{fil} = (h_{ex} - h_{int})x(\dot{m}).$$

En donde

$Q_{fil}$ = Carga térmica por filtración (W).

$h_{ex}$ = Entalpia del aire al exterior del cuarto frío (kJ/kg).

$h_{int}$ = Entalpia del aire al interior del cuarto frío (kJ/kg).

$\dot{m}$ = Flujo masico de aire entre el interior y el exterior del cuarto frío (kg/s)

Los datos medidos y los resultados obtenidos se reportan en la siguiente tabla TABLA

Tabla 11: Carga térmica por filtración de aire

Interior del cuarto frío			Exterior del cuarto frío		
Fluido	Aire		Fluido	Aire	
Temp (C)	7	(C)	Temp (C)	19	(C)
Presión (Pa)	92000	(Pa)	Presion (Pa)	92000	(Pa)
Entalpia	223	kJ/kg	Entalpia	245	kJ/kg
Entropía	6.8	kJ/kg	Entropía	6.84	kJ/kg
Densidad	1.24	kg/m3	Densidad	1.17	kg/m3
<b>Puerta de cuarto frío</b>			<b>Energía intercambiada</b>		
			Factor de puerta	0.45	
Base	0.75	m	Diferencia de entalpías	22	kJ/kg
Altura	1.95	m	Flujo másico	0.1711125	kg/s
Área	1.4625	m2	Energía	3.764475	kJ/s
Vel fluido	0.1	m/s	Energía	1.69401375	kW
Flujo másico	0.1711125	kg/s			

El margen de error en la magnitud energía calculada se puede reducir en función una correcta medición del flujo másico de aire entre el interior y el exterior del cuarto frío lo cual requerirá de iteraciones con el anemómetro hasta encontrar valores que se repitan con una frecuencia razonable.

#### 4.6) Carga térmica total

La carga térmica total será la suma de las anteriormente calculadas y con ella se podrán obtener las toneladas de refrigeración del equipo necesario para mantener la temperatura deseada en el cuarto frío analizado [2,6,10].

Tabla 12: Carga térmica total a disipar en cuarto frío

Tipo de carga	Magnitud
Carga térmica por conducción	0.346531 kW
Carga térmica por filtración	1.69401375 kW
Carga térmica del producto	0.00794744 kW
Carga térmica de personal	0.276 kW
Carga térmica de equipo eléctrico	0.0112 kW
Carga térmica total a disipar en cuarto frío	2.33569219 kW
Equivalencia	0.66734063 Ton

#### 4.7) Selección de equipo de refrigeración comercial

En función a los resultados presentados anteriormente se propondrá un sistema de refrigeración capaz de disipar dicha carga de la manera más eficiente posible [10], los principales parámetros de selección que se buscarán en el sistema de refrigeración son los siguientes:

- Capacidad de disipar la carga térmica total calculada
- Disponibilidad en el mercado
- Uso de tecnología de refrigeración reciente
- Compatibilidad con el sistema eléctrico de la tienda UNAM
- Viabilidad económica de compra e implementación

Las características del equipo seleccionado se presentan a continuación

Tabla 13: Equipo de refrigeración seleccionado

Capacidad de refrigeración	1	Ton
Fluido de trabajo	R410	
COP de placa	2.88	
Potencia	1.280	kW
Voltaje	220	V
Inversión requerida con instalación	8,472.79	Pesos



#### 4.8) Ahorros energéticos y económicos

El consumo de energía se reducirá de forma apreciable debido a que en esta ocasión el sistema de refrigeración del cuarto frío fue dimensionado correctamente, además de emplear tecnología reciente que presenta un mayor aprovechamiento de la energía utilizada, esto sin afectar la operatividad del cuarto frío en cuestión, los índices energéticos se redujeron como se muestra a continuación.

En lo referente a ahorro monetario el proyecto no resulta muy atractivo, debido a que en función a las pocas horas que el compresor pasa efectivamente encendido al mes el ahorro monetario será muy bajo.

Tabla 14: Resumen de ahorros

Energía a disipar	2.33	kW
COP de nuevo equipo de refrigeración	2.88	
Potencia promedio futura	0.80	kW
Potencia promedio actual	1.77	kW
Horas de operación mensuales	29.6	h
Ahorro mensual	28.44	kwh
Costo integrado	1.10	\$/kWh
Ahorro mensual	31.29	pesos
Ahorro anual	375.47	pesos

#### Nuevos Índices energéticos

Tabla 15: Nuevos índices energéticos

Índice	Magnitud	Unidad
Energía sobre área	.065	kW/m <sup>2</sup>
Energía sobre masa almacenada	.0013	kW/kg

#### 4.9) Viabilidad económica del proyecto

El proyecto es considerado económicamente inviable dados que de acuerdo a lo monitoreado por el analizador de redes las horas efectivas de operación del compresor son relativamente pocas, haciendo que el ahorro económico no compense la inversión requerida para poner la propuesta en marcha a pesar de que se considera una vida útil de 10 años para el sistema de refrigeración propuesto.

Tabla 16: Resumen de análisis económico

Resumen de análisis económico			
VIDA ÚTIL	VU	10.00	años
TASA DE DESCUENTO	TD	10.00%	
FACTOR DE VALOR PRESENTE		6.145	
VALOR NETO DE INVERSIÓN	VNI	7,742	pesos
BENEFICIO ANUAL NETO	BAN	375.47	pesos
TIEMPO DE RETORNO SIMPLE (Pay-back)	VNI/BAN	247.43	meses
TASA DE RETORNO DE INVERSIÓN ROI	$(BAN-AMA)/VNI*100$	4.85%	
VALOR ACTUALIZADO DE LOS BENEFICIOS	$RNO=FVP*BAN$	2,307.11	pesos
BENEFICIO NETO VPN	$VPN=RNO-VNI$	-5,434.89	pesos
RELACIÓN BENEFICIO COSTO	$RBC=RNO/VNI$	0.30	veces

## CONCLUSIONES

- A pesar de que el cuarto frío de salchichonería es eficaz, su eficiencia energética es baja.
- Dadas las condiciones del cuarto frío de salchichonería aunadas a la obsolescencia del refrigerante con el que opera la oportunidad de ahorro energético más viable es rediseñar y sustituir el sistema en su totalidad.
- El correcto rediseño del cuarto frío de salchichonería y la introducción de tecnologías actuales para el nuevo ciclo plantean un ahorro de 28.4 kWh mensuales.
- En el caso del rediseño del cuarto frío de salchichonería resulta en ahorro energético pero no se llega a recuperar la inversión monetaria, por lo cual la propuesta no es económicamente viable.

## **Bibliografía**

- 1) Yunus Cengel, Michel Boles. (2014). Termodinámica 7ma edición. McGraw Hill. México
- 2) García Colín. (1971). Introducción a la termodinámica clásica. Trillas. México
- 3) Yunus Cengel (2012). Transferencia de calor y masa 4ta edición. McGraw Hill. México
- 4) Michel J. Moran, Howard Shapiro. (2008) Fundamentals of Engineering Thermodynamics 5ta edición. John and Wiley . EU
- 5) Antonio V. (1998) Problemas de transferencia de calor. Limusa. México
- 6) Frank P. Incropera (2004). Fundamentos de transferencia de calor 4 ta edición. Pearson. México
- 7) J.P. Holman (1995). Transferencia de calor. CECSA. México
- 8) Donald Q. (2003) Procesos de transferencia de calor. Patria. México
- 9) García Colín. (1971). Problemas de termodinámica clásica. Trillas. México
- 10) Efraín A. Puerto (2011) Guía técnica para el diseño de cuartos fríos. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Colombia