



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE LA PRÁCTICA SIMULADA DE REFRIGERACIÓN EN
EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FACULTAD
DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

Guillervin Adolfo Macario Castro

Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxom

Guatemala, abril de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA PRÁCTICA SIMULADA DE REFRIGERACIÓN EN EL
LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

GUILLERVIN ADOLFO MACARIO CASTRO

ASESORADO POR EL INGENIERO JOSÉ MANUEL TAY OROXOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Dra. Casta Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE LA PRÁCTICA SIMULADA DE REFRIGERACIÓN EN
EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FACULTAD
DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 29 de enero de 2009.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the printed name.

Guillervin Adolfo Macario Castro



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 25 de febrero de 2009.

Ingeniero

Williams G. Álvarez Mejía

Director de la Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

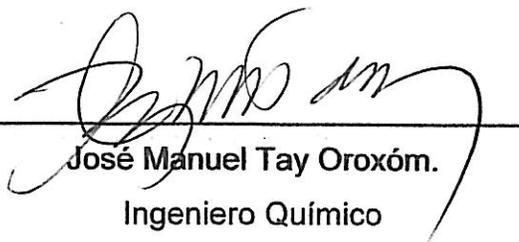
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Williams Álvarez

Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final de Trabajo de Graduación, del estudiante Guillervin Adolfo Macario Castro con número de carné 2003-12357 titulado **“DISEÑO DE LA PRÁCTICA SIMULADA DE REFRIGERACIÓN EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA”**.

Por tal motivo y para lo que al interesado le convenga extendiendo la presente para que se continúe con los trámites respectivos.

Atentamente,



José Manuel Tay Oroxóm.

Ingeniero Químico

Colegiado No. 121



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

Guatemala, 16 de Marzo de 2009
Ref. EI.Q.090.2009

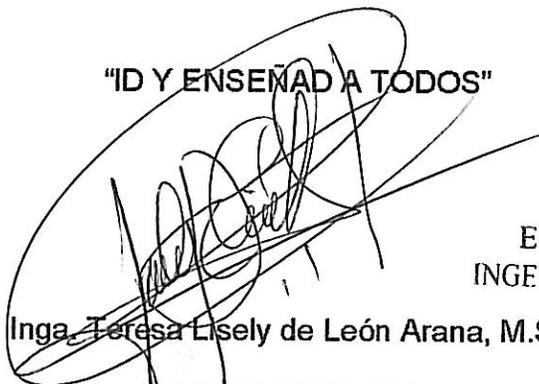
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-023-09-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **GUILLERVIN ADOLFO MACARIO CASTRO**, identificado con carné No. 2003-12357, titulado: "DISEÑO DE LA PRÁCTICA SIMULADA DE REFRIGERACIÓN EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA" el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico José Manuel Tay Oroxom, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Macario Castro** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

Inga, Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.

COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación del estudiante **Guillervin Adolfo Macario Castro** titulado: **“DISEÑO DE LA PRÁCTICA SIMULADA DE REFRIGERACIÓN EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA”**, procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc.
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, marzo de 2,009

C.c.: archivo



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA PRÁCTICA SIMULADA DE REFRIGERACIÓN EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Guillervin Adolfo Macario Castro**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large loop and a vertical line extending downwards.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, abril de 2009

ACTO QUE DEDICO A

- DIOS** Por permitirme cometer errores, levantarme cuando he caído, salvarme de todo mal y guiarme en un camino de logros y satisfacción.
- Mis padres** **Ángela Estela Castro Chávez y Pedro Félix Macario Gómez**
Por brindarme la mejor educación, apoyo, valores, principios y ética en la que he basado mi vida. Por quienes lucho ya que todo logro y éxito que obtengo es de ellos.
- Mis hermanos** **Sergio, Evelyn, Pedro y Amsi**
Por apoyarme cuando he querido desistir y soportarme en todo momento, porque sin sus acciones no podría continuar.
- A mi cuñada y sobrinos** **Kharla, Sergio y Madelyn**
Por formar en mi vida parte de el porqué de seguir adelante
- Mis amigos y compañeros** Por los buenos y malos tiempos que hemos pasado juntos, al hacer de mis buenos momentos más placenteros y de los malos un recuerdo que me permitirá aprender y continuar. Por las molestias, enojos y preocupaciones por las que los

he hecho pasar.

La Universidad de San Carlos de Guatemala Por forjarme en la mejor universidad y darme el orgullo de llamarme ingeniero San carlista.

AGRADECIMIENTOS A

Mis abuelos	Por su amor y cuidados hacia mí.
Mis primos y tíos	Por su cariño y por estar pendiente de mí en cada momento.
Los ingenieros	Orlando Posadas, Manuel Tay, Manuel Galván, Federico Salazar, Mario Estrada, César García, Otto de León y Jorge Romero, por brindarme sus conocimientos, consejos y apoyo.
Las ingenieras	Alba Guerrero, Lisely de León y Casta Zeceña, por su apoyo y enseñanza brindada.
Mis amigos	Jefferson, Margarita, Zulema, Luís, Dulce, Christian, Marcia, Claudia, Jeanhett, Gaby, Ricardo, Javier, Rubén, Raúl, Sergio, Ceci, Memphis, Jairo, Miguel, Oscar, Marvin, Vinicio, Carlos, Juan, Christian, por su amistad, alegría, entusiasmo y ayuda brindada durante todo este tiempo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1 SIMULADORES DE PROCESOS	1
1.1 Aplicación en la enseñanza.....	1
1.2 Aplicación en ingeniería química	2
1.3 Factores a tomar en cuenta.....	2
2 PROCESO DE REFRIGERACIÓN.....	3
2.1 Transferencia de calor	3
2.2 Refrigeradores y bombas de calor.....	4
2.3 El ciclo invertido de Carnot.....	5
2.4 Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.....	6
2.5 Ciclos reales de compresión de vapor.....	8
2.6 Refrigerantes.....	9
2.6.1 Tipos de refrigerantes.....	10
2.6.1.1 Halocarburos.....	10
2.6.1.2 Amoníaco	11
2.6.1.3 Hidrocarburos.....	11
2.6.1.4 Dióxido de carbono	12
2.6.1.5 Cloruro de metilo	12

2.6.1.6	Agua	12
3	EL CICLO DE REFRIGERACIÓN MECÁNICO	13
3.1	El evaporador.....	13
3.2	El condensador	14
3.3	El compresor	15
3.4	El dispositivo de expansión.....	16
4	METODOLOGÍA	17
4.1	Procedimiento de trabajo	17
4.2	Estudio preliminar	18
4.3	Aplicación del simulador propuesto.....	18
4.4	Verificación de los conocimientos adquiridos.....	19
4.5	Datos de estudiantes durante la aplicación de la práctica	19
4.6	Alcances y límites	20
5	ESTRUCTURA DEL SOFTWARE.....	21
5.1	Estructura del programa principal <i>CoolPack</i>	21
5.1.1	Utilidades de refrigeración	21
5.1.2	Análisis de ciclo.....	22
5.2	Análisis del ciclo de una etapa	22
5.2.1	Especificaciones de ciclo	23
5.2.1.1	Niveles de temperatura	23
5.2.1.2	Pérdidas de presión	24
5.2.1.3	Intercambiador de calor de gas de succión.....	24
5.2.1.4	Refrigerante	25
5.2.1.5	Capacidad del ciclo	25
5.2.1.6	Rendimiento del compresor	25
5.2.1.7	Pérdida de calor en compresor	25

5.2.1.8	Línea de succión	25
5.3	Ventanas de error.....	26
6	DISEÑO DE LA PRÁCTICA.....	27
6.1	Variables dependientes e independientes del sistema de refrigeración simulado	27
6.1.1	Efecto de las temperaturas de evaporación y condensación del refrigerante	27
6.1.2	Efecto del tipo de refrigerante	27
6.1.3	Efecto de la carga de refrigeración.....	28
6.1.4	Eficiencia isentrópica en el compresor	28
6.2	Elaboración de los objetivos propuestos	29
6.3	Diagrama del equipo propuesto.....	29
6.4	Operación del simulador.....	31
6.5	Toma de resultados.....	32
6.6	Datos a tomar en cuenta en evaluaciones	34
7	APLICACIÓN DEL SIMULADOR COOLPACK.....	37
7.1	Aplicación del diseño de la práctica.....	37
7.2	Desarrollo de la aplicación	37
7.3	Datos desplegados por el simulador	38
7.4	Discusión de datos desplegados por el simulador <i>CoolPack</i>	39
8	DISCUSIÓN DE LA APLICACIÓN.....	41
	CONCLUSIONES.....	47
	RECOMENDACIONES.....	49
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	53

BIBLIOGRAFÍA.....	55
APÉNDICES.....	57
Apéndice 1	59
Apéndice 2	65
Apéndice 3	83
Apéndice 4	89
Apéndice 5	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación del ciclo de Carnot.....	7
2.	Flujograma del desarrollo del estudio.....	17
3.	Ventana principal (utilidades)	21
4.	Utilidades de refrigeración.....	21
5.	Ventana principal (análisis)	22
6.	Análisis de ciclo.....	23
7.	Especificaciones de ciclo.....	24
8.	Ventana de posible operación	26
9.	Ventana de incapacidad de operación	26
10.	Diagrama del equipo propuesto de refrigeración por compresión	30
11.	COP's contra carga de refrigeración	38
12.	Flujo másico contra carga de refrigeración.....	39
13.	Diagrama del desarrollo de un trabajo de preparación.....	60
14.	Procedimiento en la utilización del simulador <i>CoolPack</i>	66
15.	Cumplimiento de objetivos por el simulador	83
16.	Eficiencia de la metodología.....	83
17.	Continuidad en el estudio de la refrigeración	84
18.	Conocimientos aplicados al evaluar los diversos COP.....	84
19.	Conocimientos aplicados al evaluar la etapa de condensación ..	85
20.	Conocimientos aplicados al evaluar la etapa de evaporación	85
21.	Promedio de alumnos.....	86
22.	Desviación estándar de los datos.....	86
23.	¿Debe implementarse un equipo físico de refrigeración?	87

TABLAS

I.	Datos para bomba de calor.....	33
II.	Datos para primer objetivo	33
III.	Datos para tercer objetivo	34
IV.	Resultados al utilizar <i>CoolPack</i>	38
V.	Variables independientes.....	70
VI.	Diseño experimental uno	71
VII.	Diseño experimental dos.....	72
VIII.	Diseño experimental tres	73
IX.	Propiedades del R502.....	81
X.	Datos de estudiantes	86
XI.	Sección N.....	89
XII.	Sección P	90
XIII.	Capacidad del simulador en generar datos.....	91
XIV.	Cumplimiento de objetivos	91
XV.	Metodología empleada.....	91
XVI.	¿Debe ser remplazado el simulador?	92
XVII.	¿Permite el simulador continuar con el estudio de refrigeración?	92
XVIII.	¿Representa el simulador un sistema de refrigeración?	92
XIX.	Seguimiento del estudio de refrigeración	93
XX.	Aplicación de conocimientos de COP	93
XXI.	Aplicación de conocimientos de refrigerantes	93
XXII.	Aplicación de conocimientos en condensación	94
XXIII.	Aplicación de conocimientos en evaporación	94
XXIV.	Aplicación de conocimientos en expansión de gases.....	94
XXV.	¿Es necesario un equipo físico?.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Calor
\dot{Q}_C	Calor en el condensador
\dot{Q}_{SL}	Calor ingresado en la línea de succión
\dot{W}	Capacidad del compresor
\dot{Q}_E	Carga de refrigeración
COP	Coefficiente de operación
COP _{BC}	Coefficiente de operación de bomba de calor
COP* _{Carnot}	Coefficiente de operación de Carnot
COP*	Coefficiente de operación ideal
COP _{Real}	Coefficiente de operación real
$Z_{\alpha/2}$	Confianza
n_{IS}	Eficiencia isentrópica
He	Entalpía del refrigerante a la entrada del dispositivo
Hs	Entalpía del refrigerante a la salida del dispositivo
E	Error estimado
E2*	Evaluación posterior
E1*	Evaluación previa

f_Q	Factor de pérdida de calor
\dot{m}	Flujo másico
R*	Informe final
kW	Kilo watio
N*	Número del alumno en grupo
N	Número de corridas
ΔP_{DL}	Pérdidas en línea de descarga
ΔP_{SL}	Pérdidas en línea de succión
P	Probabilidad de éxito
Q	Probabilidad de fracaso
R	Refrigerante
No SGHX	Sin intercambiador de calor de gas de succión
ΔT_{SH}	Temperatura de sobrecalentado
ΔT_{SC}	Temperatura de sub-enfriado
T_C	Temperatura en condensador
T_E	Temperatura en evaporador
W	Trabajo
P*	Trabajo de preparación

GLOSARIO

Bomba de calor	Equipo empleado en la inserción de calor a un sistema.
Calor	Transferencia de energía entre dos cuerpos debida a un diferencial de temperatura.
Carga de refrigeración	Calor ingresado al sistema de refrigeración por medio del evaporador.
Ciclo de refrigeración	Ciclo invertido de una máquina térmica en la que se aplica trabajo para transferir calor de un nivel bajo de energía a uno más alto.
Ciclo invertido de Carnot	Es en el que se invierte la dirección del fluido en el diagrama térmico por medio del ingreso de trabajo.
Compresor	Dispositivo por el cual se aumenta la presión de evaporación hasta alcanzar la presión de condensación.
Condensador	Permite la eliminación de calor del refrigerante por medio de la transferencia de calor al medio circundante.

Diseño experimental	Planeación y realización de experimentos por medio de un análisis estadístico de la información más relevante y adecuada.
Dispositivo de expansión	Elemento que restringe y regula el paso del refrigerante disminuyendo la presión de condensación hasta la presión de evaporación.
Eficiencia isentrópica	Medida de la desviación que tiene el proceso real del idealizado.
Evaporador	Permite la transferencia de calor del medio a refrigerar y el refrigerante.
Informe final	Documento en el cual son analizados los resultados obtenidos de una práctica.
Metodología	Serie de procedimientos o puntos a cumplir en la obtención de un objetivo.
Objetivo	Delimitan y definen correctamente la meta hacia la cual se dirige el trabajo.
Procedimiento	Pasos a seguir en la obtención de un resultado.
Refrigerador	Equipo por el cual se disminuye la temperatura de un medio respecto de su entorno, extrayendo energía de este.

Refrigerante	Transportador de calor de un sistema de baja potencia a otro de alta.
Simulador	<i>Software</i> que ejemplifica el funcionamiento de un sistema o equipo físico y reproduce el resultado de la modificación de variables.
Temperatura del condensador	Temperatura a la cual se mantiene el sistema de eliminación de calor entre el condensador y el medio circundante.
Temperatura del evaporador	Temperatura a la cual se mantiene el medio a refrigerar.
Trabajo de preparación	Documento elaborado con el fin de permitir la adecuada realización de la práctica.
Variable	Valor que puede ser alterado del sistema en estudio, permitiendo la obtención de un resultado.

RESUMEN

Se diseñó la práctica simulada de refrigeración por compresión empleando el simulador *CoolPack*, con lo que se continuó la enseñanza de los sistemas de refrigeración en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, este diseño se refirió directamente a los objetivos y metodología que se aplicó en la práctica simulada. La utilización del simulador se debió a que es una herramienta didáctica de gran flexibilidad y moderniza la enseñanza.

Los objetivos que se emplearon contemplan la comprensión de las características más importantes de la refrigeración como son los valores de COP, el estudio de la evaporación y condensación de gases refrigerantes y la compresión y expansión de dichos gases, así como el efecto de las variables más relevantes.

Se utilizó una metodología que correspondió a un esquema de preparación, en la cual el estudiante se familiarizó con el modelo computarizado y elaboró un documento de preparación, durante esta etapa se evaluó su conocimiento; posterior a la preparación le correspondió realizar la práctica simulada y se basó en el trabajo de preparación, elaboró un informe final donde se aprecian los resultados que obtuvo y la interpretación que dio de estos, al entregar este documento se realizó una estimación de los conocimientos que alcanzó con la implementación de la práctica. Esta metodología consideró los factores más relevantes en la operación de equipos de refrigeración por compresión.

Las evaluaciones en las etapas de condensación y evaporación correspondieron a la aplicación de sus conocimientos respecto de la

refrigeración y de bombas de calor, con lo que se apoyó en el uso de los respectivos COP para cada sección.

Los estudiantes realizaron la práctica simulada y reflejaron satisfactoriamente que la utilización del simulador *CoolPack*, los objetivos y la metodología empleada fueron los correctos, logrando la implementación de la práctica de forma adecuada. Se relacionó la teoría, operación y aplicación de la refrigeración, con lo que se creó las bases para una futura aplicación práctica-experimental, por medio de un equipo físico.

OBJETIVOS

GENERAL:

Diseñar la práctica simulada de refrigeración por compresión utilizando el simulador *CoolPack*, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ESPECÍFICOS:

1. Elaborar las directrices a considerar en la implementación de una práctica simulada de refrigeración, determinando los objetivos y metodología a emplear.
2. Evaluar un sistema de refrigeración en sus etapas de condensación y evaporación, por medio de sus respectivos COP.
3. Verificar la aplicación de la práctica simulada, mediante evaluaciones posteriores a su aplicación en los estudiantes.
4. Crear las bases para la aplicación de una práctica experimental de refrigeración por compresión, al diseñar la práctica simulada.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración son ampliamente empleados en la industria, ya que son utilizados para mantener control sobre una temperatura, la cual es menor a la del entorno en que operan, generando una utilidad en la fabricación y conservación de productos.

El sistema de refrigeración es un equipo en el cual es utilizada la Termodinámica conjunta con las Operaciones Unitarias. Se tiene el empleo de herramientas propias de estas disciplinas en su análisis detallado, como los ciclos de Carnot y Coeficientes de Operación (COP), entre otros. Las Operaciones Unitarias del sistema de refrigeración pueden observarse en las etapas de intercambio de calor entre los dispositivos de evaporación y condensación. El estudio del compresor en el sistema es evaluado como un equipo de potencia, el cual suministra trabajo al fluido refrigerante por medio de la utilización del motor.

Se realizó el estudio del sistema de refrigeración básico que se desarrolló de manera simulada, implementándolo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de San Carlos de Guatemala, se empleó como equipo de estudio el *software* de refrigeración *CoolPack*, el cual está enfocado en aplicar de la mejor manera una enseñanza demostrativa de la refrigeración.

1 SIMULADORES DE PROCESOS

En los últimos años, la simulación de procesos ha llegado a ser una herramienta adecuada y oportuna de apoyo para el diseño, caracterización, optimización y monitoreo del funcionamiento de procesos industriales, y además, su uso se está extendiendo en las instituciones de formación de ingenieros químicos.

“Existe una gran variedad de simuladores de procesos comerciales, algunos de los cuáles son poderosas herramientas de cálculo, con inmensos bancos de datos que contienen las propiedades físicas de miles de compuestos y sustancias químicas, selección de modelos termodinámicos, cálculos de equipos (teórico y real), análisis de costo, estado de agregación y condiciones de operación, que le dan al simulador la ventaja de una gran versatilidad”. (Referencia electrónica 5).

1.1 Aplicación en la enseñanza

Los sistemas simulados permiten obtener eficientemente información, con lo cual puede ser analizado por el estudiante el fenómeno, sistema o equipo. En muchos casos los simuladores crean una ventana a la modernización de aulas y laboratorios, ya que no es necesario un equipo físico para la obtención de datos, facilitando el aprendizaje de diversos temas.

Los estudiantes, al emplear esta herramienta, mejoran su avance en el entendimiento de lo aplicativo que tiene la teoría obtenida previamente. Y determinan cuáles son sus deficiencias en el tema tratado por el simulador.

1.2 Aplicación en ingeniería química

La aplicación de simuladores en la Ingeniería Química facilitan la comprensión, estudio y manejo de diversos procesos ya sea en el área de laboratorio así como a nivel industrial. Ésta facilidad que presentan tales *softwares* permiten el desarrollo y mejoramiento de equipos, así como el estudio de fenómenos físicos, químicos y termodinámicos, que en cuya ausencia dificultarían la enseñanza.

1.3 Factores a tomar en cuenta

En la aplicación de procesos simulados deben de tomarse en cuenta factores como:

- Tipo de proceso
- Fundamentos teóricos a emplear
- Grados de libertad y especificaciones de diseño
- Secuencia de simulación
- Aplicación y operatividad

2 PROCESO DE REFRIGERACIÓN

La transferencia de calor en el sistema de refrigeración se lleva a cabo utilizando refrigerante que opera en un sistema cerrado. Los sistemas refrigerados están principalmente concebidos para el enfriamiento de productos.

Una de las propiedades de gran utilidad del refrigerante es la relación presión-temperatura del vapor saturado, un vapor refrigerante se dice que estará saturado siempre que en el mismo recipiente estén presentes simultáneamente líquido y vapor en equilibrio estable. En estas condiciones existe una relación fija entre la temperatura del refrigerante dentro del recipiente y su presión.

2.1 Transferencia de calor

La termodinámica establece que el calor “es la forma de energía que se transmite de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura” (Referencia 3). Esta transferencia ocurre mediante uno o más de los métodos básicos de transferencia:

- **Conducción.** Es la transferencia de calor entre las moléculas altamente compactadas que tengan contacto una con otra.
- **Convección.** Es la transferencia de calor debida al movimiento del material. Las corrientes de convección pueden ser pasivas o activas.
- **Radiación.** Es la transferencia de calor por medio de la radiación por ondas similares a las lumínicas y sonoras.

2.2 Refrigeradores y bombas de calor

El calor fluye en la dirección de las temperaturas decrecientes; esto es de las regiones de altas temperaturas a las de bajas temperaturas, dicho proceso de transferencia de calor sucede en la naturaleza sin que se requiera de algún dispositivo. El proceso inverso no sucede por sí solo, la transferencia de calor de una región de baja temperatura a una de alta temperatura requiere de dispositivos especiales llamados refrigeradores.

Los refrigeradores son dispositivos cíclicos y los fluidos de trabajo empleados en los ciclos de refrigeración son llamados refrigerantes. Otro dispositivo que transfiere calor de un medio de baja temperatura a uno de alta temperatura es la bomba de calor. Los refrigeradores y bombas de calor son en esencia los mismos dispositivos, sólo difieren sus objetivos. El objetivo de un refrigerador es mantener un espacio refrigerado a una temperatura baja y extraer calor de él y el objetivo de una bomba de calor es mantener un espacio calentado a alta temperatura.

Los rendimientos de refrigeradores y bombas de calor se expresan en términos del coeficiente de operación (COP) el cual se define:

Ecuación 1.

$$\text{COP Refrigerador} = \frac{\text{Calor transferido en Evaporador}}{\text{Trabajo realizado en el sistema}} \quad (\text{Referencia 1})$$

Ecuación 2.

$$\text{COP Bomba de calor} = \frac{\text{Calor transferido en Condensador}}{\text{Trabajo realizado en el sistema}}$$

La capacidad de enfriamiento de un sistema de refrigeración con frecuencia se expresa en toneladas de refrigeración. La capacidad del sistema de refrigeración que puede congelar una tonelada de agua líquida a 0°C en hielo a 0°C en 24 horas será una tonelada de refrigeración. (200 BTU/min o 211 KJ/min)

2.3 El ciclo invertido de Carnot

El ciclo de Carnot es totalmente reversible puesto que se compone de dos procesos isotérmicos reversibles y dos procesos isentrópicos. Posee la eficiencia máxima térmica para límites determinados de temperatura y sirve como un estándar de comparación para los ciclos reales.

Puesto que el ciclo de Carnot es totalmente reversible, los cuatro procesos que comprenden el ciclo pueden invertirse. Al hacerlo también se invertirán las interacciones térmicas y de trabajo, el resultado es un ciclo que opera en dirección contraria a las manecillas del reloj llamado ciclo invertido de Carnot. Un refrigerador o bomba de calor que opera en el ciclo invertido de Carnot recibe el nombre de refrigerador de Carnot o bomba de calor de Carnot.

El refrigerante absorbe calor isotérmicamente de una fuente de baja temperatura, luego se comprime isoentrópicamente hasta el estado de vapor saturado, luego rechaza calor isotérmicamente en un sumidero de alta temperatura llegando al estado de líquido saturado y por último se expande isoentrópicamente en una turbina hasta el estado original.

El ciclo invertido de Carnot es el más eficiente que opera entre dos niveles de temperatura si fuera posible, pero como se explica es ideal para fines prácticos por lo que sólo puede ser utilizado para fines de comparación.

Los dos procesos isotérmicos de rechazo y adición de calor no son difíciles de alcanzar en la práctica, porque al mantener la presión constante se fija de manera automática la temperatura de la mezcla bifásica en el valor de saturación. Sin embargo los procesos de compresión y expansión no pueden aproximarse debido a que incluyen procesos de compresión de una mezcla líquido-vapor que requiere un compresor que maneje dos fases, y el proceso de expansión de vapor con alto contenido de humedad.

2.4 Ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor

Muchos de los aspectos imprácticos asociados al ciclo invertido de Carnot se eliminan al evaporar el refrigerante por completo antes de que se comprima y sustituir la turbina con un dispositivo de estrangulamiento como una válvula de expansión o un tubo capilar.

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es el más utilizado en las aplicaciones de refrigeración, se compone de cuatro procesos:

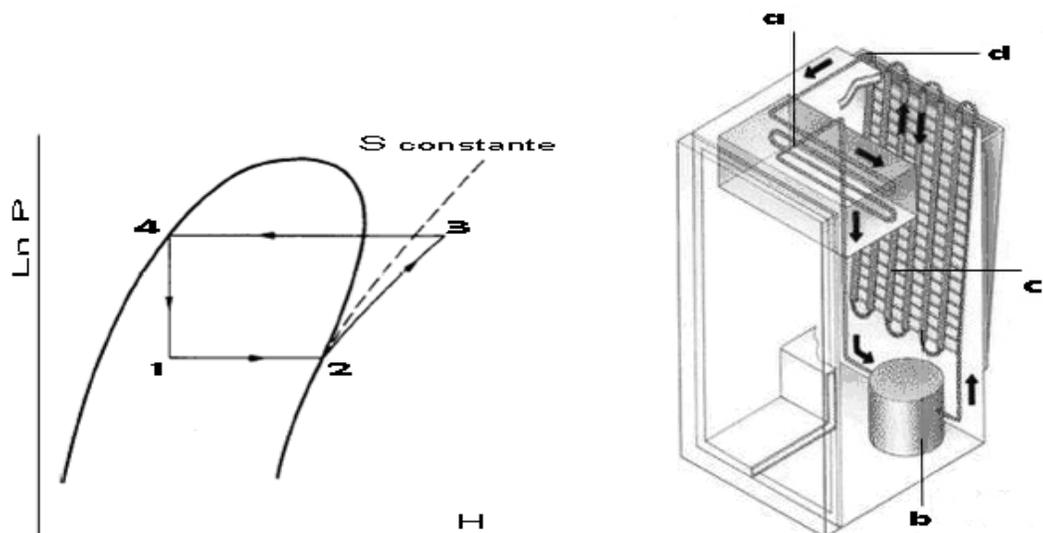
- Compresión isoentrópica en un compresor
- Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- Absorción de calor a presión constante en un evaporador

En este ciclo, el refrigerante entra al compresor como un vapor saturado (sin humedad) y se comprime isoentrópicamente hasta la presión del condensador. Durante el proceso de compresión la temperatura aumenta hasta un valor mayor que la temperatura atmosférica. Luego entra al condensador como vapor sobrecalentado, cediendo calor al medio de alta temperatura y saliendo como un líquido saturado. Luego el refrigerante es estrangulado, bajando su presión y temperatura a la del funcionamiento del evaporador.

El refrigerante entra al evaporador como una mezcla de baja calidad y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado. Por último, el refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor para completar el ciclo. Los diagramas utilizados para el análisis de los ciclos de refrigeración son dos: el diagrama temperatura-entropía y el diagrama presión-entalpía (ver Figura 1).

El ciclo de refrigeración de compresión de vapor no es un ciclo internamente reversible porque incluye dos procesos irreversibles (el estrangulamiento en el dispositivo de expansión y la compresión del vapor refrigerante). Si el dispositivo de estrangulamiento fuera reemplazado por una turbina isentrópica, el refrigerante entraría al evaporador como una mezcla de menor calidad aumentando el efecto refrigerante, sin embargo, los beneficios adicionales no justifican el costo adicional.

Figura 1. **Representación del ciclo de Carnot**



Donde: a) Evaporador 1-2; b) Compresor 2-3; c) Condensador 3-4; d) Dispositivo de expansión 4-1. (Referencia electrónica 6)

Los cuatro componentes asociados al ciclo de refrigeración por compresión de vapor son dispositivos de flujo permanente, por lo que los cuatro procesos pueden analizarse como dispositivos de flujo permanente. Los cambios en la energía cinética y potencial del refrigerante suelen ser despreciables en relación con los términos de calor y trabajo, por lo tanto la ecuación de energía es:

$$\text{Ecuación 3.} \\ Q - W = H_s - H_e \quad (\text{Referencia 1})$$

Donde:

H_s = entalpía del refrigerante a la salida del dispositivo

H_e = entalpía del refrigerante a la entrada del dispositivo

Q = calor

W = trabajo

2.5 Ciclos reales de compresión de vapor

Un ciclo de compresión de vapor real se diferencia de uno ideal por las diferentes fuentes de irreversibilidades presentes en el ciclo, la transferencia de calor hacia los alrededores y la fricción del refrigerante con las tuberías y accesorios.

Idealmente el refrigerante entra al compresor y sale del evaporador como vapor saturado, pero en realidad esto es imposible de alcanzar con tanta precisión. Para asegurarnos que sea así, debemos sobrecalentar el refrigerante antes de que entre al compresor y subenfriarlo antes de que entre a la válvula de expansión. El trabajo de compresión en el ciclo ideal es internamente reversible y adiabático, pero en realidad no es así, debido a que la

condición de cuasiequilibrio durante la compresión del fluido es imposible de alcanzar en la práctica debido a la corta duración de los ciclos de compresión.

Todas estas pérdidas se traducen en requerimientos adicionales de trabajo, lo que conlleva a una menor eficiencia de los ciclos reales.

2.6 Refrigerantes

“Los refrigerantes son los fluidos de transporte que llevan la energía calorífica del nivel de baja temperatura hacia el de alta para entregar el calor retirado del espacio refrigerado” (Referencia 2). En términos generales, los gases que intervienen en los procesos de compresión pasan por fases de baja temperatura por lo cual se les puede llamar “refrigerantes”. Los refrigerantes se designan por un número de identificación designado por el fabricante.

Las propiedades térmicas deseables de un refrigerante son:

- Presiones convenientes de evaporación y condensación (mayor que la atmosférica)
- Temperatura crítica alta y baja temperatura de congelación
- Alto calor latente de evaporación y calor específico del vapor (entalpía)
- Baja viscosidad y alta conductividad térmica de película

Las propiedades prácticas deseables de un refrigerante son:

- Costo bajo
- Inerte química y físicamente con las condiciones de operación
- No corrosivo para los materiales comunes de construcción
- Bajo riesgo de explosión por sí solo o mezclado con el aire
- No tóxico
- No ocasione daños al medio ambiente

El refrigerante no debe ser venenoso ni irritante, además no debe causar deterioro en el lubricante utilizado en el compresor. Importante: en los compresores recíprocos es importante el volumen específico del refrigerante que debe manejarse ya que determina el tamaño del compresor.

Las relaciones presión-temperatura para los vapores saturados son muy útiles para determinar las características de operación del sistema de refrigeración. Por ejemplo, si se conocen las temperaturas del recinto y de descarga del calor hacia la atmósfera entonces se pueden conocer las presiones que se necesitan mantener para obtener el efecto refrigerante. Estas propiedades se presentan en forma gráfica.

2.6.1 Tipos de refrigerantes

2.6.1.1 Halocarburos

Su nombre indica que son derivados de los hidrocarburos pero además contienen elementos llamados halógenos (como el cloro y el flúor). Los halocarburos tienen por lo general características muy convenientes: baja toxicidad, no son inflamables y tienen buena estabilidad química. Se dispone una gran variedad, con diferentes características de presión y temperatura, por lo que hay disponibilidad de halocarburos para cualquier aplicación. Los refrigerantes R134a, R-12, R-22 y R-502 son ampliamente utilizados en los sistemas de compresores recíprocos, para las aplicaciones de refrigeración comercial. El R-12 está prohibido por el daño que causa al medio ambiente. El R134a es utilizado en muchas aplicaciones porque es “ecológico”.

Entre este grupo también se encuentra el freón, el cual se utiliza mucho en unidades domiciliarias e industria en general, son: no irritantes, no tóxicos y no inflamables. Su nombre proviene de la marca Dupont y en su mayoría están prohibidos por el daño que puede ocasionar al medio ambiente. Entre estos se incluye el F-11, el F-23, el F-13, el F-21, el F-133 y el F-12.

2.6.1.2 Amoníaco

Es muy utilizado en instalaciones industriales y comerciales. Es tóxico y corrosivo, por lo que se debe evitar el contacto con cobre o aleaciones de cobre; tiene un alto calor de evaporación y no es miscible en cantidades considerables con el aceite lubricante. Es fácil de detectar fugas porque no es inodoro y su costo es bajo. Las plantas de compresión de vapor que utilizan amoníaco utilizan menos energía que los que utilizan halocarburos. El amoníaco se utiliza como refrigerante en los sistemas de refrigeración por absorción del agua amoniacal, debido a que el agua tiene gran afinidad para absorber el amoníaco.

2.6.1.3 Hidrocarburos

Algunos hidrocarburos se utilizan como refrigerantes: el propano, metano y etano. Sin embargo, son muy inflamables y explosivos, lo que limita en extremo su utilización. Se utilizan en plantas petroquímicas y refinerías de petróleo debido a su disponibilidad.

2.6.1.4 Dióxido de carbono

Durante mucho tiempo se utilizó como un refrigerante seguro, en un espacio confinado no es tóxico a menos que las concentraciones sean muy altas.

2.6.1.5 Cloruro de metilo

Es un anestésico utilizado de un 5 a 10% en volumen en unidades de enfriamiento de tamaño moderado, es miscible con los aceites minerales y no permite que existan en el sistema pequeñas cantidades de humedad porque se congelarían las válvulas de expansión.

2.6.1.6 Agua

Sus características de disponibilidad, seguridad y costo hacen ideal su utilización. El agua no resulta apropiada como refrigerante en los sistemas de compresión de vapor. Su presencia haría extremadamente difícil de impedir la corrosión, además su volumen específico es muy grande y obligaría a utilizar equipo de tamaño excesivo cuando cambia a su fase gaseosa.

3 EL CICLO DE REFRIGERACIÓN MECÁNICO

Un sistema de refrigeración mecánico debe tener varios componentes básicos que puedan hacer que circule el refrigerante y transferir el calor. Estos componentes son: el evaporador, el condensador, el compresor, el dispositivo de expansión y las tuberías de interconexión. Dispositivos auxiliares como acumuladores y filtros pueden instalarse en ciertos sistemas pero no son básicos.

3.1 El evaporador

El evaporador es aquella porción del ciclo de refrigeración por compresión de vapor donde el calor fluye hacia el interior del sistema. El flujo de calor ocurre porque la temperatura del aire o agua que se está enfriando es mayor que la del refrigerante.

Básicamente el evaporador es un intercambiador de calor con el refrigerante contenido en los tubos, pasajes o recipientes. El fluido (aire, agua o salmuera) está separado del refrigerante por las paredes o la carcasa del intercambiador de calor. Está fabricado de materiales metálicos como cobre, aluminio, hierro galvanizado y acero inoxidable. Se escogen estos materiales debido a la buena conductividad térmica que poseen. La tubería está interconectada por aletas de aluminio, que sirven para dirigir el flujo del fluido a través del serpentín y para incrementar la transferencia de calor mediante conducción.

Existen diferentes formas de clasificar los evaporadores. Pueden clasificarse en dos grandes grupos: expansión directa (si el refrigerante se

evapora por completo al salir del evaporador) o inundados (si el refrigerante en su fase líquida cubre todas las superficies de transferencia de calor).

3.2 El condensador

El condensador está localizado después de la descarga del compresor, el vapor refrigerante caliente entra al condensador proveniente del compresor y sale del condensador como líquido saturado. La función del condensador es transferir el calor que ha sido absorbido por el sistema hacia el medio circundante.

El condensador es de construcción similar al evaporador, se trata de una serie de tubos a través de los cuáles pasa el vapor caliente a alta presión. El ventilador obliga al aire a pasar a través del serpentín de condensación, y el refrigerante cede calor al aire circundante, haciendo que el vapor se condense. Mientras el vapor refrigerante se enfría y alcanza su temperatura de condensación sigue eliminando el calor latente conforme el vapor se condensa.

El refrigerante líquido que sale del condensador pasa a través del filtro secador antes de entrar al dispositivo de expansión. El filtro secador es un dispositivo mecánico con una malla que impide el paso de partículas extrañas y que contienen un desecante, es decir un agente que elimina la humedad del refrigerante. Es importante no utilizar en el sistema ningún compuesto anticongelante, ya que este compuesto obstruiría el secador.

Hay que asegurarse de que no exista la presencia de vapor en el líquido refrigerante que entra al dispositivo de expansión, por lo que el subenfriamiento es importante porque asegura que una corriente continua de refrigerante líquido entrará al dispositivo.

3.3 El compresor

La principal función del compresor es aumentar la presión de evaporación hasta la presión de condensación. (la presión debe ser la de saturación a la temperatura de condensación)

El aumento de la presión produce algunas funciones secundarias:

- La elevada presión de descarga proporciona la energía necesaria para hacer que el refrigerante circule a través de la tubería y el equipo, venciendo la resistencia de fricción.
- El gran diferencial de presión creado causa la expansión súbita en el dispositivo de expansión, causando una caída de temperatura.

El compresor bombea el vapor cargado de calor del evaporador, esto provoca la baja presión que es mantenida en el evaporador por el compresor y la limitación del flujo en el evaporador ejercida por el control del refrigerante líquido del lado de entrada al evaporador. Así la temperatura y presión resultante del refrigerante saturado se ve reducida, el refrigerante hierve y se vaporiza absorbiendo calor latente a baja presión y temperatura. El vapor cargado de calor es comprimido por el compresor, incrementando la presión y la temperatura del vapor.

Generalmente, el compresor está impulsado por un motor eléctrico lubricado con aceite especial de refrigeración y está montado dentro de una carcasa de acero soldada. Los componentes eléctricos del compresor son básicamente el relevador de arranque y la sobrecarga bimetálica. La selección de los compresores se hace con el fin de que tengan la capacidad suficiente para hacer frente a la carga máxima de enfriamiento.

Todos los compresores de refrigeración requieren lubricar sus superficies en movimiento, la distribución del lubricante puede ser mediante sistemas de salpicado, de cigüeñal o por bomba de aceite independiente. Como se espera que parte del lubricante sea transportado junto con el gas de descarga, el aceite debe ser miscible con el refrigerante y compatible con el sistema diseñado para transportar el aceite a través del condensador y evaporador y devolverlo al cárter del compresor.

3.4 El dispositivo de expansión

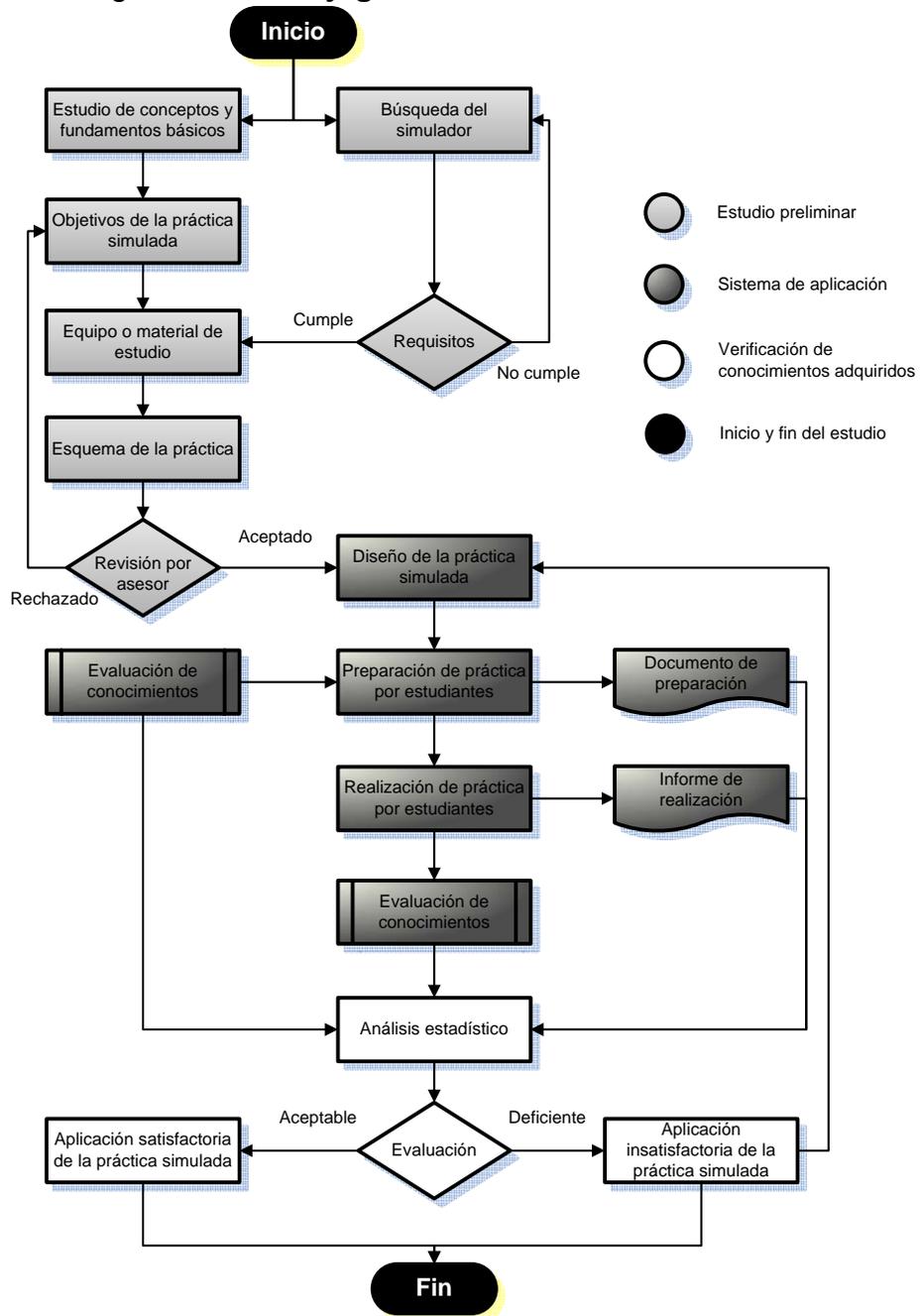
Un dispositivo de medición es un tipo de restricción que se coloca en la tubería de líquido entre el condensador y el evaporador, con el fin de producir un diferencial de presión entre el lado de alta y baja del sistema de refrigeración y también para regular el flujo de refrigerante. El tamaño de la restricción sirve para mantener una temperatura de condensación lo suficientemente alta encima del medio condensante (aire o agua) a fin de condensar el vapor de alta presión proveniente del compresor. La restricción también se coloca para mantener la temperatura de evaporación lo suficientemente baja para absorber el calor del recinto.

El dispositivo de expansión debe alimentar al evaporador el refrigerante líquido en la misma proporción en que el compresor lo bombea desde el evaporador, para evitar una sobrealimentación o subalimentación del mismo. El dispositivo de expansión debe reaccionar a un cambio en las condiciones de funcionamiento del sistema, esto es aumentando el flujo refrigerante cuando aumenta la carga térmica y disminuyéndolo cuando la carga térmica es menor.

4 METODOLOGÍA

4.1 Procedimiento de trabajo

Figura 2. Flujograma del desarrollo del estudio



4.2 Estudio preliminar

Se investigó la aplicación de un programa que simule el sistema de refrigeración por compresión, utilizándolo en el diseño propuesto, el cual cumplió con los requisitos siguientes:

- Ser un programa de uso libre y de fácil acceso.
- Utilizar los conceptos de COP.
- Poder obtener valores de temperatura y presiones en cada parte del equipo básico.

Se elaboró el estudio de los conceptos y fundamentos básicos de los sistemas de refrigeración por compresión con enfoque en Ingeniería Química, con lo que se realizó el esquema empleado, logrando la creación de una práctica simulada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

El *software* seleccionado fue el siguiente: “*CoolPack* versión 1.46 del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Dinamarca... *CoolPack* fue desarrollado como parte de un proyecto llamado *SysSim*. La Agencia para la Energía danés financió el proyecto. *CoolPack* es gratuito y puede descargarse” (Referencia electrónica 3). Las directrices utilizadas contienen los objetivos de la práctica de refrigeración y el equipo o material de estudio.

4.3 Aplicación del simulador propuesto

Tomando como base el *software* de simulación *CoolPack* y sus limitaciones en su aplicación en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, se insertó como una práctica simulada del proceso de refrigeración, el cual tomó las siguientes actividades:

1. Se efectuaron exámenes preliminares y posteriores en el uso del programa o en los conceptos empleados en los sistemas de refrigeración por compresión.
2. Los estudiantes debieron preparar un documento preliminar a la utilización de dicho programa, en forma de preparación de la práctica, en esta fase se evaluó el conocimiento del estudiante sobre la refrigeración por compresión.
3. Se realizó la práctica utilizando el simulador, objetivos y metodología que se describió en la preparación.
4. Presentó un informe final de la práctica simulada y se evaluó los conocimientos adquiridos por la realización de dicha práctica.

4.4 Verificación de los conocimientos adquiridos

Al analizar estadísticamente los datos recabados por los exámenes preliminares y posteriores de la práctica simulada de refrigeración, así como en la elaboración de los documentos de preparación e informe final, se tomó como satisfactorio la aplicación del estudio simulado de refrigeración, al cumplir con:

- Las evaluaciones realizadas en estudiantes con la aplicación de dicho estudio presentan un conocimiento mayor al 70%.
- Demostrar mediante una calificación mayor de 70%, que los trabajos de preparación e informe final contemplan un buen manejo, comprensión y conocimiento de los conceptos de refrigeración.

4.5 Datos de estudiantes durante la aplicación de la práctica

La práctica simulada se aplicó al grupo completo de estudiantes que cursaron durante el segundo semestre del año 2008 el Laboratorio de

Ingeniería Química uno, siendo la población de este laboratorio de 58 alumnos, de los cuales se obtuvo un total de 12 grupos distribuidos en 2 secciones.

Se recabaron las calificaciones de cada evaluación y documento elaborado, con el fin de analizar los resultados estadísticamente por medio del promedio, el cual representó la nota total del grupo y la desviación estándar que representó cuan dispersos se encuentran los valores de sus notas.

4.6 Alcances y límites

El desarrollo de esta práctica simulada permitió dar continuidad en el estudio y comprensión de los equipos de refrigeración por compresión en los estudiantes de Ingeniería Química, al dar un seguimiento respecto del análisis de la refrigeración. No se extendió a un desarrollo experimental debido a la falta de un equipo para el estudio de la refrigeración.

5 ESTRUCTURA DEL SOFTWARE

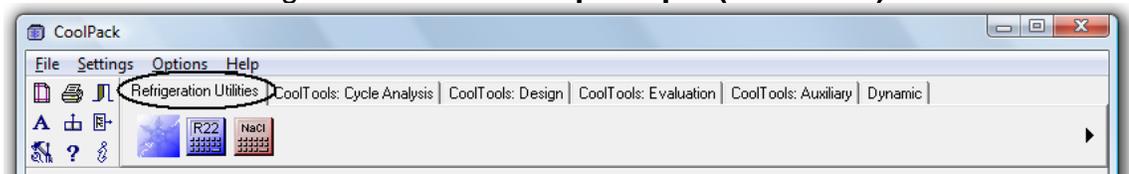
5.1 Estructura del programa principal *CoolPack*

La pantalla principal del simulador *CoolPack* presentó gran variedad de herramientas útiles en el estudio de la refrigeración de las cuáles se describen las empleadas para el diseño de la práctica:

5.1.1 Utilidades de refrigeración

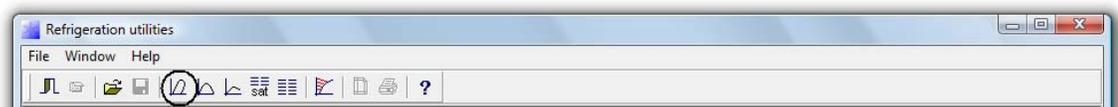
La ventana de utilidades de refrigeración, Figura 3, por medio del ícono de utilidades  graficó los diagramas más comunes, siendo estos temperatura/entropía , presión/entalpía ($\ln[P]$ -H) , y entalpía/entropía (diagrama de Mollier) . Para visualizar de una manera adecuada los ciclos de refrigeración se empleó el diagrama $\ln[P]$ -H, Figura 4, el cual desplegó las curvas de temperatura, presión, entalpía, entropía y volumen específico para diversos refrigerantes.

Figura 3. Ventana principal (utilidades)



Fuente. Simulador *CoolPack*

Figura 4. Utilidades de refrigeración



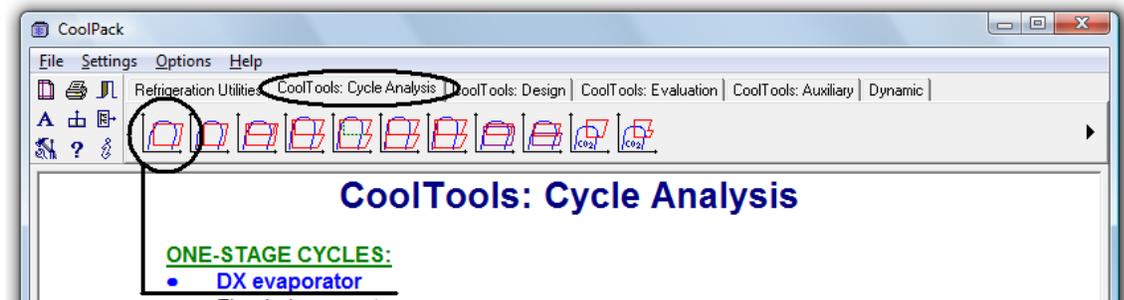
Fuente. Simulador *CoolPack*

5.1.2 Análisis de ciclo

El análisis de ciclo permitió el estudio de diversos sistemas de refrigeración, debido a que el diseño de la práctica se centró en el análisis de la refrigeración por compresión básica se utilizó la sección de *DX evaporator*,

representado por el icono .

Figura 5. Ventana principal (análisis)

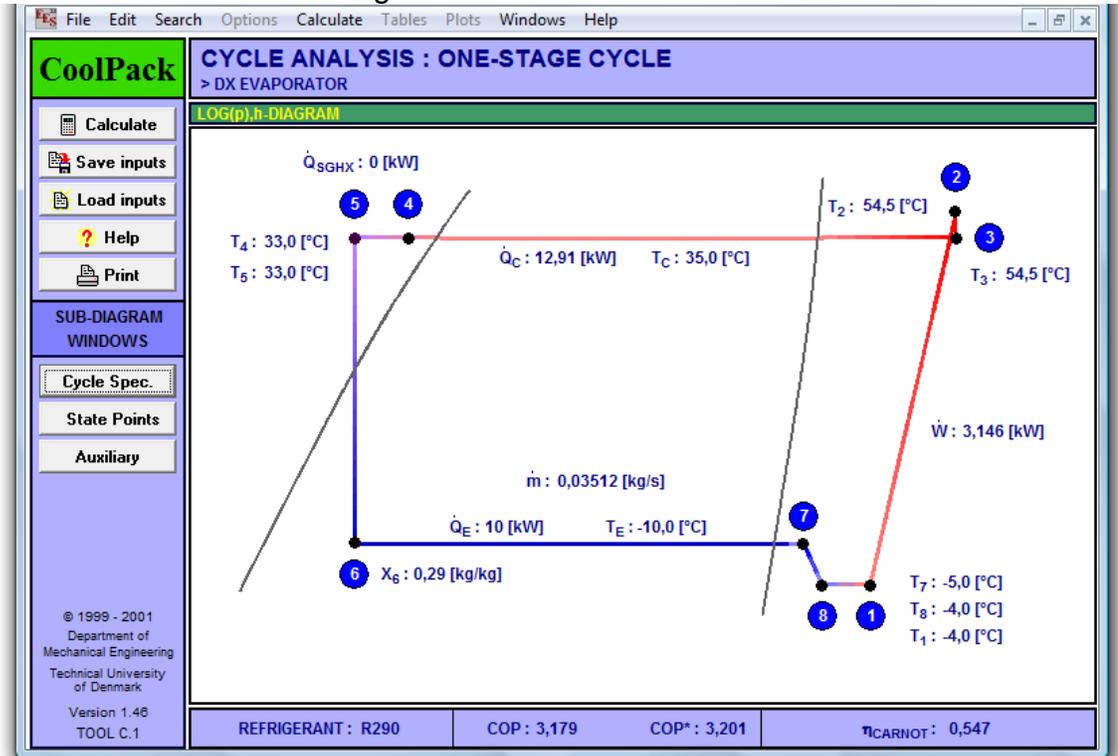


Fuente. Simulador *CoolPack*

5.2 Análisis del ciclo de una etapa

Esta ventana fue el resultado de acceder a *DX evaporator*, en la sección del análisis de ciclo, Figura 6, la cual inició con el diagrama Ln[p]-H para el refrigerante R290. Fue posible ingresar a tres sub-ventanas utilizando los iconos ubicados en la parte inferior izquierda, correspondiendo a  para especificaciones de ciclo,  para estado de puntos y  para valores auxiliares. De los anteriores se utilizó únicamente la sub-ventana de especificaciones de ciclo.

Figura 6. Análisis de ciclo



Fuente. Simulador CoolPack

5.2.1 Especificaciones de ciclo

Esta sub-ventana se estructuró en 8 secciones como lo muestra la Figura 7, siendo estas:

5.2.1.1 Niveles de temperatura

En esta sección se ingresó los valores de temperatura del evaporador y condensador y los diferenciales de temperatura creados por el sobre calentado y sub-enfriado a los cuales operó el sistema simulado, estos datos se ingresaron haciendo clic en los recuadros derechos de cada variable.

Figura 7. Especificaciones de ciclo

CYCLE SPECIFICATION			
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES	
T_E [°C]: -10,0	ΔT_{SH} [K]: 5	Δp_{SL} [K]: 0,5	
T_C [°C]: 35,0	ΔT_{SC} [K]: 2	Δp_{DL} [K]: 0,5	
		SUCTION GAS HEAT EXCHANGER	REFRIGERANT
		No SGHX	R290
CYCLE CAPACITY			
Cooling capacity \dot{Q}_E [kW]: 10	\dot{Q}_E : 10 [kW]	\dot{Q}_C : 12,91 [kW]	\dot{m} : 0,03512 [kg/s] \dot{V}_S : 17,35 [m ³ /h]
COMPRESSOR PERFORMANCE			
Isentropic efficiency η_{is} [-]: 0,7	η_{is} : 0,700 [-]	\dot{W} : 3,146 [kW]	
COMPRESSOR HEAT LOSS			
Heat loss factor f_Q [%]: 10	f_Q : 10,0 [%]	T_2 : 54,5 [°C]	\dot{Q}_{LOSS} : 0,3146 [kW]
SUCTION LINE			
Unuseful superheat $\Delta T_{SH,SL}$ [K]: 1,0	\dot{Q}_{SL} : 68 [W]	T_8 : -4,0 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 1,0 [K]
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Print"/> <input type="button" value="Help"/>		<input type="button" value="Home"/> <input type="button" value="Auxiliary"/> <input type="button" value="State Points"/>	
		COP: 3,179 COP*: 3,201	

Fuente. Simulador CoolPack

5.2.1.2 Pérdidas de presión

Se ingresaron las pérdidas en la línea de succión y en la de descarga del compresor a las cuáles operó el sistema simulado.

5.2.1.3 Intercambiador de calor de gas de succión

Debido a que el sistema simulado representó un equipo básico, esta sección se mantuvo deshabilitada.

5.2.1.4 Refrigerante

En esta sección se eligió el refrigerante que operó el sistema simulado, por medio de la pestaña en la que se desplegó los refrigerantes predeterminados por el *software*.

5.2.1.5 Capacidad del ciclo

Aquí se introdujeron los valores de carga ya sea en el evaporador o condensador y el flujo másico o volumétrico del refrigerante. Estos valores fueron colocados en el recuadro negro seleccionando la opción predefinida ubicada a la izquierda de dicho recuadro.

5.2.1.6 Rendimiento del compresor

Los valores de eficiencia isentrópica y potencia a la cual operó el compresor son incorporados en esta sección.

5.2.1.7 Pérdida de calor en compresor

Se ingresó el factor de pérdida del compresor al igual que la temperatura que descarga el refrigerante, así como el calor perdido debido por este factor.

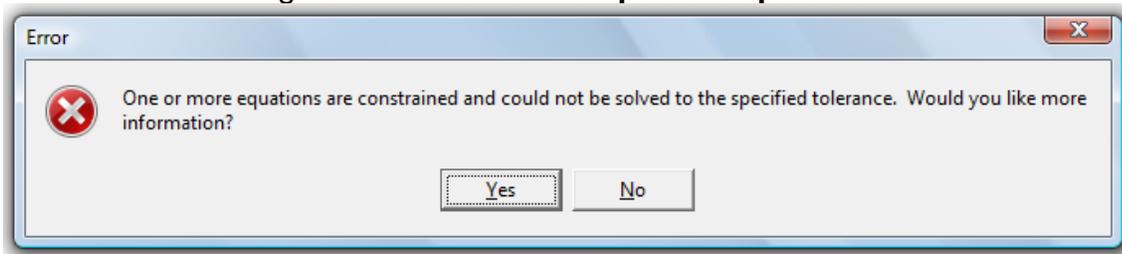
5.2.1.8 Línea de succión

Los datos a los cuáles operó la línea de succión como el calor ingresado en la succión del gas y temperaturas de ingreso se ubicaron en esta parte.

5.3 Ventanas de error

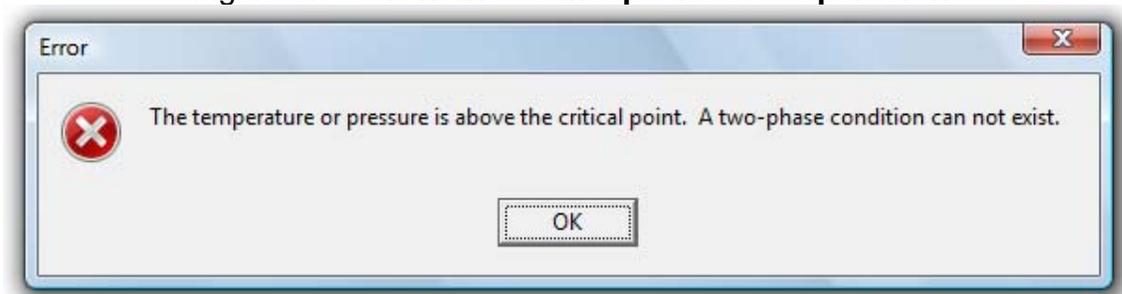
Debido a que pueden ser ingresados valores al simulador libremente, éste muestra si los datos pueden operar en un sistema real careciendo de errores o si el sistema podría funcionar a baja capacidad y/o con modificaciones, si este último caso se diera el simulador despliega la ventana representada en la Figura 8. Si el análisis no puede llevarse a cabo en un sistema real el simulador *CoolPack* despliega la ventana representada en la Figura 9.

Figura 8. **Ventana de posible operación**



Fuente. Simulador *CoolPack*

Figura 9. **Ventana de incapacidad de operación**



Fuente. Simulador *CoolPack*

6 DISEÑO DE LA PRÁCTICA

6.1 Variables dependientes e independientes del sistema de refrigeración simulado

Una variable es un valor que es cambiado durante un proceso o simulación, al cual le corresponde un resultado determinado. En este caso se tomaron las variables de temperaturas de evaporación y condensación del refrigerante, el tipo de refrigerante, carga de refrigeración y eficiencia isentrópica, que se utilizaron en el simulador *CoolPack*.

6.1.1 Efecto de las temperaturas de evaporación y condensación del refrigerante

Los datos de las temperaturas a la cual se desea el espacio refrigerado y el entorno permiten generar el primer análisis en la selección del refrigerante. El efecto de estas temperaturas se ve reflejado en el equipo a utilizar ya que “son valores de diseño y debe mantenerse un diferencial de 5 a 10°C entre el medio y el refrigerante” (Referencia electrónica 4).

6.1.2 Efecto del tipo de refrigerante

Cuando se tomó en cuenta los refrigerantes a emplear, se requirió de un análisis extenso y conocimientos adecuados de termodinámica debido a su importancia. Se consideraron las temperaturas de los espacios a refrigerar y del ambiente en el cual se operaría posiblemente un equipo real.

El cambio del refrigerante utilizando el simulador *CoolPack* afectó la temperatura de descarga del compresor, flujo másico y volumétrico del

refrigerante, potencia del compresor, calor del condensador y los valores de COP. Estos cambios surgieron cuando los valores de temperatura del evaporador y condensador, pérdidas de presión, carga del evaporador, eficiencia isentrópica, pérdidas de calor en el compresor y calor ingresado en la línea de succión se mantuvieron constantes para todo refrigerante.

6.1.3 Efecto de la carga de refrigeración

Se le llama carga a la energía que se desea extraer del medio a refrigerar, en la simulación los diversos valores de carga evaluados efectuaron variaciones en los datos de calor del condensador, flujo másico y volumétrico, potencia del compresor y los valores de COP.

6.1.4 Eficiencia isentrópica en el compresor

Este análisis es de importancia ya que un equipo real siempre presenta pérdidas y por ello su eficiencia se ve afectada. La eficiencia isentrópica es el movimiento del sistema de refrigeración por las curvas isentrópicas en un diagrama termodinámico del refrigerante, éste movimiento en el equipo afectan las características del refrigerante al pasar por el compresor y válvula de expansión, creando una medida de la desviación del equipo real a uno ideal.

Se cambió a diversos valores la eficiencia isentrópica del compresor en el simulador, dando variaciones en la potencia del compresor, temperatura en la línea de descarga del compresor, calor del condensador y en los COP.

6.2 Elaboración de los objetivos propuestos

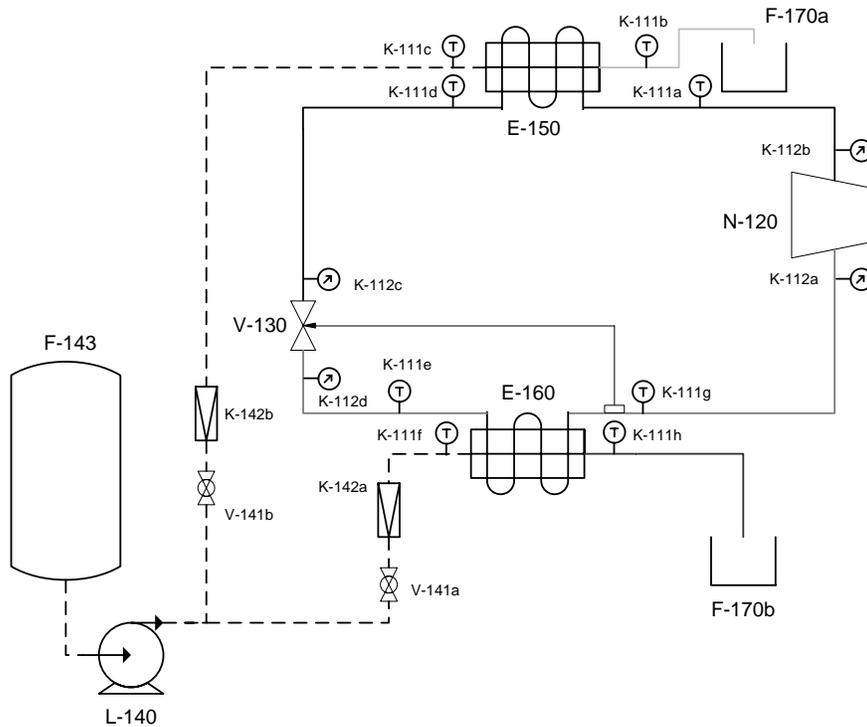
Se elaboraron los objetivos tomando en cuenta que el estudiante debió de aplicar los conocimientos previamente adquiridos, y que se le proporcionó una herramienta didáctica de gran flexibilidad como lo es el simulador *CoolPack*. Los objetivos desarrollados fueron los siguientes:

1. Evaluar los COP real y de Carnot para diversos flujos y tipos de refrigerantes, cargas de refrigeración y capacidad de compresor.
2. Evaluar la eficiencia del sistema dentro del concepto de bomba de calor.
3. Estudiar el efecto de la eficiencia Isentrópica en los sistemas de refrigeración.
4. Comparar el modelo computarizado con un sistema real comercial y doméstico.

6.3 Diagrama del equipo propuesto

Se presentó de manera gráfica un equipo físico y que complementó la práctica simulada de refrigeración por compresión en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

Figura 10. Diagrama del equipo propuesto de refrigeración por compresión



Lista de equipamiento	
Texto mostrado	Descripción
E-150	Condensador
E-160	Evaporador
K-111	Termómetro
K-112	Manómetro
K-142	Rotámetro
L-140	Bomba
N-120	Compresor
F-143	Depósito de agua
F-170	Depósito de líquido
V-130	Válvula termostática de expansión
V-141	Válvula de globo

Lista de canalizaciones	
Tipo de la línea	Descripción
-----	Línea de agua
—————	Línea de refrigerante a alta presión
—————	Línea de refrigerante a baja presión
—————	Línea de agua refrigerada
—————	Línea de agua del condensador

6.4 Operación del simulador

Se definió el procedimiento utilizado durante la operación del simulador *CoolPack*, el cual correspondió a los siguientes pasos.

1. Cargar el programa principal *CoolPack*
2. En la pestaña *Cycle Análisis* buscar el icono que corresponde a *DX evaporador*, ingresar haciendo clic en el icono.
3. Aparecerá una ventana nueva nombrada *pack_1* en la cual debe aceptar su creación haciendo clic en el icono *OK*.
4. Emergerá la nueva ventana iniciando con la representación gráfica del ciclo de refrigeración por compresión real.
5. Entrar en *Cicle Specification* utilizando los iconos izquierdos inferiores que aparecen en la ventana principal de *pack_1*.
6. Las entradas de datos se encuentran situadas en las partes izquierdas de cada sub-ventana marcadas con un recuadro negro, se hace clic en cada recuadro y se varia el valor.
7. Al variar el valor se elige el tipo de dato cambiado, se accede haciendo clic en los recuadros izquierdos en los que aparecen las opciones predefinidas.
8. Fijar pérdidas de presión por el sistema de refrigeración, encontradas en la ventana *Pressure Losses*,
9. Fijar valores de sobre calentado y sub-enfriado utilizando las entradas de valores de $\Delta T_{SH}[K]$ y $\Delta T_{SC}[K]$, ubicadas en la ventana *Temperatura Levels*,
10. Establecer temperaturas en el condensador y evaporador del sistema de refrigeración simulado utilizando las entradas de valores de $T_E[^\circ C]$ y $T_C[^\circ C]$, ubicadas en la ventana *Temperatura Levels*,

11. No se empleará en la simulación un intercambiador de calor de gas de succión, por lo que en la sección de *suction gas heat exchanger* debe de estar visible el icono “No SGHX”.
12. Fijar el valor de factor de pérdidas de calor por el compresor f_Q en la ventana *compressor heat loss*.
13. Establecer un valor de entrada de calor en la línea de succión \dot{Q}_{SL} la cual se ubica en la sub-ventana *suction line*.
14. Elegir un refrigerante en la sub-ventana de *Refrigerant*, los cuales han sido mencionados en el diseño experimental.
15. Variar las cargas de refrigeración \dot{Q}_E en la sub-ventana de *cycle capacity* con los valores determinados por el diseño experimental.
16. Tomar los valores requeridos por la tabla de toma de datos.
17. Cambiar la eficiencia isentrópica n_{IS} ubicada en la sub-ventana *compressor performance* con los valores determinados por el diseño experimental, dejando estable una carga de refrigeración.
18. Tomar los valores requeridos por la tabla de toma de datos.
19. Realizar los pasos 15 a 18 variando el refrigerante del paso 14.

6.5 Toma de resultados

La toma de datos fue el resultado de un análisis previo del sistema simulado de refrigeración por medio del diseño experimental, el cual se elaboró durante la preparación de la práctica (Ver Apéndice 2, A2.4).

Tabla I. Datos para bomba de calor

		Eficiencia Isentrópica							
		$\overset{\circ}{Q}_{E\ 1}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 2}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 3}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 4}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 5}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 6}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 7}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 8}$
Refrigerante	R ₁								
	R ₂								
	R ₃								
	R ₄								

Fuente. Apéndice 2 preparación de la práctica simulada de refrigeración por compresión, A2.4.

Tabla II. Datos para primer objetivo

		Refrigerante							
		R ₁		R ₂		R ₃		R ₄	
Carga de Refrigeración	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 1}$								
	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 2}$								
	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 3}$								
	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 4}$								
	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 5}$								
	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 6}$								
	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 7}$								
	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 8}$								

Fuente. Apéndice 2 preparación de la práctica simulada de refrigeración por compresión, A2.4.

Tabla III. Datos para tercer objetivo

		Refrigerante							
		R ₁		R ₂		R ₃		R ₄	
Eficiencia Isentrópica	$n_{IS\ 1}$								
	$n_{IS\ 2}$								
	$n_{IS\ 3}$								
	$n_{IS\ 4}$								
	$n_{IS\ 5}$								
	$n_{IS\ 6}$								
	$n_{IS\ 7}$								
	$n_{IS\ 8}$								

Fuente. Apéndice 2 preparación de la práctica simulada de refrigeración por compresión, A2.4.

6.6 Datos a tomar en cuenta en evaluaciones

Se evaluó los fundamentos y requerimientos mínimos de conocimiento en los sistemas de refrigeración por compresión, tales como:

- Nivel de comprensión del concepto de refrigeración.
- Componentes principales del equipo de refrigeración.
- Tipos de refrigerantes y sus características

- Funcionamiento básico del equipo de refrigeración por compresión.
- Concepto de Coeficiente de Operación (COP).
- Aplicación de Operaciones Unitarias en refrigeración.
- Efecto de las variables principales en el sistema de refrigeración.

7 APLICACIÓN DEL SIMULADOR COOLPACK

7.1 Aplicación del diseño de la práctica

Se tomó en consideración los aspectos mencionados en el capítulo 6, del cual fueron seleccionados los objetivos y metodología concerniente a la elaboración de las gráficas de COP's contra carga de refrigeración (Figura 11), y flujo másico contra carga de refrigeración (Figura 12).

Se empleó el *software CoolPack* descrito en el capítulo 5, del cual se utilizó la ventana de análisis de ciclo para la obtención de los resultados colocados en la Tabla IV.

7.2 Desarrollo de la aplicación

La práctica se desarrolló con base a los aspectos definidos en el Apéndice 2, el cual representa la manera en como se operó el simulador, al igual que los valores que deben permanecer constantes durante la simulación de la refrigeración, dichos valores constituyeron los aspectos que permiten al sistema asemejarse a un equipo real.

El objetivo que se elaboró parcialmente fue el descrito en la sección 6.2, el cual es:

1. Evaluar los COP real y de Carnot para diversos flujos y tipos de refrigerantes, cargas de refrigeración y capacidad de compresor. Para ello los valores establecidos son los seleccionados en el Apéndice 2, A2.4.6 (Se colocó un valor de 0.7 para la eficiencia isentrópica del compresor).

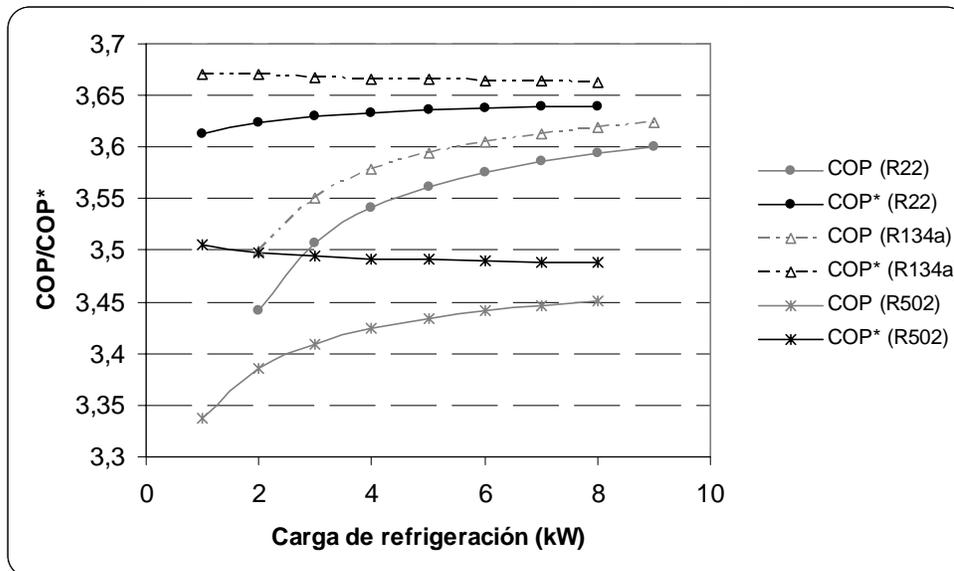
7.3 Datos desplegados por el simulador

Tabla IV. Resultados al utilizar *CoolPack*

Q_E (kW)	Refrigerante								
	R22			R134a			R502		
	COP	COP*	\square (kg/s)	COP	COP*	\square (kg/s)	COP	COP*	\square (kg/s)
2	3,441	3,613	0,0117	3,5	3,67	0,0127	3,338	3,505	0,0177
3	3,507	3,624	0,017	3,551	3,67	0,019	3,385	3,498	0,0266
4	3,541	3,63	0,0234	3,578	3,667	0,0254	3,409	3,494	0,0355
5	3,562	3,633	0,0293	3,594	3,666	0,03127	3,424	3,492	0,0444
6	3,576	3,636	0,03512	3,605	3,665	0,0381	3,434	3,491	0,0533
7	3,586	3,638	0,0409	3,613	3,664	0,0444	3,441	3,49	0,06215
8	3,594	3,639	0,0468	3,619	3,664	0,0507	3,446	3,489	0,071
9	3,6	3,64	0,05268	3,623	3,663	0,0571	3,451	3,489	0,0799

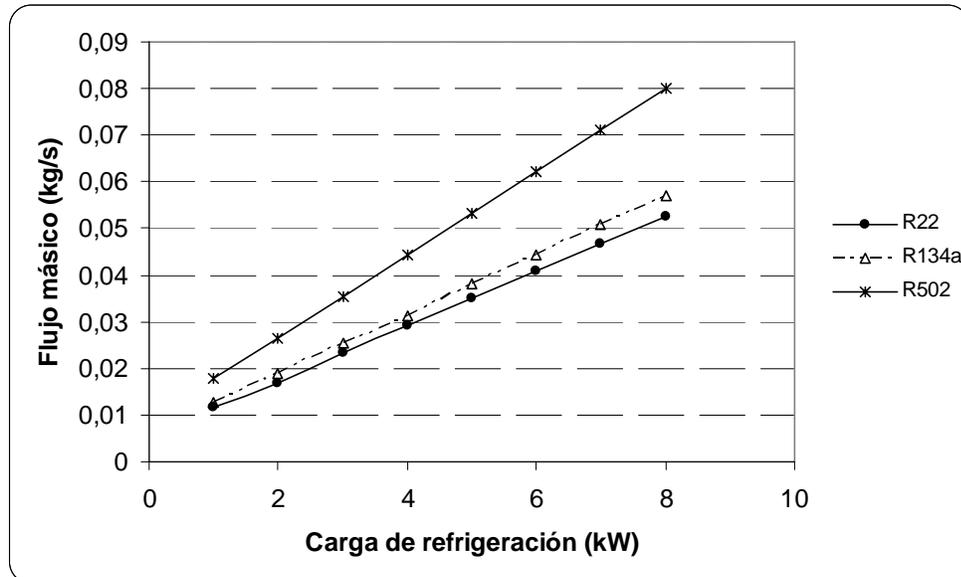
Fuente. Simulador *CoolPack*

Figura 11. COP's contra carga de refrigeración



Fuente. Simulador *CoolPack*

Figura 12. Flujo másico contra carga de refrigeración



Fuente. Simulador *CoolPack*

7.4 Discusión de datos desplegados por el simulador *CoolPack*

La Tabla IV muestra los datos que fueron tomados del simulador *CoolPack* durante la aplicación de la metodología para la obtención parcial del objetivo descrito anteriormente.

Los diversos refrigerantes al igual que la carga de refrigeración afectan grandemente los valores de los coeficientes de operación, éste efecto se evidencia en la Figura 11, de la que resaltan las diferencias entre los distintos coeficientes de operación ya que el coeficiente de Carnot (COP^*), muestra curvas muy superiores a las generadas por los datos del coeficiente real (COP), con esto se demuestra que el simulador ha representado de una manera adecuada a un sistema real aplicado ya sea en la industria o a nivel doméstico. De estas curvas el mejor refrigerante es el 134a, debido a que presenta un aumento de los valores de COP a comparación de los otros, es por ello y sus

características, tanto fisico-químicas como económicas que hacen de este refrigerante uno de los más utilizados.

El empleo de un refrigerante para cierta carga de refrigeración es representado por la Figura 12, en la cual se destaca que tanto para un aumento de carga existe un aumento del flujo másico del refrigerante, demostrando que el refrigerante es tan solo el medio por el cual es transportado el calor extraído del espacio a refrigerar, y al aumentar la carga se requiere el incremento de éste, siendo factores proporcionales entre sí. Debido a que el costo del refrigerante es factor a considerar en sistemas de refrigeración, es de denotar que el refrigerante R502 es un mal refrigerante ya que posee bajos valores de COP y se necesita una gran cantidad del refrigerante para operar.

8 DISCUSIÓN DE LA APLICACIÓN

Los alcances evaluados por medio del *software CoolPack* reflejaron que el simulador ha sido de fácil utilización en la determinación de los objetivos propuestos, gracias a que desplegó los resultados rápidamente sin la necesidad de realizar grandes cálculos. Por lo que se consideró que el programa cumplió de manera satisfactoria los objetivos planteados como lo refleja la Figura 15 (Apéndice 3), exponiendo que un 58% de los estudiantes opinaron que sin gran dificultad lograron cumplir los objetivos planteados, el 35% expresó que existieron algunas deficiencias pero estas fueron superadas posteriormente, un bajo valor del 7% expresó que al implementar el programa *CoolPack* lograron difícilmente los objetivos, al igual cabe resaltar que un 0% opinó que el simulador no permite cumplir con los objetivos. De lo anterior se destaca que en su gran mayoría el estudiante está satisfecho con los objetivos de la práctica simulada y el empleo del *software CoolPack* en la obtención de estos.

Referente a la metodología empleada en la práctica simulada de refrigeración por compresión para el programa *CoolPack*, así como de las diversas actividades realizadas durante la práctica, en la Figura 16 (Apéndice 3), se observa que satisfactoriamente la metodología ha sido de gran utilidad, al referir con un 44% una alta eficiencia y un 38% de eficiencia media. Esta metodología estuvo basada en dos partes, metodología en el empleo del simulador y metodología de la práctica simulada, la diferencia entre estas dos es en que la primera permitió la utilización adecuada del simulador en la determinación de los resultados y por ende de los objetivos de la práctica. La segunda metodología hace mención de las directrices que se emplearon en la enseñanza de la refrigeración por compresión durante la práctica, la cual se integró por las actividades realizadas en la elaboración de trabajos de preparación, informes finales y evaluaciones preliminares y posteriores.

En dicha gráfica únicamente el 18% de los estudiantes cree que la metodología que utilizaron es de tipo básica y debe presentar mejoras.

La continuidad del estudio de la refrigeración que permitió la práctica simulada es de importancia, debido a esto fue implementada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, al ser elaborada por los estudiantes quienes opinaron que el 33% aplicó una alta cantidad de conocimientos y el 54% utilizó medianamente éstos, dando valores satisfactorios en la implementación de sus conocimientos. Dejando tan solo un 9% en la aplicación básica y el 4% en aplicación deficiente, estos valores reflejan que hace falta un complemento físico que permita el empleo de sus conocimientos y mayor comprensión de la refrigeración. Estos datos son extraídos de la Figura 17 (Apéndice 3).

La evaluación de los sistemas de refrigeración en las etapas de condensación y evaporación se realizó por medio de sus respectivos Coeficientes de Operación (COP), los cuáles permitieron conocer de mejor manera la utilización y comportamiento del gas refrigerante en los sistemas de refrigeración.

Por lo anterior la comprensión de los COP por los estudiantes durante la realización de la práctica simulada, y de las etapas de evaporación y condensación se reflejó en la Figura 18, Figura 19 y Figura 20 (Apéndice 3).

- Figura 18 (Apéndice 3). Esta figura permitió conocer que tipo de comprensión han alcanzado los estudiantes al aplicar el simulador dejando ver que el 15% comprendió altamente el concepto de COP y sus diversas variantes y variables, a un 56% de estudiantes que comprendió medianamente el concepto de COP pero que aun presentan algunas complicaciones. Se tuvo a un 25% de alumnos con la aplicación básica

de sus conocimientos necesitando de otro apoyo para su mejora en el tema, el 4% de alumnos insatisfechos con la aplicación de sus conocimientos es debida a que prefieren la operación de un equipo físico para su aplicación de conocimientos.

- Figura 19 (Apéndice 3). Se demuestra que los alumnos aplicaron altamente sus conocimientos referentes a la etapa de condensación de gases refrigerantes a un 4% y de un 62% medianamente, por lo que se les permitió tener una buena comprensión del tema. Un 30% refleja que aplicaron bajos conocimientos de la condensación durante la práctica y que el 4% de estudiantes estuvo inconforme con la aplicación de sus conocimientos durante la realización de la práctica simulada.
- Figura 20 (Apéndice 3). El conocimiento que aplicaron referente a la evaporación de gases refrigerantes es de gran importancia por ser el medio en que el sistema de refrigeración genera la disminución de temperatura. Durante la inserción de la práctica simulada el 10% de estudiantes expresó satisfacción al aplicar sus conocimientos por medio del simulador, un 68% presentó una aplicación de tipo media, permitiendo que el estudio fuera realizado con pocas deficiencias. El 22% reveló que sus conocimientos han sido aplicados en un nivel básico y que requieren de un equipo o herramienta que les permita comprender de mejor manera la etapa de evaporación, con un valor del 0% de alumnos que demostraron insatisfacción en el empleo de sus conocimientos, el cual hace referencia a que la utilización del simulador ha sido la adecuada.

De los anteriores datos se refirió a que la comprensión y aplicación de los conocimientos en los alumnos tuvo un aumento durante la realización de la

práctica simulada de refrigeración, utilizando el *Software CoolPack*. Dando seguimiento en los estudios de refrigeración, al haber evaluado un sistema de refrigeración en las etapas de condensación y evaporación por medio de sus respectivos COP.

La verificación de los conocimientos adquiridos y aplicados se reflejada en la Tabla X (Apéndice 3), la cual se conformó por medio de ponderaciones de trabajos y evaluaciones realizadas durante las actividades de la práctica, que correspondieron a parte de la metodología de está y al nivel alcanzado por los estudiantes. Comprobando que los promedios cumplieron satisfactoriamente con el requisito de ser mayores al 70% de la nota, con lo que se demostró que tanto en las evaluaciones preliminares como finales se aplicó y adquirió los conocimientos de refrigeración.

Los trabajos de preparación y de informes finales demostraron con una nota mayor al 70% que el estudiante aplicó correctamente el simulador en la obtención de sus resultados y que suplió la información adecuada, analizó e interpretó correctamente estos resultados, destacando este último punto debido a que en los informes finales presentan una nota promedio de 81.6%.

Los bajos valores en las desviaciones estándar en cada trabajo y evaluación de la Figura 22 (Apéndice 3), hacen referencia a que gran parte de los alumnos evaluados tuvieron una nota no muy lejana al valor medio, permitiendo generalizar al utilizar los promedios para la superación del 70% necesario para aprobar los objetivos y metodología de la práctica simulada de refrigeración.

La Figura 23 (Apéndice 3), hace referencia a la necesidad de implementar un equipo físico a manera de continuar con la enseñanza de la refrigeración

por comprensión, al mostrar que un 96% del alumno en el que se aplicó el simulador opinó que si es necesario el equipo físico y tan solo un 4% del alumnado que se encontró satisfecho con la aplicación del simulador como práctica. Apoyando estos datos, se mencionan los resultados anteriormente expuestos en las gráficas de aplicación de conocimientos, de las que se mencionó una baja o deficiente capacidad de aplicación por medio del simulador el cual puede ser apoyado por un equipo físico.

CONCLUSIONES

1. El simulador *CoolPack* es una herramienta adecuada en la enseñanza de sistemas de refrigeración.
2. Los objetivos de la práctica simulada permitieron continuar correctamente con el estudio de la refrigeración por compresión.
3. La metodología utilizada es adecuada en la implementación de la práctica simulada por compresión.
4. La evaluación de los Coeficientes de Operación (COP), se llevó a cabo correctamente por medio del simulador *CoolPack*.
5. Se aplicó correctamente los conocimientos adquiridos previamente por los alumnos en el estudio de la evaporación de gases refrigerantes al realizar la práctica simulada.
6. El estudio de la condensación de gases refrigerantes utilizó adecuadamente los conocimientos previamente adquiridos de cada estudiante.
7. La implementación de la práctica simulada se tomó como exitosa al presentar promedios mayores del 70% en las notas de evaluaciones y trabajos realizados durante la práctica.
8. Una pequeña parte de los alumnos expuso un déficit en la aplicación de conocimientos al emplear el simulador como práctica de refrigeración.

RECOMENDACIONES

1. Debe complementarse la práctica simulada de refrigeración por compresión con un equipo físico.
2. De no implementar la práctica simulada de refrigeración por compresión, continuar con el estudio de la refrigeración realizando un análisis paralelo durante el transcurso del laboratorio.
3. Estudiar el efecto del sobrecalentamiento y sub-enfriamiento de los gases refrigerantes utilizando el *software CoolPack*.
4. Realizar un estudio separado respecto de las pérdidas en los sistemas de refrigeración empleando las opciones del simulador *CoolPack*.
5. Evaluar el efecto de un intercambiador de calor de gas de succión en los valores de COP.
6. Analizar sistemas de refrigeración en cascada, empleando el programa *CoolPack*.
7. Utilizar los datos desplazados por el simulador *CoolPack*, al evaluar posibles diseños de equipos refrigerados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cengel Yunus A. y Michael A. Boles. **Termodinámica**. 4ta. Edición. Editorial Continental. México 1994. Pág. 334-335, 548-555.
2. Jennigs, Burgués H. **Aire Acondicionado y Refrigeración**. 1ra. Edición, 18va. Reimpresión. Editorial McGraw-Hill. México 2003. Pág. 551, 567-568.
3. Pita, Edward G. **Acondicionamiento de aire, principios y sistemas**. 1ra. edición. Editorial Continental. México 1994. Pág. 28, 354-364.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Air Liquide. **Propiedades de refrigerantes.** Enero 2009.
<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp>. (21 febrero 2009).
2. Gas Server. **Documentos de refrigerantes.** 2007. <http://www.gas-servei.com/docs/tecnicas/ref/R403B.pdf>. (21 febrero 2009).
3. Jakobsen, Arne. y otros. **About CoolPack.** 23 marzo 2004.
<http://www.et.web.mek.dtu.dk/CoolPack/UK/About.html> (2 agosto 2008).
4. Montes, Pablo y Otros. **Modelado de sistemas de refrigeración por compresión de vapor.** <http://www.imst-art.com/ficherosdesc/CongresoIngMecanica2000.pdf> (2 agosto 2008).
5. Pineda Pizarro, Lister. **Simulación de Procesos.** 3 diciembre 2007.
http://simulacioniq.blogspot.com/2007/12/simuladores-de-procesos_03.html. (9 septiembre 2008).
6. Sin autor. **Ciclos de refrigeración por compresión**
<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/Termodinamica/PDFs/Capitulo14.pdf> (2 agosto 2008).

BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, Edwin P. **Audels Refrigeration and Air Conditioning Guide**. 1ra. edición. Editorial Theo Audel & CO. United States 1953.
2. Galindo Arana, Amilcar René. **Descripción y análisis de equipos y refrigerantes usados en la refrigeración industrial**. Trabajo de Graduación: Universidad de San Carlos de Guatemala. 2002.
3. Schweitzer, Gerald. **Curso Completo de Aire Acondicionado**. 1ra. edición. Editorial Glem S. A. Argentina 1989.
4. Smith, J.M. y otros. **Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química**. 6ta edición. Editorial McGraw-Hill. México 2003.
5. Whitman, William C. y William M. Johnson. **Tecnología de Refrigeración y Aire Acondicionado**. 2da. edición. Tomo 2. Editorial Marcombo. España 1998.

APÉNDICES

Apéndice 1	59
A1.1 ¿Qué es una preparación de práctica?	59
A1.2 Contenido mínimo de un trabajo de preparación.....	59
A1.2.1 Objetivos de la práctica	60
A1.2.2 Procedimiento en la operación del equipo o simulador	61
A1.2.3 Precauciones especiales en la utilización del equipo (no aplica a simuladores).....	61
A1.2.4 Definir posibles arreglos necesarios en el equipo (no aplica a simuladores).....	61
A1.2.5 Definir número de corridas a utilizar, justificando la elección	61
A1.2.6 Diseño experimental.....	62
A1.2.7 Ecuaciones y procedimiento, para la obtención de los resultados.....	62
A1.2.8 Tabla de toma de datos.....	62
A1.2.9 Equipo de medición requerido	62
A1.2.10 Propiedades fisico-químicas de los fluidos a utilizar.....	63
A1.2.11 Diagrama del equipo	63
Apéndice 2	65
A2.1 Objetivos de la práctica	65
A2.2 Procedimiento en la operación del equipo o simulador	65
A2.3 Definir número de corridas a utilizar, justificando la elección	67
A2.4 Diseño Experimental	67
A2.4.1 Descripción del problema	67
A2.4.1.1 Definición de objetivos	68
A2.4.1.2 Preguntas referentes a la investigación	68

A2.4.2	Justificación.....	69
A2.4.3	Descripción de variables involucradas	70
A2.4.3.1	Variables dependientes	70
A2.4.3.2	Variables independientes.....	70
A2.4.3.3	Factores perturbadores.....	71
A2.4.4	Selección de variables de respuesta o salida	71
A2.4.5	Elección del diseño experimental.....	71
A2.4.6	Diseño de tratamientos	74
A2.4.7	Diseño de control de error.....	74
A2.4.8	Planteamiento de hipótesis	75
A2.5	Ecuaciones y procedimiento, para la obtención de los resultados	75
A2.6	Tabla de toma de datos	76
A2.7	Equipo de medición requerido.....	76
A2.8	Propiedades fisico-químicas de los fluidos a utilizar	76
A2.8.1	Propiedades del refrigerante R717	76
A2.8.2	Propiedades del refrigerante R134a	78
A2.8.3	Propiedades del refrigerante R 22	79
A2.8.4	Propiedades del refrigerante R502	81
A2.9	Diagrama del equipo	81
Apéndice 3	83
Apéndice 4	89
A4.1	Notas de alumnos de laboratorio de Ingeniería Química Uno sección N, de segundo semestre de 2008	89
A4.2	Notas de alumnos de laboratorio de Ingeniería Química Uno sección P, de segundo semestre de 2008	90
Apéndice 5	91
A5.1	Aplicación del simulador	91
A5.2	Conocimientos aplicados	93
A5.3	Continuidad de mejora por una práctica experimental	95

APÉNDICE 1

Preparación de práctica

A1.1 ¿Qué es una preparación de práctica?

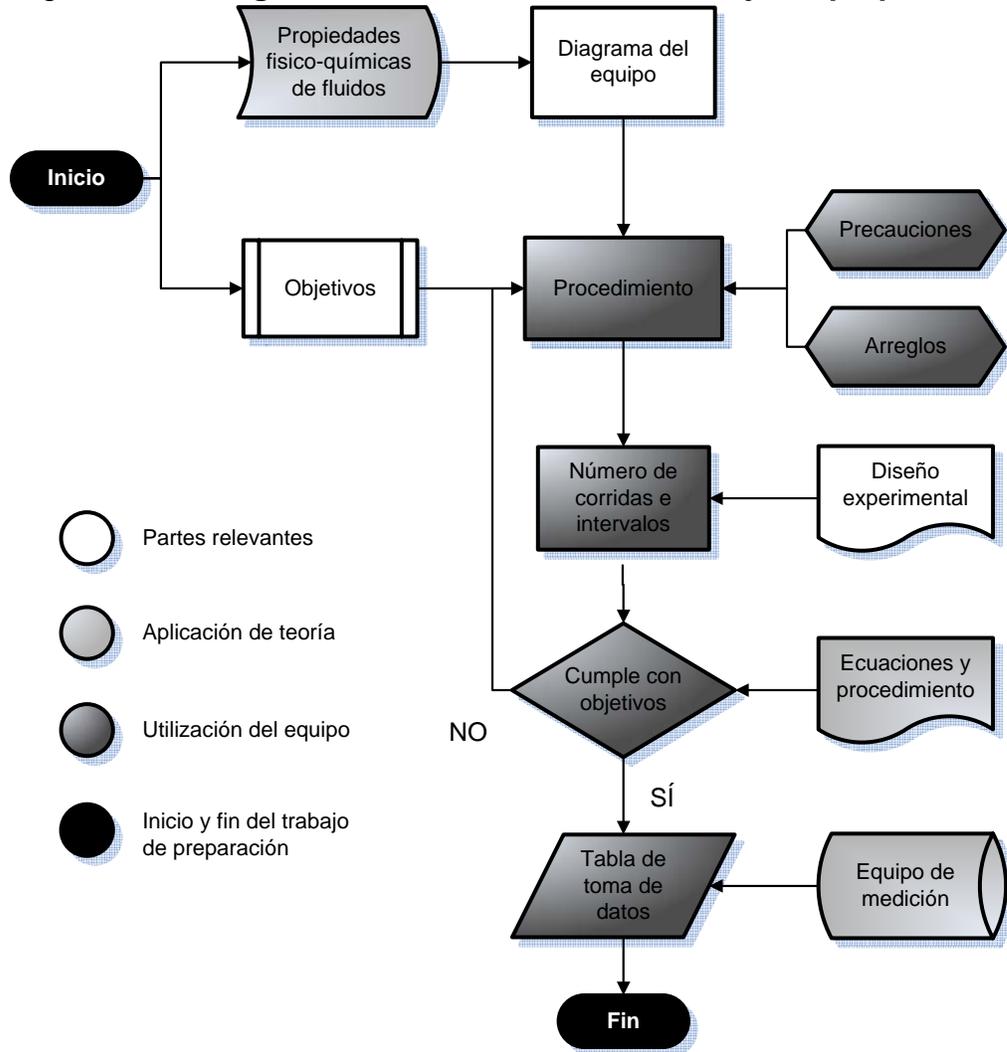
Un trabajo de preparación es un documento elaborado por el estudiante, previo a la realización de la práctica, por lo cual el estudiante debe tener claro los objetivos de la práctica, así como los conocimientos teóricos que aplicará. Tales conocimientos se encuentran estructurados con los datos a obtener del equipo o simulador, el procesamiento matemático de los datos y aplicación de la teoría adquirida en la interpretación de sus datos.

La preparación de una práctica es la elaboración de las directrices a emplear, permitiéndole al estudiante disponer de una herramienta de apoyo durante la realización de la práctica, así como de la realización de su informe final (Reporte de práctica).

A1.2 Contenido mínimo de un trabajo de preparación

Debido a la importancia de los trabajos de preparación, estos deben estar estructurados con un contenido mínimo de temas o puntos a tratar, los cuáles son:

Figura 13. Diagrama del desarrollo de un trabajo de preparación



A1.2.1 Objetivos de la práctica

Los objetivos de una práctica representan el motivo por el cual se realiza el trabajo o desarrollo de la práctica, al plantear y limitar su realización, sin ellos no existe el porqué de tales, es por esto su vital importancia, estos deben estar claramente fijados en la mentalidad del estudiante durante la realización de la práctica.

A1.2.2 Procedimiento en la operación del equipo o simulador

Toda práctica lleva inmersa un procedimiento, el cual permitirá que el estudiante opere adecuadamente su equipo o simulador, ya que sin este conocimiento no será capaz de obtener los datos necesarios, dañaría el equipo y pondría en peligro su bienestar. Éste procedimiento puede ser enlistado o graficado como un diagrama de bloques.

A1.2.3 Precauciones especiales en la utilización del equipo (no aplica a simuladores)

En la operación de equipos de enseñanza, al estudiante le es permitido operar el equipo, correspondiéndole tomar las precauciones necesarias para evitar cualquier percance.

A1.2.4 Definir posibles arreglos necesarios en el equipo (no aplica a simuladores)

El estudiante debe verificar la correcta funcionalidad del equipo a operar, de este análisis conocerá las deficiencias y/o averías de su unidad, las cuáles pueden causarle errores en la toma de datos.

A1.2.5 Definir número de corridas a utilizar, justificando la elección

La calidad de resultados y disminución de errores deben ser tratados con precisión, es por este motivo que el estudiante conoce el porqué de la cantidad de repeticiones e intervalos utilizados durante la toma de datos.

A1.2.6 Diseño experimental

El conocimiento y análisis de las variables con mayor influencia sobre los resultados disminuye los errores, permitiendo que se realicen de mejor manera la toma de datos.

A1.2.7 Ecuaciones y procedimiento, para la obtención de los resultados

Aquí es plasmada la teoría fundamentada por medio de las ecuaciones utilizadas, con el fin de determinar de mejor manera los resultados correspondientes a los objetivos propuestos. Estas ecuaciones dan a conocer cuáles son los datos relevantes de los equipos, por lo que evita un alto procesamiento de información innecesario.

A1.2.8 Tabla de toma de datos

Esta sección del trabajo de preparación permite administrar ordenadamente los datos con sus diversas repeticiones y/o intervalos obtenidos por los equipos de medición.

A1.2.9 Equipo de medición requerido

Puesto que los datos son adquiridos de medidores colocados en el equipo, le corresponde al estudiante conocer cuáles son estos medidores y su respectivo funcionamiento.

A1.2.10 Propiedades fisico-químicas de los fluidos a utilizar

El conocimiento de las propiedades en los fluidos empleados permite manipular adecuadamente el equipo y entender el porqué de su utilización.

A1.2.11 Diagrama del equipo

Parte fundamental del trabajo de preparación ya que brinda una vista esquematizada del funcionamiento de la unidad en estudio, así como de sus partes más relevantes dejando ver cuán importante es la operación adecuada de este. Da a conocer la ubicación de los medidores a emplear y permite que el estudiante aplique sus conocimientos de ingeniería química en la representación gráfica del equipo.

APÉNDICE 2

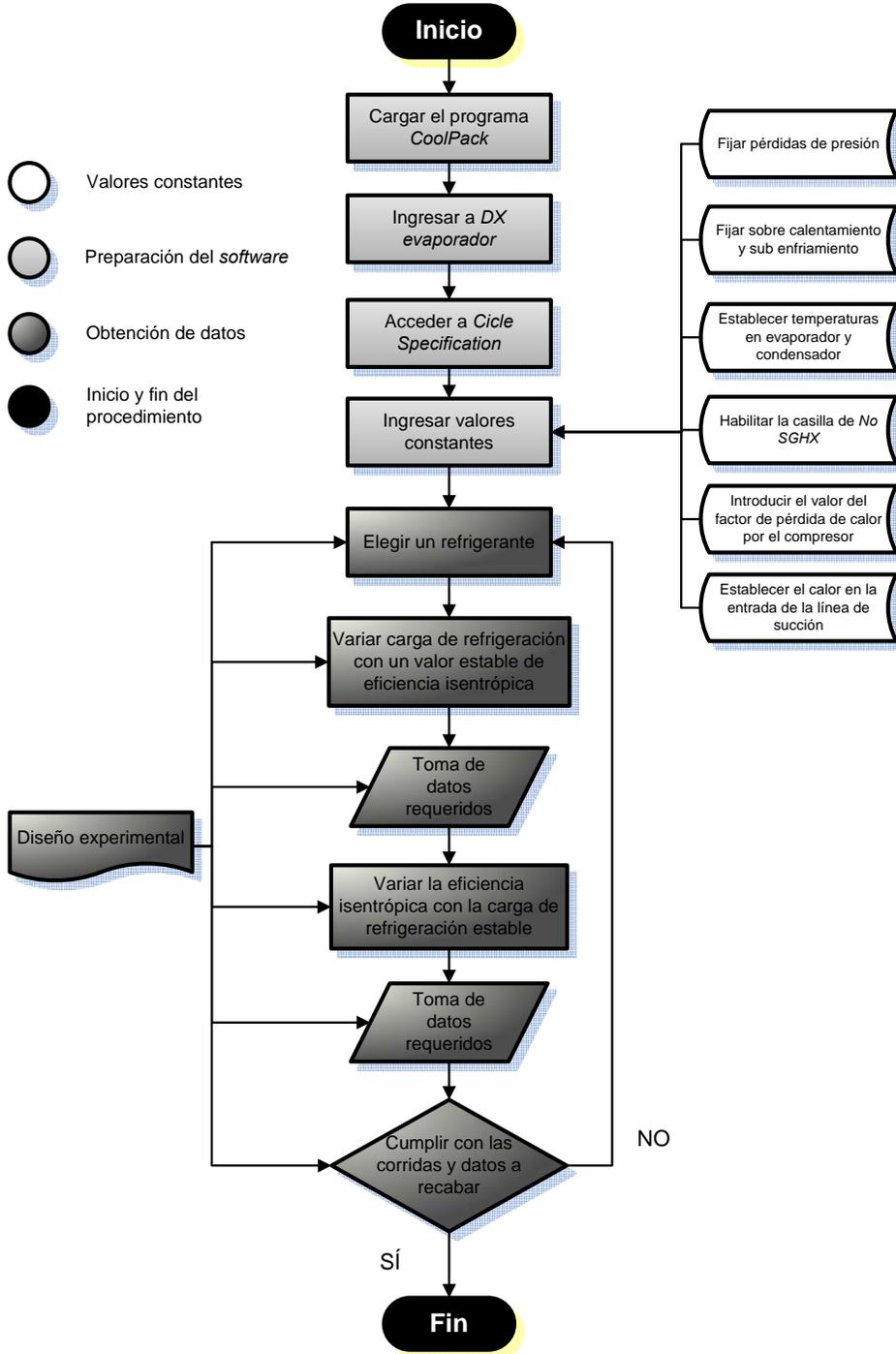
Preparación de la práctica simulada de refrigeración por compresión

A2.1 Objetivos de la práctica

1. Evaluar los COP real y de Carnot para diversos flujos y tipos de refrigerantes, cargas de refrigeración y capacidad de compresor.
2. Evaluar la eficiencia del sistema dentro del concepto de bomba de calor.
3. Estudiar el efecto de la eficiencia Isentrópica en los sistemas de refrigeración.
4. Comparar el modelo computarizado con un sistema real comercial y doméstico.

A2.2 Procedimiento en la operación del equipo o simulador

Figura 14. Procedimiento en la utilización del simulador *CoolPack*



Fuente. 6 DISEÑO DE LA PRÁCTICA, 6.4 Operación del simulador

A2.3 Definir número de corridas a utilizar, justificando la elección

Utilizando la siguiente ecuación estadística se determina la cantidad de corridas a evaluar:

Ecuación 4.

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 PQ}{E^2}$$

Donde:

N = Número de corridas

$Z_{\alpha/2}$ = Confiabilidad

P = Probabilidad de éxito

Q = Probabilidad de fracaso

E = Error estimado

A manera de obtener resultados satisfactorios con un mínimo error y poder generar gráficas y análisis matemáticos adecuados, se emplea un valor de $Z_{\alpha/2}=1.96$; P=95%; Q=5% y E=15%, los cuáles se sustituyen en la ecuación anterior para obtener el número de corridas a realizar.

$$N = \frac{1.96^2 * 0.95 * 0.05}{0.15^2} = 8.11 \approx 8$$

A2.4 Diseño Experimental

A2.4.1 Descripción del problema

A2.4.1.1 Definición de objetivos

Evaluar un sistema de refrigeración por compresión utilizando el simulador *CoolPack*, por medio de sus valores de flujo y tipos de refrigerantes, cargas de refrigeración, capacidad de compresor, COP y eficiencia isentrópica.

A2.4.1.2 Preguntas referentes a la investigación

¿Qué datos son necesarios para realizar adecuadamente gráficas representativas del sistema de refrigeración?

Flujo másico $\left(\overset{\circ}{m}\right)$, carga de refrigeración $\left(\overset{\circ}{Q}_E\right)$, capacidad del compresor $\left(\overset{\circ}{W}\right)$, COP_{Real} , COP^*_{Carnot} , eficiencia isentrópica (n_{IS}) y tipo de refrigerante.

¿Qué datos son necesarios mantener estables en el simulador?

Pérdidas en línea de succión (ΔP_{SL}) , pérdidas en línea de descarga (ΔP_{DL}) , factor de pérdida de calor (f_Q) y calor ingresado en la línea de succión $\left(\overset{\circ}{Q}_{SL}\right)$, temperatura en evaporador (T_E) , temperatura en condensador (T_C) , temperatura de sobrecalentado (ΔT_{SH}) y temperatura de sub-enfriado (ΔT_{SC}) .

¿Qué datos mantienen la simulación como un sistema real?

Pérdidas en línea de succión, pérdidas en línea de descarga, factor de pérdida de calor y calor ingresado en la línea de succión.

¿Qué datos deben permanecer estables al variar el tipo de refrigerante?

Pérdidas en línea de succión, pérdidas en línea de descarga, factor de pérdida de calor, calor ingresado en la línea de succión, temperatura en evaporador, temperatura en condensador, temperatura de sobrecalentado y temperatura de sub-enfriado.

¿Qué propiedades del refrigerante a emplear son necesarias conocer?

Temperatura máxima y mínima de operación, comportamiento de curvas isentrópicas dentro del área de operación y rango de operación de la entalpía.

A2.4.2 Justificación

Para lograr el cumplimiento de los objetivos se empleará el *software CoolPack* que representa un sistema de refrigeración, del cual se obtendrán diversos COP_{Real} y COP^*_{Carnot} , al variar los valores de flujo y tipo de refrigerante, cargas de refrigeración, capacidad de compresor. Con este procedimiento se determinarán los resultados adecuados para realizar un análisis gráfico y matemático de la refrigeración, permitiendo comparar el sistema simulado con equipos domésticos y/o industriales.

A2.4.3 Descripción de variables involucradas

A2.4.3.1 Variables dependientes

Calor del condensador $\left(\overset{\circ}{Q}_C\right)$, flujo másico $\left(\overset{\circ}{m}\right)$, flujo volumétrico $\left(\overset{\circ}{v}_S\right)$,
 capacidad del compresor $\left(\overset{\circ}{W}\right)$, COP_{Real} y COP^*_{Carnot} .

A2.4.3.2 Variables independientes

Tabla V. Variables independientes

Variable	Símbolo	Unidades	Rango de Variación
Temperatura de evaporación	(T_E)	°C	-30 a 0 °C
Temperatura de condensación	(T_C)	°C	15 a 40 °C
Carga del refrigerante	$\left(\overset{\circ}{Q}_E\right)$	kW	0 a 25 kW
Eficiencia isentrópica	(n_{IS})	---	0 a 1
Temperatura de sobrecalentado	(ΔT_{SH})	°K	0 a 10 °K
Temperatura de sub-enfriado	(ΔT_{SC})	°K	0 a 10 °K
Tipo de refrigerante	---	---	---

A2.4.3.3 Factores perturbadores

No existen tales factores en la toma de datos al realizar la práctica simulada de refrigeración, ya que se trabaja con un sistema ideal, el cual no se ve afectado por errores externos.

A2.4.4 Selección de variables de respuesta o salida

Las variables que darán los datos de interés son: tipo de refrigerante, carga de refrigeración y eficiencia isentrópica.

A2.4.5 Elección del diseño experimental

Tabla VI. Diseño experimental uno

		Eficiencia Isentrópica							
		$\overset{\circ}{Q}_{E\ 1}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 2}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 3}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 4}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 5}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 6}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 7}$	$\overset{\circ}{Q}_{E\ 8}$
Refrigerante	R ₁	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 11}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 12}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 13}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 14}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 15}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 16}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 17}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 18}$
	R ₂	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 21}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 22}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 23}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 24}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 25}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 26}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 27}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 28}$
	R ₃	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 31}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 32}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 33}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 34}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 35}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 36}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 37}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 38}$
	R ₄	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 41}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 42}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 43}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 44}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 45}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 46}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 47}$	$\overset{\circ}{Q}_{C\ 48}$

Tabla VII. Diseño experimental dos

		Refrigerante							
		R ₁		R ₂		R ₃		R ₄	
Carga de Refrigeración	$\overset{o}{Q}_{E\ 1}$	COP ₁₁	COP* ₁₁	COP ₁₂	COP* ₁₂	COP ₁₃	COP* ₁₃	COP ₁₄	COP* ₁₄
		$\overset{o}{m}_{11}$		$\overset{o}{m}_{12}$		$\overset{o}{m}_{13}$		$\overset{o}{m}_{14}$	
	$\overset{o}{Q}_{E\ 2}$	COP ₂₁	COP* ₂₁	COP ₂₂	COP* ₂₂	COP ₂₃	COP* ₂₃	COP ₂₄	COP* ₂₄
		$\overset{o}{m}_{21}$		$\overset{o}{m}^*_{22}$		$\overset{o}{m}_{23}$		$\overset{o}{m}_{24}$	
	$\overset{o}{Q}_{E\ 3}$	COP ₃₁	COP* ₃₁	COP ₃₂	COP* ₃₂	COP ₃₃	COP* ₃₃	COP ₃₄	COP* ₃₄
		$\overset{o}{m}_{31}$		$\overset{o}{m}^*_{32}$		$\overset{o}{m}_{33}$		$\overset{o}{m}_{34}$	
	$\overset{o}{Q}_{E\ 4}$	COP ₄₁	COP* ₄₁	COP ₄₂	COP* ₄₂	COP ₄₃	COP* ₄₃	COP ₄₄	COP* ₄₄
		$\overset{o}{m}_{41}$		$\overset{o}{m}^*_{42}$		$\overset{o}{m}_{43}$		$\overset{o}{m}_{44}$	
	$\overset{o}{Q}_{E\ 5}$	COP ₅₁	COP* ₅₁	COP ₅₂	COP* ₅₂	COP ₅₃	COP* ₅₃	COP ₅₄	COP* ₅₄
		$\overset{o}{m}_{41}$		$\overset{o}{m}^*_{42}$		$\overset{o}{m}_{43}$		$\overset{o}{m}_{44}$	
	$\overset{o}{Q}_{E\ 6}$	COP ₆₁	COP* ₆₁	COP ₆₂	COP* ₆₂	COP ₆₃	COP* ₆₃	COP ₆₄	COP* ₆₄
		$\overset{o}{m}_{41}$		$\overset{o}{m}^*_{42}$		$\overset{o}{m}_{43}$		$\overset{o}{m}_{44}$	
	$\overset{o}{Q}_{E\ 7}$	COP ₇₁	COP* ₇₁	COP ₇₂	COP* ₇₂	COP ₇₃	COP* ₇₃	COP ₇₄	COP* ₇₄
		$\overset{o}{m}_{41}$		$\overset{o}{m}^*_{42}$		$\overset{o}{m}_{43}$		$\overset{o}{m}_{44}$	
	$\overset{o}{Q}_{E\ 8}$	COP ₈₁	COP* ₈₁	COP ₈₂	COP* ₈₂	COP ₈₃	COP* ₈₃	COP ₈₄	COP* ₈₄
		$\overset{o}{m}_{41}$		$\overset{o}{m}^*_{42}$		$\overset{o}{m}_{43}$		$\overset{o}{m}_{44}$	

Tabla VIII. Diseño experimental tres

		Refrigerante							
		R ₁		R ₂		R ₃		R ₄	
Eficiencia Isentrópica	$n_{IS\ 1}$	COP ₁₁	COP* ₁₁	COP ₁₂	COP* ₁₂	COP ₁₃	COP* ₁₃	COP ₁₄	COP* ₁₄
		$\overset{\circ}{W}_{11}$		$\overset{\circ}{W}_{12}$		$\overset{\circ}{W}_{13}$		$\overset{\circ}{W}_{14}$	
	$n_{IS\ 2}$	COP ₂₁	COP* ₂₁	COP ₂₂	COP* ₂₂	COP ₂₃	COP* ₂₃	COP ₂₄	COP* ₂₄
		$\overset{\circ}{W}_{21}$		$\overset{\circ}{W}_{22}^*$		$\overset{\circ}{W}_{23}$		$\overset{\circ}{W}_{24}$	
	$n_{IS\ 3}$	COP ₃₁	COP* ₃₁	COP ₃₂	COP* ₃₂	COP ₃₃	COP* ₃₃	COP ₃₄	COP* ₃₄
		$\overset{\circ}{W}_{31}$		$\overset{\circ}{W}_{32}^*$		$\overset{\circ}{W}_{33}$		$\overset{\circ}{W}_{34}$	
	$n_{IS\ 4}$	COP ₄₁	COP* ₄₁	COP ₄₂	COP* ₄₂	COP ₄₃	COP* ₄₃	COP ₄₄	COP* ₄₄
		$\overset{\circ}{W}_{41}$		$\overset{\circ}{W}_{42}^*$		$\overset{\circ}{W}_{43}$		$\overset{\circ}{W}_{44}$	
	$n_{IS\ 5}$	COP ₅₁	COP* ₅₁	COP ₅₂	COP* ₅₂	COP ₅₃	COP* ₅₃	COP ₅₄	COP* ₅₄
		$\overset{\circ}{W}_{41}$		$\overset{\circ}{W}_{42}^*$		$\overset{\circ}{W}_{43}$		$\overset{\circ}{W}_{44}$	
	$n_{IS\ 6}$	COP ₆₁	COP* ₆₁	COP ₆₂	COP* ₆₂	COP ₆₃	COP* ₆₃	COP ₆₄	COP* ₆₄
		$\overset{\circ}{W}_{41}$		$\overset{\circ}{W}_{42}^*$		$\overset{\circ}{W}_{43}$		$\overset{\circ}{W}_{44}$	
	$n_{IS\ 7}$	COP ₇₁	COP* ₇₁	COP ₇₂	COP* ₇₂	COP ₇₃	COP* ₇₃	COP ₇₄	COP* ₇₄
		$\overset{\circ}{W}_{41}$		$\overset{\circ}{W}_{42}^*$		$\overset{\circ}{W}_{43}$		$\overset{\circ}{W}_{44}$	
	$n_{IS\ 8}$	COP ₈₁	COP* ₈₁	COP ₈₂	COP* ₈₂	COP ₈₃	COP* ₈₃	COP ₈₄	COP* ₈₄
		$\overset{\circ}{W}_{41}$		$\overset{\circ}{W}_{42}^*$		$\overset{\circ}{W}_{43}$		$\overset{\circ}{W}_{44}$	

A2.4.6 Diseño de tratamientos

Los datos de interés se obtienen a partir de los diferentes tipos de refrigerante utilizados, siendo los más representativos R22, R134a, R502 y R717; cargas de refrigeración de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 kW; eficiencias isentrópicas de 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9.

Los valores seleccionados de temperatura de evaporación ($T_E = -25^\circ\text{C}$) y temperatura condensación ($T_C = 30^\circ\text{C}$), temperatura de sobrecalentado ($\Delta T_{SH} = 5$), temperatura de sub-enfriado ($\Delta T_{SC} = 2$), pérdida de presión en línea de succión ($\Delta P_{SL} = 1$) y línea de descarga ($\Delta P_{DL} = 1$), factor de pérdida de calor en compresor ($f_\varrho = 10$), ingreso de calor en línea de succión ($\dot{Q}_{SL} = 100$), no se empleará un intercambiador de calor de gas de succión (No SGHX). Los valores seleccionados se emplearán en todo cálculo y no serán alterados al variar de refrigerante.

A2.4.7 Diseño de control de error

No habrá intervención directa por el experimentador, por lo que la toma de datos a partir del simulador *CoolPack* serán precisos. De lo anterior se cuenta con una alta precisión.

A2.4.8 Planteamiento de hipótesis

Para tablas Tabla VI y Tabla VII

Ho: los valores de los coeficientes de operación (COP) son independientes del flujo másico y tipo de refrigerante, carga de refrigeración y capacidad de compresor.

Ha: los valores de los coeficientes de operación (COP) son dependientes del flujo másico y tipo de refrigerante, carga de refrigeración y capacidad de compresor.

Para la Tabla VIII

Ho: la variación de la eficiencia isentrópica, no genera cambio alguno en el sistema de refrigeración.

Ha: la variación de la eficiencia isentrópica, genera cambios en el sistema de refrigeración.

A2.5 Ecuaciones y procedimiento, para la obtención de los resultados

Debido a que se utiliza un sistema simulado, éste extiende la mayor cantidad de datos necesarios en la realización de resultados por lo que no es necesario la colocación de ecuaciones en la obtención de:

- COP_{Carnot}
- COP_{real}
- Potencia del compresor
- Flujo másico del refrigerante

Determinación del valor del COP de bomba de calor

Para la determinación del COP_{BC} se emplea la Ecuación 2.

A2.6 Tabla de toma de datos

En esta parte de la preparación se hace referencia a las tablas incluidas en el diseño experimental. Las cuáles aparecen en la sección de Metodología, siendo: Tabla I, Tabla II y Tabla III.

A2.7 Equipo de medición requerido

- Termómetro
- Manómetro
- Rotámetro

A2.8 Propiedades fisico-químicas de los fluidos a utilizar

Los datos de los refrigerantes R717, R22 y R134a son extraídos de la referencia electrónica 1. La información del refrigerante R502 se obtiene de la referencia electrónica 2.

A2.8.1 Propiedades del refrigerante R717

- Nombres: Amoníaco
- Peso molecular: 17.03 g/mol
- Fórmula química: NH₃

Fase sólida

- Punto de fusión: -78 °C
- Calor latente de fusión (1,013 bar, en el punto triple) : 331.37 kJ/kg

Fase líquida

- Densidad del líquido (1.013 bar en el punto de ebullición) : 682 kg/m³
- Equivalente líquido/gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 947 vol/vol
- Punto de ebullición (1.013 bar) : -33.5 °C
- Calor latente de vaporización (1.013 bar en el punto de ebullición) : 1371.2 kJ/kg
- Presión de vapor (a 21 °C o 70 °F) : 8.88 bar

Punto crítico

- Temperatura crítica: 132.4 °C
- Presión crítica: 112.8 bar

Fase gaseosa

- Densidad del gas (1.013 bar en el punto de ebullición) : 0.86 kg/m³
- Densidad del gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.73 kg/m³
- Factor de compresibilidad (Z) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.9929
- Gravedad específica (aire = 1) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.597
- Volumen específico (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 1.411 m³/kg
- Capacidad calorífica a presión constante (Cp) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.037 kJ/(mol.K)
- Capacidad calorífica a volumen constante (Cv) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.028 kJ/(mol.K)
- Razón de calores específicos (Gama:Cp/Cv) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 1.309623
- Viscosidad (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 0.000098 Poise
- Conductividad térmica (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 22.19 mW/(m.K)

Misceláneos

- Solubilidad en agua (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 862 vol/vol
- Temperatura de autoignición: 630 °C

A2.8.2 Propiedades del refrigerante R134a

- Nombres: 1,1,1,2-Tetrafluoroethane; Freon 134a; Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-; Halocarbon 134a; 1,2,2,2-Tetrafluoroethane
- Peso molecular: 102.03 g/mol
- Fórmula química: H₂FC-CF₃

Fase sólida

- Punto de fusión (1.013 bar) : -101 °C

Fase líquida

- Densidad del líquido (1.013 bar y 25 °C (77 °F)) : 1206 kg/m³
- Punto de ebullición (1.013 bar) : -26.6 °C
- Calor latente de vaporización (1.013 bar en el punto de ebullición) : 215.9 kJ/kg
- Presión de vapor (a 20 °C o 68 °F) : 5.7 bar
- Presión de vapor (a 5 °C o 41 °F) : 3.5 bar
- Presión de vapor (a 15 °C o 59 °F) : 4.9 bar
- Presión de vapor (a 50 °C o 122 °F) : 13.2 bar

Punto crítico

- Temperatura crítica: 100.9 °C
- Presión crítica: 40.6 bar
- Densidad crítica: 512 kg/m³

Punto triple

- Temperatura del punto triple: -103.3 °C

Fase gaseosa

- Densidad del gas (1.013 bar en el punto de ebullición) : 5.28 kg/m³
- Densidad del gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 4.25 kg/m³
- Factor de compresibilidad (Z) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 1
- Gravedad específica (aire = 1) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 3.25
- Volumen específico (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.235 m³/kg
- Capacidad calorífica a presión constante (C_p) (1.013 bar y 25 °C (77 °F)) : 0.087 kJ/(mol.K)

Misceláneos

- Solubilidad en agua (1 bar y 25 °C (77 °F)) : 0.21 vol/vol

A2.8.3 Propiedades del refrigerante R 22

- Nombres: Difluorochloromethane; HCFC 22; Halocarbon R22; Freon 22, Difluoromonochloromethane.
- Peso molecular: 86.48 g/mol
- Fórmula química: CHClF₂

Fase líquida

- Densidad del líquido (1.013 bar en el punto de ebullición) : 1413 kg/m³
- Equivalente líquido/gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 385 vol/vol
- Punto de ebullición (1.013 bar) : -40.8 °C
- Calor latente de vaporización (1.013 bar en el punto de ebullición) : 233.95 kJ/kg

Punto crítico

- Temperatura crítica: 96 °C
- Presión crítica: 49.36 bar

Fase gaseosa

- Densidad del gas (1.013 bar en el punto de ebullición) : 4.706 kg/m³
- Densidad del gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 3.66 kg/m³
- Factor de compresibilidad (Z) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)) : 0.9831
- Gravedad específica (aire = 1) (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 3.08
- Volumen específico (1.013 bar y 21 °C (70 °F)) : 0.275 m³/kg
- Capacidad calorífica a presión constante (Cp) (1.013 bar y 30 °C (86 °F)) : 0.057 kJ/(mol.K)
- Capacidad calorífica a volumen constante (Cv) (1.013 bar y 30 °C (86 °F)) : 0.048 kJ/(mol.K)
- Razón de calores específicos (Gama:Cp/Cv) (1.013 bar y 30 °C (86 °F)) : 1.178253
- Viscosidad (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 0.0001256 Poise

Misceláneos

- Solubilidad en agua (1 bar y 25 °C (77 °F)) : 0.7799 vol/vol

A2.8.4 Propiedades del refrigerante R502

Tabla IX. Propiedades del R502

Mezcla ternaria		R115 / R22
Composición	%	51.2/48.8
Peso molecular	Kg/Kmol	111.64
Punto de ebullición	°C	-45.6
Presión vapor (25 °C)	bar	11.54
Temperatura crítica	°C	82.2
Presión crítica	bar	40.75
Densidad del líquido (25°C)	g/cm ³	1.242
Densidad vapor saturado	g/l	6.05
Calor específico de líquido (25°C)	J/mol K	140.13
Calor específico de vapor (25°C)	J/mol K	78.47
Inflamabilidad		NO
ODP relativo a R11= 1		0.23

Fuente. Referencia electrónica 2

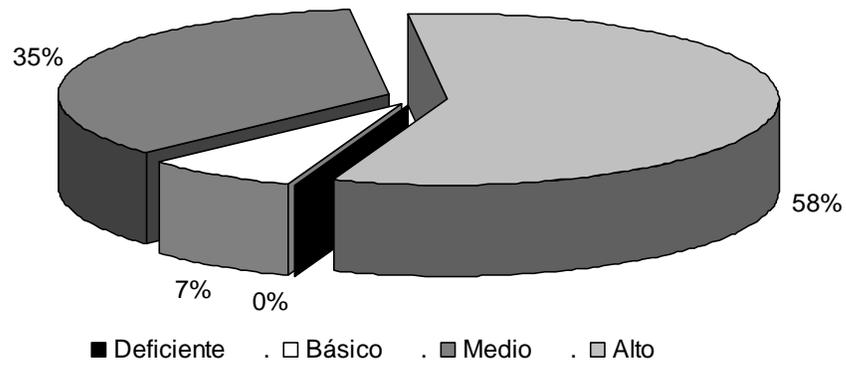
A2.9 Diagrama del equipo

Para esta sección se hace referencia al diagrama del equipo propuesto de refrigeración por compresión, Figura 10, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, USAC.

APÉNDICE 3

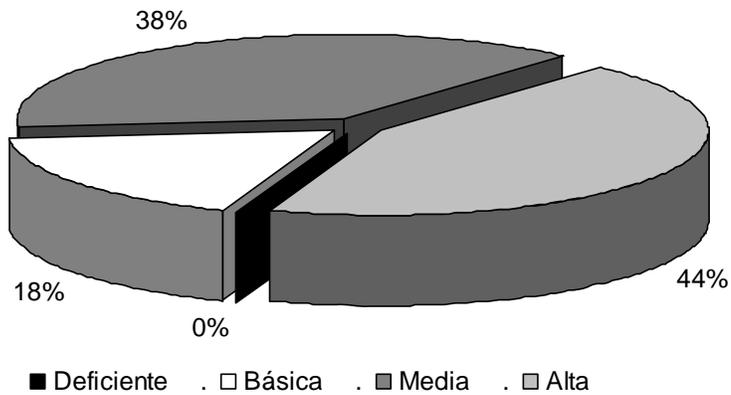
Gráficos

Figura 15. **Cumplimiento de objetivos por el simulador**



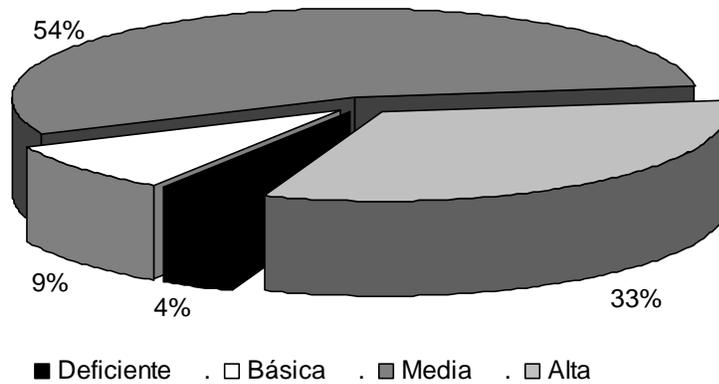
Fuente. Apéndice 5 resultados de encuesta, A5.1 Aplicación del simulador.

Figura 16. **Eficiencia de la metodología**



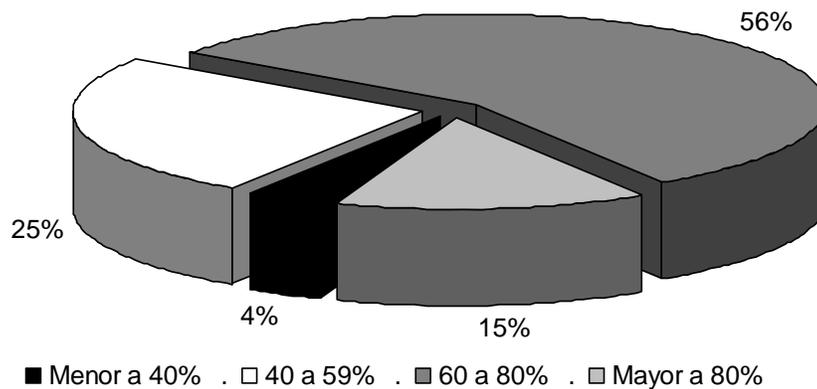
Fuente. Apéndice 5 resultados de encuesta, A5.1 Aplicación del simulador.

Figura 17. Continuidad en el estudio de la refrigeración



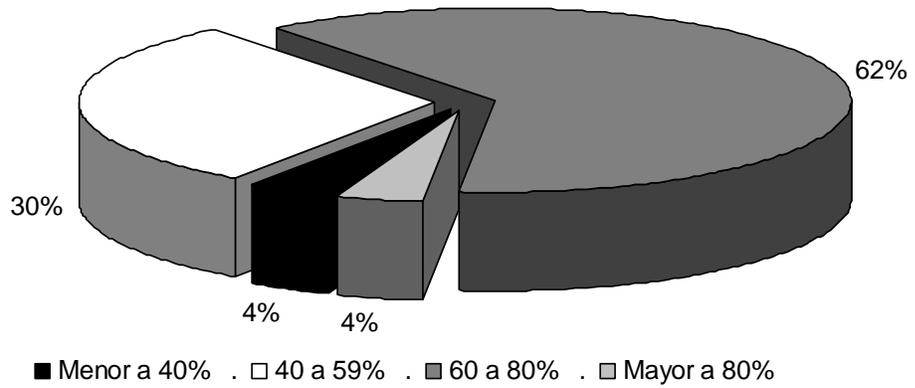
Fuente. Apéndice 5 resultados de encuesta, A5.2 Conocimientos aplicados.

Figura 18. Conocimientos aplicados al evaluar los diversos COP



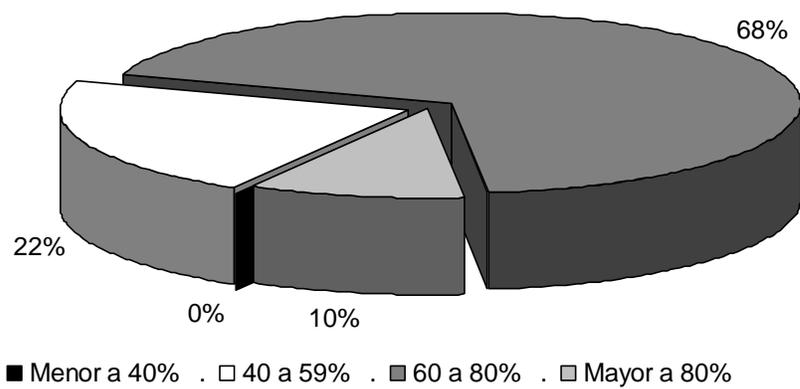
Fuente. Apéndice 5 resultados de encuesta, A5.2 Conocimientos aplicados.

Figura 19. **Conocimientos aplicados al evaluar la etapa de condensación**



Fuente. Apéndice 5 resultados de encuesta, A5.2 Conocimientos aplicados.

Figura 20. **Conocimientos aplicados al evaluar la etapa de evaporación**



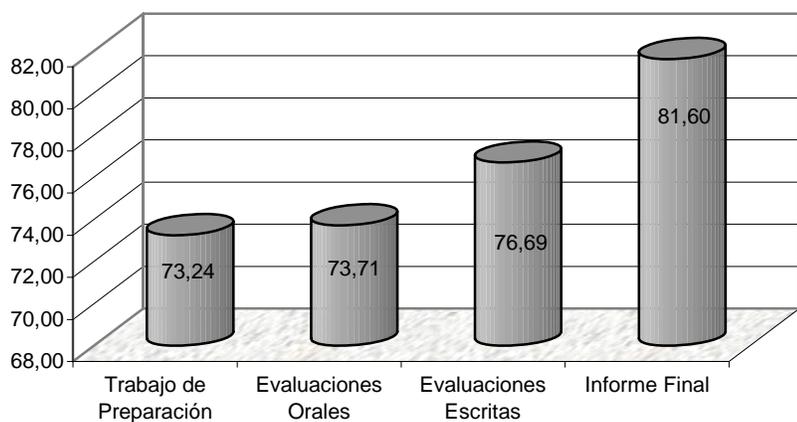
Fuente. Apéndice 5 resultados de encuesta, A5.2 Conocimientos aplicados.

Tabla X. Datos de estudiantes

	Trabajos de preparación	Evaluaciones Preliminares	Evaluaciones Finales	Informe Final
Promedios	73,24	73,71	76,69	81,60
Desviación Estándar	15,36	12,75	20,33	12,99

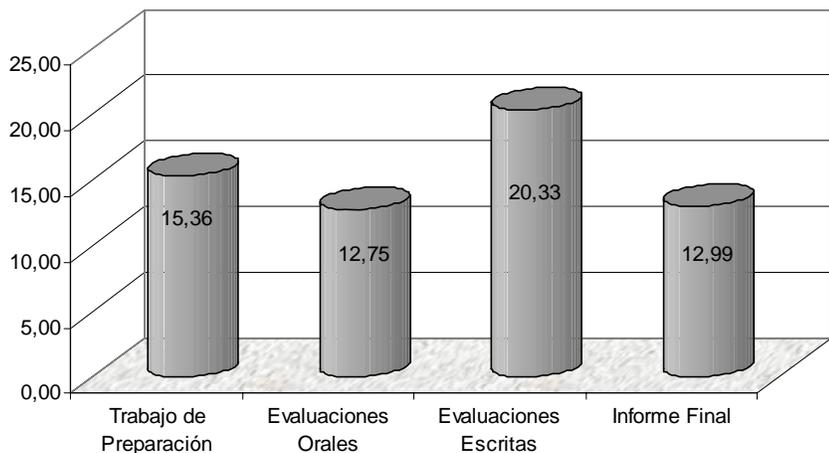
Fuente. Laboratorio de Ingeniería Química Uno, 2do. semestre 2008

Figura 21. Promedio de alumnos



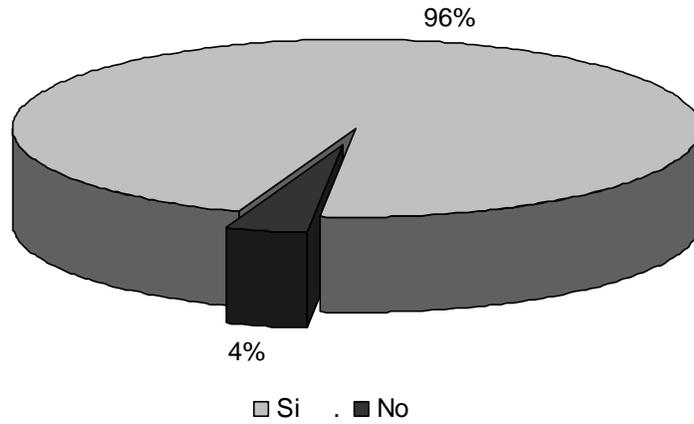
Fuente. Laboratorio de Ingeniería Química Uno, 2do. semestre 2008

Figura 22. Desviación estándar de los datos



Fuente. Laboratorio de Ingeniería Química Uno, 2do. semestre 2008

Figura 23. ¿Debe implementarse un equipo físico de refrigeración?



Fuente. Apéndice 5 resultados de encuesta, A5.3 Continuidad de mejora.

APÉNDICE 4

Ponderación de estudiantes

A4.1 Notas de alumnos de laboratorio de Ingeniería Química Uno sección N, de segundo semestre de 2008

Tabla XI. Sección N

		N	P	E1	E2	R
GRUPO 1 A	1	90	70	60	82	
	2	90	70	100	82	
	3	90	70	61	82	
	4	90	65	70	82	
GRUPO 2 B	1	70	85	40	50	
	2	70	80	28	50	
	3	70	75	80	50	
	4	70	85	63	50	
	5	70	40	65	50	
GRUPO 3 C	1	55	80	55	86	
	2	55	80	40	86	
	3	55	80	95	86	
	4	55	80	70	86	
	5	55	80	25	86	
GRUPO 4 D	1	75	70	90	88	
	2	75	90	100	88	
	3	75	90	100	88	
	4	75	85	100	88	
	5	75	90	100	88	
GRUPO 5 E	1	75	80	78	95	
	2	75	80	100	95	
	3	75	80	85	95	
	4	75	80	80	95	
	5	75	70	95	95	
GRUPO 6 F	1	90	77	99	96	
	2	90	77	90	96	
	3	90	77	100	96	
	4	90	77	90	96	
	5	90	77	96	96	

Fuente. Laboratorio de Ingeniería Química Uno, 2do. semestre 2008

Donde: N) Número de alumno en grupo, P) Trabajo de preparación, E1) Evaluación previa, E2) Evaluación posterior y R) Informe final.

A4.2 Notas de alumnos de laboratorio de Ingeniería Química Uno sección P, de segundo semestre de 2008

Tabla XII. Sección P

GRUPO 1 A		N	P	E1	E2	R
1	60	60	76	80		
2	60	65	70	80		
3	60	75	95	80		
4	60	75	80	80		
5	60	80	100	80		

GRUPO 2 B		N	P	E1	E2	R
1	87	68	40	63		
2	87	78	67	63		
3	87	68	28	63		
4	87	81	50	63		

GRUPO 3 C		N	P	E1	E2	R
1	60	70	80	72		
2	60	70	80	72		
3	60	60	60	72		
4	60	70	90	72		

GRUPO 4 D		N	P	E1	E2	R
1	50	65	90	90		
2	50	50	70	90		
3	50	90	80	90		
4	50	50	85	90		
5	50	30	80	90		
6	50	30	75	90		

GRUPO 5 E		N	P	E1	E2	R
1	75	80	70	88		
2	75	80	80	88		
3	75	80	56	88		
4	75	80	80	88		
5	75	80	85	88		

GRUPO 6 F		N	P	E1	E2	R
1	100	80	62	82		
2	100	80	98	82		
3	100	80	96	82		
4	100	80	100	82		
5	100	80	70	82		

Fuente. Laboratorio de Ingeniería Química Uno, 2do. semestre 2008

Donde: N) Número de alumno en grupo, P) Trabajo de preparación, E1) Evaluación previa, E2) Evaluación posterior y R) Informe final.

APÉNDICE 5

Resultados de encuestas

A5.1 Aplicación del simulador

1. Capacidad del simulador en la generación de datos:

Tabla XIII. Capacidad del simulador en generar datos

	Menor a 40%	40 a 59%	60 a 80%	Mayor a 80%
Valor	1,8%	12,7%	38,2%	47,3%

2. Cumplimiento de objetivos de la práctica simulada empleando el *software CoolPack*:

Tabla XIV. Cumplimiento de objetivos

	Deficiente	Básico	Medio	Alto
Valor	0,0%	7,4%	35,2%	57,4%

3. La metodología utilizada en la implementación del simulador *CoolPack* fue de tipo:

Tabla XV. Metodología empleada

	Deficiente	Básico	Medio	Alto
Valor	0,0%	18,0%	38,0%	44,0%

4. ¿Debe ser reemplazado el simulador *CoolPack*?

Tabla XVI. ¿Debe ser reemplazado el simulador?

	SÍ	NO
Valor	24,5%	75,5%

5. ¿Es el simulador *CoolPack* una herramienta adecuada en el estudio de la refrigeración?

Tabla XVII. ¿Permite el simulador continuar con el estudio de refrigeración?

	SÍ	NO
Valor	85,4%	14,6%

6. ¿Representa el simulador *CoolPack* correctamente un sistema industrial y/o doméstico de refrigeración por compresión?

Tabla XVIII. ¿Representa el simulador un sistema de refrigeración?

	SÍ	NO
Valor	100,0%	0,0%

A5.2 Conocimientos aplicados

1. De qué manera el simulador *CoolPack* permite dar seguimiento al estudio de la refrigeración por compresión:

Tabla XIX. Seguimiento del estudio de refrigeración

	Deficiente	Básico	Medio	Alto
Valor	3,6%	9,1%	54,5%	32,7%

2. ¿Qué nivel de conocimientos aplicó respecto de los COP en la práctica simulada?

Tabla XX. Aplicación de conocimientos de COP

	Menor a 40%	40 a 59%	60 a 80%	Mayor a 80%
Valor	3,6%	25,5%	56,4%	14,5%

3. ¿Qué nivel de conocimientos aplicó respecto de la compresión de gases refrigerantes en la práctica simulada?

Tabla XXI. Aplicación de conocimientos de refrigerantes

	Menor a 40%	40 a 59%	60 a 80%	Mayor a 80%
Valor	2,0%	24,0%	56,0%	18,0%

4. ¿Qué nivel de conocimientos aplicó respecto de la condensación de gases refrigerantes en la práctica simulada?

Tabla XXII. Aplicación de conocimientos en condensación

	Menor a 40%	40 a 59%	60 a 80%	Mayor a 80%
Valor	4,0%	30,0%	62,0%	4,0%

5. ¿Qué nivel de conocimientos aplicó respecto de la evaporación de gases refrigerantes en la práctica simulada?

Tabla XXIII. Aplicación de conocimientos en evaporación

	Menor a 40%	40 a 59%	60 a 80%	Mayor a 80%
Valor	0,0%	22,0%	68,0%	10,0%

6. ¿Qué nivel de conocimientos aplicó respecto de la expansión de gases refrigerantes en la práctica simulada?

Tabla XXIV. Aplicación de conocimientos en expansión de gases

	Menor a 40%	40 a 59%	60 a 80%	Mayor a 80%
Valor	2,0%	34,7%	57,1%	6,1%

A5.3 Continuidad de mejora por una práctica experimental

1. ¿Es necesario continuar el estudio de la refrigeración mediante un equipo físico?

Tabla XXV. ¿Es necesario un equipo físico?

	SÍ	NO
Valor	96,0%	4,0%