



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE
REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN EL LABORATORIO DE
INGENIERÍA QUÍMICA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA AGUA
POR MEDIO DE GAS R134A**

Lizandro Danilo Hernández Girón

Asesorado por el Ing. José Manuel Tay Oroxom

Guatemala, octubre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE
REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN EL LABORATORIO DE
INGENIERÍA QUÍMICA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA AGUA
POR MEDIO DE GAS R134A**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

LIZANDRO DANILO HERNÁNDEZ GIRÓN

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ MANUEL TAY OROXOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz 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. Luis Pedro Ortiz De León
VOCAL V	Agr. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

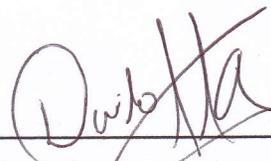
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

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:

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE
REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN EL LABORATORIO DE
INGENIERÍA QUÍMICA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA AGUA
POR MEDIO DE GAS R134A,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha agosto de 2009.



Lizandro Danilo Hernández Girón

Guatemala, 28 de mayo de 2010

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director

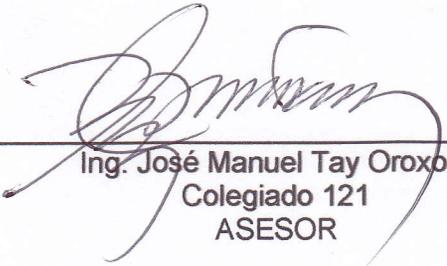
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Álvarez:

Con un cordial saludo me dirijo a usted para informarle que he asesorado y aprobado el Informe Final del Trabajo de Graduación titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA AGUA POR MEDIO DE GAS R134A"**. Elaborado por el estudiante de Ingeniería Química Lizandro Danilo Hernández Girón con número de carné 2003-12489. Considero que el Informe Final de Trabajo de Graduación desarrollado por el estudiante Hernández Girón, satisface los requisitos exigidos; por lo que solicito se sirva remitirlo para su respectiva revisión.

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,



Ing. José Manuel Tay Oroxom
Colegiado 121
ASESOR



Guatemala, 15 de septiembre de 2010
Ref. EI.Q.TG.072.2010

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-072-10-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 **LIZANDRO DANILO HERNÁNDEZ GIRÓN**, identificado con carné No. **200312489**, titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR POR MEDIO DE GAS R134A"** el cual ha sido asesorado por el Ingeniero José Manuel Tay Oroxom, como consta en el Acta.

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. **Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.**
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante **LIZANDRO DANILO HERNÁNDEZ GIRÓN** titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA AGUA POR MEDIO DE GAS R134A"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2010

Cc: Archivo
WGAM/am





DTG. 327-2010.

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: **IMPLEMENTACIÓN DE UNA PRÁCTICA EXPERIMENTAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA AGUA POR MEDIO DE GAS R134A**, presentado por el estudiante universitario **Lizandro Danilo Hernández Girón**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 19 de octubre de 2010.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A

DIOS

Por haber sido la fuerza suprema que me dio la inteligencia y fortaleza necesaria en los momentos más difíciles y hostiles permitiendo que me levantara de nuevo a pesar de la tormentas y desafíos vividos, gracias infinitamente ya que más éxitos me esperan.

Mis padres

Lisandro Danilo Hernández González y Amalia C. Girón Natareno, ya que gracias a ellos es posible recibir este título de Ingeniero Químico, con sus esfuerzos y apoyo logramos juntos este éxito que marcará mi vida y los llenará de orgullo, siempre estuvieron a mi lado sin importar las circunstancias.

A mi abuelita

Carlota Natareno quien siempre me apoyó, preocupó, creyó en mí y ha sido como una madre, esperándome hasta tarde después de salir de la universidad para tener mis alimentos siempre calientes y sus bendiciones, encomendándome siempre con Dios.

Mi hermana

Michelle Hernández la quiero mucho y me ha apoyado cuando la he necesitado en los malos momentos.

Mi hermano

Guillermo Girón Sanchinelli que siempre ha estado conmigo en los buenos y malos momentos, gracias por tu amistad invaluable.

- A mi tío** **Leonel Arturo Hernández González** ya que me brindó su apoyo en el momento que lo necesite sin haberme pedido nada a cambio, gracias por haberme proporcionado mi proyecto para el trabajo de graduación.
- A mi novia** **María del Mar Ramos** a quien quiero mucho y a la vez es mi mejor amiga y compañera.
- A mi tía** **Flor Vásquez Rodas** por haberme apoyado en la última etapa de mi carrera.
- A mis tíos** **Lizeth Hernández González, Marco Tulio Molina Lara y Rony Joel Girón** por siempre haber creído en mí y nunca haber dudado de mis capacidades.
- A mi amigo** **Edgar Geovanni López** mi amigo de la infancia, que siempre ha estado conmigo en todos los momentos.
- A mi prima** **Verónica Girón** por haber sido una amiga muy confiable y su muestra de amor y cariño sinceros (mi prima favorita).
- A mi bisabuelita** **María Ortega** quien siempre me inspiro por su gran ánimo, fortaleza y fe en Dios.
- A mi amigo** **Dr. Carlos Garrido** por ser amigo de muchos años y haberme proporcionado de su ayuda en el momento final de mi formación profesional.
- A mi amigo** **Dr. Oscar Bathen** por su apoyo en los malos momentos que me han acechado.

Amiga de la familia

Anabella Farfán por su cariño demostrado a lo largo del tiempo.

En memoria de

Rosendo Girón Natareno[†], Marcela Escalante Kovać[†], Lisandro Hernández[†], América González[†] y Herminio Girón[†].

A la Universidad de San Carlos de Guatemala

Por haberme permitido ingresar en esta prestigiosa casa de estudios de élite en Guatemala.

A la Facultad de Ingeniería

Por haberme moldeado y hecho todo un profesional orgullosamente Sancarlista.

AGRADECIMIENTOS A

**A mis amigos y
compañeros**

Luis González, Jaime Dardón, María Fernanda Peña, Rodolfo Castro, Edwin Esmieu, José Labin, Carlos Polanco, Juan Molina, Armando Morales, Edwin Esmieu, Alejandro Santa Cruz, Douglas Gallo, Gabriel García, Zulema Calderón, por haber compartido los mejores momentos de mi formación como profesional además de haber sido parte de mi equipo.

Ingeniero

Manuel Tay, por haberme asesorado y apoyado en la etapa final de mi formación profesional, habiendo tenido la paciencia en hacer las revisiones y ayuda en la defensa del trabajo de graduación.

Ingeniero

Federico Salazar, por haberme proporcionada de sus conocimientos los cuales fueron vitales para la realización del trabajo de graduación.

Ingeniero

Otto Raúl De León, por haber sido la espina dorsal en mi formación como profesional.

Mis primos

Kathy, Marco, Leonel, Ana Luisa, Blanca, Estuardo, Aníbal y Sofía, por su cariño demostrado a lo largo del tiempo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS	XXIII
HIPÓTESIS.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Ciclos de refrigeración por compresión	5
2.2 Importancia de los sistemas de refrigeración convencionales y por compresión de gas.....	6
2.3 Transferencia de calor.....	6
2.4 Mecanismos de Transferencia de calor.....	7
2.4.1 Transferencia de calor por conducción.....	8
2.4.2 Transferencia de calor por convección.....	8
2.4.3 Transferencia de calor por radiación	9
2.5 Sistemas de producción de frío	9
2.6 Clasificación de los sistemas de refrigeración.....	11

2.7	Sistemas basados en la elevación de la temperatura de un fluido frigorígeno	12
2.8	El ciclo de Carnot Invertido	14
2.9.1	Compresor de gas.....	20
2.9.2	Condensador.....	21
2.9.3	Válvula estrangulamiento.....	21
2.9.4	Evaporador.....	22
2.10	Compresores.....	23
3	MARCO METODOLÓGICO	25
3.1	Variables	25
3.2	Delimitación del campo de estudio.....	27
3.3	Recursos humanos disponibles	28
3.4	Recursos materiales disponibles.....	28
3.5	Técnica aplicada	29
3.6	Recolección y ordenamiento de la información.....	35
3.7	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	36
3.8	Análisis estadístico.....	37
4	RESULTADOS.....	39
4.1	Equipo de refrigeración por compresión	39
4.2	Diagrama propuesto para el sistema de refrigeración por compresión	46
4.3	Diseño experimental aplicado a la práctica de refrigeración por compresión	49
4.3.1	Descripción del problema.....	49
4.3.2	Preguntas referentes a la investigación	49

4.3.3	Justificación	51
4.3.4	Descripción de variables involucradas	52
4.3.5	Selección de variables de respuesta o salida.....	54
4.3.6	Elección del diseño experimental	54
4.3.7	Tablas de tratamiento del diseño experimental	55
4.3.8	Planteamiento de hipótesis	57
4.3.9	Número de corridas a realizar	58
4.3.10	Ecuaciones para la obtención de resultados	59
4.4	Diseño general de prácticas a realizar en el equipo	65
4.5	Calidad del aprendizaje y confiabilidad didáctica del equipo.....	71
4.6	Manual de operación del equipo.....	77
4.7	Manual de operación del simulador CoolPack	83
4.8	Comparación del proceso ideal y real del ciclo de refrigeración por compresión	98
5	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	105
	CONCLUSIONES	111
	RECOMENDACIONES.....	113
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	117
	BIBLIOGRAFÍA	119
	ANEXOS.....	121
	Requisitos académicos	121
	Árbol de problemas.....	123
	APÉNDICES	125
	APÉNDICE 1.....	125

APÉNDICE 2 137

APÉNDICE 3 149

APÉNDICE 4 151

APÉNDICE 5 161

APÉNDICE 6 167

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. El ciclo de Carnot invertido	14
2. Ciclo de refrigeración por compresión de gas	16
3. Ciclo de Carnot inverso por compresión de gas	17
4. Válvula de expansión de gas.....	18
5. Compresor.....	20
6. Condensador.....	21
7. Válvula de estrangulamiento	22
8. Evaporador	22
9. Equipo de refrigeración por compresión de gas R134a.....	39
10. Compresor de gas R134a.....	40
11. Condensador.....	41
12. Evaporador	42
13. Manómetro	42
14. Medidor de flujo	43
15. Termómetros en evaporadores	44
16. Capilar o válvula de estrangulamiento.....	45
17. Diagrama del sistema de refrigeración por compresión de gas.....	46
18. Conocimientos previos a la práctica de los ciclos de refrigeración.....	71
19. Conocimientos adquiridos de refrigeración posterior a realización de práctica y reporte.....	72
20. ¿El equipo representa un ciclo de refrigeración?	72
21. ¿Debe seguir utilizándose CoolPack para auxiliar la práctica de refrigeración?.....	73

22. ¿Cree necesario el estudio de los ciclos de refrigeración en Ingeniería Química?.....	73
23. Conocimientos adquiridos respecto al COP.....	74
24. Conocimientos adquiridos respecto a la compresión de gases refrigerantes.....	74
25. Conocimientos adquiridos respecto a la condensación de gases refrigerantes.....	75
26. Conocimientos adquiridos respecto a la evaporación de gases refrigerantes.....	75
27. Conocimientos adquiridos respecto a la expansión de gases refrigerantes.....	76
28. ¿Los instrumentos de medición en el equipo de refrigeración por compresión son los adecuados?.....	76
29. Botón de encendido.....	79
30. Válvula de esfera.....	79
31. Reóstato.....	80
32. Medidor de flujo.....	80
33. Manómetro.....	81
34. Amperímetro AC.....	82
35. Escritorio de Linux/GNU Debian Ubuntu 9.10.....	84
36. Terminal de línea de comandos en Linux.....	85
37. Ventana de instalación del Simulador CoolPack.....	86
38. Procedimiento de ingreso al simulador CoolPack.....	87
39. Ventana de análisis del ciclo.....	88
40. Especificaciones del ciclo.....	89
41. Capacidad de ciclo.....	90
42. Desempeño del compresor.....	91
43. Factor de pérdida de calor en el compresor.....	92
44. Resultados de COP y COP* según los parámetros ingresados.....	93

45. Gráfica Log(p) vs. H	93
46. Tabla de los puntos de condición	94
47. Elección del refrigerante en el menú desplegable	95
48. Diagrama Temperatura-Entropía desplegado	96
49. Tabla con los valores de saturación para el gas R134a	97
50. Comparación del coeficiente de desempeño real y el coeficiente de desempeño ideal (Carnot) reóstato a 15 negativo	98
51. Comparación del coeficiente de desempeño real y el coeficiente de desempeño ideal (Carnot) reóstato a cero	99
52. Eficiencia del ciclo de refrigeración experimental (%)	100
53. Variación de la temperatura del fluido respecto al flujo másico reóstato a 15 negativo	101
54. Variación de la temperatura del fluido respecto al flujo másico reóstato a cero.....	102
55. Comparación de la eficiencia isentrópica (%) del compresor con el reóstato a 15 negativo y cero	103
56. Error por exactitud frente a la posición del reóstato del refrigerante R134a.....	149

TABLAS

I.	Definición operacional de las variables	24
II.	Lista de variables a manipular.....	25
III.	Variables de respuesta	25
IV.	Encuesta de apreciación didáctica.....	34
V.	Obtención de los datos experimentales	35
VI.	Tabulación para la apreciación didáctica	35
VII.	Tabulación de los datos obtenidos experimentalmente	36
VIII.	Lista de equipamiento	46
IX.	Lista de canalizaciones	47
X.	Variables del sistema experimental de refrigeración.....	51
XI.	Variables en el modelo teórico de refrigeración CoolPack.....	52
XII.	Valores de la carga del condensador en función de la carga del evaporador y del tipo de refrigerante	54
XIII.	Valores de los coeficientes de operación en función de la carga del evaporador y del tipo de refrigerante	55
XIV.	Valores de flujo másico en función de la carga del evaporador y del tipo de refrigerante	55
XV.	Valores de coeficientes de operación en función de la eficiencia isentrópica y del tipo de refrigerante	56
XVI.	Toma de datos a partir de las variables manipuladas.....	65
XVII.	Toma de datos a partir de las variables manipuladas.....	68
XVIII.	Análisis detallado de la Figura 53	100
XIX.	Análisis detallado de la Figura 54	101
XX.	Requisitos académicos	119
XXI.	Entalpía durante la corrida 1, reóstato a -15.....	135
XXII.	Entalpía durante la corrida 2, reóstato a -15.....	135

XXIII.	Entalpía durante la corrida 3, reóstato a -15	136
XXIV.	Entalpía durante la corrida 1, reóstato a 0.....	136
XXV.	Entalpía durante la corrida 2, reóstato a 0.....	137
XXVI.	Entalpía durante la corrida 3, reóstato a 0.....	137
XXVII.	Calor absorbido y disipado durante la corrida 1, reóstato a -15	138
XXVIII.	Calor absorbido y disipado durante la corrida 2, reóstato a	138
XXIX.	Calor absorbido y disipado durante la corrida 3, reóstato a -15	139
XXX.	Calor absorbido y disipado durante la Corrida 1, reóstato a 0.....	139
XXXI.	Calor absorbido y disipado durante la corrida 2, reóstato a 0	140
XXXII.	Calor absorbido y disipado durante la corrida 3, reóstato a 0	140
XXXIII.	Flujo volumétrico durante la Corrida 1, reóstato a -15.....	141
XXXIV.	Flujo volumétrico durante la corrida 2, reóstato a -15.....	141
XXXV.	Flujo volumétrico durante la corrida 3, reóstato a -15.....	142
XXXVI.	Flujo volumétrico durante la corrida 1, reóstato a 0.....	142
XXXVII.	Flujo volumétrico durante la corrida 2, reóstato a 0.....	143
XXXVIII.	Flujo volumétrico durante la corrida 3, reóstato a 0.....	143
XXXIX.	Potencia del compresor, reóstato a -15.....	144
XL.	Potencia del compresor, reóstato a 0	144
XLI.	Calor absorbido y liberado promedio.....	144
XLII.	Calor absorbido y liberado promedio.....	144
XLIII.	Coeficiente de desempeño experimental	145
XLIV.	Coeficiente de desempeño de Carnot	145
XLV.	Eficiencia del sistema	145
XLVI.	Error por exactitud al variar la posición del reóstato para el refrigerante R134a.....	147
XLVII.	Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 15 negativo	149
XLVIII.	Flujo volumétrico de agua 1 con posición del reóstato a 15 negativo.....	149

XLIX.	Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo.....	150
L.	Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 15 negativo	150
LI.	Flujo volumétrico de agua 2 con posición del reóstato a 15 negativo	151
LII.	Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo.....	151
LIII.	Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 15 negativo	152
LIV.	Flujo volumétrico de agua 3 con posición del reóstato a 15 negativo	152
LV.	Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo.....	153
LVI.	Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 0	153
	Flujo volumétrico de agua 1 con posición del reóstato a 0.....	154
LVII.	Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 0	154
LVIII.	Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 0	155
LIX.	Flujo volumétrico de agua 2 con posición del reóstato a 0.....	155
LX.	Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 0	156
LXI.	Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 0	156
LXII.	Flujo volumétrico de agua 3 con posición del reóstato a 15 negativo	157
LXIII.	Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo.....	157
LXIV.	R134a (Líquido-vapor).....	159

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidades
x_i	Cada uno de los datos	[Adimensional]
C_{PA}	Calor específico del agua a distintas temperaturas	[KJ/(Kg °C)]
C_{Pr}	Calor específico del refrigerante	[KJ/(Kg °C)]
Q_L	Cantidad de calor que se absorbe en el Evaporador	[KJ/s]
Q_H	Cantidad de calor que se disipa en el Condensador	[KJ/s]
$Z_{a/2}$	Confiabilidad	[Adimensional]
I	Corriente o amperaje	[A]
Δ	Delta	[Adimensional]
P	Densidad del agua	[Kg/m ³]
$\rho_{(T\text{ °C})}$	Densidad del agua en función de la temperatura	[Kg/m ³]
∂	Derivada parcial	[Adimensional]
Σ	Desviación estándar	[Adimensional]
COP_C	Eficiencia de Carnot	[Adimensional]
COP_i	Eficiencia del ciclo ideal de refrigeración por compresión	[Adimensional]
COP_r	Eficiencia del ciclo real de refrigeración por compresión	[Adimensional]
COP_i	Eficiencia del ciclo real de refrigeración por compresión	[Adimensional]
η_e	Eficiencia del equipo	[%]
η_s	Eficiencia Isentrópica del compresor	[%]
ΔH_{vap}	Entalpía de vaporización del refrigerante	[KJ/Kg]
E_{ABS}	Error absoluto	[Adimensional]
E	Error estimado	[Adimensional]
fp	Factor de potencia para el compresor	[Adimensional]
m_w	Flujo másico de agua	[Kg/s]
m_r	Flujo másico del refrigerante	[Kg/s]

V_w	Flujo volumétrico de agua	[m ³ /s]
ΔT	Gradiente de temperatura del agua	[° C]
M	Margen de error	[%]
T	Nivel de fiabilidad	[%]
N	Número total de datos.	[Adimensional]
%Err	Porcentaje de error relativo	[%]
P_{COMP}	Potencia del compresor	[W]
P_C	Presión en el condensador	[psi]
P_E	Presión en el evaporador	[psi]
P	Prevalencia estimada de la variable considerada	[Adimensional]
P	Probabilidad de éxito	[%]
Q	Probabilidad de fracaso	[%]
\bar{x}	Promedio de los datos	[Adimensional]
Σ	Sumatoria	[Adimensional]
T_C	Temperatura en el condensador	[° C]
T_E	Temperatura en el evaporador	[° C]
T	Tiempo	[s]
W	Trabajo eléctrico del compresor	[J/s]
$W_{Neto,Entrada}$	Trabajo neto de entrada del sistema	[KJ/s]
V	Voltaje	[V]

GLOSARIO

Absorción	Operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido con el cual forma solución (un soluto A, o varios solutos, se absorben de la fase gaseosa y pasan a la líquida).
Calor	El calor siempre se transfiere entre diferentes cuerpos o diferentes zonas de un mismo cuerpo que se encuentran a diferentes temperaturas y el flujo de calor siempre ocurre desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el cuerpo de menor temperatura, ocurriendo la transferencia de calor hasta que ambos cuerpos se encuentren en equilibrio térmico.
Capilar	Es una conducción de fluido muy estrecha y de pequeña sección circular. Su nombre se origina en similitud con el espesor del cabello, y es en estos tubos en los que se manifiestan los fenómenos de capilaridad.
Ciclo de refrigeración	Consiste en forzar mecánicamente la circulación de un fluido en un circuito cerrado creando zonas de alta y baja presión con el propósito de que el fluido absorba calor en un lugar y lo disipe en el otro.

Compresión	Aumento de la presión de un fluido mediante la disminución de su volumen.
Condensación	Cambio de estado de la materia que se encuentra en forma gaseosa a forma líquida.
CoolPack	Programa gratuito de simulación para procesos y diseño de sistemas de refrigeración de varios tipos.
Debian	Es una comunidad conformada por desarrolladores y usuarios, que mantiene un sistema operativo GNU basado en software libre precompilado y empaquetado, en un formato sencillo en múltiples arquitecturas de computador y en varios núcleos.
Diseño	Contexto de las artes aplicadas, ingeniería, arquitectura y otras disciplinas creativas, diseño se define como el proceso previo de configuración mental, "pre-figuración", en la búsqueda de una solución en cualquier campo.
Ecuación	Una ecuación es una igualdad entre dos expresiones algebraicas, denominadas miembros, en las que aparecen valores conocidos o datos, y desconocidos o incógnitas, relacionados mediante operaciones matemáticas.
Eficiencia	Relación entre la energía útil y la energía invertida.
Energía	Capacidad necesaria para realizar un trabajo.

Entalpía	Expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o sea, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.
Entropía	Es la magnitud física que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo. Es una función de estado de carácter extensivo y su valor, en un sistema aislado, crece en el transcurso de un proceso que se dé de forma natural.
Error experimental	La inexactitud cometida por culpa de no poder controlar adecuadamente la influencia de todas las variables presentes en un experimento.
Estrangulamiento	Es una restricción al flujo, si bien se reduce la presión, no realiza trabajo y por lo general la transferencia de calor es pequeña.
Evaporación	Proceso físico en sí, que trata del cambio de estado, de líquido a gaseoso en el cual una sustancia se puede separar de otra por su punto de ebullición.
Experimento	Procedimiento mediante el cual se trata de comprobar (confirmar o verificar) una o varias hipótesis relacionadas con un determinado fenómeno, mediante la manipulación de la/s variables que presumiblemente son su causa.
Flujo	Cantidad de fluido que avanza en una unidad de tiempo.

Frío	Ausencia de calor.
GNU	Acrónimo recursivo que significa GNU No es Unix (GNU is Not Unix), concebido con el objetivo de crear un sistema operativo completamente libre.
Kernel	Es un software que actúa de sistema operativo. Es el principal responsable de facilitar a los distintos programas acceso seguro al hardware de la computadora o en forma más básica, es el encargado de gestionar recursos, a través de servicios de llamada al sistema.
Linux	Es un sistema operativo libre tipo Unix, usualmente utilizado junto a las herramientas GNU como interfaz entre los dispositivos de hardware y los programas usados por el usuario para manejar un computador.
R134a	Halogenuro de alquilo en estado gaseoso utilizado principalmente para sistemas de refrigeración, con nombre IUPAC 1,1,1,2-Tetrafluoroetano.
Refrigerante	Compuesto químico fácilmente licuable, que se utiliza para servir de medio transmisor de calor entre otros dos en una máquina térmica, y concretamente en aparatos de refrigeración.
Reóstato	Resistor de resistencia variable.
Sistema	Conjunto de funciones, virtualmente referenciada sobre ejes, bien sean estos reales o abstractos.

Software	Equipamiento lógico o soporte lógico de una computadora digital, y comprende el conjunto de los componentes lógicos necesarios para hacer posible la realización de tareas específicas; en contraposición a los componentes físicos del sistema, llamados hardware.
Sublimación	Es el proceso que consiste en el cambio de estado de la materia sólida al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido.
Ubuntu	Distribución GNU/Linux basada en Debian GNU/Linux, cuyo nombre proviene de la ideología sudafricana Ubuntu ("humanidad hacia otros").
Vapor	Estado en el que se encuentra un gas (estado de la materia en el que las moléculas que la forman no reaccionan entre sí formando enlaces moleculares, sino que tienden a repelerse mutuamente, adoptando la forma y el volumen del recipiente que las contiene y tendiendo a separarse, esto es, expandirse, todo lo posible) cuando se encuentra por debajo de su temperatura crítica.
Variable	Símbolo que representa un elemento no especificado de un conjunto dado.

RESUMEN

Se diseñó una práctica experimental de refrigeración por compresión en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, empleando un equipo experimental el cual representa un ciclo de refrigeración por compresión utilizando como refrigerante gas R134a, complementado con un software simulador para la comparación entre el ciclo real e ideal.

Los estudiantes realizaron experimentos en el equipo de refrigeración, previo a una metodología, con un diseño experimental adecuado, comúnmente definiendo variables de control y monitoreo por medio de las cuales generaron datos para presentar los resultados obtenidos, interpretarlos y concluir.

Se evaluó posteriormente a los estudiantes para comprobar los conocimientos adquiridos en cada una de las etapas del ciclo de refrigeración como la compresión, condensación, expansión y evaporación de gas refrigerante además de la aplicación de las tablas y diagramación del equipo de refrigeración utilizando la nomenclatura aplicada oficialmente en ingeniería.

Los estudiantes reflejaron satisfactoriamente el cumplimiento de los objetivos al aplicar la metodología adecuada, manejo del equipo con base en los conocimientos termodinámicos previamente adquiridos, con lo que se implementó la práctica de refrigeración por compresión exitosamente.

ABSTRACT

An experimental practice have been designed of a compression cooling system in the Unit Operations Laboratory at the Chemical Engineering College, using an experimental equipment which represents a compression refrigeration cycle using R134a as a refrigerant gas, supplemented with a software simulator for comparison real and ideal cycle.

Students performed experiments in refrigeration equipment prior to an experimental design methodology with a suitable, commonly defining monitoring and control variables by means of which generated data to present the results, interpret and conclude.

The students have been assessed to check the knowledge acquired in each of the stages of cooling and compression, condensation, expansion and evaporation of refrigerant gas in addition to the application of the tables and layout of the cooling equipment using the nomenclature applied officially in engineering.

Students showed satisfactory achievement of the objectives by applying the appropriate methodology, equipment management based on thermodynamic knowledge previously acquired, which was implemented compression refrigeration practice successfully.

OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar una práctica experimental de refrigeración por compresión para los estudiantes de Laboratorio de Ingeniería Química de La Universidad De San Carlos de Guatemala en un intercambiador de calor para agua utilizando como refrigerante gas R134a.

ESPECÍFICOS

1. Armar, instalar y poner en marcha el equipo de refrigeración por compresión en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química.
2. Comparar los resultados obtenidos en el ciclo de refrigeración ideal del Simulador *CoolPack* con el ciclo de refrigeración real, mediante la aplicación de conceptos termodinámicos.
3. Diseñar una práctica para estudiantes de Ingeniería Química, utilizando el equipo de refrigeración por compresión mediante procedimientos didácticos y diseño experimental apropiado.
4. Llevar a cabo prácticas testigo con los estudiantes del Laboratorio de Ingeniería Química 1, para concluir sobre la calidad del aprendizaje y la confiabilidad didáctica del equipo y evaluaciones.
5. Elaborar el manual de operación del equipo.

HIPÓTESIS

Hipótesis científica:

“El valor de COP (ω) real y de Carnot es constante para el refrigerante R134a”.

Hipótesis estadística:

- Hipótesis nula

“El COP (ω) real y de Carnot varía de acuerdo con el flujo másico del refrigerante R134a”.

- Hipótesis alternativa

“El COP (ω) real y de Carnot permanece constante de acuerdo con el flujo másico de refrigerante R134a”.

INTRODUCCIÓN

Un equipo de refrigeración por compresión de gas consiste en la utilización de un gas refrigerante forzado a realizar una circulación mecánica produciendo altas y bajas presiones con el propósito de absorber calor en el evaporador y disiparlo en el condensador por medio de una convección forzada con aire.

Como parte del estudio en Ingeniería Química es necesario el conocimiento del ciclo de refrigeración por compresión y la transferencia de calor que se presenta dentro de cada uno de los equipos. Se parte de los fenómenos de condensación y evaporación, así también del estudio del comportamiento del gas refrigerante.

En este experimento se empleó el gas Freón R134a (gas SUVA) por sus propiedades termodinámicas útiles en ciclos de refrigeración; la interacción que existe entre el refrigerante y el compresor para la determinación del coeficiente de operación y eficiencia del mismo, en función de la presión, temperatura y entalpías del sistema, encontrado en la literatura para gases HFC de termodinámica.

Con el equipo implementado se realizaron experimentos, donde los estudiantes corrieron prácticas experimentales, quienes fueron asistidos en la corrida de la práctica y en la elaboración de reportes técnicos en cuya actividad plantearon sus resultados y conclusiones.

1. ANTECEDENTES

El experimento es un método para verificar empíricamente una hipótesis causal. Sobre la base de la hipótesis, se diseñó el experimento de forma que el objeto de estudio tenga la posibilidad de comportarse de acuerdo con la hipótesis o no. El método está así sólidamente anclado en la teoría existente y es posible sólo cuando ya se conoce el objeto bastante bien desde el comienzo y sólo se requiere depurar el conocimiento, por ejemplo, estableciendo asociaciones cuantitativas entre variables.

En el método experimental, el punto de partida del investigador es una hipótesis teórica. La primera tarea es traducir la hipótesis a un diseño experimental, empírico, donde la variable independiente aparezca como un estímulo que se aplica sobre el objeto de estudio. A este estímulo, el objeto puede optar por reaccionar en el modo que se especifica en la hipótesis; esta reacción entonces es medida y así se obtiene el valor de la variable dependiente.

El experimento ha de ser repetido al menos una vez, para poder comprobar al menos dos valores distintos de la variable independiente y saber si tienen algún efecto sobre la variable dependiente. Pero puede que se necesiten muchos más experimentos si las hipótesis incluyen más de dos variables, si la relación causal que se está comprobando es muy débil o si hay perturbaciones.

La experimentación en un equipo de refrigeración por compresión está basada en la obtención de datos a partir de lecturas experimentales proporcionadas por instrumentos de medición, los cuales se comparan

posteriormente con las bases teóricas y así comprobar una o varias hipótesis previamente planteadas.

Diversos estudios relacionados a sistemas de refrigeración, la mayoría de estos estudios han sido aplicados por parte de ingenieros mecánicos, entre los cuales cabe mencionar los siguientes:

Autor: Macario

Año: 2009

Título de investigación: “Diseño de la Práctica Simulada de Refrigeración en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala”

Universidad: USAC, Ingeniería Química.

Autor: Porres

Año: 2003

Título de investigación: “Diseño de las prácticas de laboratorio de la asignatura refrigeración y aire acondicionado de la Universidad Rafael Landívar”

Universidad: Universidad Rafael Landívar, Ingeniería Mecánica

Autor: Galindo

Año: 2002

Título de investigación: “Descripción y análisis de equipos y refrigerantes usados en la refrigeración industrial.

Universidad: USAC, Ingeniería Mecánica

Autor: Espinosa

Año: 2000

Tema de investigación: "Diseño de un modelo práctico-experimental de des-humidificación para el laboratorio de refrigeración de aire acondicionado"

Universidad: USAC, Ingeniería Mecánica

Autor: Flores

Año: 1978

Tema de Investigación: "Panel didáctico para la enseñanza de un sistema de refrigeración"

Universidad: USAC, Ingeniería Mecánica

2. MARCO TEÓRICO

CICLOS DE REFRIGERACIÓN

2.1 Ciclos de refrigeración por compresión

En las máquinas de refrigeración por compresión, los vapores son aspirados y comprimidos mediante un compresor y licuados en un condensador. Los compresores pueden ser de émbolo o rotativos, con o sin refrigeración intermedia. Los equipos frigoríficos a base de compresores de émbolos y funcionamiento automático, son los que se utilizan casi exclusivamente en los frigoríficos industriales.

Durante el cambio de estado el refrigerante en estado gaseoso absorbe energía térmica del medio en contacto con el evaporador, bien sea este medio gaseoso o líquido. Luego de este intercambio energético, un compresor mecánico se encarga de aumentar la presión del vapor para poder condensarlo dentro de otro intercambiador de calor conocido como condensador y hacerlo líquido de nuevo.

Ya que este aumento de presión además produce un aumento en su temperatura, para lograr el cambio de estado del fluido refrigerante es necesario enfriarlo al interior del condensador; esto suele hacerse por medio de aire y/o agua. De esta manera, el refrigerante en estado líquido, puede evaporarse nuevamente a través de la válvula de expansión y repetir el ciclo de refrigeración por compresión.

2.2 Importancia de los sistemas de refrigeración convencionales y por compresión de gas

Un sistema de refrigeración se emplea para mantener cierta región del espacio a una temperatura menor que la de su entorno. El fluido de trabajo puede permanecer en una sola fase (refrigeración por gas) o puede aparecer en dos fases (refrigeración por compresión de vapor). Es común asociar la refrigeración con la conservación de alimentos y acondicionamiento de aire en los edificios. No obstante, las técnicas de refrigeración se necesitan en muchas otras situaciones. Como son el empleo de combustibles líquidos para la propulsión de cohetes, el oxígeno líquido para la fabricación del acero, el nitrógeno líquido para la investigación a temperaturas bajas(criogenia), y para técnicas quirúrgicas y el gas natural licuado para transporte intercontinental son solo algunos ejemplos de los muchos que la refrigeración es esencial.

2.3 Transferencia de calor

Del estudio de la Termodinámica sabemos que el calor es energía en tránsito que tiene lugar como resultado de las interacciones entre un sistema y sus alrededores, debido a una diferencia de temperatura. También sabemos que la Termodinámica Clásica trata con sistemas en equilibrio, de modo que puede predecir la cantidad de energía requerida para que un sistema dado cambie de un estado de equilibrio a otro, pero no puede predecir qué tan rápido tendrá lugar dicho cambio, puesto que el sistema no está en equilibrio durante el proceso. Es en este punto donde la ciencia de la Transferencia de Calor juega un rol complementario de la Termodinámica, dándonos información acerca de la naturaleza de las interacciones entre sistema y medio y de la velocidad con la que dichas interacciones se producen. Como ejemplo, consideremos una barra de acero que se enfría al sumergirse en un recipiente

con agua a menor temperatura. La Termodinámica puede utilizarse para encontrar la temperatura de equilibrio final del sistema pero no puede predecir el tiempo necesario para alcanzar dicho equilibrio, o la temperatura que tendrá la barra después de cierto tiempo antes de alcanzar el equilibrio. La Transferencia de calor puede utilizarse para encontrar la temperatura de la barra y del agua como función del tiempo. Así, el 1º Principio nos permite realizar balances de energía en un sistema, cuantificando la energía acumulada en el mismo a partir del conocimiento de las energías entrantes y salientes y de la energía térmica generada por conversión de otras formas de energía tales como: química, eléctrica, electromagnética y nuclear. El 2º Principio especifica el sentido de la transferencia de calor, indicándonos que el flujo de calor se produce en el sentido de las temperaturas decrecientes. Por último, la ciencia de la Transferencia de Calor nos brinda reglas experimentales adicionales muy simples que permiten cuantificar la velocidad con la cual ocurre la transferencia de calor en términos del grado de desequilibrio térmico.

2.4 Mecanismos de Transferencia de calor

Existen tres formas de Transferencia de Calor, llamadas: conducción, convección y radiación. Cada uno de estos modos puede estudiarse separadamente, si bien la mayoría de las aplicaciones en Ingeniería son combinaciones de las tres formas. No obstante, un estudio profundo de los mecanismos asociados a cada una de las formas mencionadas anteriormente permite extender fácilmente el análisis al problema combinado.

2.4.1 Transferencia de calor por conducción

Flujo de calor a través de medios sólidos por la vibración interna de las moléculas y de los electrones libres y por choques entre ellas. Las moléculas y los electrones libres de la fracción de un sistema con temperatura alta vibran con más intensidad que las moléculas de otras regiones del mismo sistema o de otros sistemas en contacto con temperaturas más bajas. Las moléculas con una velocidad más alta chocan con las moléculas menos excitadas y transfieren parte de su energía a las moléculas con menos energía en las regiones más frías del sistema. Las moléculas que absorben el excedente de energía también adquirirán una mayor velocidad vibratoria y generarán más calor (energía potencial -absorbe calor- <--> energía cinética -emite calor).

Los metales son los mejores conductores térmicos; mientras que los materiales no metálicos son conductores térmicos imperfectos.

2.4.2 Transferencia de calor por convección

Es el flujo de calor mediante corrientes dentro de un fluido (líquido o gaseoso). La convección es el desplazamiento de masas de algún líquido o gas. Cuando una masa de un fluido se calienta al estar en contacto con una superficie caliente, sus moléculas se separan y se dispersan, causando que la masa del fluido llegue a ser menos densa. Cuando llega a ser menos denso se desplazará hacia arriba u horizontalmente hacia una región fría, mientras que las masas menos calientes, pero más densas, del fluido descenderán o se moverán en un sentido opuesto al del movimiento de la masa más caliente (el volumen de fluido menos caliente es desplazado por el volumen más caliente). Mediante este mecanismo los volúmenes más calientes transfieren calor a los volúmenes menos calientes de ese fluido (un líquido o un gas).

2.4.3 Transferencia de calor por radiación

Es la transferencia de calor por medio de ondas electromagnéticas. No se requiere de un medio para su propagación. La energía irradiada se mueve a la velocidad de la luz. El calor irradiado por el Sol se puede intercambiar entre la superficie solar y la superficie de la Tierra sin calentar el espacio de transición.

2.5 Sistemas de producción de frío

Hablar de producción de frío es tanto como hablar de extracción de calor; existen diversos procedimientos que permiten su obtención, basados en el hecho de que si entre dos cuerpos existe una diferencia de temperaturas, la transmisión de calor de uno a otro se puede efectuar por conducción y radiación.

Procedimientos químicos. Están basados en el uso de determinadas mezclas y disoluciones que absorben calor del medio que las rodea; se trata de procesos no continuos, de nulo interés y aplicación prácticos, sólo aptos para determinados trabajos de laboratorio.

Procedimientos físicos. Se puede conseguir un descenso de temperatura mediante procesos físicos, como la expansión de un fluido en expansores y en válvulas de estrangulamiento, fundamento de las actuales máquinas industriales de producción de frío; este tipo de sistemas admite la siguiente clasificación:

Sistemas basados en el cambio de estado de una sustancia. En estos sistemas interviene el calor latente del cambio de estado y se puede hacer la siguiente subdivisión:

- 2.5.1 Por fusión; en que la producción de frío, o lo que es lo mismo, la sustracción de calor a la carga a refrigerar, se utiliza para pasar a una sustancia del estado sólido al de líquido; está muy extendida la fusión del hielo, o de mezclas eutécticas, que al cambiar de estado captan calor del entorno.
- 2.5.2 Por sublimación; en que el paso se efectúa de sólido a gas mediante la adición de calor, siendo el ejemplo más representativo el anhídrido carbónico, para la producción de nieve carbónica.
- 2.5.3 Por vaporización, en donde se engloban todos los procesos en los que un líquido pasa a fase de vapor al suministrársele una cierta cantidad de calor, pudiéndose distinguir dos casos:
- 2.5.3.1 Circuito abierto (vaporización directa), en donde el fluido capta el calor de la carga a enfriar y una vez ha modificado su estado ya no se vuelve a utilizar; este es el caso de algunos transportes que utilizan nitrógeno como medio de producción de frío.
- 2.5.3.2 Circuito cerrado, en que a diferencia del anterior, el fluido se recupera con vistas a ser utilizado en un proceso cíclico. Como característica general de estos métodos, hay que hacer un aporte de energía al sistema y utilizar fluidos que vaporicen a baja presión.

2.6 Clasificación de los sistemas de refrigeración

Las máquinas frigoríficas se pueden clasificar, según el sistema utilizado para la recogida de vapores, en la siguiente forma:

2.6.1 Máquinas de adsorción, en las que los vapores son captados mediante un absorbente sólido.

2.6.2 Máquinas de absorción, en las que los vapores que se forman añadiendo calor al sistema, son absorbidos y recuperados mediante un absorbente líquido.

2.6.3 Máquinas de compresión, en las que los vapores son aspirados y comprimidos mediante un compresor y licuados en un condensador; los compresores pueden ser de émbolo o rotativos, con o sin refrigeración intermedia. Los equipos frigoríficos a base de compresores de émbolos y funcionamiento automático, son los que se utilizan casi exclusivamente en los frigoríficos industriales.

2.6.4 Máquinas de eyección, en las que los vapores son arrastrados por el efecto Venturi que genera el paso de otro fluido a gran velocidad.

2.6.5 Sistemas basados en la expansión adiabática de un fluido gaseoso

En estos sistemas se consigue el enfriamiento del mismo, mediante dos tipos de máquinas,

- a) Para la producción de aire líquido, (efecto Joule-Thompson)
- b) Las máquinas refrigeradoras de aire, en las que el aire comprimido al expansionarse en un expansor (turbina o cilindro de trabajo), se enfría, realizando al mismo tiempo un trabajo, que puede ser aprovechado para la compresión del aire.

2.7 Sistemas basados en la elevación de la temperatura de un fluido frigorígeno

En estos sistemas se utiliza un fluido frigorígeno (salmuera) que previamente se ha enfriado por algún tipo de procedimiento; durante el enfriamiento de la salmuera no se produce cambio de estado en la misma, ni tampoco cuando ésta capta calor del producto a enfriar, por lo que el calor eliminado de la carga lo toma la salmuera en forma de calor sensible.

Existen otros métodos en los que la producción de frío se obtiene por técnicas distintas de las anteriormente descritas, pudiéndose enunciar, entre otras, las siguientes:

2.7.1 Efecto Peltier (Termoeléctrico): este método está basado en el fenómeno que tiene lugar al pasar la corriente eléctrica por un circuito compuesto por dos conductores distintos, unidos por un par de soldaduras. Al pasar la corriente eléctrica por el circuito, una de las uniones se enfría, pudiéndose utilizar como fuente fría, mientras que la otra se calienta.

2.7.2 Efecto Haas-Keenson: es un método que permite alcanzar temperaturas próximas a 0°K, menores de 0.001°K, mediante la desimantación de una sal paramagnética. El proceso de descenso de la temperatura se inicia enfriando previamente la sal mediante

helio líquido; una vez alcanzado el nivel térmico deseado, se somete a la sal a la acción de un campo magnético muy potente que orienta sus moléculas, lo que origina un desprendimiento de calor que se elimina a través del gas licuado; una vez conseguida la eliminación del calor se aísla la sal y se desconecta el campo magnético, con lo que las moléculas de la sal vuelven a su estado inicial, para lo que se requiere un trabajo que, por estar la sal completamente aislada, lo obtiene de su propia energía interna, ocasionando un descenso en la temperatura hasta los límites mencionados.

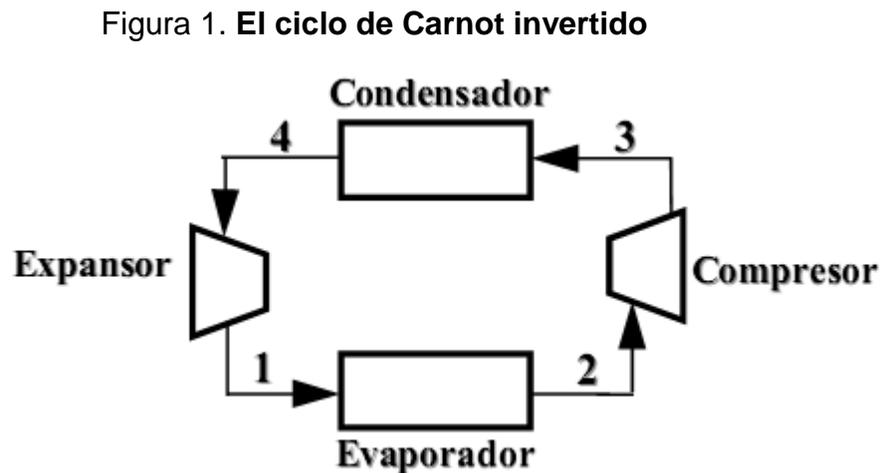
2.7.3 Efecto Etingshausen (Termo-magneto-eléctrico): según este método, cuando por un conductor circula una corriente eléctrica, en presencia de un campo magnético perpendicular al mismo, el material del conductor se ve afectado por la presencia de un gradiente de temperaturas que se produce en dirección perpendicular a la de los campos, de forma que uno de los extremos del conductor absorbe calor, mientras que el otro lo desprende.

2.7.4 Efecto de Ranke-Hilsh (Torbellino): cuando una corriente de aire comprimido se inyecta tangencialmente a velocidad sónica en una cámara tubular, se crea un movimiento circular ciclónico, observándose un enfriamiento del aire en la zona cercana al eje del cilindro, fenómeno que es debido a la expansión de este aire y al descenso de temperatura que provoca; el aire situado en la periferia experimenta un calentamiento. Es un proceso apenas utilizado, restringido al acondicionamiento de equipos y trajes de trabajo en ambientes tóxicos y cálidos.

2.8 El ciclo de Carnot Invertido

El ciclo de Carnot Inverso es considerado como el estándar de comparación dentro de los ciclos de refrigeración existentes, dado que por ser ideal da el rendimiento máximo posible por un proceso cíclico. Este será el patrón de comparación al evaluar eficiencia y operación de todos aquellos ciclos mecánicos reales que transforman el calor o energía internas en trabajo mecánico.

El ciclo de Carnot Inverso está compuesto por cuatro procesos totalmente reversibles que se ilustran en la figura que se muestra a continuación:



- 1) Una evaporación isobárica e isotérmica de 1 a 2 a una temperatura T_2 donde se suministra al fluido una cantidad de calor Q .
- 2) Una compresión isentrópica o adiabática donde el refrigerante pasa de una temperatura T_2 a una T_3 (donde $T_3 > T_2$) al realizar un trabajo sobre el gas.
- 3) Una condensación isobárica e isotérmica de 3 a 4 a una temperatura T_4 , al ceder una cantidad de calor Q al receptor.

- 4) Una expansión isentrópica o adiabática donde el fluido pasa de una temperatura T_4 hasta la inicial T_1 (donde $T_4 > T_1$).

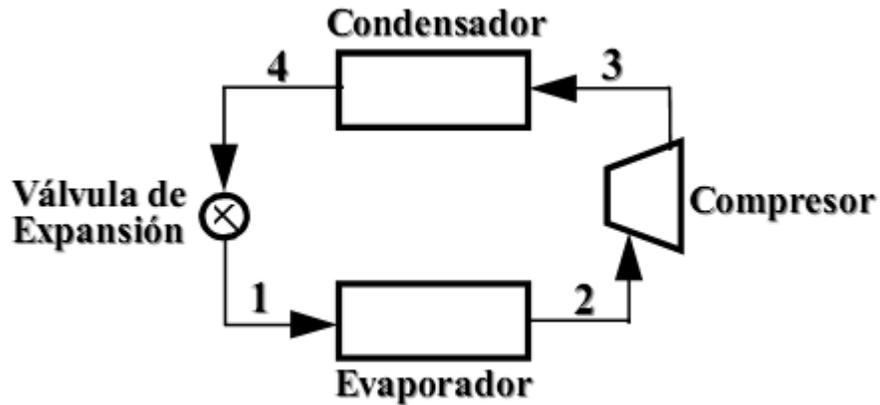
Para obtener un ciclo de refrigeración en la práctica se emplea una bomba calorimétrica, donde el líquido a evaporar a presión constante, permite absorber calor a temperatura constante. Este líquido refrigerante puede ser desde un glicol éter o producto halogenado hasta agua, dependiendo de las condiciones de operación requeridas y la aplicación industrial. Para el caso particular de esta práctica se emplea el Freón R134a.

El ciclo de refrigeración de compresión de vapor que se efectúa en una bomba calorimétrica, realiza los siguientes procesos reversibles sobre la sustancia refrigerante:

- 1) Una evaporación donde se suministra calor poniendo en contacto indirecto una sustancia más caliente con el refrigerante. Este comienza a hervir y pasa a fase vapor.
- 2) Ya en fase de vapor, este se introduce a un compresor de donde sale a mayor presión y temperatura.
- 3) El vapor comprimido pasa por un condensador, en donde se pone en contacto indirecto (ej. serpentín) con un fluido de menor temperatura. Durante este proceso el refrigerante cede calor logrando así su condensación.
- 4) Esta mezcla de vapor y líquido se pasa por una válvula de expansión isoentálpica, saliendo de ella a baja presión y temperatura.

Esto se verá ilustrado de la siguiente forma

Figura 2. Ciclo de refrigeración por compresión de gas

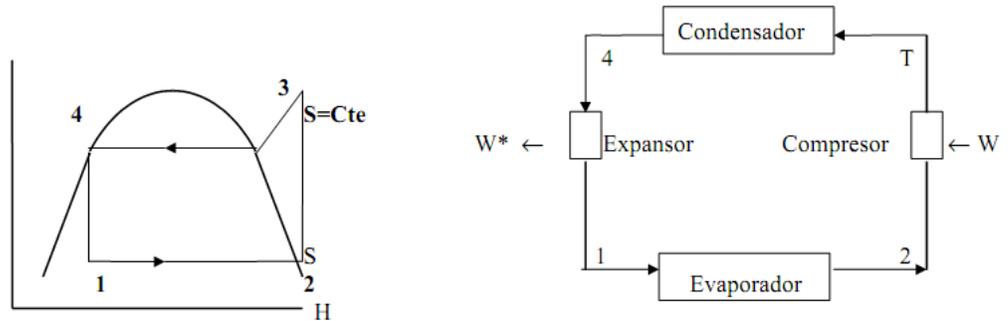


(Referencia electrónica 1)

Prácticamente se pueden hacer las siguientes consideraciones

- a) La caída de presión del refrigerante durante el proceso de condensación y evaporación es despreciable, por lo que ambos se pueden considerar isobáricos.
- b) El proceso de compresión se realiza a entropía constante, dado que se considera que no hay intercambio de calor con los alrededores y toda la energía aplicada al compresor se convierte en trabajo (idealmente).
- c) El proceso de expansión en la válvula se realiza a entalpía constante.

Figura 3. Ciclo de Carnot inverso por compresión de gas



(Referencia electrónica 1)

La absorción de calor a temperatura constante está dada por la evaporación de un líquido a presión constante, de igual manera la condensación de vapor después de la compresión hasta una presión superior, sirve para rechazar calor a temperatura constante. El líquido obtenido de la condensación se regresa a su estado original mediante un proceso de expansión, el cual puede realizarse en una turbina y del cual se obtiene trabajo.

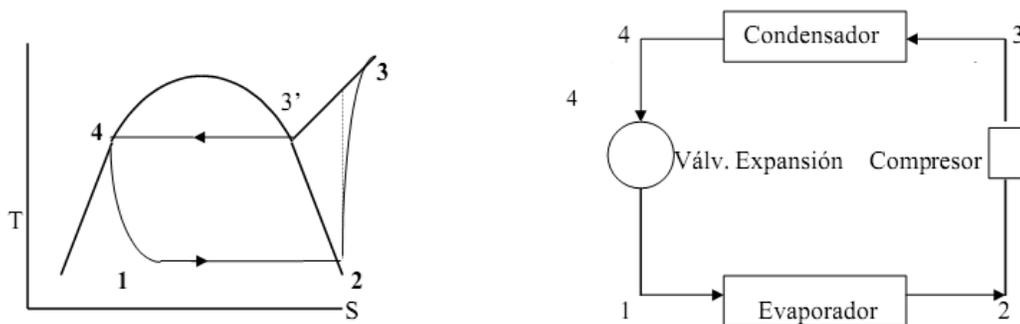
Cuando la compresión y expansión son isentrópicas, la secuencia de los procesos constituye el ciclo de la figura 1, equivale al ciclo de Carnot inverso, a excepción de que el vapor sobrecalentado que sale del compresor (punto 3 de la figura) debe enfriarse hasta la temperatura de saturación antes de que inicie la condensación.

Este proceso requiere de una turbina o un expansor que opere con una mezcla líquido/vapor, lo cual es poco práctico para pequeñas unidades, por lo que el ciclo de la figura anterior solo se emplea en instalaciones grandes. De manera más frecuente, la expansión se efectúa mediante un estrangulamiento del líquido proveniente del condensador que pasa por una válvula parcialmente abierta. En unidades pequeñas como refrigeradores caseros y los

acondicionadores de aire, las ventajas de la simplicidad y bajo costo de la de la válvula de estrangulamiento superan el posible ahorro de energía con la turbina, este proceso de estrangulamiento ocurre a entalpía constante.

El ciclo de compresión de vapor que incorpora una válvula de expansión se muestra en la siguiente figura

Figura 4. **Válvula de expansión de gas**



(Referencia electrónica 1)

La línea 4 - 1 representa el proceso de estrangulamiento a entalpía constante. La línea 2 - 3 corresponde al proceso real de compresión, la pendiente de la línea en dirección de aumento de entropía, refleja la irreversibilidad inherente del proceso.

La línea punteada 2 - 3' corresponde a la trayectoria de la compresión isentrópica. Para este ciclo el coeficiente de rendimiento se escribe como:

Ecuación 1

$$\omega = \frac{H_2 - H_1}{H_3 - H_2} = COP$$

(Referencia electrónica 1)

Donde:

ω = Coeficiente de desempeño (Adimensional).

H_1 = Entalpía 1 (KJ/Kg)

H_2 = Entalpía 2 (KJ/Kg)

H_3 = Entalpía 3 (KJ/Kg)

H_4 = Entalpía 4 (KJ/Kg)

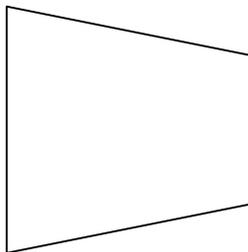
2.9 Partes de un sistema de refrigeración por compresión de gas

2.9.1 Compresor de gas

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Simbología

Figura 5. **Compresor**

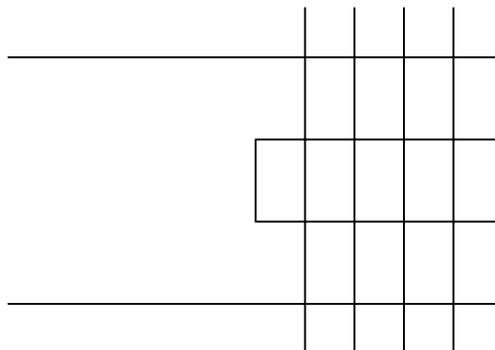


2.9.2 Condensador

Consiste en un intercambiador de calor entre fluidos (en este caso el gas R134a que es el fluido de refrigeración y el agua que es el fluido a refrigerar), de modo que mientras uno de ellos se enfría, pasando de estado gaseoso a estado líquido, el otro se calienta. Se fabrican en tamaños y disposiciones diversas para ser empleados en numerosos procesos térmicos.

Simbología

Figura 6. **Condensador**



2.9.3 Válvula estrangulamiento

Su papel es el de controlar el caudal de líquido refrigerante que fluye por el evaporador del sistema. Para realizar este cometido dispone de un sensor de temperatura que se encarga de abrir o cerrar la válvula para así disminuir o aumentar la temperatura, respectivamente. Este dispositivo permite mejorar la eficiencia de los sistemas de refrigeración por compresión.

Simbología

Figura 7. Válvula de estrangulamiento



2.9.4 Evaporador

Equipo donde se dará el intercambiador de calor que genera la transferencia de energía térmica contenida en el medio ambiente hacia un gas refrigerante R134a a baja temperatura y en proceso de evaporación. Este medio puede ser aire o agua.

Simbología

Figura 8. Evaporador



2.10 Compresores

Un compresor es una máquina que eleva la presión de un gas, un vapor o una mezcla de gases y vapores. La presión del fluido se eleva reduciendo el volumen específico del mismo durante su paso a través del compresor. Comparados con turbo soplantes y ventiladores centrífugos o de circulación axial, en cuanto a la presión de salida, los compresores se clasifican generalmente como máquinas de alta presión, mientras que los ventiladores y soplantes se consideran de baja presión.

Los compresores se emplean para aumentar la presión de una gran variedad de gases y vapores para un gran número de aplicaciones. Un caso común es el compresor de aire, que suministra aire a elevada presión para transporte, pintura pistola, inflamiento de neumáticos, limpieza, herramientas neumáticas y perforadoras. Otro es el compresor de refrigeración, empleado para comprimir el gas del vaporizador. Otras aplicaciones abarcan procesos químicos, conducción de gases, turbinas de gas y construcción.

2.10.1 Estructura de los compresores

Los elementos principales de esta estructura son: motor, cuerpo, tapas, enfriador y árboles. El cuerpo y las tapas del compresor se enfrían por el agua. Los elementos constructivos tienen ciertas particularidades. Para disminuir las pérdidas de energía de la fricción mecánica de los extremos de las placas contra el cuerpo en este se colocan dos anillos de descarga que giran libremente en el cuerpo. A la superficie exterior de estos se envía lubricación. Al girar el motor los extremos de las placas se apoyan en el anillo de descarga y se deslizan parcialmente por la superficie interior de estos; los anillos de descarga giran simultáneamente en el cuerpo.

Al fin de disminuir las fuerzas de fricción en las ranuras las placas se colocan no radicalmente sino desviándolas hacia adelante en dirección de la rotación. El ángulo de desviación constituye 7 a 10 grados. En este caso la dirección de la fuerza que actúa sobre las placas por lado del cuerpo y los anillos de descarga se aproxima a la dirección de desplazamiento de la placa en la ranura y la fuerza de fricción disminuye.

Para disminuir las fugas de gas a través de los huelgos axiales, en el buje del motor se colocan anillos de empacaduras apretados con resortes contra las superficies de las tapas.

Por el lado de salida del árbol a través de la tapa, se ha colocado una junta de prensaestopas con dispositivos tensor de resortes.

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 Variables

Se tomará en cuenta la definición operacional de las variables que pueden ser aplicadas al equipo de refrigeración por compresión, siendo estas variables dependientes e independientes según sea el caso, tabulando las variables y tomando en cuenta los factores perturbadores o de ruido.

Tabla I. Definición operacional de las variables

No.	Variables	Dimensional	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constantes	Variables	Control directo	Control indirecto
	Análisis del equipo					
1	Presión	kg/cm ² ó psi		X		X
2	Temperatura	°C		X		X
3	Flujo volumétrico de agua	l/min		X	X	
4	COP (ω)	adimensional		X		
5	Potencia del compresor	Watts		X		X
6	Corriente	A		X	X	

Tabla II. Lista de variables a manipular

No.	Variable	Rango de variación
1	Flujo volumétrico de agua	Definida por el estudiante
2	Corriente aplicada al compresor	$0A \leq 5.88A \pm 0.05A$

Tabla III. Variables de respuesta

No.	Variable	Dimensional
1	Presión	kg/cm ² o psig
2	Corriente consumida por el compresor	A
3	Flujo volumétrico	l/min

3.2 Delimitación del campo de estudio

El universo de estudio será delimitado a un equipo de refrigeración por compresión específicamente al sistema experimental que se encuentra instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química, la metodología y modelos aplicados en este documento serán específicamente aplicados a él, este equipo consta con las siguientes características:

- Un compresor de 1/3+ hp.
- Un condensador enfriado por aire.
- Un filtro.
- Una válvula de estrangulamiento.
- Un evaporador el cual funcionará como el intercambiador de calor entre el gas sub enfriado y el agua.
- Un amperímetro análogo de 15A.
- Un medidor de flujo para agua.

El equipo fue diseñado experimentalmente para uso didáctico y aplicación de conceptos de la termodinámica, siendo estos estudiados en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, USAC.

3.3 Recursos humanos disponibles

3.3.1 Investigador: Lizandro Danilo Hernández Girón.

3.3.2 Asesor: Ing. Qco. José Manuel Tay Oroxom.

3.3.3 Sujeto: Estudiantes de Ingeniería Química que cursen el Laboratorio de Ingeniería Química 1, código 428.

3.4 Recursos materiales disponibles

3.4.1 Lugar: Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Química.

3.4.2 Material de estudio: libros de transferencia de calor, termodinámica y de refrigeración adquiridos en la Biblioteca Central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.4.3 Equipo computacional: computadora de escritorio.

3.4.4 Equipo completo de refrigeración por compresión.

3.5 Técnica aplicada

El estudio será de tipo experimental, ya que se pretende obtener un muestreo de datos a partir de una aleatorización con cada uno de los experimentos realizados en el equipo para un registro estadístico y obtención de datos para un mejor manejo y control de posibles errores.

Cualitativamente

Se procederá a encuestar a los estudiantes de tal manera que expresen la su punto de vista y la calidad didáctica acerca de los experimentos realizados en el equipo de refrigeración.

Cuantitativamente

Los estudiantes realizarán corridas en el equipo de refrigeración por compresión y obtendrán datos para expresar los resultados obtenidos por medio de ecuaciones y tabulación de datos.

3.5.1 Diseño de tratamientos

Para el sistema tenemos varios tratamientos tales como: flujo másico, temperaturas, calor que entra, calor que sale; tomando en cuenta las variaciones posibles de entrada y salida del flujo másico del agua.

3.5.2 Diseño para el control de errores

3.5.2.1 Al ser un experimento en el cual se realizan varias corridas, se tomará en cuenta errores estadísticos como la desviación estándar, para valores de $N < 31$, ya que en el experimento no se realizarán más de 31 corridas:

Ecuación 2

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

(Referencia 2)

Donde:

σ = Desviación estándar.

N = Número total de datos.

x_i = Cada uno de los datos.

\bar{x} = Promedio de los datos.

También la aplicación de errores absolutos y relativos, ya que se tiene la bibliografía necesaria para hacer las comparaciones con datos teóricos a partir de los datos reales obtenidos.

3.5.2.2 Error relativo

En este caso el error relativo será aplicable a medida que los datos experimentales sean comparados con un dato teórico, la diferencia del valor absoluto de ambos dividido el valor teórico nos proporcionará el error relativo, el cuál puede ser multiplicado por cien para un manejo de porcentaje de error relativo.

A partir de la siguiente ecuación se calculará el porcentaje de error absoluto:

Ecuación 3

$$\% Err = \frac{|DT - DE|}{DT} \times 100$$

(Referencia 2)

3.5.2.3 Error absoluto

El error absoluto nos indicará que tan lejos nos encontramos de un dato teórico.

La siguiente ecuación muestra la forma de calcular el error absoluto:

Ecuación 4

$$E_{ABS} = |DT - DE|$$

(Referencia 2)

Donde:

$\%Err$ = Porcentaje de error relativo.

E_{ABS} = Error absoluto.

DT = Dato teórico.

DE = Dato obtenido experimentalmente.

3.5.2.4 Error de precisión por incertidumbre

Partiendo de unas medidas directas y de los errores de esas medidas, y conociendo una ecuación por la que a partir de las medidas conocidas se puede calcular el valor de una medida indirecta, un método de cálculo del error de esta medida indirecta es el cálculo diferencial, equiparando los diferenciales a los errores de cada variable.

En este caso se aplican derivadas parciales para evaluar los diferenciales y las incertidumbres que se obtienen de los instrumentos de medición.

No hay una ecuación generalizada ya que se debe aplicar derivación parcial en cada una de las variables que posea una incertidumbre en la medición.

A partir de la siguiente ecuación se propone un modelo en el cual hay incertidumbres en la medición de b y c:

Ecuación 5

$$a = \frac{b}{c}$$

(Referencia 2)

Derivando parcialmente se obtiene

Ecuación 6

$$\partial a = \frac{\partial b}{\partial c};$$
$$\partial a = \frac{1}{c} \partial b - \frac{b}{c^2} \partial c$$

Se debe escribir la ecuación restante en cambiando los diferenciales por deltas anteponiendo el signo \pm para así aplicar los errores por incertidumbre quedando de la siguiente manera

Ecuación 7

$$\pm \Delta a = \frac{1}{c} \pm \Delta b - \frac{b}{c^2} \pm \Delta c$$

Donde:

a = Valor relacionado a los errores por mediciones indirectas.

b = Valor de medido con un instrumento que posee incertidumbre.

c = Valor de medido con un instrumento que posee incertidumbre.

∂a = Derivada parcial respecto de a .

∂b = Derivada parcial respecto de b .

∂c = Derivada parcial respecto de c .

$\pm \Delta a$ = Incertidumbre en la medición para a .

$\pm \Delta b$ = Incertidumbre en la medición para b .

$\pm \Delta c$ = Incertidumbre en la medición para c .

3.5.3 Errores experimentales

Se tiene dos tipos de errores en el proceso de medida

3.5.3.1 Errores sistemáticos

Tienen que ver con la metodología del proceso de medida (forma de realizar la medida)

- Calibrado del aparato. Normalmente errores en la puesta a cero. En algunos casos errores de fabricación del aparato de medida que desplazan la escala. Una forma de arreglar las medidas es valorando si el error es lineal o no y descontándolo en dicho caso de la medida.
- Error de paralaje: cuando un observador mira oblicuamente un indicador y la escala del aparato. Para tratar de evitarlo o, al menos disminuirlo, se debe mirar perpendicularmente la escala de medida del aparato.

3.5.3.2 Errores accidentales o aleatorios

- Se producen por causas difíciles de controlar: momento de iniciar una medida de tiempo, colocación de la cinta métrica, etc. Habitualmente se distribuyen estadísticamente en torno a una medida que sería la correcta.

Para evitarlo se deben tomar varias medidas de la experiencia y realizar un tratamiento estadístico de los resultados. Se toma como valor o medida más cercana a la realidad la media aritmética de las medidas tomadas.

3.6 Recolección y ordenamiento de la información

Los datos serán recolectados a partir de una fuente interna de datos con base en un universo de 40 estudiantes de los cuales se ha seleccionado 5 grupos compuestos por 5 integrantes cada uno; procediendo principalmente a evaluar por medio de encuestas a cada uno de los integrantes respecto a los conocimientos adquiridos del ciclo de refrigeración por compresión de gas.

La información de las encuestas realizadas a los estudiantes se recolectó y ordenó en una tabla la cual informaron su apreciación sobre los conocimientos adquiridos individualmente.

Tabla IV. **Encuesta de apreciación didáctica**

	Apreciación didáctica			
Integrante/Grupo	Deficiente	Básico	Medio	Alto
1/1				
n/n				

Los datos experimentales proporcionados por el equipo de refrigeración se recolectaron en tablas realizadas con base en un diseño experimental apropiado, en función de las variables a manipular en la práctica, indicando variable, dimensional, así como el factor potencial de diseño y factores perturbadores.

Tabla V. **Obtención de los datos experimentales**

No.	Variable	Dimensional	Factor Potencial del diseño		Factores perturbadores	
			Constantes	Variables	Controlables	De ruido
Análisis del equipo						
1						
2						
n						

3.7 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se analiza en forma cualitativa la apreciación didáctica de los estudiantes respecto a los conocimientos adquiridos respecto al ciclo de refrigeración por compresión de gas.

Tabla VI. **Tabulación para la apreciación didáctica**

Pregunta X_i	
Apreciación didáctica	Cantidad de estudiantes
Alto	X_1
Medio	X_2
Básico	X_3
Deficiente	X_4

Respecto a los datos que son obtenidos experimentalmente en el equipo de refrigeración por compresión, se realizaran N corridas de las cuales se hará el cálculo promedio para una mejor tabulación de datos.

Tabla VII. **Tabulación de los datos obtenidos experimentalmente**

Corrida	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable N
1	$V_{1,1}$	$V_{1,2}$	$V_{1,3}$	$V_{1,N}$
2	$V_{2,1}$	$V_{2,2}$	$V_{2,3}$	$V_{2,N}$
N	$V_{N,1}$	$V_{N,2}$	$V_{N,3}$	$V_{N,N}$
Promedio	\bar{V}_1	\bar{V}_2	\bar{V}_3	\bar{V}_N

3.8 Análisis estadístico

3.8.1 Muestreo de tipo aleatorio simple

Consistirá en la extracción de una serie de datos finita de N unidades, de un tamaño fijado de antemano. Si todas las unidades son indistinguibles, el número de muestras de tamaño n viene dado por:

Ecuación 8

$$\binom{N}{n} = \frac{N!}{n!(N-n)!} = {}^N C_n$$

(Referencia 2)

Por ejemplo, si el universo de estudio contiene 5 unidades A, B, C, D, E; existen 10 muestras diferentes de tamaño 3, que son:

ABC, ABD, ABE, ACD, ACE

ADE, BCD, BCE, BDE. CDE

Tamaño fijado de la muestra

El tamaño adecuado de la muestra para una encuesta relativa a la población está determinado en gran medida por tres factores:

- a) Prevalencia estimada de la variable considerada.
- b) Nivel deseado de fiabilidad.
- c) Margen de error aceptable.

El tamaño de la muestra para un diseño de encuesta basado en una muestra aleatoria simple, puede calcularse mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 9

$$n = \frac{t^2 p \hat{p}}{m^2}$$

(Referencia 2)

Donde:

n =Tamaño de la muestra requerida.

t =Nivel de fiabilidad de 95%, para un equipo con instrumentación previamente calibrada (valor estándar de 0.95).

p =Prevalencia estimada de la variable considerada.

M =Margen de error de 5% (valor estándar de 0.05).

4 RESULTADOS

4.1 Equipo de refrigeración por compresión

Equipo de refrigeración por compresión de gas R134a experimental, armado e instalado en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, mostrado en la siguiente figura:

Figura 9. **Equipo de refrigeración por compresión de gas R134a**



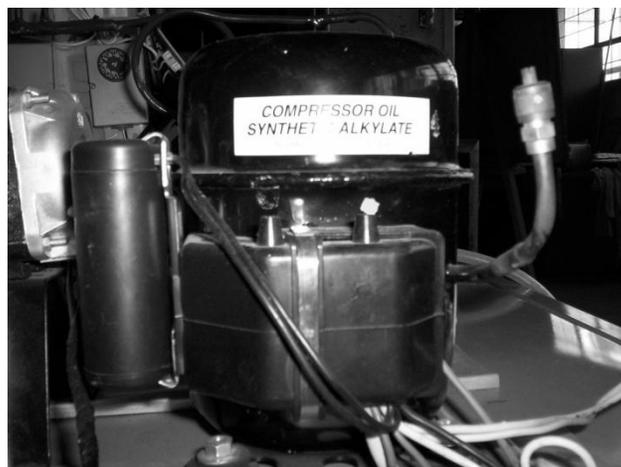
Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

El equipo consta de los siguientes aparatos y sistemas de medición:

Compresor

Es una máquina motora que trabaja entregándole energía a un fluido compresible. Esta energía es adquirida por el fluido en forma de energía cinética y presión. Generalmente se utiliza en aire acondicionado y sistemas de enfriamiento de fluidos.

Figura 10. **Compresor de gas R134a**

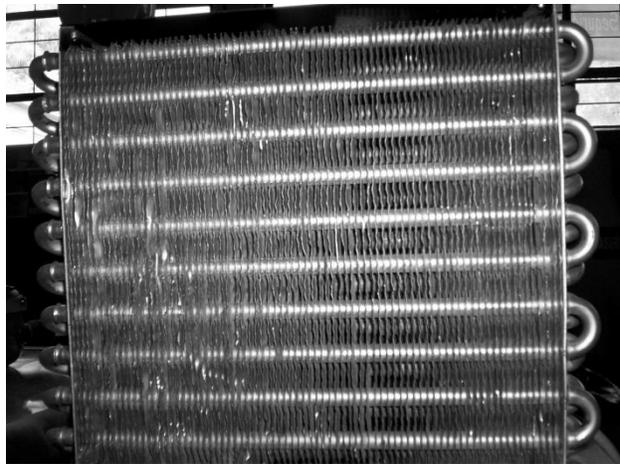


Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Condensador

Un condensador es otro tipo de intercambiador de calor en el cual se pretende que cierto fluido que lo recorre, cambie a fase líquida desde su fase gaseosa, mediante el intercambio de calor.

Figura 11. **Condensador**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Evaporador

Un evaporador es un intercambiador de calor entre fluidos (en el caso de un sistema de refrigeración el refrigerante y el aire de los alrededores) de modo que mientras uno de ellos se enfría, el otro se calienta aumentando su temperatura. Pasando de estado líquido original a estado de vapor.

Figura 12. **Evaporador**

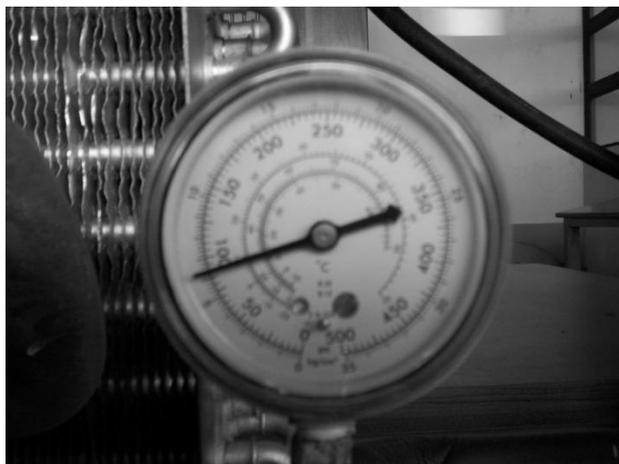


Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Manómetro

Instrumento de medición que utiliza la relación que existe entre un cambio de presión y un cambio de elevación en un fluido estático.

Figura 13. **Manómetro**

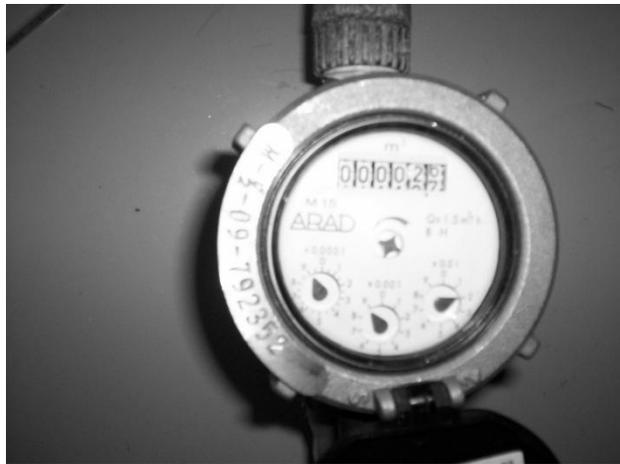


Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Medidor de Flujo

Dispositivo mecánico el cual consiste en un molino cuyas aspas están transversales a la circulación de fluido. El flujo hace girar el molino cuyo eje mueve un contador que acumula lecturas.

Figura 14. **Medidor de flujo**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Termómetro

Es un instrumento que sirve para medir la temperatura. Se basa en el efecto que un cambio de temperatura produce en algunas propiedades físicas observables y en el hecho de que dos sistemas a diferentes temperaturas puestos en contacto térmico tienden al equilibrio.

Figura 15. **Termómetros en evaporadores**

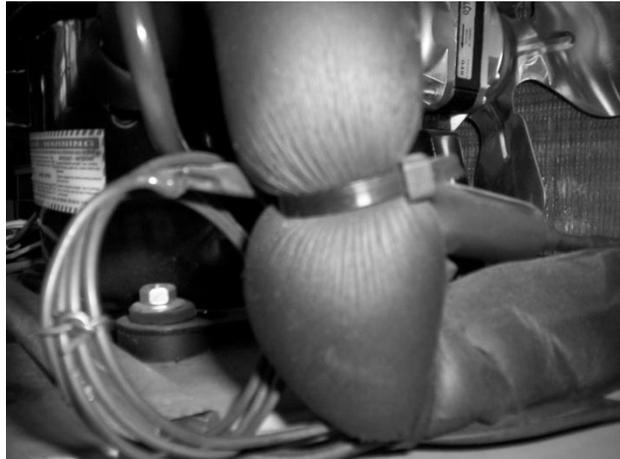


Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Capilar

Una válvula de estrangulamiento o capilar es simplemente una restricción al flujo, si bien se reduce la presión, no realiza trabajo y por lo general la transferencia de calor es pequeña. Si se elige el volumen de control lo suficientemente alejado de dicha restricción, el cambio de la energía cinética resulta pequeño.

Figura 16. **Capilar o válvula de estrangulamiento**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

4.2 Diagrama propuesto para el sistema de refrigeración por compresión

Figura 17. Diagrama del sistema de refrigeración por compresión de gas

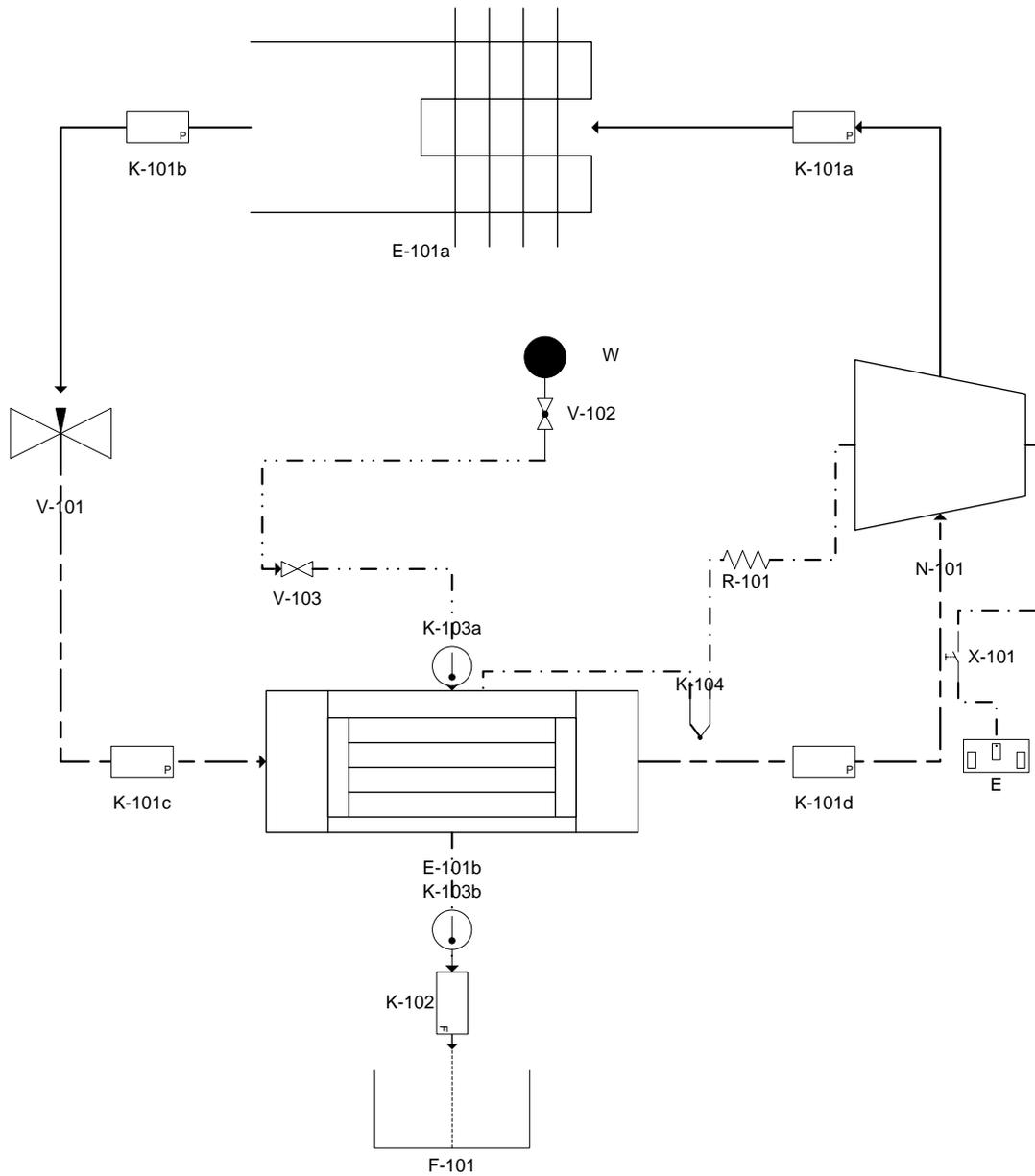


Tabla VIII. Lista de equipamiento

LISTA DE EQUIPAMIENTO	
TEXTO MOSTRADO	DESCRIPCIÓN
K-101	Manómetro
K-102	Medidor de flujo
K-103	Termómetro
K-104	Termocupla
V-101	Válvula de estrangulamiento
V-102	Válvula de globo
V-103	Válvula de esfera
N-101	Compresor
X-101	Interruptor de encendido y apagado
R-101	Reóstato
E-101a	Condensador
E-101b	Evaporador
F-101	Drenaje
SERVICIOS	
W	Agua
E	Energía eléctrica

Tabla IX. Lista de canalizaciones

LISTA DE CANALIZACIONES	
	Flujo de refrigerante a alta presión
	Flujo de refrigerante a baja presión
	Corriente eléctrica
	Flujo de agua

4.3 Diseño experimental aplicado a la práctica de refrigeración por compresión

4.3.1 Descripción del problema

4.3.1.1 Definición de los objetivos

Estudiar y evaluar el funcionamiento de un sistema de ciclo de Carnot Inverso, utilizando parámetros de temperatura, presión y flujo volumétrico, para determinar y comparar la eficiencia real en el equipo instalado y la eficiencia ideal del ciclo de refrigeración utilizando el software CoolPack.

4.3.2 Preguntas referentes a la investigación

¿Qué factores y propiedades prácticas se deben tomar en cuenta al momento de seleccionar un refrigerante?

Los factores de importancia son la presión y temperatura para los vapores saturados porque su utilidad determina las características de operación del sistema y entre las propiedades prácticas más importante se encuentran:

- Costo bajo.
- Inerte física y químicamente con las condiciones de operación.
- No corrosivo para los materiales comunes de construcción y con los cuales tiene contacto directo en el sistema.
- No tóxico.
- No debe causar deterioro en el lubricante utilizado en el compresor.
- Tener una viscosidad baja.

¿Qué propiedades del refrigerante a emplear son necesarias conocer?

Es necesario conocer las temperaturas de ebullición y fusión del refrigerante, y la entalpía de vaporización.

¿Qué función tiene el filtro en la entrada del tubo capilar?

El filtro sirve para remover la humedad del refrigerante causada por cualquier infiltración en el sistema, es importante eliminar el agua en el sistema ya que esta reacciona con los halógenos contenidos en el refrigerante formando ácidos, tales como fluorhídrico y clorhídrico. Asimismo retiene partículas contaminantes que pudieran haberse desprendido de la tubería de cobre del condensador.

¿Por qué en los sistemas de refrigeración en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor se utiliza un dispositivo de estrangulamiento, tubo capilar, a diferencia de la turbina isentrópica que se utiliza en el ciclo invertido de Carnot?

Debido a que la expansión se realiza con el refrigerante en estado líquido, ya sea, saturado o ligeramente subenfriado, esto perjudicaría la eficiencia de la turbina, ya que al entrar en contacto con el refrigerante este dañaría al equipo lo que representa un factor económico importante. También en los sistemas de refrigeración no se busca la producción de trabajo por parte del dispositivo de expansión, lo cual se obtendría de la turbina, y disminuiría el trabajo neto que entra al sistema.

¿En el equipo de refrigeración experimental, ¿por qué los manómetros y termómetros se encuentran en la entrada y salida del condensador y del evaporador?

Ya que se necesita conocer las condiciones de entrada y salida del refrigerante en cada uno de estos aparatos del equipo, de tal manera, que sea posible determinar las caídas de presión en cada uno de los dispositivos, además de verificar si cada uno de los procesos se mantienen a presión constante. Además, que tanto la presión y la temperatura de dichos procesos permiten determinar el flujo de calor extraído del espacio refrigerado y el trabajo neto que entra al sistema durante la compresión, con lo que se logra obtener el coeficiente de desempeño del sistema.

4.3.3 Justificación

Para lograr el cumplimiento de los objetivos se empleará el equipo instalado en el laboratorio el cual consiste en una máquina térmica diseñada para transferir energía térmica entre dos focos. En el equipo se llevará a cabo mediciones de temperatura en el evaporador con el fin de encontrar la eficiencia del ciclo invertido de Carnot del sistema experimental. Asimismo se registrarán las presiones de trabajo del evaporador y del condensador con el propósito de hallar las temperaturas de saturación teóricas del refrigerante R-134a utilizando el software CoolPack, permitiendo comparar el sistema ideal y real.

4.3.4 Descripción de variables involucradas

4.3.4.1 Modelo experimental de refrigeración

Tabla X. **Variables del sistema experimental de refrigeración**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial del diseño		Factores perturbadores	
			Constantes	Variables	Controlables	De ruido
Análisis del equipo						
1	Temperatura de entrada	°C		X		
2	Temperatura de salida	°C		X		
3	Presión condensador	psi		X		
4	Presión evaporador	psi		X		
5	Flujo másico refrigerante	kg/s		X		
6	Potencia compresor	kW		X		
7	Volumen de agua	m ³	X			
8	Calor rechazado condensador	kW		X		
9	Calor aceptado evaporador	kW		X		
Ambiente externo						
10	Temperatura ambiente	°C				X
11	Presión atmosférica	psi				X

4.3.4.2 Modelo teórico CoolPack

Tabla XI. **Variables en el modelo teórico de refrigeración CoolPack**

No.	Variable	Dimensional	Rango de variación
1	Potencia compresor	kW	--
2	Temperatura entrada	°C	--
3	Temperatura salida	°C	--
4	Refrigerante	--	--
5	Capacidad de refrigeración	kW	--
6	Pérdida de calor en el compresor	%	--
7	Gradiente de temperatura de sobrecalentamiento	°C	--
8	Pérdida de presión	psi	--

4.3.5 Selección de variables de respuesta o salida

Las variables que proporcionarán los datos de interés son: para el modelo teórico CoolPack, el tipo de refrigerante, carga del refrigerante y la eficiencia isentrópica, la cual varía en un rango de 0.2 a 0.6. Para el modelo experimental de refrigeración, los datos de interés son las lecturas proporcionadas en los termómetros, manómetros, potencia del compresor, medida del caudal y el tipo de refrigerante.

4.3.6 Elección del diseño experimental

4.3.6.1 Diseño de control de error

Se utilizará el diseño de control de error, para lo cual se realizarán cinco lecturas en los manómetros y termómetros para obtener las presiones y temperaturas, realizando un promedio de las mismas para obtener un dato preciso.

4.3.7 Tablas de tratamiento del diseño experimental

Tabla XII. **Valores de la carga del condensador en función de la carga del evaporador y del tipo de refrigerante**

		Refrigerante		
		R ₁	R ₂	R ₃
Carga del evaporador	Q _{E1}	Q _{C11}	Q _{C21}	Q _{C31}
	Q _{E2}	Q _{C12}	Q _{C22}	Q _{C32}
	Q _{E3}	Q _{C13}	Q _{C23}	Q _{C33}
	Q _{E4}	Q _{C14}	Q _{C24}	Q _{C34}
	Q _{E5}	Q _{C15}	Q _{C25}	Q _{C35}
	Q _{E6}	Q _{C16}	Q _{C26}	Q _{C36}
	Q _{E7}	Q _{C17}	Q _{C27}	Q _{C37}
	Q _{E8}	Q _{C18}	Q _{C28}	Q _{C38}

Tabla XIII. Valores de los coeficientes de operación en función de la carga del evaporador y del tipo de refrigerante

		Refrigerante					
		R ₁		R ₂		R ₃	
Carga del evaporador	Q _{E1}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	Q _{E2}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	Q _{E3}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	Q _{E4}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	Q _{E5}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	Q _{E6}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	Q _{E7}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	Q _{E8}	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*

Tabla XIV. Valores de flujo másico en función de la carga del evaporador y del tipo de refrigerante

		Refrigerante		
		R ₁	R ₂	R ₃
Carga del evaporador	Q _{E1}	μ ₁₁	μ ₂₁	μ ₃₁
	Q _{E2}	μ ₁₂	μ ₂₂	μ ₃₂
	Q _{E3}	μ ₁₃	μ ₂₃	μ ₃₃
	Q _{E4}	μ ₁₄	μ ₂₄	μ ₃₄
	Q _{E5}	μ ₁₅	μ ₂₅	μ ₃₅
	Q _{E6}	μ ₁₆	μ ₂₆	μ ₃₆
	Q _{E7}	μ ₁₇	μ ₂₇	μ ₃₇
	Q _{E8}	μ ₁₈	μ ₂₈	μ ₃₈

Tabla XV. Valores de coeficientes de operación en función de la eficiencia isentrópica y del tipo de refrigerante

		Refrigerante					
		R ₁		R ₂		R ₃	
Eficiencia isentrópica	$\eta_{IS\ 1}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	$\eta_{IS\ 2}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	$\eta_{IS\ 3}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	$\eta_{IS\ 4}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	$\eta_{IS\ 5}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	$\eta_{IS\ 6}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	$\eta_{IS\ 7}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*
	$\eta_{IS\ 8}$	COP	COP*	COP	COP*	COP	COP*

4.3.8 Planteamiento de hipótesis

4.3.8.1 Hipótesis científica

Existe un mayor coeficiente de desempeño al aumentar el flujo másico del refrigerante en el sistema.

4.3.8.2 Hipótesis estadística

- **Hipótesis Nula (H₀):** al comparar la eficiencia de Carnot, para el ciclo inverso del modelo teórico (CoolPack) respecto a la del modelo experimental (equipo de refrigeración), no existe diferencia significativa entre ellas.

- **Hipótesis Alternativa (Ha):** para el ciclo inverso del modelo teórico (CoolPack), la eficiencia de Carnot es mayor comparado a la del modelo experimental (equipo de refrigeración).

4.3.9 Número de corridas a realizar

Debido a que los resultados deben ser precisos y satisfactorios, se trata de disminuir los posibles errores utilizando un número de corridas adecuadas a evaluar. Para llevar a cabo lo anterior se utiliza una confiabilidad de 1.96, una probabilidad de éxito del 95% por lo que la probabilidad de fracaso es 5%, y se estima un error estimado de 20%.

Ecuación 10

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

(Referencia 2)

Donde:

N=Número de corridas.

$Z_{\alpha/2}$ =Confiabilidad.

P=Probabilidad de éxito.

Q=Probabilidad de fracaso.

E=Error estimado.

Sustituyendo datos en la ecuación 10 con los datos anteriores se obtiene lo siguiente:

$$N = \frac{(1.96)^2 * 0.95 * 0.05}{0.20^2}$$

$$N = 4.59 \approx 5$$

Por lo tanto, la cantidad de corridas a realizar es 5.

4.3.10 Ecuaciones para la obtención de resultados

4.3.10.1 Cálculo del calor que se absorbe en el evaporador

Ecuación 11

$$Q_L = H_2 - H_1$$

(Referencia 3)

Donde:

Q_L =Cantidad de calor que se absorbe en el evaporador (KJ/s).

H_1 = Entalpía específica de una mezcla saturada de baja calidad a la presión y temperatura del estrangulamiento (KJ/s).

H_2 =Entalpía específica del vapor saturado a la presión del evaporador (KJ/s).

4.3.10.2 Cálculo del calor que se disipa en el condensador

Ecuación 12

$$Q_H = H_3 - H_4$$

(Referencia 3)

Donde:

Q_H =Cantidad de calor que se disipa en el condensador (KJ/s).

H_3 =Entalpía específica del vapor sobrecalentado a la presión y temperatura del condensador (KJ/s).

H_4 =Entalpía específica del líquido saturado a la presión del evaporador (KJ/s).

4.3.10.3 Determinación del trabajo neto de entrada del sistema

Ecuación 13

$$W_{\text{Neto, Entrada}} = Q_H - Q_L$$

(Referencia 3)

Donde:

$W_{\text{Neto, Entrada}}$ = Trabajo neto de entrada del sistema (KJ/s).

Q_H =Cantidad de calor que se disipa en el condensador (KJ/s).

Q_L =Cantidad de calor que se absorbe en el evaporador (KJ/s).

4.3.10.4 Determinación del coeficiente de desempeño experimental en función de las entalpías

Ecuación 14

$$\text{COP}_R = \frac{H_2 - H_4}{H_3 - H_2}$$

(Referencia 1)

Donde:

COP_R =Coeficiente de desempeño experimental (adimensional).

H_2 =Entalpía específica de vapor saturado a la presión evaporador (KJ/s).

H_3 =Entalpía específica del vapor sobrecalentado a la presión y temperatura del Condensador (KJ/s).

H_4 =Entalpía específica del líquido saturado a la presión del evaporador (KJ/s).

4.3.10.5 Determinación del coeficiente de desempeño ideal

Ecuación 15

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

(Referencia 1)

Donde:

$\text{COP}_{\text{Carnot}}$ =Coeficiente de desempeño Ideal (adimensional).

T_C =Temperatura absoluta del evaporador (K).

T_H =Temperatura absoluta del condensador (K).

4.3.10.6 Determinación de la eficiencia del sistema experimental

Ecuación 16

$$\eta_E = \frac{COP_R(Q_H - Q_C)}{Q_H} * 100$$

(Referencia 1)

Donde:

η_E =Eficiencia del sistema experimental (%).

COP_R =Coeficiente de desempeño experimental (adimensional).

Q_H =Cantidad de calor que se disipa en el condensador (KJ/s).

Q_L =Cantidad de calor que se absorbe en el evaporador (KJ/s).

4.3.10.7 Determinación de la eficiencia del sistema ideal

Ecuación 17

$$\eta_I = \frac{COP_{Carnot}(Q_H - Q_C)}{Q_H} * 100$$

(Referencia 1)

Donde:

η_I =Eficiencia del sistema Ideal (%).

COP_{Carnot} =Coeficiente de desempeño ideal (adimensional).

Q_H =Cantidad de calor que se disipa en el condensador (KJ/s).

Q_L =Cantidad de calor que se absorbe en el evaporador (KJ/s).

4.3.10.8 Determinación de la eficiencia del equipo

Ecuación 18

$$\eta_e = \frac{COP_R}{COP_{Carnot}} * 100$$

(Referencia 1)

Donde:

η_e =Eficiencia del equipo (%).

COP_R =Coeficiente de desempeño experimental (adimensional).

COP_{Carnot} =Coeficiente de desempeño ideal (adimensional).

4.3.10.9 Determinación del flujo másico de agua

Ecuación 19

$$m_W = \rho_{(T^{\circ}C)} V_W$$

(Referencia 1)

Donde:

m_W =Flujo másico de agua (Kg/s).

$\rho_{(T^{\circ}C)}$ =Densidad del agua en función de la temperatura (Kg/m³).

V_W =Flujo volumétrico de agua (m³/s).

4.3.10.10 Determinación de la potencia consumida por el compresor

Ecuación 20

$$P_{\text{COMP}} = \frac{V * I}{fp} * \eta_E$$

(Referencia 1)

Donde:

P_{COMP} =Potencia del compresor (KJ/s).

V=Voltaje (V).

I=Corriente (A).

η_E =Eficiencia del sistema.

fp=Factor de potencia.

4.3.10.11 Determinación de la eficiencia isentrópica del compresor

Ecuación 21

$$\eta_s = \frac{H_2 - H_1}{P_{\text{COMP}}} * 100$$

(Referencia 1)

Donde:

η_s =Eficiencia isentrópica del Compresor (%).

H =Entalpía específica de una mezcla saturada de baja calidad a la presión y temperatura del estrangulamiento (KJ/s).

H_2 =Entalpía específica del vapor saturado a la presión del evaporador (KJ/s).

P_{COMP} =Potencia del compresor (KJ/s).

4.4 Diseño general de prácticas a realizar en el equipo

Práctica sugerida número 1.

Título: Práctica experimental de refrigeración por compresión con variación del flujo másico de agua y potencia de compresor constante.

Objetivos:

- a) Comprender el funcionamiento de un ciclo de refrigeración.
- b) Realizar un diagrama del equipo de refrigeración.
- c) Realizar un diagrama de un ciclo de Carnot inverso.
- d) Calcular el COP de compresor, la eficiencia del compresor y la válvula de estrangulamiento.

Procedimiento:

1. Abrir la válvula de globo para el acceso de agua en el equipo.
2. Abrir cuidadosamente la válvula de esfera para proveer al equipo de refrigeración de un flujo constante de agua.
3. Medir el flujo másico de agua saliente del evaporador, pesando la masa de agua en varias corridas, luego realice un promedio del caudal.
4. Encender el compresor por medio del interruptor que se encuentra por debajo de los termómetros digitales.
5. Fijar una potencia para el compresor por medio del reóstato el cual también se encuentra en conexión con la termocupla interna en el evaporador.
6. Conectar el multímetro en las terminales de medición que se encuentran en el compresor y anotar la lectura de la corriente indicada en este.

7. Esperar que el equipo alcance su equilibrio térmico (25 minutos aproximadamente).
8. Verificar que no se produzca escarcha en la salida del evaporador, ya que esto indicaría que el agua ha empezado a congelarse dentro del mismo.
9. Observar los manómetros de alta (rojo) y baja (azul) y anotar las presiones que indiquen las lecturas.
10. Hacer dos corridas más aumentando el flujo másico de agua y repetir el procedimiento del paso 3 al 8.

Tabla XVI. Toma de datos a partir de las variables manipuladas

Corrida:	Flujo volumétrico de agua	Corriente consumida por el compresor	Presiones en alta (kg/cm² o psi)	Presiones en baja (kg/cm² o psi)
1				
2				
3				

Reportar:

- COP del compresor.
- Eficiencia del compresor.
- Eficiencia de la válvula de estrangulamiento.
- Realizar el ciclo de Carnot inverso para una de las corridas, indicando a cuál de ellas se refiere. Sugerencia: puede utilizar software para el mismo como lo es el simulador de refrigeración CoolPack.

Práctica sugerida número 2.

Título: Práctica experimental de refrigeración por compresión con variación en la potencia del compresor y flujo másico de agua constante.

Objetivos:

- a) Comprender el funcionamiento de un ciclo de refrigeración.
- b) Realizar un diagrama del equipo de refrigeración.
- c) Realizar un diagrama de un ciclo de Carnot inverso.
- d) Calcular el COP de compresor, la eficiencia del compresor y la válvula de estrangulamiento.

Procedimiento:

1. Abrir la válvula de globo para el acceso de agua en el equipo.
2. Abrir cuidadosamente la válvula de esfera para proveer al equipo de refrigeración de un flujo constante de agua.
3. Medir el flujo másico de agua saliente del evaporador, pesando la masa de agua en varias corridas, luego realice un promedio del caudal.

4. Encender el compresor por medio del interruptor que se encuentra por debajo de los termómetros digitales.
5. Fijar una potencia para el compresor por medio del reóstato el cual también se encuentra en conexión con la termocupla interna en el evaporador.
6. Conectar el multímetro en las terminales de medición que se encuentran en el compresor y anotar la lectura de la corriente indicada en este.
7. Esperar que el equipo alcance su equilibrio térmico (25 minutos aproximadamente).
8. Verificar que no se produzca escarcha en la salida del evaporador, ya que esto indicaría que el agua ha empezado a congelarse dentro del mismo.
9. Observar los manómetros de alta (rojo) y baja (azul) y anotar las presiones que indiquen las lecturas.
10. Hacer dos corridas más aumentando la potencia del compresor observando la variación de las lecturas indicadas en el multímetro, repetir el procedimiento del paso 3 al 9.

Tabla XVII. Toma de datos a partir de las variables manipuladas

Corrida:	Corriente consumida por el compresor	Flujo volumétrico de agua constante	Presiones en alta (kg/cm ² o psi)	Presiones en baja (kg/cm ² o psi)
1				
2				
3				

Reportar:

- COP del compresor.
- Eficiencia del compresor.
- Eficiencia de la válvula de estrangulamiento.
- Realizar el ciclo de Carnot inverso para una de las corridas, indicando a cuál de ellas se refiere. Sugerencia: puede utilizar software para el mismo como lo es el simulador de refrigeración CoolPack.

Palabras clave:

Ciclo de refrigeración, Carnot inverso, entalpía, entropía, compresor, evaporador, gas sub enfriado, HFC, freón, condensación, evaporación, compresión, proceso adiabático, procesos isotérmico, procesos isobárico, termocupla, reóstato, condensador.

Temas sugeridos:

Ciclos termodinámicos de refrigeración, transferencia de calor.

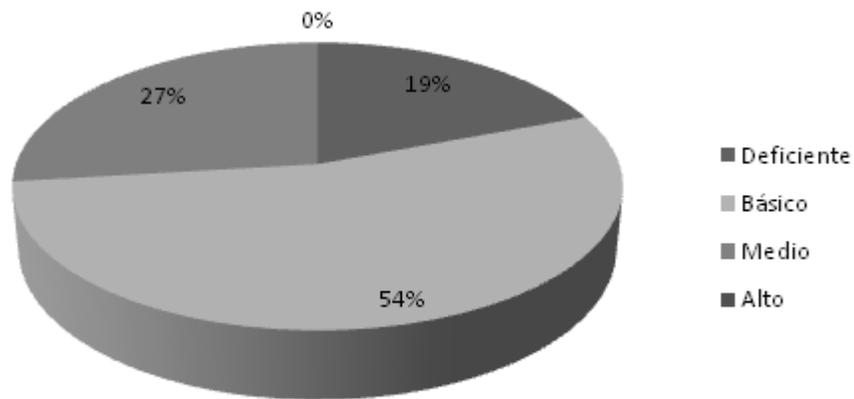
Precauciones:

- El contacto directo con la tubería de alta presión y el compresor podría ocasionar quemaduras en la piel.
- Es obligatorio el uso de cofia, guantes y lentes de protección al momento de manipular el equipo.
- El congelamiento total o parcial del evaporador podría dañar la coraza del mismo y ocasionar fugas del gas refrigerante.

4.5 Calidad del aprendizaje y confiabilidad didáctica del equipo

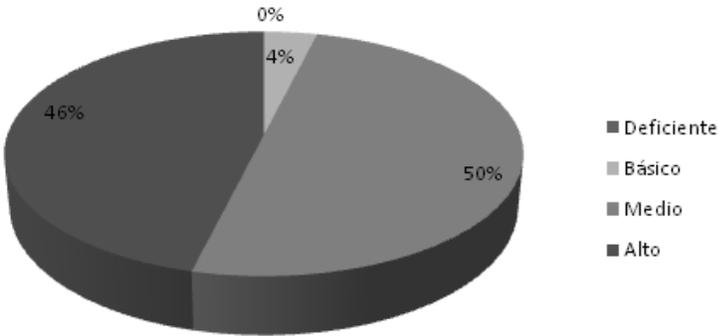
Para hacer la evaluación con respecto a la calidad del aprendizaje y confiabilidad didáctica del equipo se procedió a realizar una encuesta a un grupo de 26 estudiantes que experimentaron con el equipo de refrigeración por compresión obteniendo los siguientes resultados:

Figura 18. **Conocimientos previos a la práctica de los ciclos de refrigeración**



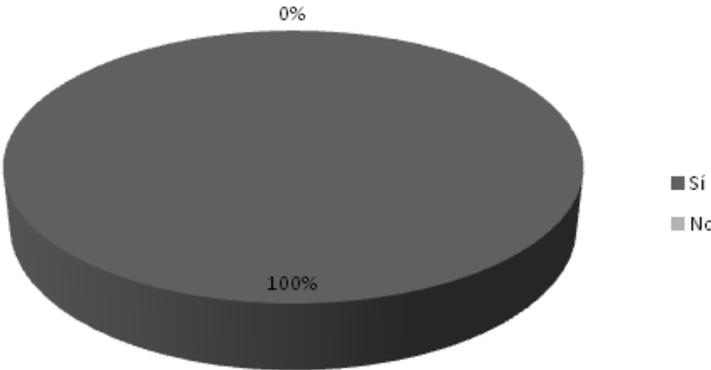
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 19. **Conocimientos adquiridos de refrigeración posterior a realización de práctica y reporte**



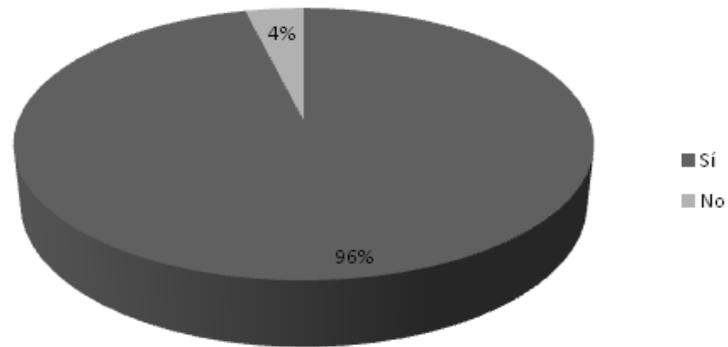
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 20. **¿El equipo representa un ciclo de refrigeración?**



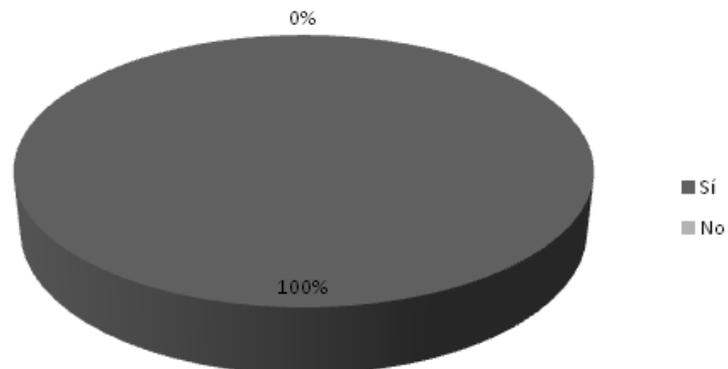
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 21. ¿Debe seguir utilizándose CoolPack para auxiliar la práctica de refrigeración?



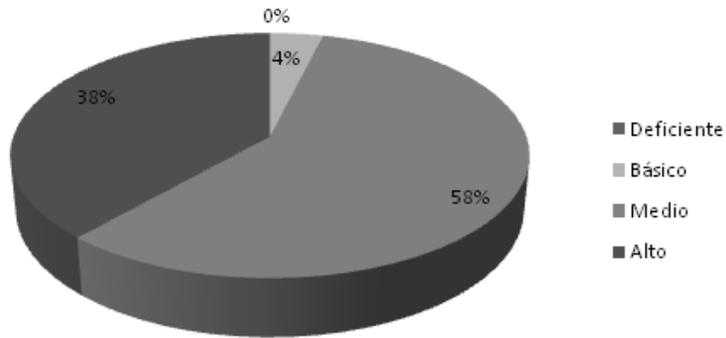
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 22. ¿Cree necesario el estudio de los ciclos de refrigeración en Ingeniería Química?



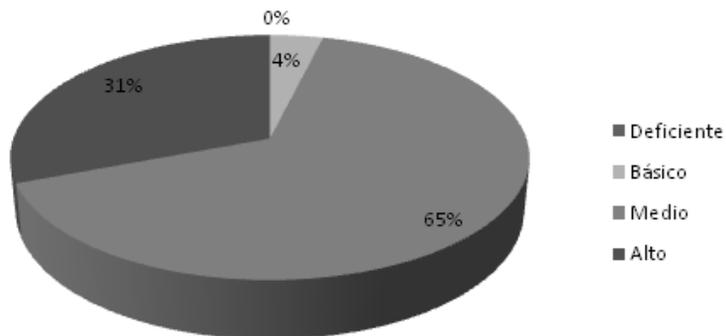
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 23. **Conocimientos adquiridos respecto al COP**



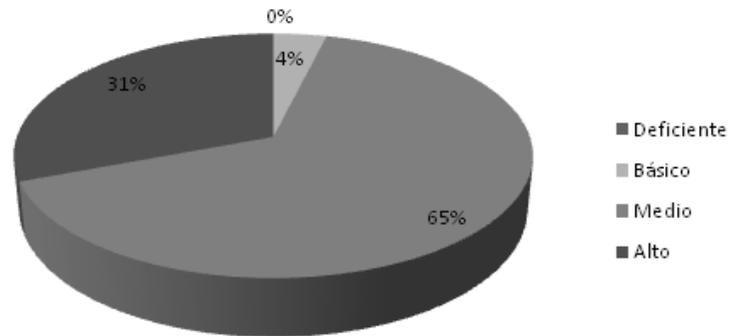
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 24. **Conocimientos adquiridos respecto a la compresión de gases refrigerantes**



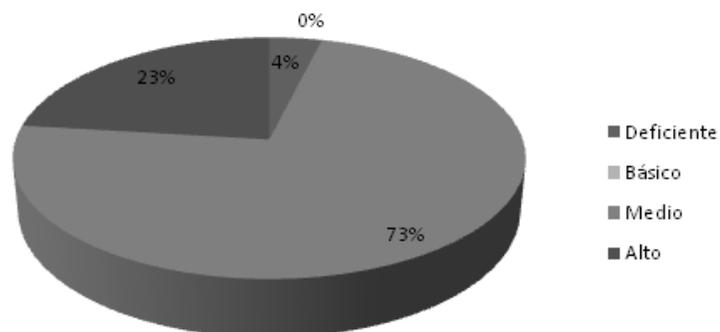
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 25. **Conocimientos adquiridos respecto a la condensación de gases refrigerantes**



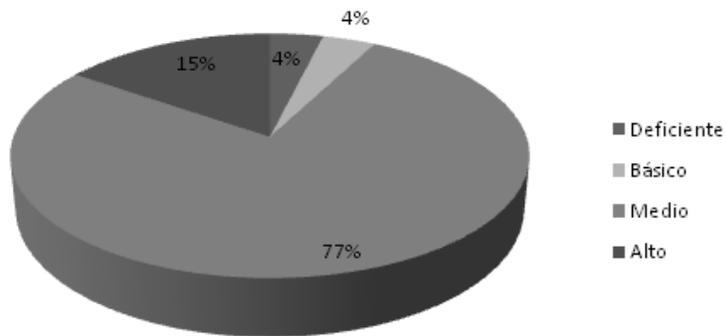
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 26. **Conocimientos adquiridos respecto a la evaporación de gases refrigerantes**



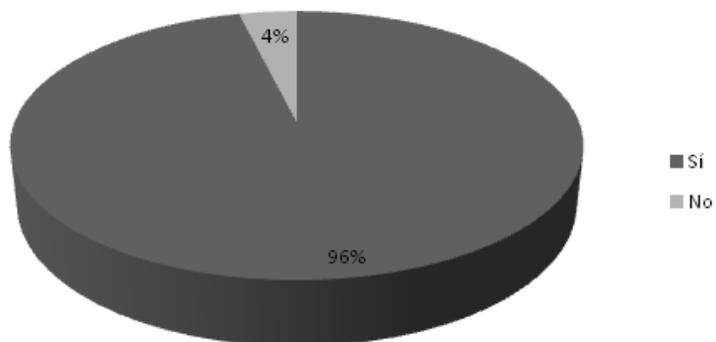
Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 27. **Conocimientos adquiridos respecto a la expansión de gases refrigerantes**



Fuente: resultados de encuesta realizada

Figura 28. **¿Los instrumentos de medición en el equipo de refrigeración por compresión son los adecuados?**



Fuente: resultados de encuesta realizada

4.6 Manual de operación del equipo

Verificación previa antes de empezar

Antes de iniciar cualquier operación con el equipo de refrigeración por compresión se deben hacer las siguientes observaciones.

- Verificar que no existan fugas en el sistema.
Las fugas en equipos de refrigeración son muy comunes debido a las altas presiones que se manejan dentro de las tuberías y los cambios de temperatura, las fugas son detectables cuando son de mayor magnitud ya que en el área afectada se muestra una formación de sarro y aceite saliente, otra forma de verificar la existencia de fugas es observar que la presión de alta no esté por debajo de 5kg/cm^2 .
- Compresor.
El compresor es la unidad que realiza la compresión de gas, este debe tener una apariencia intacta y no presentar ningún derrame de aceite, además de no producir ruidos extraños similares a un cerrojo sin lubricación, lo cual indicaría un desperfecto en el sistema interno.

Precauciones

- El contacto con las tuberías de alta presión ocasionan quemaduras de primer grado en la piel, si se permanece mucho tiempo en contacto ocasionará lesiones y quemaduras de segundo grado.

- Si el compresor presenta ruidos irregulares deberá desconectar inmediatamente el equipo y avisar a su instructor.
- El sistema eléctrico está completamente aislado, sin embargo se recomienda evitar el contacto con el mismo, en especial con el capacitor ubicado a un costado del compresor, ya que es un sistema de arranque para el motor y si no se tienen las precauciones adecuadas podría recibir una descarga de 120V con una corriente de 18A.
- El uso de guantes de cuero es obligatorio para quien manipula el equipo, así evitará quemaduras en las manos.
- Debe utilizar bata de algodón y nunca una bata fabricada de poliéster o nylon, ya que estos materiales al ser sobrecalentados ocasionaran lesiones sobre la piel.

Puesta en marcha del equipo

Antes de poner en marcha el equipo, este debe ser conectado en corriente alterna de 120V a 60Hz o 50Hz, ya que el compresor está diseñado específicamente para este voltaje y frecuencias.

Luego de que el equipo está conectado a la toma de potencial proceder a colocar en posición de encendido el botón ubicado por debajo de los termómetros digitales.

Figura 29. **Botón de encendido**



Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Ingresar un flujo pequeño de agua abriendo la válvula de esfera y esperar 12 minutos para que se alcance el equilibrio térmico dentro del evaporador.

Figura 30. **Válvula de esfera**



Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Deberá elegir una posición del reóstato para variar la corriente entrante hacia el compresor lo cual repercute directamente en la potencia; los rangos de variación pueden ser de -25 hasta +10.

Figura 31. **Reóstato**



Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Nota: evitar la formación de escarcha en la tubería de salida del evaporador y entrada del compresor, lo cual significaría el congelamiento del agua dentro del evaporador.

Fijar un flujo volumétrico de agua, notar que la medida más pequeña del contador indica decilitros y este al momento de dar una vuelta completa ha obtenido un litro de agua, deberá ser cronometrado para así fijar el caudal.

Figura 32. **Medidor de flujo**



Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Proceder a observar las variaciones de presión en cada uno de los manómetros y anotar lo observado.

Figura 33. **Manómetro**



Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Las variaciones de flujo volumétrico y reóstato provocaran mayor o menor demanda de corriente en el compresor, así que deberá anotar la corriente indicada para el cálculo de la potencia eléctrica.

Figura 34. **Amperímetro AC**



Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

Debe realizar el número de corridas calculadas por medio del diseño experimental elaborado, haciendo las respectivas variaciones en el reóstato y flujo volumétrico de agua.

4.7 Manual de operación del simulador CoolPack

Simuladores computacionales

Es un programa de cómputo que permite la simulación de un sistema, reproduciendo su comportamiento. Los simuladores reproducen procesos que en realidad no están sucediendo.

Para simular el comportamiento de los equipos de la máquina simulada se pueden recurrir varias técnicas. Se puede elaborar un modelo de cada equipo, utilizar el equipo real o bien utilizar el mismo software que corre en el equipo real pero haciéndolo correr en un ordenador más convencional. A esta última opción se la conoce como "Software Rehosteado".

Para hacer la comparación entre el equipo de refrigeración por compresión que representa un proceso real se utilizó un programa de cómputo gratuito llamado CoolPack el cual representa procesos de refrigeración ideales y sin desviaciones, este software se utilizó instalado en un sistema operativo gratuito y de código abierto para así evitar violaciones a los derechos de autor, el software puede ser obtenido en <http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack>.

En este caso se ha utilizado el sistema operativo gratuito basado en el Kernel Linux/GNU Debian, Ubuntu en su versión 9.10 para escritorio, los procedimientos de instalación y ejecución del simulador se explicaran detalladamente a continuación, debido a que originalmente fue concebido para trabajar en plataformas de Microsoft Windows de 32 y 64bits.

En el primer paso se debe tener instalado el sistema operativo gratuito, recomendándose así un sistema basado en Linux/GNU Debian, ya que estos

sistemas poseen una interfaz gráfica y amigable para el usuario, el sistema puede obtenerse gratuitamente en <http://www.ubuntu.com/>

Figura 35. Escritorio de Linux/GNU Debian Ubuntu 9.10



Fuente: sistema operativo Linux Ubuntu 9.10

Se procederá a continuación con la instalación del Software CoolPack, para esto se debe abrir la terminal, ubicada en Aplicaciones → Accesorios → Terminal, después de haber abierto la terminal se procede a ingresar el siguiente comando (se necesita conexión a Internet):

```
$ sudo apt-get install wine
```

Mostrado en la siguiente figura a continuación:

Figura 36. Terminal de línea de comandos en Linux



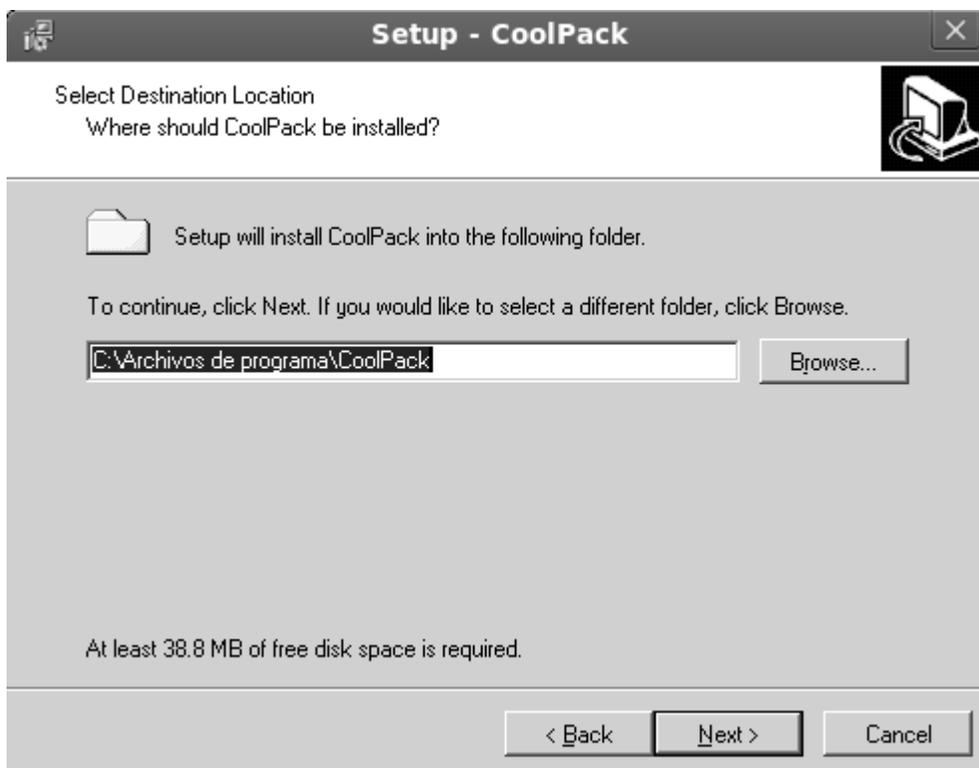
Fuente: sistema operativo Linux Ubuntu 9.10

Al ingresar este comando se instalará de manera automatizada un interpretador de librerías y archivos de sistema de Microsoft Windows necesarias para cargar el simulador CoolPack.

Nota: se recomienda utilizar el comando `$ sudo apt-get update` para realizar actualizaciones y tener un sistema más estable.

Luego de haber instalado el interpretador Wine se procede a descargar el simulador CoolPack se instalará simplemente al dar doble clic sobre el archivo descargado, procedemos con las instrucciones que nos desplegará el instalador para finalizar.

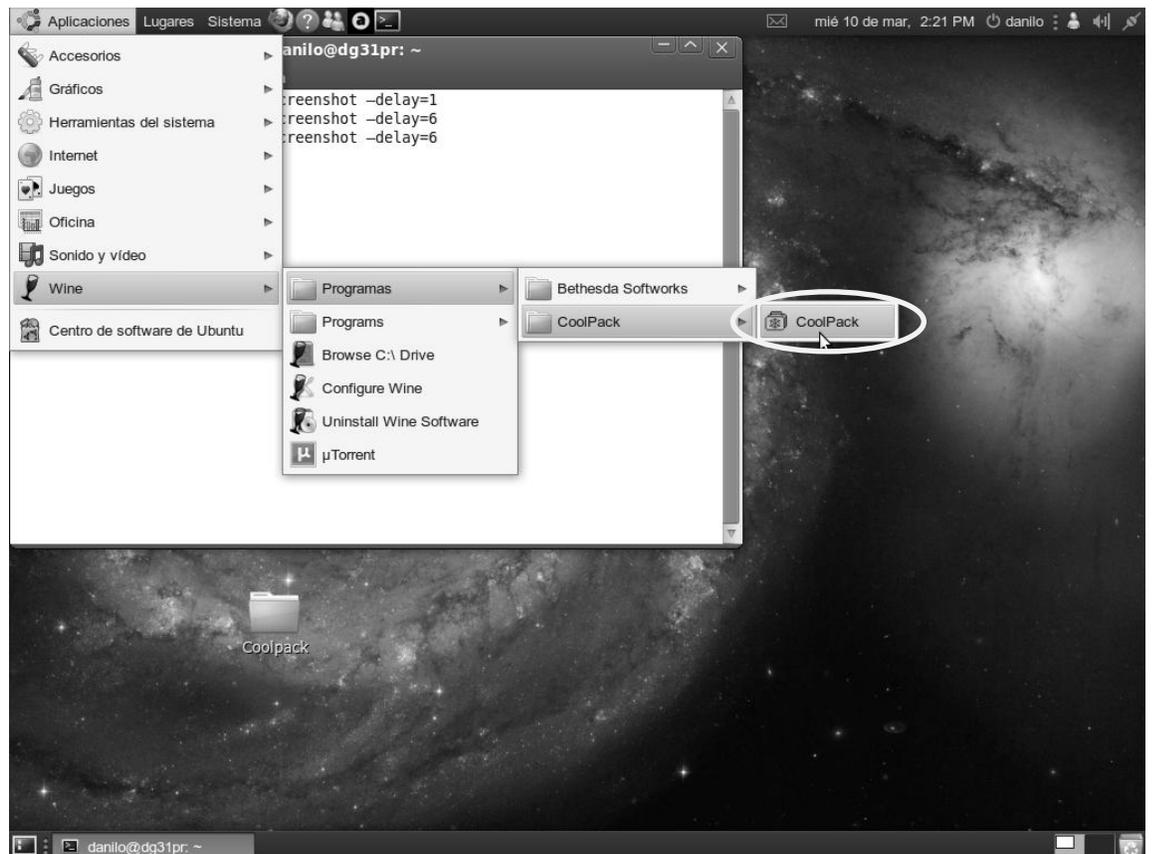
Figura 37. **Ventana de instalación del Simulador CoolPack**



Fuente: instalador del simulador CoolPack

Para ingresar al simulador CoolPack debe dirigirse a: Aplicaciones→Wine
→Programas → CoolPack → CoolPack, como se muestra en la siguiente figura:

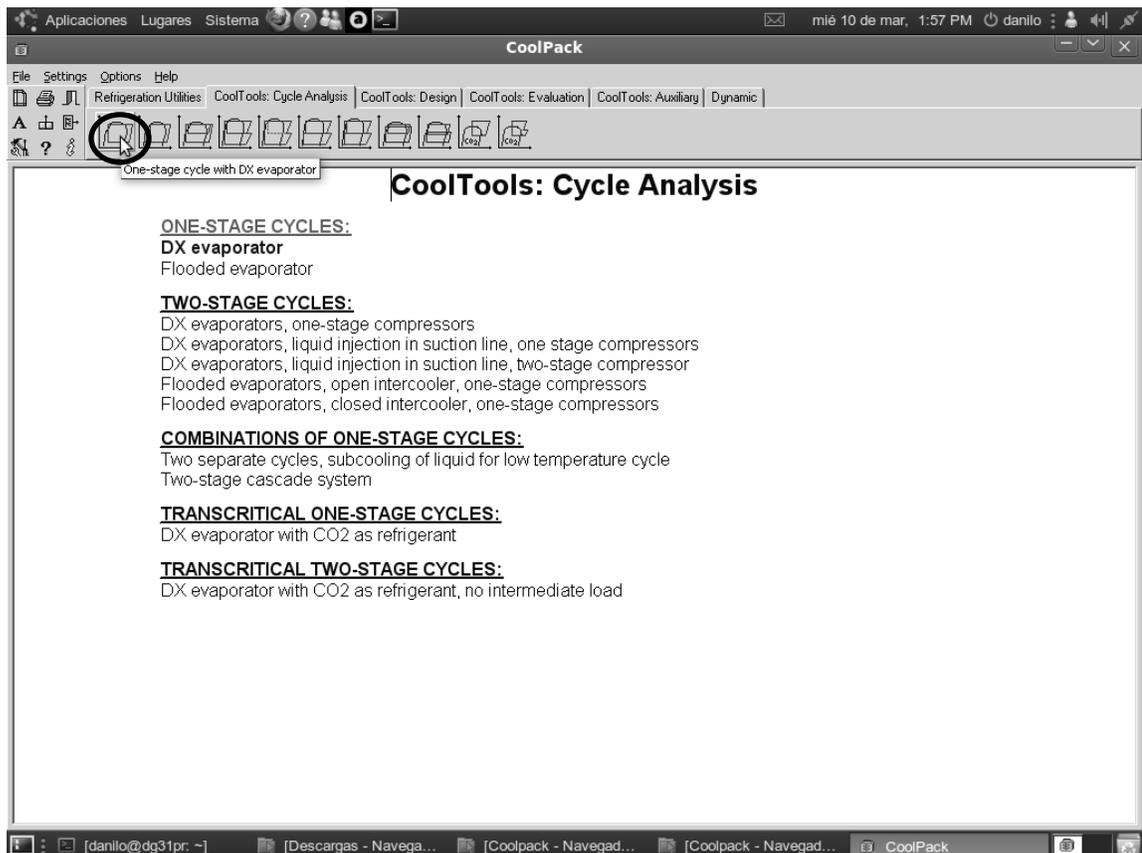
Figura 38. Procedimiento de ingreso al simulador CoolPack



Fuente: sistema operativo Linux Ubuntu 9.10

Después del ingreso al simulador CoolPack aparecerá la siguiente pantalla de inicio en la cual se obtienen botones de operación y utilidades para los sistemas de refrigeración, en esta pantalla se debe dirigir a la pestaña nombrada CoolTools: Cycle Analysis y elegir el icono One-stage cycle with DX evaporator, ya que este es el que se aplica al sistema de refrigeración por compresión real que se está estudiando.

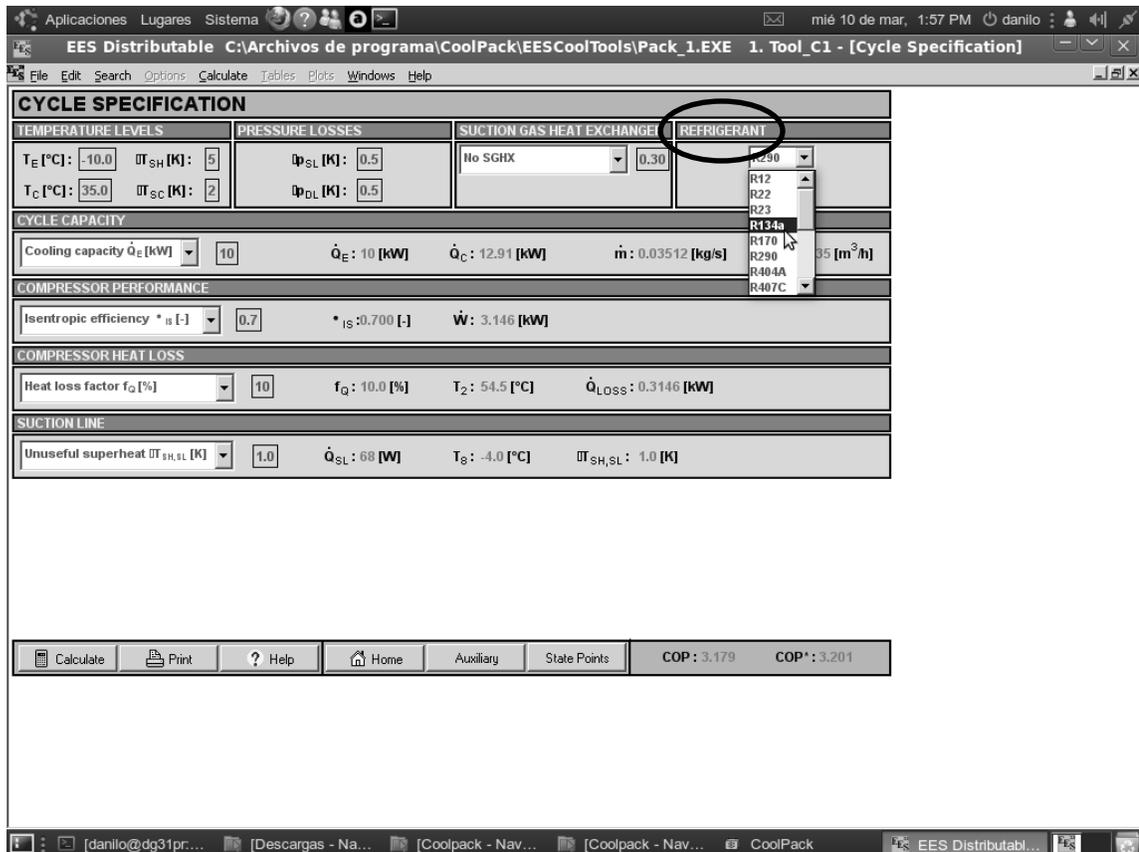
Figura 39. Ventana de análisis del ciclo



Fuente: simulador CoolPack

A continuación, se procede a seleccionar el botón Cycle Spec en el cual se ingresan las especificaciones del ciclo de refrigeración y se elige el refrigerante R134a en el menú desplegable REFRIGERANT.

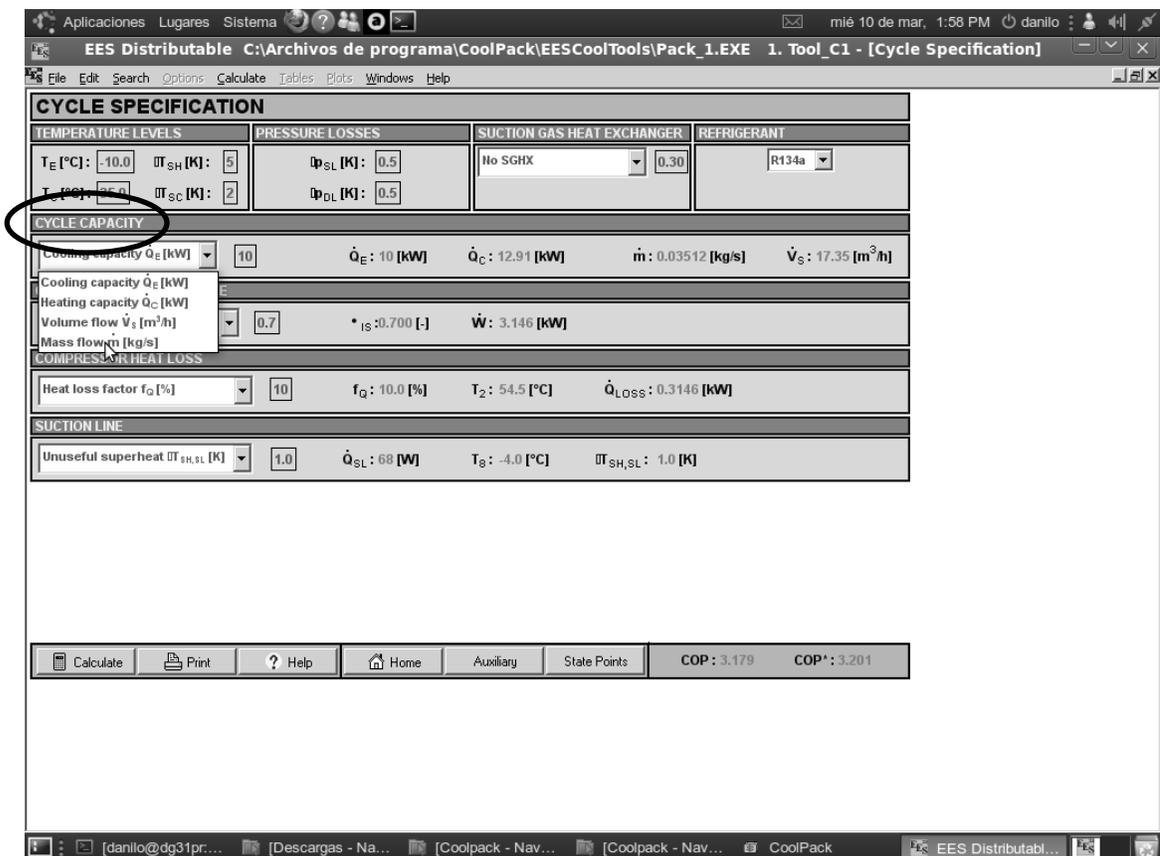
Figura 40. Especificaciones del ciclo



Fuente: simulador CoolPack

Se procederá al ingreso de los parámetros deseado para el análisis teórico del ciclo de refrigeración donde se elige las temperaturas del compresor (T_C) y del evaporador (T_E) expresadas en grados Celsius, en el menú desplegable CYCLE CAPACITY (capacidad de ciclo) se debe elegir Mass flow [kg/s] el cual se refiere al flujo másico de refrigerante previamente calculado.

Figura 41. Capacidad de ciclo



Fuente: simulador CoolPack

En el menú desplegable COMPRESSOR PERFORMANCE (desempeño del compresor) se ingresa Isentropic efficiency (eficiencia isentrópica) ó Power consumption [kW] (energía consumida).

Figura 42. Desempeño del compresor

The screenshot displays the EES Distributable software interface for '1. Tool_C1 - [Cycle Specification]'. The 'COMPRESSOR PERFORMANCE' section is highlighted with a red circle. The parameters shown are as follows:

TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES		SUCTION GAS HEAT EXCHANGER		REFRIGERANT	
T_E [°C]:	[-10.0]	ΔT_{SH} [K]:	[5]	Δp_{SL} [k]:	[0.5]	No SGHX	[0.30]
T_C [°C]:	[35.0]	ΔT_{SC} [K]:	[2]	Δp_{DL} [k]:	[0.5]		R134a

CYCLE CAPACITY							
Mass flow \dot{m} [kg/s]	[10]	\dot{Q}_E [kW]	[10]	\dot{Q}_C [kW]	[12.91]	\dot{m} [kg/s]	[0.03512]
						\dot{V}_S [m ³ /h]	[17.35]

COMPRESSOR PERFORMANCE			
Isentropic efficiency $*ii$ [-]	[0.7]	$*i_s$ [0.700 [-]	\dot{W} [kW]
Isentropic efficiency $*ii$ [-]			
Power consumption \dot{W} [kW]			
Heat loss factor f_Q [%]	[10]	f_Q [10.0 [%]	T_2 [54.5 [°C]
			\dot{Q}_{LOSS} [0.3146 [kW]

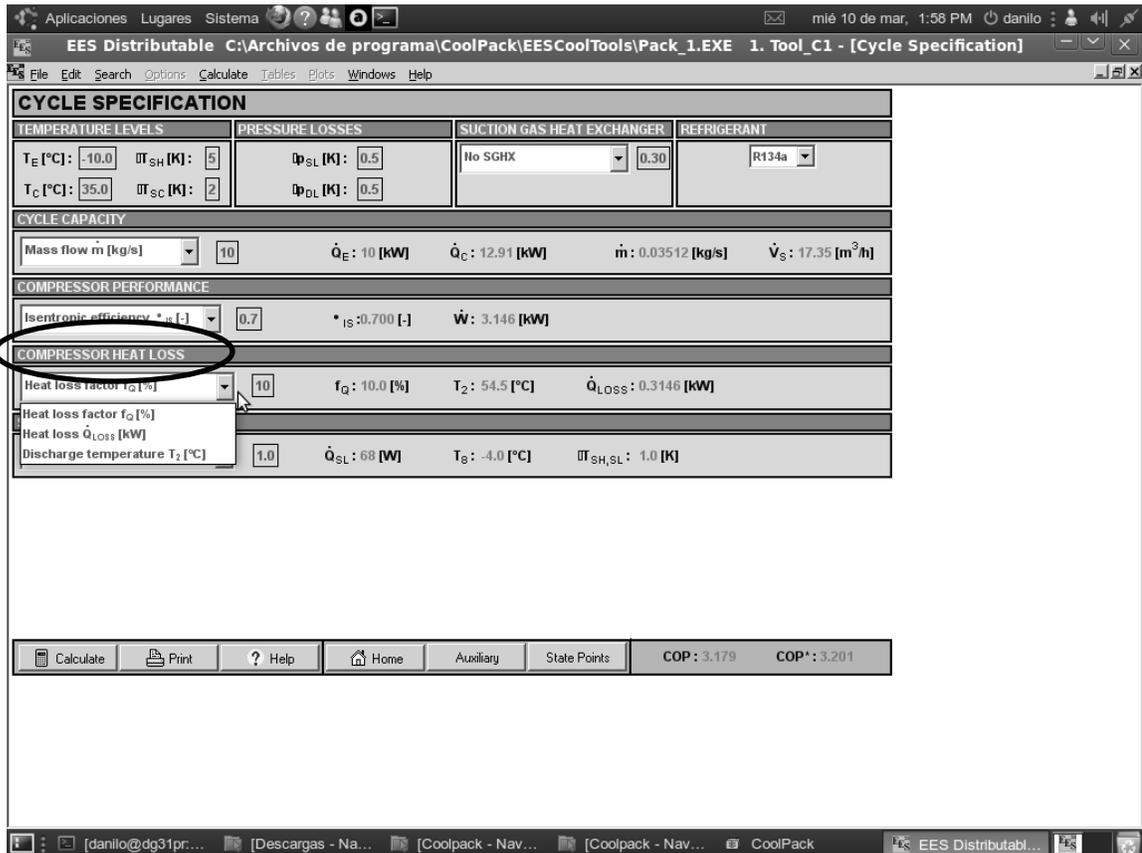
SUCTION LINE			
Unuseful superheat $\Delta T_{SH,SL}$ [K]	[1.0]	\dot{Q}_{SL} [68 [W]	T_8 [-4.0 [°C]
			$\Delta T_{SH,SL}$ [1.0 [K]

At the bottom of the interface, the 'Calculate' button is visible, and the COP values are shown as COP: 3.179 and COP*: 3.201.

Fuente: simulador CoolPack

Por último, se procede a ingresar en el menú desplegable COMPRESSOR HEAT LOSS (factor de pérdida de calor en compresor) y elegir Heat Loss facto $f_Q\%$ ingresando el porcentaje de pérdida de calor en el compresor y a continuación presionar el botón Calculate.

Figura 43. Factor de pérdida de calor en el compresor



Fuente: simulador CoolPack

Después de presionar el botón Calculate se mostrará el COP y COP* estimado según los parámetros ingresados en el simulador.

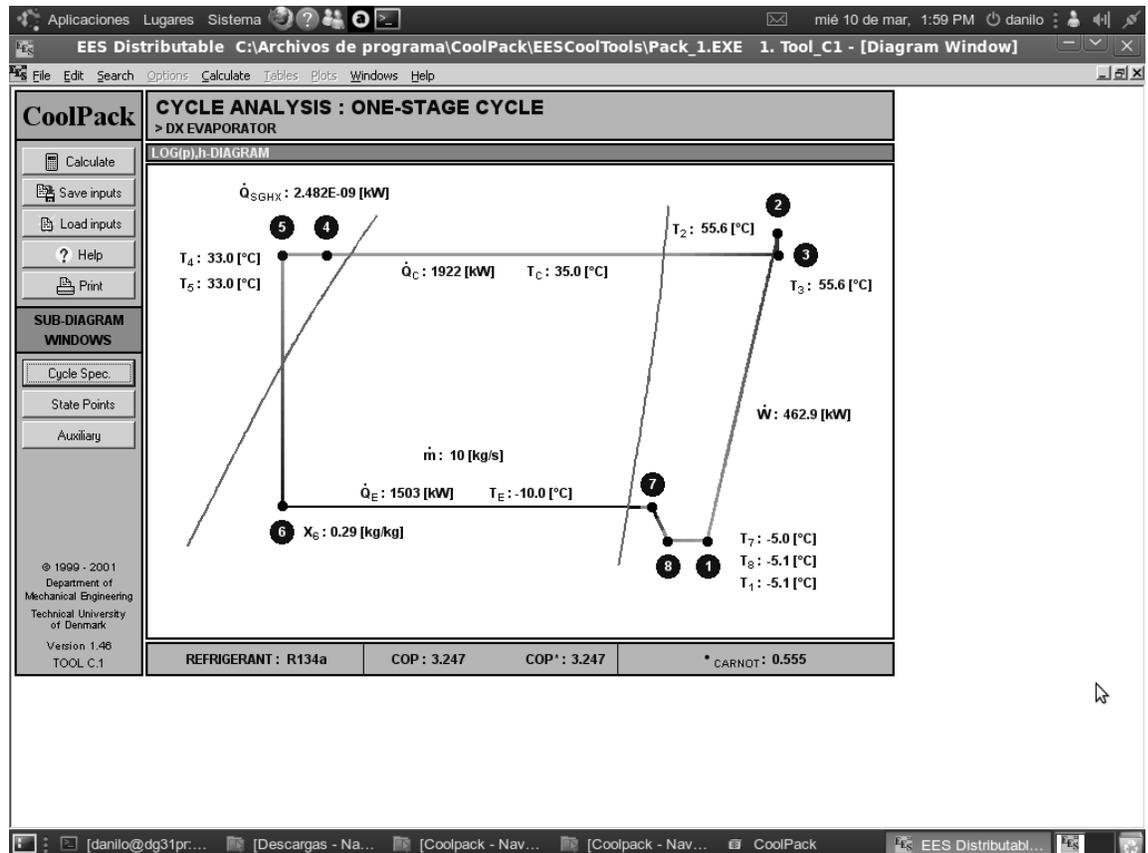
Figura 44. Resultados de COP y COP* según los parámetros ingresados



Fuente: simulador CoolPack

Al presionar el botón Home se mostrará una gráfica que representa el Log(p) contra la entalpía según los parámetros ingresados.

Figura 45. Gráfica Log(p) vs. H



Fuente: simulador CoolPack

En el botón State Points se desplegará una tabla que contiene información acerca de cada uno de los puntos mostrará en el diagrama previo como temperatura, entalpía, presión y densidad.

Figura 46. **Tabla de los puntos de condición**

The screenshot shows the EES Distributable software interface. The main window displays a table titled 'STATE POINTS' with the following data:

STATE POINT	TEMPERATURE [°C]	PRESSURE [kPa]	ENTHALPY [kJ/kg]	DENSITY [kg/m ³]
1	-5.1	196.8	245.1	9.7
2	55.6	899.8	286.8	39.2
3	55.6	887.4	287.0	38.6
4	33.0	887.4	94.9	1176.3
5	33.0	887.4	94.9	1176.3
6	-10.0	200.7	94.9	-----
7	-5.0	200.7	245.1	9.9
8	-5.1	196.8	245.1	9.7

To the right of the table, there is an 'Additional information' section:

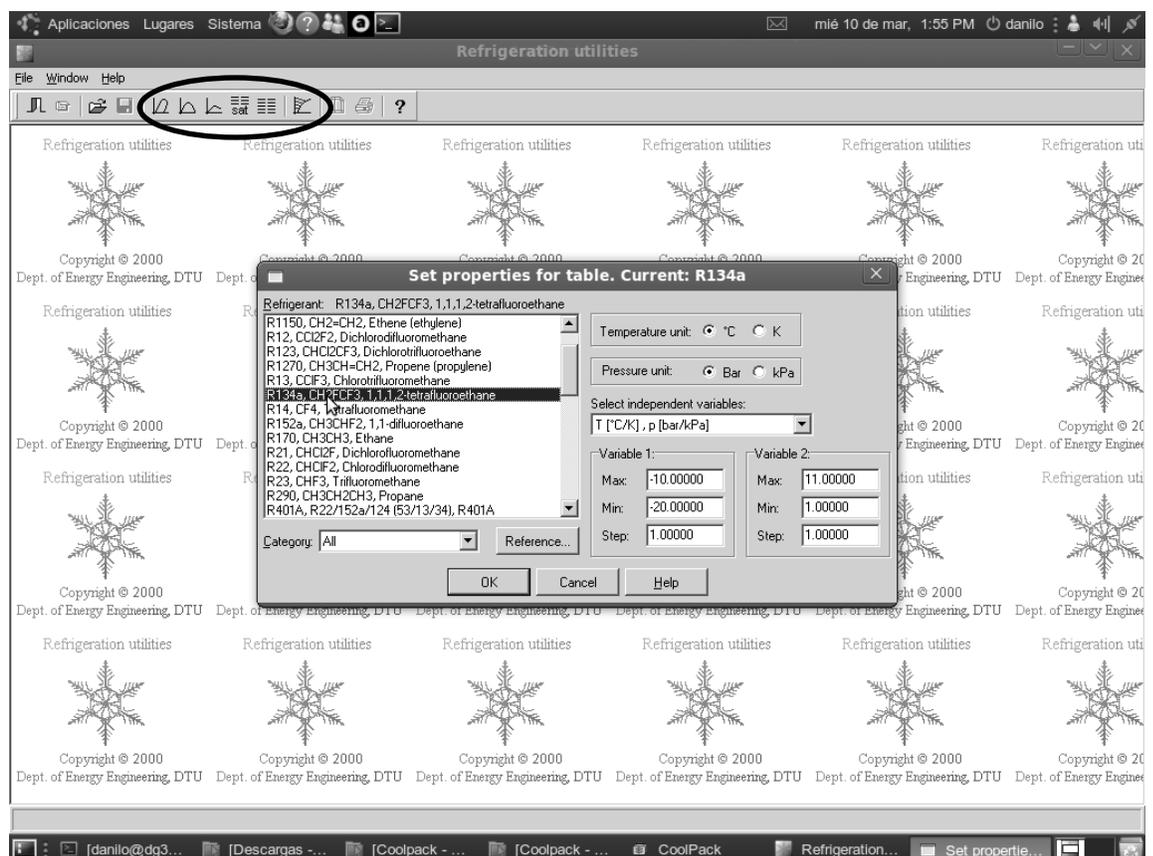
- Pressure ratio (p_2 / p_1): 4.573
- $T_{2,1S}$: 47.0 [°C]
 $T_{2,1S}$ is the temperature of the discharge gas assuming reversible and adiabatic compression
- $T_{2,w}$: 60.0 [°C]
 $T_{2,w}$ is the temperature of the discharge gas assuming real and adiabatic compression

At the bottom of the window, there is a toolbar with buttons for Calculate, Print, Help, Home, Cycle Spec., and Auxiliary. The COP is displayed as 3.247.

Fuente: simulador CoolPack

Al elegir la pantalla de Refrigeration Utilities se encuentran aplicaciones y bases de datos las cuales despliegan información acerca del gas que se está empleando, al presionar cualquiera de los botones de la parte superior se preguntará qué refrigerante se está utilizando, en este caso seleccionar el R134a.

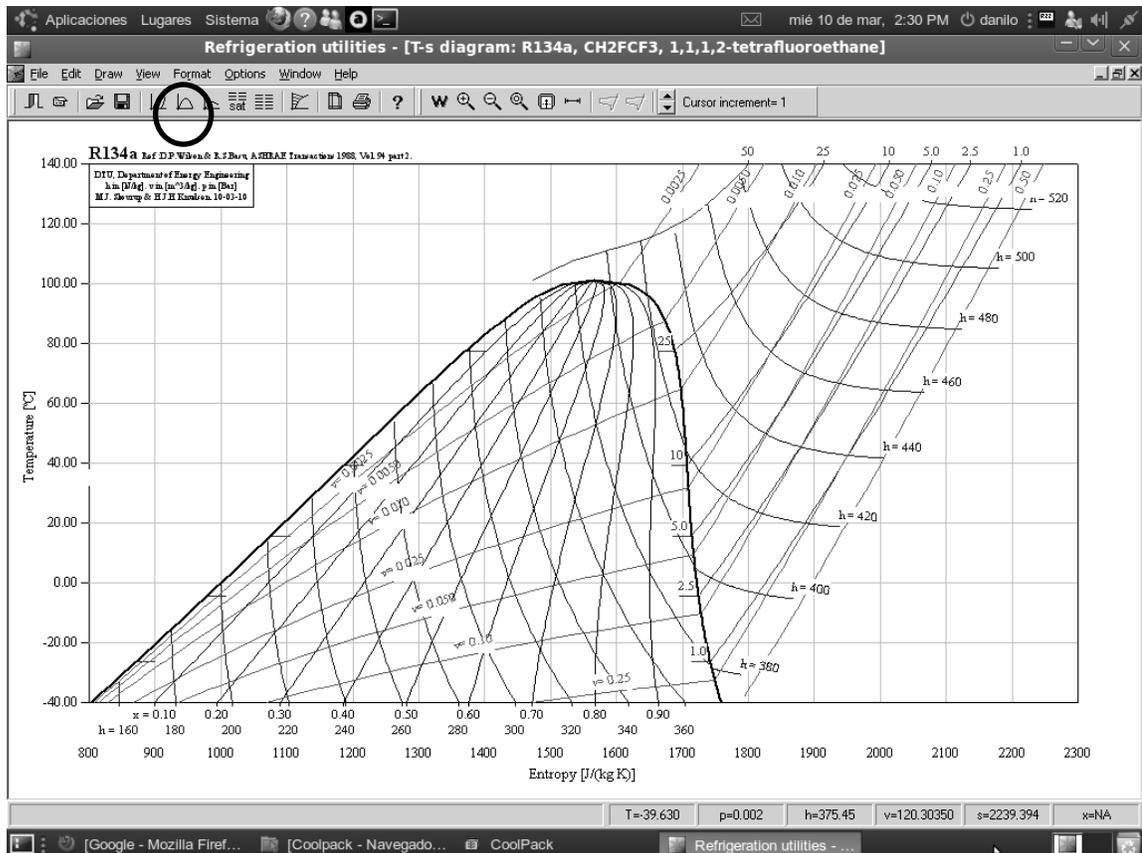
Figura 47. Elección del refrigerante en el menú desplegable



Fuente: simulador CoolPack

Al seleccionar cualquiera de los botones se desplegará ya sea tablas o diagramas para el refrigerante seleccionado.

Figura 48. Diagrama Temperatura-Entropía desplegado



Fuente: simulador CoolPack

También se cuenta con tablas de gas y sus propiedades termodinámicas las cuales son muy útiles para la evaluación de los datos, como lo son temperatura, presión, entalpía, volumen específico y entropía.

Figura 49. Tabla con los valores de saturación para el gas R134a

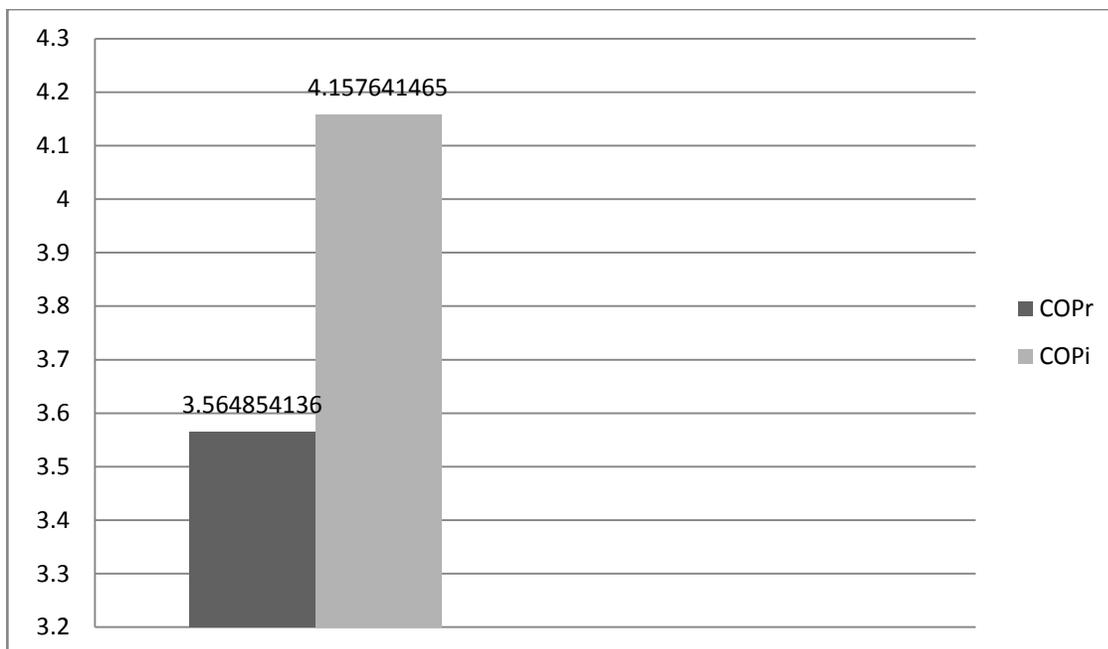
T	p	v_l	v_g	h_l	h_g	R	s_l	s_g
°C	Bar	dm^3/kg	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	$\text{kJ}/(\text{kg K})$	$\text{kJ}/(\text{kg K})$
-40.00	0.516	0.7055	0.35692	149.97	372.85	222.88	0.8030	1.7589
-39.00	0.544	0.7069	0.34001	151.15	373.48	222.33	0.8080	1.7575
-38.00	0.572	0.7083	0.32405	152.33	374.11	221.78	0.8130	1.7562
-37.00	0.602	0.7098	0.30898	153.51	374.74	221.23	0.8180	1.7548
-36.00	0.633	0.7113	0.29474	154.70	375.37	220.66	0.8231	1.7535
-35.00	0.665	0.7127	0.28128	155.89	375.99	220.10	0.8281	1.7523
-34.00	0.699	0.7142	0.26855	157.09	376.62	219.53	0.8331	1.7510
-33.00	0.734	0.7157	0.25651	158.29	377.24	218.95	0.8381	1.7498
-32.00	0.770	0.7172	0.24511	159.49	377.87	218.37	0.8431	1.7486
-31.00	0.808	0.7187	0.23431	160.70	378.49	217.79	0.8480	1.7474
-30.00	0.847	0.7202	0.22408	161.91	379.11	217.20	0.8530	1.7463
-29.00	0.888	0.7218	0.21438	163.13	379.73	216.61	0.8580	1.7452
-28.00	0.930	0.7233	0.20518	164.35	380.35	216.01	0.8630	1.7441
-27.00	0.974	0.7249	0.19645	165.57	380.97	215.40	0.8679	1.7430
-26.00	1.020	0.7264	0.18817	166.80	381.59	214.79	0.8729	1.7420
-25.00	1.067	0.7280	0.18030	168.03	382.21	214.18	0.8778	1.7410
-24.00	1.116	0.7296	0.17282	169.26	382.82	213.56	0.8828	1.7400
-23.00	1.167	0.7312	0.16571	170.50	383.44	212.94	0.8877	1.7390
-22.00	1.219	0.7328	0.15896	171.74	384.05	212.31	0.8927	1.7380
-21.00	1.274	0.7345	0.15253	172.99	384.67	211.68	0.8976	1.7371
-20.00	1.330	0.7361	0.14641	174.24	385.28	211.04	0.9025	1.7362
-19.00	1.388	0.7378	0.14059	175.49	385.89	210.40	0.9075	1.7353
-18.00	1.448	0.7394	0.13504	176.75	386.50	209.75	0.9124	1.7345
-17.00	1.511	0.7411	0.12975	178.01	387.11	209.10	0.9173	1.7336
-16.00	1.575	0.7428	0.12471	179.27	387.71	208.44	0.9222	1.7328
-15.00	1.641	0.7445	0.11991	180.54	388.32	207.78	0.9271	1.7320
-14.00	1.710	0.7463	0.11533	181.81	388.92	207.11	0.9320	1.7312
-13.00	1.781	0.7480	0.11095	183.09	389.52	206.44	0.9369	1.7304

Fuente: simulador CoolPack

4.8 Comparación del proceso ideal y real del ciclo de refrigeración por compresión

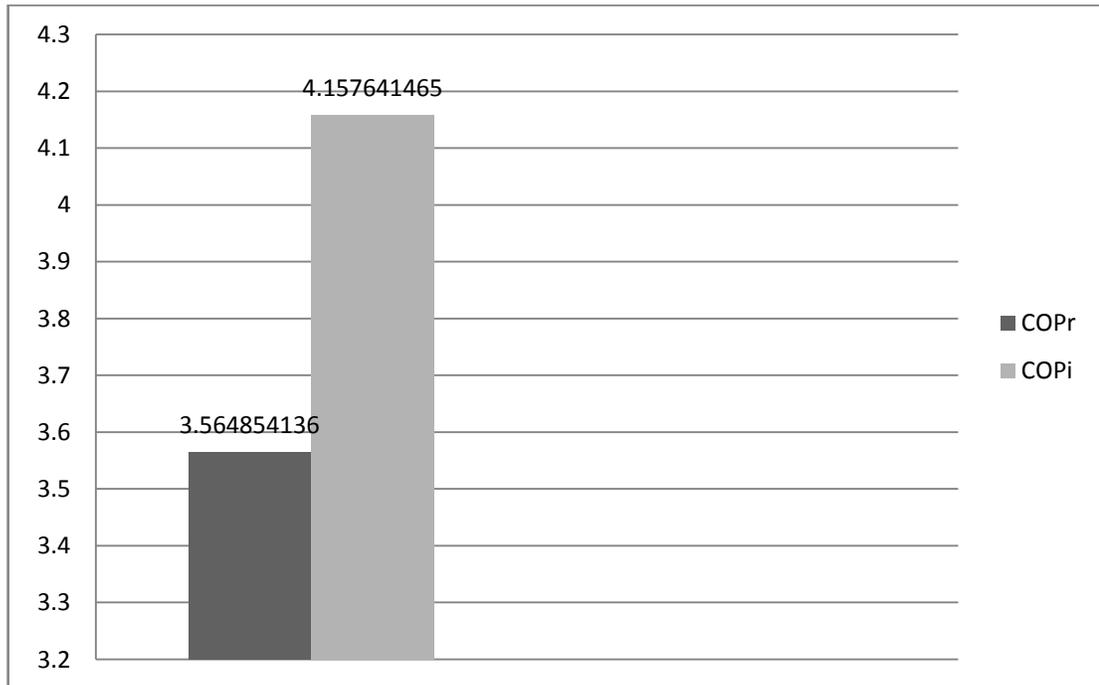
A partir de datos experimentales con el equipo de Refrigeración por Compresión de gas R134a obtenidos en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química se plantean los siguientes resultados en la comparación con un sistema de refrigeración ideal de datos generados en el simulador CoolPack.

Figura 50. **Comparación del coeficiente de desempeño real y el coeficiente de desempeño ideal (Carnot) reóstato a 15 negativo**



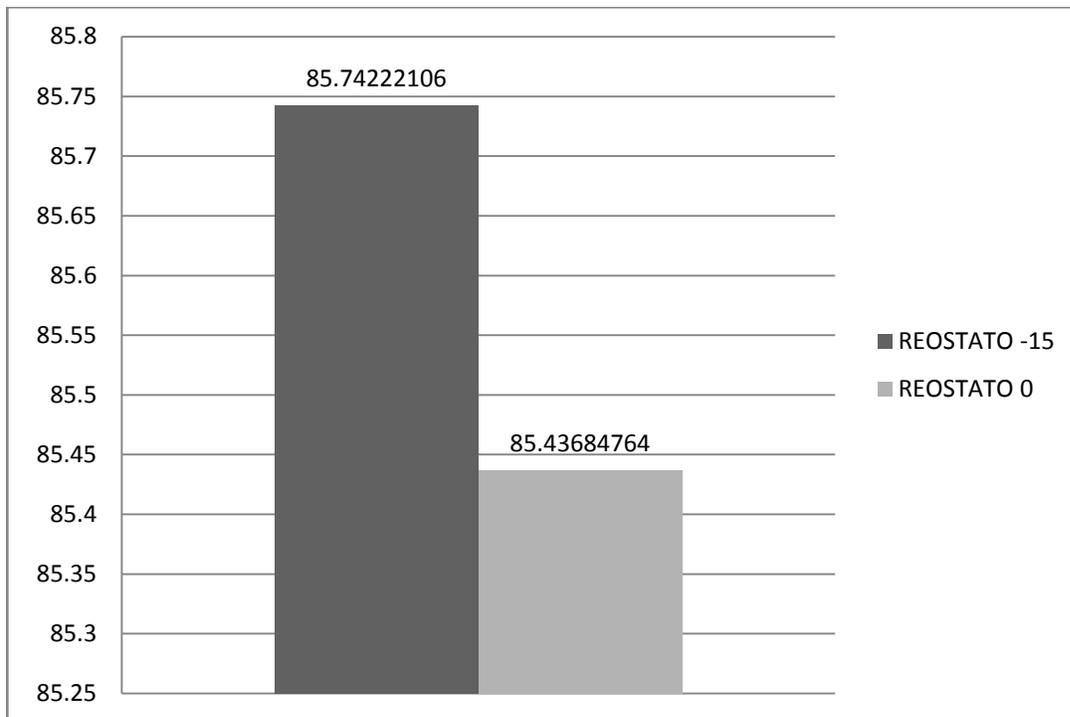
Fuente: datos calculados, Tablas XL y XLI.

Figura 51. Comparación del coeficiente de desempeño real y el coeficiente de desempeño ideal (Carnot) reóstato a cero



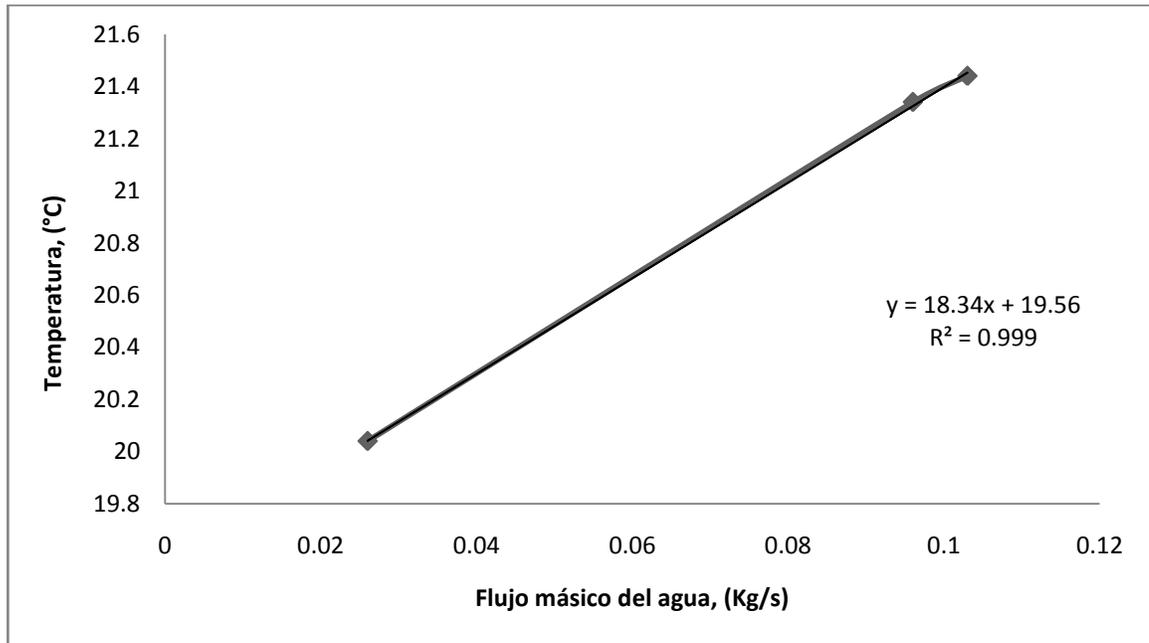
Fuente: datos calculados, Tablas XXXVIII y XXXIX.

Figura 52. Eficiencia del ciclo de refrigeración experimental (%)



Fuente: datos calculados, Tabla XL.

Figura 53. Variación de la temperatura del fluido respecto al flujo másico reóstato a 15 negativo



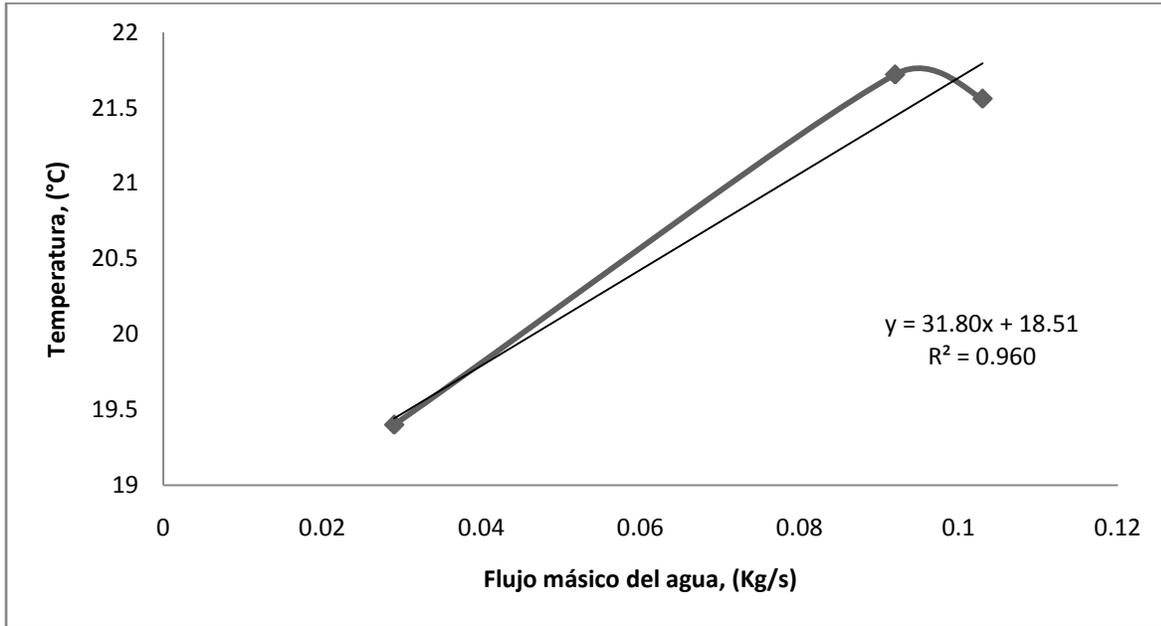
Fuente: datos calculados, Tablas XXXIV, XXXV y XXXVI.

Tabla XVIII. Análisis detallado de la Figura 53

Curva	Modelo Matemático	Correlación	Incertidumbre máxima variable independiente	Incertidumbre máxima variable dependiente	Intervalo de validez
Variación de la temperatura vrs. flujo másico	$\Delta T = 18.34M + 19.565$	0,9997	± 0.00023 Kg/s	± 0.005 ° C	[0,0.12] Kg/s

Fuente: Apéndice 3, Análisis de error.

Figura 54. Variación de la temperatura del fluido respecto al flujo másico reóstato a cero



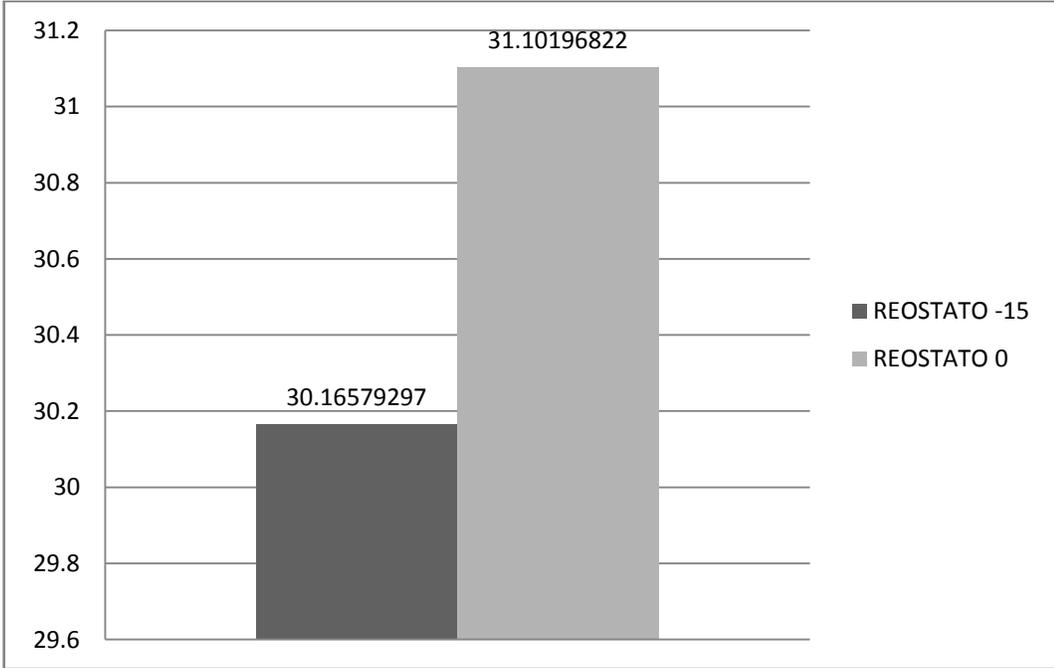
Fuente: datos calculados, Tablas XXXI, XXXII y XXXIII.

Tabla XIX. Análisis detallado de la Figura 54

Curva	Modelo Matemático	Correlación	Incertidumbre máxima variable independiente	Incertidumbre máxima variable dependiente	Intervalo de validez
Variación de la temperatura vs. flujo másico	$\Delta T = 31.804M + 18.519$	0.9605	± 0.00023 Kg/s	± 0.005 ° C	[0,0.12] Kg/s

Fuente: Apéndice 3, Análisis de error.

Figura 55. Comparación de la eficiencia isentrópica (%) del compresor con el reóstato a 15 negativo y cero



Fuente: datos calculados, Tabla XXXVII.

5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química se implementó exitosamente tanto el equipo como la práctica experimental de refrigeración por compresión, en la Figura 9 se observa el equipo instalado presentando cada una de sus partes como el compresor (Figura 10), condensador (Figura 11), evaporador (Figura 12), así como los instrumentos de medición instalados.

Se presentó un diagrama del equipo instalado señalando cada una de sus partes con la nomenclatura oficial utilizada en ingeniería, con el listado de equipamiento y servicios (Tabla IV), canalizaciones utilizadas por el equipo (Tabla V),

Con referencia al diseño experimental se planteo la descripción del problema, definiendo los objetivos aplicables, preguntas referentes a la investigación así como la justificación de cada una. Se realizó una descripción de las variables involucradas en el proceso con sus respectivas dimensionales, factor potencial de diseño y factores perturbadores (Tabla VI); para el modelo teórico CoolPack (Tabla VII) se elaboró una tabla indicando variables, dimensionales con un rango de variación para cada una relacionada con las variables del modelo experimental.

La selección de variables de respuesta o salida fue del mismo tipo tanto para el equipo experimental y el simulador, siendo casos de aplicación temperaturas, presiones, potencia y eficiencias.

El tratamiento para el diseño experimental consistió en la realización de tablas que relacionaran las combinaciones posibles entre cada una de las

variables como el calor de evaporación y el tipo de refrigerante (Tabla VIII) para el simulador CoolPack, la relación entre el calor de evaporación y el coeficiente de operación (Tabla IX), flujo másico de refrigerante (Tabla X) y la eficiencia isentrópica (Tabla XI).

El número de corridas para la práctica será determinado por medio de la ecuación 10, tomando en cuenta la confiabilidad, probabilidad de éxito, probabilidad de fracaso y el error estimado, para este caso de aplicación se utilizaron 5 corridas variando los flujos volumétricos de agua.

Las ecuaciones utilizadas para la obtención de los resultados fueron obtenidas a partir de las referencias bibliográficas utilizando libros de termodinámica y estadística, la ecuación 11 representa el calor que es absorbido en el evaporador en función de la entalpía específica de una mezcla saturada de baja calidad a la presión y temperatura del estrangulamiento y entalpía específica del vapor saturado a la presión del evaporador.

El trabajo neto de entrada al sistema se determinó por medio de la ecuación 13, siendo este en función de la cantidad de calor que se disipa en el condensador y cantidad de calor que se absorbe en el evaporador.

El coeficiente de operación experimental se obtuvo por medio de la ecuación 14, relacionando la entalpía específica de vapor saturado a la presión del evaporador, entalpía específica del vapor sobrecalentado a la presión y temperatura del condensador y la entalpía específica del líquido saturado a la presión del evaporador, de la misma forma se obtuvo el coeficiente de operación ideal por medio de la ecuación 14.

La eficiencia del sistema experimenta fue obtenida a partir de la ecuación 16, relacionando el coeficiente de operación experimental por la diferencia de la cantidad de calor que se disipa en el condensador y la cantidad de calor que se absorbe en el evaporador por el recíproco de la cantidad de calor que se disipa en el condensador.

La metodología para las posibles prácticas a realizar en el equipo se basó en procedimientos experimentales, operación adecuada del equipo, planteamiento de objetivos y posibles tablas de toma de datos.

Para hacer la evaluación con respecto a la calidad del aprendizaje y confiabilidad didáctica del equipo se procedió a realizar una encuesta a un grupo de 26 estudiantes que experimentaron con el equipo de refrigeración por compresión obteniendo diversas opiniones y puntos de vista, la Figura 18 representa los conocimientos que poseían los estudiantes previo a la realización de la práctica, obteniendo conocimientos básicos en un 54%, 27% medios, 19% deficientes y 0% altos.

La Figura 19 presenta una mejoría en la adquisición de los conocimientos respecto a los ciclos de refrigeración posterior a la realización del experimento y reporte, obteniendo conocimientos altos en un 46%, 50% medios, 4% básicos y 0% deficientes lo cual es un indicador del cumplimiento de los objetivos didácticos de la implementación de la práctica.

El 100% de los estudiantes encuestados respondieron que el equipo representa un ciclo de refrigeración (Figura 20), mientras que un 4% no está de acuerdo en que se siga utilizando el simulador CoolPack para auxiliar la práctica experimental (Figura 21), la Figura 22 señala que el 100% de los

estudiantes encuetados considera necesario el estudio de los ciclos de refrigeración en Ingeniería Química.

Según la Figura 23 los conocimientos adquiridos por los estudiantes respecto al COP fueron satisfactorios, ya que adquirieron conocimientos medios un 58%, 38% altos, 4% básicos y 0% deficientes.

Los conocimientos adquiridos por los estudiantes respecto a la compresión de gas refrigerante (Figura 24) siguen siendo satisfactorios, habiendo obtenido conocimientos medios un 65%, 31% altos, 4% básicos y 0% deficientes, los mismo resultados se obtuvieron para los conocimientos adquiridos respecto a la condensación de gas refrigerante (Figura 25).

Respecto a la evaporación de gas refrigerante (Figura 26) los conocimientos altos adquiridos por los estudiantes disminuyeron considerablemente respecto a la compresión y condensación, ya que un 23% consideró haber adquirido conocimientos altos, mientras que 73% medios y un 4% deficiente.

La comprensión de los estudiantes respecto a la expansión de gases (Figura 27) presenta ser satisfactoria ya que los conocimientos medios fueron del 77%, 15% altos, 4% básicos y 4% deficientes, por los que las etapas de evaporación y expansión deberían ser reforzadas posteriormente ya que fueron las únicas que presentaron secciones de deficiencia.

El 96% de los estudiantes consideró que el equipo experimental de refrigeración tiene instalados los instrumentos de medición adecuados mientras que el 4% no está de acuerdo según la Figura 28.

Se realizó un manual de operación detallado del equipo (Sección 4.4), haciendo énfasis en la verificación previa antes de poner en marcha la práctica, precauciones a tomar, mostrando las partes del equipo a operar con su respectiva Figura, como lo son el botón de encendido (Figura 29), la válvula de esfera que controla el flujo volumétrico a ingresar en el evaporador (Figura 30), el reóstato que controla la corriente que consume el evaporador (Figura 31), este debe tener una variación de +10°C hasta -25°C, ya que por debajo de esta temperatura se corre el riesgo de congelación y posibles daños en el evaporador. El medidor de flujo (Figura 32) deberá ser auxiliado por un cronómetro para la medición de flujo volumétrico saliente del evaporador, sugiriéndose la escala más pequeña la cual indicará un litro al completar una vuelta, los manómetros (Figura 33) colocados en alta y baja presión constan de escalas en sistema internacional e inglés, siendo estos kg/cm^2 y psig, debiendo utilizarlos a criterio del experimentador. Para la estimación de la potencia eléctrica del compresor el equipo posee instalado un amperímetro de corriente alterna (Figura 34), el cual indicará la corriente demandada por el compresor (la corriente demandada no debe superar 5.88A) respecto a las variaciones de flujo volumétrico y reóstato previas.

El manual de operación del simulador CoolPack muestra el procedimiento detallado a seguir para realizar las comparaciones entre el ciclo de refrigeración real e ideal, mostrando desde la instalación en un sistema operativo gratuito y de código abierto hasta cada una de sus posibles ventanas de operación, así como las útiles tablas de propiedades para diversos refrigerantes con sus respectivos diagramas.

En la sección 4.6 se muestra la comparación del ciclo de refrigeración real e ideal, desplegando en la Figura 50 las diferencias entre el coeficiente de

operación ideal habiendo obtenido 4.1576 mientras que para el ciclo real fue de 3.5649.

La Figura 52 muestra la eficiencia del equipo a dos diferentes posiciones del reóstato, siendo estas significativas ya que para la posición -15 la eficiencia calculada fue de 85.74% mientras que en posición 0 fue de 85.44%, lo cual sugiere que la eficiencia del equipo permanece casi constante al variar el reóstato para las posiciones por debajo de 0.

Las Ilustraciones 53 y 54 muestran el aumento proporcional de temperatura del agua saliente del evaporador respecto al flujo másico ingresado al mismo, lo que significa que a menores flujos habrá un mejor enfriamiento del agua dentro del evaporador.

La Figura 55 muestra la diferencia existente para la eficiencia isentrópica del compresor para dos diferentes posiciones del reóstato, para -15 la eficiencia calculada fue de 30.166%, mientras que en posición 0 fue de 31.102%, lo cual indica que al forzar más el compresor su eficiencia isentrópica será disminuida.

CONCLUSIONES

1. La práctica de refrigeración por compresión se implementó exitosamente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
2. La utilización del simulador CoolPack permitió la comparación adecuada entre un ciclo de refrigeración ideal y un ciclo real.
3. El diseño experimental para la práctica de refrigeración por compresión fue la adecuada.
4. Los conocimientos adquiridos de los ciclos refrigeración por los estudiantes fueron satisfactorios.
5. El 100% de los estudiantes encuestados está de acuerdo con que el equipo representa un ciclo de refrigeración por compresión.
6. El Simulador CoolPack es una herramienta muy útil para la comparación del ciclo real e ideal, por lo tanto debe seguir siendo utilizado.
7. El 96% de los estudiantes considera necesaria la continuidad del estudio de los ciclos de refrigeración.
8. El estudio de compresión y condensación resultó ser exitoso por parte de los estudiantes, ya que más del 90% ha comprendido ambos procesos.
9. El estudio de evaporación y expansión resultó ser exitoso por parte de los estudiantes, ya que más del 90% ha comprendido ambos procesos.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar un condensador enfriado por agua para aumentar la eficiencia del equipo de refrigeración por compresión.
2. Aislar térmicamente el evaporador para evitar la interacción del calor hacia el mismo.
3. Instalar un medidor de caudal específico para medir el flujo másico de refrigerante.
4. Utilizar un regulador de voltaje para evitar las variaciones de corriente que se dan en el compresor.
5. Instalar un vatímetro digital para tener una lectura más precisa de la potencia en el compresor.
6. Medir la temperatura del compresor para determinar la eficiencia isentrópica con mayor precisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Çengel, Yunus A.; Boles, Michael A. **Termodinámica**. 5a ed. México: McGraw – Hill, 2006 pp. 280 – 316, 608 – 618.
2. Spiegel, Murray R. **Probabilidad y Estadística**. México: McGraw – Hill, 1999 pp. 211 – 220.
3. Smith & Van Ness. **Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química**. 6a ed. México: McGraw - Hill, 2003 pp. 337-345.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. **Ciclos de refrigeración por compresión de gas.**

<http://www.monografias.com/.../ciclos-refrigeracion.../ciclos-refrigeracion-compresion.pdf> (consultado en: junio de 2010)

2. **Ciclos de refrigeración.**

http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/ap07_ciclos_termicos.php (consultado en: junio de 2010)

3. **Refrigeración por compresión.**

http://es.wikipedia.org/wiki/Refrigeraci%C3%B3n_por_compresi%C3%B3n (consultado en: mayo de 2010)

4. **El ciclo de refrigeración con gas R134a.**

<http://www.emagister.com/ciclo-refrigeracion-tps-1279571.htm> (consultado en: junio de 2010)

BIBLIOGRAFÍA

1. Balzhiser, R. y otros. **Termodinámica Química para Ingenieros**. México: Prentice Hall Latinoamericana 1980.
2. Callen, H. B. **Termodinámica**. España: AC 1981.
3. Çengel Yunus A. y Michael A. Boles. **Termodinámica**. Cuarta edición. México: McGraw-Hill 2003.
4. Gargallo, L.G. **Termodinámica Química**. México: Alfaomega, 2000.
5. Holman, J. P. **Transferencia de Calor**. México: C.E.C.S.A, 1989.
6. Kern, Donald. Q. **Procesos de transferencia de Calor**. 2a. ed. México: C.E.C.S.A, 1986.
7. Smith & Van Ness. **Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química**. México: McGraw Hill, 1991.
8. Wark, K.; Richards, D. E. **Termodinámica**. España: McGraw Hill, 2001.

ANEXOS

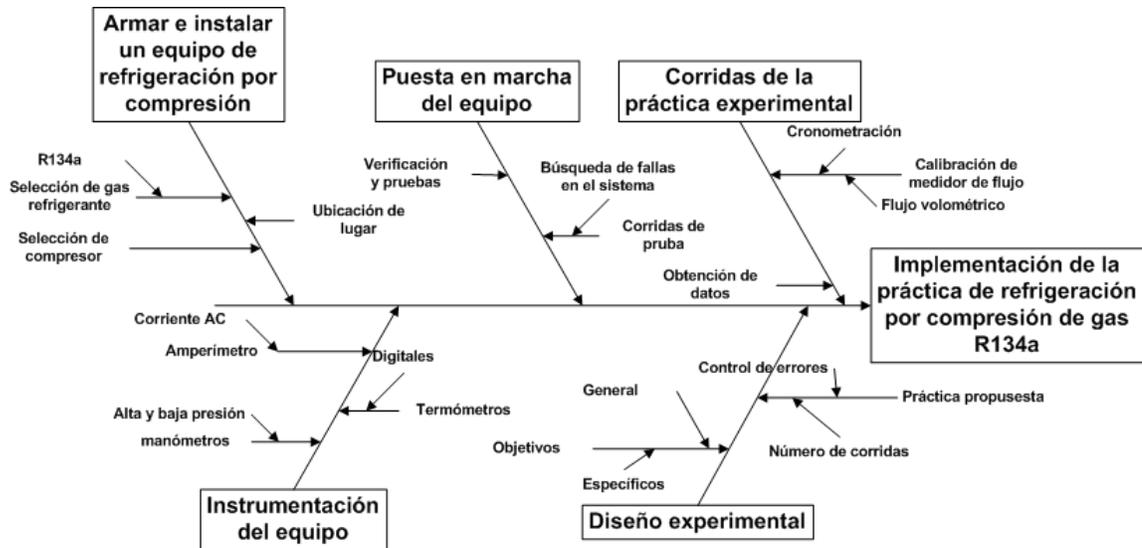
ANEXO 1

Tabla XX. REQUISITOS ACADÉMICOS

Carrera: Ingeniería Química						
Área	Tema genérico	Tema específico	Especificación	Problema a resolver	Hipótesis	
Química	Química orgánica	Alcanos	Halogenuros de alquilo	Implementar una práctica de refrigeración por compresión diseñada para los estudiantes de Ingeniería Química en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química	<p>Científica: "El valor de COP (ω) real y de Carnot es constante para el refrigerante R134a".</p> <p>Estadística: Nula: "El COP (ω) real y de Carnot varía de acuerdo al flujo másico del refrigerante R134a"</p> <p>Alternativa: "El COP (ω) real y de Carnot permanece constante de acuerdo al flujo másico de refrigerante R134a"</p>	
Operaciones Unitarias	Transferencia de calor (IQ-3)	Intercambiadores de calor	Condensadores y evaporadores			
Fisicoquímica	Termodinámica	Ciclos de refrigeración	Carnot Inverso			
Ciencias básicas y complementarias	Estadística	Estadística descriptiva	Hipótesis			

ANEXO 2

ÁRBOL DE PROBLEMAS



APÉNDICES

APÉNDICE 1

A1.1 MUESTRA DE CÁLCULO

1. Interpolación de datos

Ecuación 22

$$M = \frac{(X_2 - X)}{(X_2 - X_1)} * M_1 + \frac{(X - X_1)}{(X_2 - X_1)} * M_2$$

(Referencia 2)

Donde:

M = dato deseado.

M₁ = dato anterior.

M₂ = dato posterior.

X = dato independiente del dato deseado.

X₁ = dato independiente anterior.

X₂ = dato independiente posterior.

Ejemplo:

Cálculo de la densidad del agua a 30.5 °C de temperatura.

$$M = \frac{(35 - 30.5)}{35 - 30} * 995.67 + \frac{(30.5 - 30)}{(35 - 30)} * 994.06 = 995.509$$

Nota: de esta forma se calcularon las entalpías y densidades utilizadas para posteriores cálculos. Véase Apéndice 2, Sección Datos Calculados, Tablas XVI – XL.

2. Cálculo del calor que se absorbe en el evaporador

Ecuación 23

$$Q_L = H_2 - H_1$$

(Referencia 1)

Donde:

Q_L =Cantidad de calor que se absorbe en el Evaporador (KJ/s).

H_1 =Entalpía específica de una mezcla saturada de baja calidad a la Presión y temperatura del Estrangulamiento (KJ/s).

H_2 =Entalpía específica del vapor saturado a la presión del evaporador (KJ/s).

Ejemplo:

Cálculo de calor que absorbe el evaporador en la corrida No.1 reóstato a 15 negativo.

$$Q_L = 240.06646\text{KJ/Kg} - 116.27674\text{KJ/Kg} = 123.7879\text{KJ/Kg}$$

Nota: de la misma forma se procedió a calcular el calor absorbido por el evaporador para todas las corridas realizadas. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

3. Cálculo del calor que se disipa en el condensador

Ecuación 24

$$Q_H = H_2 - H_4$$

(Referencia 1)

Donde:

Q_H =Cantidad de calor que se disipa en el Condensador (KJ/s).

H_2 =Entalpía específica del vapor a la presión y temperatura del evaporador (KJ/s).

H_4 =Entalpía específica del líquido saturado a la Presión del condensador (KJ/s).

Ejemplo:

Cálculo del calor que se disipa en el condensador para la corrida No.1 reóstato 15 negativo.

$$Q_H = 274.5843\text{KJ/Kg} - 116.27674\text{KJ/Kg} = 158.3076\text{KJ/Kg}$$

Nota: de la misma forma se procedió al cálculo del calor disipado por el condensador para todas las corridas realizadas. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

4. Determinación del trabajo neto de entrada del sistema

Ecuación 25

$$W_{\text{Neto, Entrada}} = Q_H - Q_L$$

(Referencia 1)

Donde:

$W_{\text{Neto, Entrada}}$ = Trabajo neto de entrada del sistema (KJ/s).

Q_H = Cantidad de calor que se disipa en el condensador (KJ/s).

Q_L = Cantidad de calor que se absorbe en el evaporador (KJ/s).

Ejemplo:

Cálculo del trabajo neto de entrada del sistema con el reóstato en posición 15 negativo.

$$W_{\text{Neto, Entrada}} = 153.35 \text{KJ/Kg} - 119.76 \text{KJ/Kg} = 33.5900 \text{KJ/Kg}$$

Nota: de igual forma se procedió al cálculo del trabajo neto de entrada del sistema con el reóstato en posición cero.

5. Determinación del coeficiente de desempeño experimental

Ecuación 26

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{W_{\text{Neto, Entrada}}}$$

(Referencia 1)

Donde:

COP_R =Coeficiente de desempeño experimental (adimensional).

Q_L =Cantidad de calor que se absorbe en el evaporador (KJ/s).

W_{Neto} =Trabajo neto de entrada del sistema (KJ/s).

Ejemplo:

Cálculo del coeficiente de desempeño experimental para el sistema con el reóstato en posición 15 negativo.

$$\text{COP}_R = \frac{119.7564\text{KJ/Kg}}{33.5900\text{KJ/Kg}} = 3.5652$$

Nota: de la forma se procedió al cálculo del coeficiente de desempeño experimental para el sistema con el reóstato en posición cero. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

6. Determinación del coeficiente de desempeño ideal

Ecuación 27

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_e}{T_c - T_e}$$

(Referencia 1)

Donde:

$\text{COP}_{\text{Carnot}}$ =Coeficiente de desempeño ideal (adimensional).

T_e =Temperatura absoluta del evaporador (K).

T_c =Temperatura absoluta del condensador (K).

Ejemplo:

Cálculo del coeficiente de desempeño ideal para el sistema con el reóstato en posición 15 negativo.

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{260.2326\text{K}}{322.824\text{K} - 260.2326\text{K}} = 4.1576$$

Nota: de la misma forma se procedió al cálculo del coeficiente de desempeño ideal para el sistema con el reóstato en posición cero. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

7. Determinación de la eficiencia del sistema experimental

Ecuación 28

$$\eta_E = \frac{COP_R}{COP_{Carnot}} * 100$$

(Referencia 1)

Donde:

η_E =Eficiencia del sistema experimental (%).

COP_R =Coeficiente de desempeño experimental (adimensional).

COP_{Carnot} =Coeficiente de desempeño ideal (adimensional).

Ejemplo:

Cálculo de la eficiencia del sistema con el reóstato en posición 15 negativo.

$$\eta_E = \frac{3.5652}{4.1576} * 100\% = 85.7514\%$$

Nota: de la misma forma se procedió al cálculo de la eficiencia del sistema con el reóstato en posición cero. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

8. Determinación del flujo másico de agua

Ecuación 29

$$m_W = \rho_{(T\text{ }^{\circ}\text{C})} V_W$$

(Referencia 1)

Donde:

m_W =Flujo másico de agua (Kg/s).

$\rho_{(T\text{ }^{\circ}\text{C})}$ =Densidad del agua en función de la temperatura (Kg/m³).

V_W =Flujo volumétrico de agua (m³/s).

Ejemplo:

Cálculo del flujo másico de agua para la corrida No.1 con el reóstato en posición 15 negativo.

$$m_W = 995.509\text{Kg/m}^3 * 0.0000238\text{m}^3/\text{s} = 0.0237\text{Kg/s}$$

Nota: de la misma forma se procedió al cálculo de todos los flujos másicos utilizados en la práctica. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

9. Determinación de la potencia consumida por el compresor

Ecuación 30

$$P_{\text{COMP}} = \frac{V \times I \times \eta_E}{f_p}$$

(Referencia 3)

Donde:

P_{COMP} =Potencia del compresor (KJ/s).

V=Voltaje (V).

I=Amperaje (A).

f_p =Factor de potencia.

η_E =Eficiencia del sistema.

Ejemplo:

Cálculo de la potencia consumida por el compresor para la corrida No.1 con el reóstato en posición 15 negativo.

$$P_{\text{COMP}} = \frac{120V \times 5.75 \times 0.857514}{1.09} = 542.83W$$

Nota: de la misma forma se procedió al cálculo de la potencia consumida por el compresor para todas las corridas realizadas. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

10. Determinación de la eficiencia isentrópica del compresor

Ecuación 31

$$\eta_i = \frac{H_2 - H_4}{P_{\text{COMP}}} * 100$$

(Referencia 3)

Donde:

η_i =Eficiencia isentrópica del compresor (%).

H_4 =Entalpía específica de una mezcla saturada de baja calidad a la presión y temperatura del estrangulamiento (KJ/s).

H_2 =Entalpía específica del vapor saturado a la presión del evaporador (KJ/s).

P_{COMP} =Potencia del compresor (KJ/s).

Ejemplo:

Cálculo de la eficiencia isentrópica del compresor con el reóstato a 15 negativo.

$$\eta_i = \frac{123.7295}{542.83} * 100\% = 22.7934\%$$

Nota: de la misma forma se calculo la eficiencia isentrópica del compresor con el reóstato en posición cero. Véase Apéndice 2, sección datos calculados, Tablas XVI – XL.

11. Cálculo del error por exactitud para los valores obtenidos de COP

Ecuación 32

$$\% Err = \frac{|DT - DE|}{DT} \times 100 \%$$

(Referencia 2)

Donde:

$\%Err$ = Error por exactitud (%).

DT = Dato teórico.

DE = Dato experimental.

Ejemplo:

Para la determinación del error por exactitud de los COP al variar la posición del reóstato en -15, se obtiene lo siguiente:

$$\% Err = \frac{|DT - DE|}{DT} \times 100 \%$$

$$\% Err = \frac{|4.1576 - 3.5648|}{4.1576} \times 100 \%$$

$$\% Err = 14.258\%$$

Nota: de la misma forma se calcularon los valores de los errores por exactitud para todos los datos obtenidos. Véase Apéndice 3, sección análisis de error, Tabla XLI.

12. Cálculo del error por exactitud para los valores obtenidos de COP

Ecuación 33

$$\dot{m}_r \Delta H_{\text{vap}}(P) = \dot{m}_w C_p(T) \Delta T$$

(Referencia 1)

Ecuación 34

$$\Delta \dot{m}_r = \frac{C_p}{\Delta H_{\text{vap}}(P)} (\Delta \dot{m}_w T_f + \Delta \dot{m}_w T_0 + \Delta T_f \dot{m}_w + \Delta T_0 \dot{m}_w)$$

(Referencia 1)

Donde:

\dot{m}_r = Flujo másico del refrigerante (Kg/s).

$\Delta H_{\text{vap}}(P)$ = Entalpía de vaporización en función de la presión (KJ/Kg).

\dot{m}_w = Flujo másico de agua (Kg/s).

$C_p(T)$ = Calor específico del agua en función de la temperatura (KJ/Kg °C)

ΔT = Gradiente de temperatura del agua (°C).

$\Delta \dot{m}_r$ = Incerteza flujo másico del refrigerante (Kg/s).

$\Delta \dot{m}_w$ = Incerteza flujo másico de agua (Kg/s).

ΔT_f = Incerteza temperatura final (°C).

ΔT_0 = Incerteza temperatura inicial (°C).

Ejemplo: sustituyendo datos en la ecuación derivada queda:

$$\Delta \dot{m}_r = 0.0098 \text{ kg/s}$$

Nota: de la misma forma se calcularon los valores de los errores por exactitud para todos los datos obtenidos. Véase Apéndice 3, sección análisis de error, Tabla XLI.

APÉNDICE 2

A2.1 TABLAS DE DATOS CALCULADOS

Tabla XXI. Entalpía durante la corrida 1, reóstato a -15

Corrida No. 1 Reóstato a 15 negativo							
Presión en evaporador (psig)	Presión en evaporador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)	Presión en condensador (psig)	Presión en condensador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)
7	21.6959	103.21	240.0665	155	169.6959	49.99	116.2767
8	22.6959	103.49	240.7177	160	174.6959	50.72	117.9747
8	22.6959	103.49	240.7177	162	176.6959	51.01	118.6493
8.5	23.1959	103.63	241.0434	163	177.6959	51.16	118.9982
9	23.6959	103.77	241.369	165	179.6959	51.45	119.6727

Fuente: muestra de cálculo, inciso 1.

Tabla XXII. Entalpía durante la corrida 2, reóstato a -15

Corrida No. 2 Reóstato a 15 negativo							
Presión en evaporador (psig)	Presión en evaporador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)	Presión en condensador (psig)	Presión en condensador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)
11.5	26.1959	104.41	242.8577	181	195.6959	53.69	124.8829
12	26.6959	104.53	243.1368	181	195.6959	53.69	124.8829
12	26.6959	104.53	243.1368	177	191.6959	53.15	123.6269
12.5	27.1959	104.65	243.4159	185	199.6959	54.24	126.1622
12.5	27.1959	104.65	243.4159	185	199.6959	54.24	126.1622

Fuente: muestra de cálculo, inciso 1.

Tabla XXIII. Entalpía durante la corrida 3, reóstato a -15

Corrida No. 3 Reóstato a 15 negativo							
Presión en evaporador (psig)	Presión en evaporador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)	Presión en condensador (psig)	Presión en condensador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)
12	26.6959	104.53	243.1368	181	195.6959	53.69	124.8829
13	27.6959	104.77	243.695	183	197.6959	53.97	125.5342
14	28.6959	105	244.23	180	194.6959	53.56	124.5806
14.5	29.1959	105.13	244.5324	182	196.6959	53.83	125.2086
14.5	29.1959	105.13	244.5324	185	199.6959	54.24	126.1622

Fuente: muestra de cálculo, inciso 1.

Tabla XXIV. Entalpía durante la corrida 1, reóstato a 0

Corrida No. 1 Reóstato a 0							
Presión en evaporador (psig)	Presión en evaporador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)	Presión en condensador (psig)	Presión en condensador (psia)	Entalpía (Btu/lbm)	Entalpía (KJ/Kg)
9.5	24.1959	103.91	241.6947	168	182.6959	51.88	120.6729
10	24.6959	104.05	242.0203	172	186.6959	52.44	121.9754
10	24.6959	104.05	242.0203	173	187.6959	52.59	122.3243
10.5	25.1959	104.18	242.3227	175	189.6959	52.87	122.9756
11	25.6959	104.3	242.6018	176	190.6959	53.01	123.3013

Fuente: muestra de cálculo, inciso 1.

Tabla XXV. Entalpía durante la corrida 2, reóstato a 0

Corrida No. 2 Reóstato a 0							
Presión en evaporador (psig)	Presión en evaporador (psia)	Entalpia (Btu/lbm)	Entalpia (KJ/Kg)	Presión en condensador (psig)	Presión en condensador (psia)	Entalpia (Btu/lbm)	Entalpia (KJ/Kg)
13	27.6959	104.77	243.695	190	204.6959	54.9	127.6974
13.5	28.1959	104.89	243.9741	190	204.6959	54.9	127.6974
14	28.6959	105	244.23	192	206.6959	55.17	128.3254
14	28.6959	105	244.23	180	194.6959	53.56	124.5806
13	27.6959	104.77	243.695	180	194.6959	53.56	124.5806

Fuente: muestra de cálculo, inciso 1.

Tabla XXVI. Entalpía durante la corrida 3, reóstato a 0

Corrida No. 3 Reóstato a 0							
Presión en evaporador (psig)	Presión en evaporador (psia)	Entalpia (Btu/lbm)	Entalpia (KJ/Kg)	Presión en condensador (psig)	Presión en condensador (psia)	Entalpia (Btu/lbm)	Entalpia (KJ/Kg)
14	28.6959	105.01	244.2533	180	194.6959	53.56	124.5806
14.5	29.1959	105.13	244.5324	180	194.6959	53.56	124.5806
15.5	30.1959	105.36	245.0674	195	209.6959	55.56	129.2326
15.5	30.1959	105.36	245.0674	195	209.6959	55.56	129.2326
15.5	30.1959	105.36	245.0674	185	199.6959	54.24	126.1622

Fuente: muestra de cálculo, inciso 1.

Tabla XXVII. **Calor absorbido y disipado durante la corrida 1, reóstato a -15**

Corrida 1 reóstato -15	
Calor disipado (KJ/Kg)	Calor absorbido evaporador (KJ/Kg)
158.3076	123.7897
157.1678	122.7430
156.5631	122.0685
156.3770	122.0452
155.8420	121.6963

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XXVIII. **Calor absorbido y disipado durante la corrida 2, reóstato a -15**

Corrida 2 reóstato -15	
Calor disipado (KJ/Kg)	Calor absorbido evaporador (KJ/Kg)
151.7715	117.9747
151.9576	118.2538
152.8415	119.5099
150.6783	117.2537
150.6783	117.2537

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XXIX. **Calor absorbido y disipado durante la corrida 3, reóstato a -15**

Corrida 3 reóstato -15	
Calor disipado (KJ/Kg)	Calor absorbido evaporador (KJ/Kg)
151.7715	118.2538
151.4459	118.1608
152.1437	119.6494
151.7715	119.3238
150.9341	118.3701

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XXX. **Calor absorbido y disipado durante la Corrida 1, reóstato a 0**

Corrida 1 reóstato 0	
Calor disipado (KJ/Kg)	Calor absorbido evaporador (KJ/Kg)
154.9814	121.0218
153.9812	120.0449
153.8882	119.6960
153.3532	119.3471
153.0973	119.3005

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XXXI. **Calor absorbido y disipado durante la corrida 2, reóstato a 0**

Corrida 2 reóstato 0	
Calor disipado (KJ/Kg)	Calor absorbido evaporador (KJ/Kg)
149.5851	115.9976
149.5385	116.2767
149.0268	115.9046
152.0739	119.6494
152.0739	119.1145

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XXXII. **Calor absorbido y disipado durante la corrida 3, reóstato a 0**

Corrida 3 reóstato 0	
Calor disipado (KJ/Kg)	Calor absorbido evaporador (KJ/Kg)
152.2600	119.6727
152.5856	119.9518
148.2127	115.8348
148.2127	115.8348
150.6783	118.9051

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XXXIII. Flujo volumétrico durante la Corrida 1, reóstato a -15

Flujo volumétrico No. 1 reóstato 15 negativo				
Flujo volumétrico (L/s)	Flujo volumétrico (m³/s)	Temperatura (° C)	Densidad (Kg/m³)	Flujo másico (Kg/s)
0.0238	0.000024	30.5000	995.5090	0.0237
0.0250	0.000025	26.6000	996.6220	0.0249
0.0250	0.000025	25.3000	996.9860	0.0249
0.0261	0.000026	25.0000	997.0700	0.0260
0.0322	0.000032	25.4000	996.9580	0.0321

Fuente: muestra de cálculo, inciso 8.

Tabla XXXIV. Flujo volumétrico durante la corrida 2, reóstato a -15

Flujo volumétrico No. 2 reóstato 15 negativo				
Flujo volumétrico (L/s)	Flujo volumétrico (m³/s)	Temperatura (° C)	Densidad (Kg/m³)	Flujo másico (Kg/s)
0.0944	0.000094	23.9000	997.3252	0.0941
0.0978	0.000098	23.4000	997.4412	0.0975
0.0967	0.000097	23.5000	997.4180	0.0965
0.0978	0.000098	23.8000	997.3484	0.0975
0.0967	0.000097	23.2000	997.4876	0.0965

Fuente: muestra de cálculo, inciso 8.

Tabla XXXV. Flujo volumétrico durante la corrida 3, reóstato a -15

Flujo volumétrico No. 3 reóstato 15 negativo				
Flujo volumétrico (L/s)	Flujo volumétrico (m³/s)	Temperatura (° C)	Densidad (Kg/m³)	Flujo másico (Kg/s)
0.1033	0.000103	22.5000	997.6500	0.1031
0.1022	0.000102	22.8000	997.5804	0.1020
0.1028	0.000103	22.3000	997.6964	0.1026
0.1033	0.000103	22.0000	997.7660	0.1031
0.1028	0.000103	22.2000	997.7196	0.1026

Fuente: muestra de cálculo, inciso 8.

Tabla XXXVI. Flujo volumétrico durante la corrida 1, reóstato a 0

Flujo volumétrico No. 1 reóstato 0				
Flujo volumétrico (L/s)	Flujo volumétrico (m³/s)	Temperatura (° C)	Densidad (Kg/m³)	Flujo másico (Kg/s)
0.0256	0.000026	25.4000	996.9580	0.0255
0.0306	0.000031	25.7000	996.9580	0.0305
0.0300	0.000030	25.1000	997.0420	0.0299
0.0278	0.000028	25.4000	996.9580	0.0277
0.0306	0.000031	24.4000	997.2092	0.0305

Fuente: muestra de cálculo, inciso 8.

Tabla XXXVII. Flujo volumétrico durante la corrida 2, reóstato a 0

Flujo volumétrico No. 2 reóstato 0				
Flujo volumétrico (L/s)	Flujo volumétrico (m³/s)	Temperatura (° C)	Densidad (Kg/m³)	Flujo másico (Kg/s)
0.0933	0.000093	23.7000	997.3716	0.0931
0.0900	0.000090	23.4000	997.4412	0.0898
0.0956	0.000096	23.5000	997.4180	0.0954
0.0906	0.000091	23.0000	997.5340	0.0904
0.0900	0.000090	23.8000	997.3484	0.0898

Fuente: muestra de cálculo, inciso 8.

Tabla XXXVIII. Flujo volumétrico durante la corrida 3, reóstato a 0

Flujo volumétrico No. 3 reóstato 0				
Flujo volumétrico (L/s)	Flujo volumétrico (m³/s)	Temperatura (° C)	Densidad (Kg/m³)	Flujo másico (Kg/s)
0.1039	0.000104	22.7000	997.6036	0.1037
0.1044	0.000104	22.5000	997.6500	0.1042
0.1028	0.000103	23.5000	997.4180	0.1025
0.1033	0.000103	23.9000	997.3252	0.1030
0.1039	0.000104	23.2000	997.4876	0.1036

Fuente: muestra de cálculo, inciso 8.

Tabla XXXIX. **Potencia del compresor, reóstato a -15**

Potencia en el compresor reóstato 15 negativo			
Corrida	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (W)
1	120.00	5.75	542.7718581
2	118.00	5.85	543.0078458
3	117.30	5.88	542.5547493

Fuente: muestra de cálculo, inciso 9.

Tabla XL. **Potencia del compresor, reóstato a 0**

Potencia en el compresor reóstato 0			
Corrida	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (W)
1	120.00	5.85	552.2113687
2	118.00	5.75	533.7256604
3	118.00	5.88	545.7925015

Fuente: muestra de cálculo, inciso 9.

Tabla XLI. **Calor absorbido y liberado promedio**

Calor absorbido y liberado		
Reóstato	Q_l (J)	Q_h (J)
-15	119.756436	153.3500787
0	118.4368187	151.5699133

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XLII. **Calor absorbido y liberado promedio**

Trabajo neto de entrada al sistema	
Reóstato	Trabajo (W)
-15	33.59364267
0	33.13309467

Fuente: muestra de cálculo, incisos 2 y 3.

Tabla XLIII. **Coficiente de desempeño experimental**

Coficiente de desempeño experimental	
Reóstato	COP_r
-15	3.564854136
0	3.57457762

Fuente: muestra de cálculo, inciso 5.

Tabla XLIV. **Coficiente de desempeño de Carnot**

Coficiente de desempeño Carnot	
Reóstato	COP_{Carnot}
-15	4.157641465
0	4.183882854

Fuente: muestra de cálculo, inciso 6.

Tabla XLV. **Eficiencia del sistema**

Eficiencia del sistema	
Reóstato	Eficiencia
-15	85.74222
0	85.43685

Fuente: muestra de cálculo, inciso 7.

APÉNDICE 3

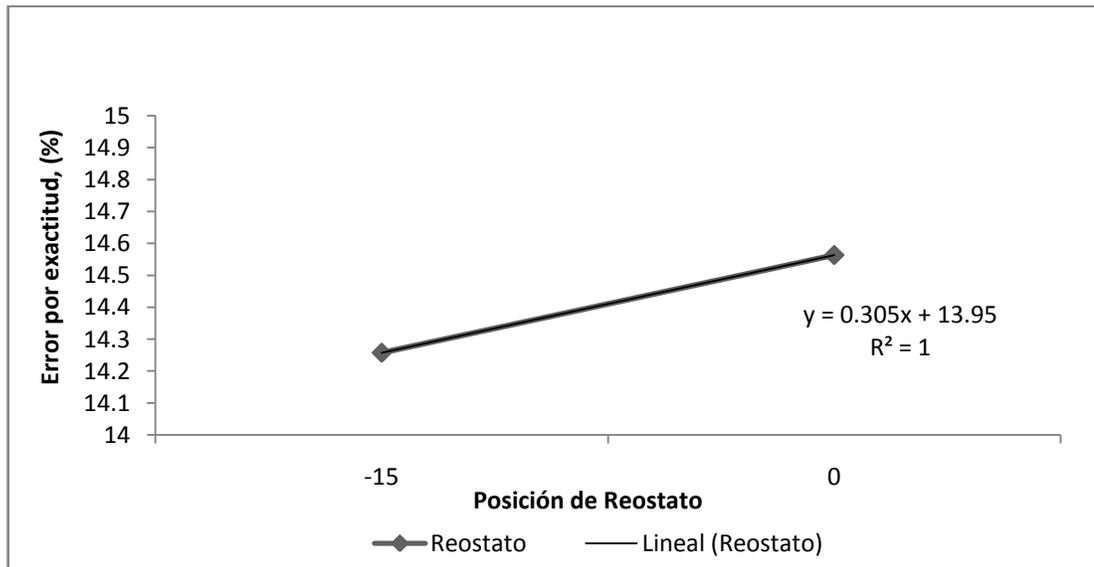
A3.1 ANÁLISIS DE ERROR

Tabla XLVI. Error por exactitud al variar la posición del reóstato para el refrigerante R134a

Reóstato	COP real	COP ideal	Error por exactitud (%)
0	3.5745	4.1838	14.5631
-15	3.5648	4.1576	14.2577

Fuente: muestra de cálculo, inciso 11.

Figura 56. Error por exactitud frente a la posición del reóstato del refrigerante R134a



Fuente: análisis de error, Tabla LIV.

APÉNDICE 4
A4.1 DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE EN
LABORATORIO

Tabla XLVII. **Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 15 negativo**

Corrida	Intervalo de tiempo por corrida (min)	Flujo volumétrico de agua 1			
		Condensador		Evaporador	
		P _{HE} (psi)	P _{Hs} (psi)	P _{LE} (psi)	P _{Ls} (psi)
1	3	155	169,6959	7	21,6959
2	3	160	174,6959	8	22,6959
3	3	162	176,6959	8	22,6959
4	3	163	177,6959	8,5	23,1959
5	3	165	179,6959	9	23,6959

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla XLVIII. **Flujo volumétrico de agua 1 con posición del reóstato a 15 negativo**

Corrida	Flujo volumétrico de agua 1		
	T _{Succión} (°C)	T _{Descarga} (°C)	V _w (L/s)
1	30,5	20,7	0,0238
2	26,6	20,7	0,025
3	25,3	19,6	0,025
4	25	19,4	0,0261
5	25,4	19,8	0,0322

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla XLIX. **Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo**

Corrida	Flujo volumétrico de agua 1	
	Voltaje (V)	Amperaje (A)
1	120	5,75
2	120	5,75
3	120	5,75
4	120	5,75
5	120	5,75

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla L. **Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 15 negativo**

Corrida	Intervalo de tiempo por corrida (min)	Flujo volumétrico de agua 2			
		Condensador		Evaporador	
		P_{HE} (psi)	P_{HS} (psi)	P_{LE} (psi)	P_{LS} (psi)
1	3	181	195,6959	11,5	26,1959
2	3	181	195,6959	12	26,6959
3	3	177	191,6959	12	26,6959
4	3	185	199,6959	12,5	27,1959
5	3	185	199,6959	12,5	27,1959

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LI. Flujo volumétrico de agua 2 con posición del reóstato a 15 negativo

Corrida	Flujo volumétrico de agua 2		
	T _{Succión} (°C)	T _{Descarga} (°C)	V _w (L/s)
1	23,9	21,2	0,0944
2	23,4	21,5	0,0978
3	23,5	21,6	0,0967
4	23,8	21,4	0,0978
5	23,2	21,5	0,0967

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LII. Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo

Corrida	Flujo volumétrico de agua 2	
	Voltaje (V)	Amperaje (A)
1	118	5,85
2	118	5,85
3	118	5,85
4	118	5,85
5	118	5,85

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LIII. Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 15 negativo

Corrida	Intervalo de tiempo por corrida (min)	Flujo volumétrico de agua 3			
		Condensador		Evaporador	
		P _{HE} (psi)	P _{HS} (psi)	P _{LE} (psi)	P _{LS} (psi)
1	3	181	195,6959	12	26,6959
2	3	183	197,6959	13	27,6959
3	3	180	194,6959	14	28,6959
4	3	182	196,6959	14,5	29,1959
5	3	185	199,6959	14,5	29,1959

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LIV. Flujo volumétrico de agua 3 con posición del reóstato a 15 negativo

Corrida	Flujo volumétrico de agua 3		
	T _{Succión} (°C)	T _{Descarga} (°C)	V _w (L/s)
1	22,5	21,3	0,1033
2	22,8	21,1	0,1022
3	22,3	21,5	0,1028
4	22	21,3	0,1033
5	22,2	21,5	0,1028

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LV. **Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo**

Corrida	Flujo volumétrico de agua 3	
	Voltaje (V)	Amperaje (A)
1	117,3	5,88
2	117,3	5,88
3	117,3	5,88
4	117,3	5,88
5	117,3	5,88

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LVI. **Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 0**

Corrida	Intervalo de tiempo por corrida (min)	Flujo volumétrico de agua 1			
		Condensador		Evaporador	
		P_{HE} (psi)	P_{HS} (psi)	P_{LE} (psi)	P_{LS} (psi)
1	3	168	182,6959	9,5	24,1959
2	3	172	186,6959	10	24,6959
3	3	173	187,6959	10	24,6959
4	3	175	189,6959	10,5	25,1959
5	3	176	190,6959	11	25,6959

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LVII. Flujo volumétrico de agua 1 con posición del reóstato a 0

Corrida	Flujo volumétrico de agua 1		
	T _{Succión} (°C)	T _{Descarga} (°C)	V _w (L/s)
1	25,4	19,5	0,0256
2	25,7	19,5	0,0306
3	25,1	19,2	0,03
4	25,4	19,4	0,0278
5	24,4	19,4	0,0306

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LVIII. Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 0

Corrida	Flujo Volumétrico de agua 1	
	Voltaje (V)	Amperaje (A)
1	120	5,85
2	120	5,85
3	120	5,85
4	120	5,85
5	120	5,85

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LIX. Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 0

Corrida	Intervalo de tiempo por corrida (min)	Flujo volumétrico de agua 2			
		Condensador		Evaporador	
		P _{HE} (psi)	P _{HS} (psi)	P _{LE} (psi)	P _{LS} (psi)
1	3	190	204,6959	13	27,6959
2	3	190	204,6959	13,5	28,1959
3	3	192	206,6959	14	28,6959
4	3	180	194,6959	14	28,6959
5	3	180	194,6959	13	27,6959

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LX. Flujo volumétrico de agua 2 con posición del reóstato a 0

Corrida	Flujo volumétrico de agua 2		
	T _{Succión} (°C)	T _{Descarga} (°C)	V _w (L/s)
1	23,7	21,4	0,0933
2	23,4	21,5	0,09
3	23,5	21,5	0,0956
4	23	21,6	0,0906
5	23,8	21,8	0,09

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LXI. Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 0

Corrida	Flujo volumétrico de agua 2	
	Voltaje (V)	Amperaje (A)
1	118	5,75
2	118	5,75
3	118	5,75
4	118	5,75
5	118	5,75

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LXII. Temperatura y presión en el evaporador y condensador con posición del reóstato a 0

Corrida	Intervalo de tiempo por corrida (min)	Flujo volumétrico de agua 3			
		Condensador		Evaporador	
		P_{HE} (psi)	P_{HS} (psi)	P_{LE} (psi)	P_{LS} (psi)
1	3	180	194,6959	14	28,6959
2	3	180	194,6959	14,5	29,1959
3	3	195	209,6959	15,5	30,1959
4	3	195	209,6959	15,5	30,1959
5	3	185	199,6959	15,5	30,1959

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LXIII. **Flujo volumétrico de agua 3 con posición del reóstato a 15 negativo**

Corrida	Flujo volumétrico de agua 3		
	T _{Succión} (°C)	T _{Descarga} (°C)	V _w (L/s)
1	22,7	21,3	0,1039
2	22,5	21,5	0,1044
3	23,5	20,2	0,1028
4	23,9	20,3	0,1033
5	23,2	20,3	0,1039

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración.

Tabla LXIV. **Mediciones de voltaje y amperaje en el compresor con posición del reóstato a 15 negativo**

Corrida	Flujo volumétrico de agua 3	
	Voltaje (V)	Amperaje (A)
1	118	5,88
2	118	5,88
3	118	5,88
4	118	5,88
5	118	5,88

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, equipo de refrigeración

APÉNDICE 5

A5. 1 PROPIEDADES DEL REFRIGERANTE R134A SATURADO (LÍQUIDO-VAPOR)

Tabla LXV. R134a (Líquido-vapor)

T	P	V _f	V _g	H _f	H _g	R	S _f	S _g
°C	Bar	dm ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
-40	0.516	0.7055	0.35692	149.97	372.85	222.88	0.8030	1.7589
-39	0.544	0.7069	0.34001	151.15	373.48	222.33	0.8080	1.7575
-38	0.572	0.7083	0.32405	152.33	374.11	221.78	0.8130	1.7562
-37	0.602	0.7098	0.30898	153.51	374.74	221.23	0.8180	1.7548
-36	0.633	0.7113	0.29474	154.70	375.37	220.66	0.8231	1.7535
-35	0.665	0.7127	0.28128	155.89	375.99	220.10	0.8281	1.7523
-34	0.699	0.7142	0.26855	157.09	376.62	219.53	0.8331	1.7510
-33	0.734	0.7157	0.25651	158.29	377.24	218.95	0.8381	1.7498
-32	0.770	0.7172	0.24511	159.49	377.87	218.37	0.8431	1.7486
-31	0.808	0.7187	0.23431	160.70	378.49	217.79	0.8480	1.7474
-30	0.847	0.7202	0.22408	161.91	379.11	217.20	0.8530	1.7463
-29	0.888	0.7218	0.21438	163.13	379.73	216.61	0.8580	1.7452
-28	0.930	0.7233	0.20518	164.35	380.35	216.01	0.8630	1.7441
-27	0.974	0.7249	0.19645	165.57	380.97	215.40	0.8679	1.7430
-26	1.020	0.7264	0.18817	166.80	381.59	214.79	0.8729	1.7420
-25	1.067	0.7280	0.18030	168.03	382.21	214.18	0.8778	1.7410
-24	1.116	0.7296	0.17282	169.26	382.82	213.56	0.8828	1.7400
-23	1.167	0.7312	0.16571	170.50	383.44	212.94	0.8877	1.7390
-22	1.219	0.7328	0.15896	171.74	384.05	212.31	0.8927	1.7380
-21	1.274	0.7345	0.15253	172.99	384.67	211.68	0.8976	1.7371
-20	1.330	0.7361	0.14641	174.24	385.28	211.04	0.9025	1.7362
-19	1.388	0.7378	0.14059	175.49	385.89	210.40	0.9075	1.7353
-18	1.448	0.7394	0.13504	176.75	386.50	209.75	0.9124	1.7345
-17	1.511	0.7411	0.12975	178.01	387.11	209.10	0.9173	1.7336

-16	1.575	0.7428	0.12471	179.27	387.71	208.44	0.9222	1.7328
-15	1.641	0.7445	0.11991	180.54	388.32	207.78	0.9271	1.7320
-14	1.710	0.7463	0.11533	181.81	388.92	207.11	0.9320	1.7312
-13	1.781	0.7480	0.11095	183.09	389.52	206.44	0.9369	1.7304
-12	1.854	0.7498	0.10678	184.36	390.12	205.76	0.9418	1.7297
-11	1.929	0.7515	0.10279	185.65	390.72	205.08	0.9467	1.7289
-10	2.007	0.7533	0.09898	186.93	391.32	204.39	0.9515	1.7282
-9	2.088	0.7551	0.09534	188.22	391.92	203.69	0.9564	1.7275
-8	2.170	0.7569	0.09186	189.52	392.51	202.99	0.9613	1.7269
-7	2.256	0.7588	0.08853	190.82	393.10	202.29	0.9661	1.7262
-6	2.344	0.7606	0.08535	192.12	393.70	201.58	0.9710	1.7255
-5	2.434	0.7625	0.08230	193.42	394.28	200.86	0.9758	1.7249
-4	2.527	0.7644	0.07938	194.73	394.87	200.14	0.9807	1.7243
-3	2.623	0.7663	0.07659	196.04	395.46	199.42	0.9855	1.7237
-2	2.722	0.7682	0.07391	197.36	396.04	198.68	0.9903	1.7231
-1	2.824	0.7701	0.07135	198.68	396.62	197.95	0.9952	1.7225
0	2.928	0.7721	0.06889	200.00	397.20	197.20	1.0000	1.7220
1	3.036	0.7740	0.06653	201.33	397.78	196.45	1.0048	1.7214
2	3.146	0.7760	0.06427	202.66	398.36	195.70	1.0096	1.7209
3	3.260	0.7781	0.06210	203.99	398.93	194.94	1.0144	1.7204
4	3.376	0.7801	0.06001	205.33	399.50	194.17	1.0192	1.7199
5	3.496	0.7821	0.05801	206.67	400.07	193.40	1.0240	1.7194
6	3.619	0.7842	0.05609	208.02	400.64	192.62	1.0288	1.7189
7	3.746	0.7863	0.05425	209.37	401.21	191.84	1.0336	1.7184
8	3.876	0.7884	0.05248	210.72	401.77	191.05	1.0384	1.7179
9	4.009	0.7906	0.05077	212.08	402.33	190.25	1.0432	1.7175
10	4.145	0.7927	0.04913	213.44	402.89	189.45	1.0480	1.7170
11	4.286	0.7949	0.04756	214.80	403.44	188.64	1.0527	1.7166
12	4.429	0.7971	0.04604	216.17	404.00	187.83	1.0575	1.7162
13	4.577	0.7994	0.04458	217.54	404.55	187.01	1.0623	1.7158
14	4.728	0.8016	0.04318	218.92	405.10	186.18	1.0670	1.7154
15	4.883	0.8039	0.04183	220.30	405.64	185.34	1.0718	1.7150
16	5.042	0.8062	0.04052	221.68	406.18	184.50	1.0765	1.7146
17	5.204	0.8085	0.03927	223.07	406.72	183.66	1.0813	1.7142
18	5.371	0.8109	0.03806	224.44	407.26	182.82	1.0859	1.7139

19	5.541	0.8133	0.03690	225.84	407.80	181.96	1.0907	1.7135
20	5.716	0.8157	0.03577	227.23	408.33	181.09	1.0954	1.7132
21	5.895	0.8182	0.03469	228.64	408.86	180.22	1.1001	1.7128
22	6.078	0.8206	0.03365	230.05	409.38	179.34	1.1049	1.7125
23	6.265	0.8231	0.03264	231.46	409.91	178.45	1.1096	1.7122
24	6.457	0.8257	0.03166	232.87	410.42	177.55	1.1143	1.7118
25	6.653	0.8283	0.03072	234.29	410.94	176.65	1.1190	1.7115
26	6.853	0.8309	0.02982	235.72	411.45	175.73	1.1237	1.7112
27	7.058	0.8335	0.02894	237.15	411.96	174.81	1.1285	1.7109
28	7.267	0.8362	0.02809	238.58	412.47	173.89	1.1332	1.7106
29	7.482	0.8389	0.02727	240.02	412.97	172.95	1.1379	1.7103
30	7.701	0.8416	0.02648	241.46	413.47	172.00	1.1426	1.7100
31	7.924	0.8444	0.02572	242.91	413.96	171.05	1.1473	1.7097
32	8.153	0.8473	0.02498	244.36	414.45	170.09	1.1520	1.7094
33	8.386	0.8501	0.02426	245.82	414.94	169.12	1.1567	1.7091
34	8.625	0.8530	0.02357	247.28	415.42	168.14	1.1614	1.7088
35	8.868	0.8560	0.02290	248.75	415.90	167.15	1.1661	1.7085
36	9.117	0.8590	0.02225	250.22	416.37	166.15	1.1708	1.7082
37	9.371	0.8620	0.02162	251.70	416.84	165.14	1.1755	1.7079
38	9.630	0.8651	0.02102	253.18	417.30	164.12	1.1802	1.7077
39	9.894	0.8682	0.02043	254.67	417.76	163.09	1.1849	1.7074
40	10.164	0.8714	0.01986	256.16	418.21	162.05	1.1896	1.7071
41	10.439	0.8747	0.01930	257.66	418.66	161.00	1.1943	1.7068
42	10.720	0.8779	0.01877	259.16	419.11	159.94	1.1990	1.7065
43	11.007	0.8813	0.01825	260.67	419.54	158.87	1.2037	1.7062
44	11.299	0.8847	0.01774	262.19	419.98	157.79	1.2084	1.7059
45	11.597	0.8882	0.01726	263.71	420.40	156.69	1.2131	1.7056
46	11.901	0.8917	0.01678	265.24	420.83	155.59	1.2178	1.7053
47	12.211	0.8953	0.01632	266.77	421.24	154.47	1.2225	1.7050
48	12.526	0.8989	0.01588	268.32	421.65	153.33	1.2273	1.7047
49	12.848	0.9026	0.01544	269.86	422.05	152.19	1.2320	1.7044
50	13.176	0.9064	0.01502	271.42	422.44	151.03	1.2367	1.7041
51	13.510	0.9103	0.01461	272.98	422.83	149.85	1.2414	1.7037
52	13.851	0.9142	0.01421	274.55	423.21	148.66	1.2462	1.7034
53	14.198	0.9182	0.01383	276.13	423.59	147.46	1.2509	1.7030

54	14.552	0.9223	0.01345	277.71	423.95	146.24	1.2557	1.7027
55	14.912	0.9265	0.01309	279.30	424.31	145.01	1.2604	1.7023
56	15.278	0.9308	0.01273	280.90	424.66	143.75	1.2652	1.7019
57	15.652	0.9351	0.01239	282.51	424.99	142.49	1.2700	1.7015
58	16.032	0.9396	0.01205	284.13	425.32	141.20	1.2747	1.7011
59	16.419	0.9441	0.01172	285.75	425.64	139.89	1.2795	1.7007
60	16.813	0.9488	0.01141	287.39	425.96	138.57	1.2843	1.7003
61	17.215	0.9536	0.01110	289.03	426.26	137.23	1.2892	1.6998
62	17.623	0.9585	0.01079	290.68	426.54	135.86	1.2940	1.6994
63	18.039	0.9635	0.01050	292.35	426.82	134.47	1.2988	1.6989
64	18.462	0.9687	0.01021	294.02	427.09	133.07	1.3037	1.6983
65	18.893	0.9739	0.00993	295.71	427.34	131.63	1.3085	1.6978
66	19.331	0.9794	0.00966	297.40	427.58	130.18	1.3134	1.6973
67	19.777	0.9850	0.00940	299.11	427.81	128.70	1.3183	1.6967
68	20.231	0.9907	0.00914	300.83	428.02	127.19	1.3232	1.6961
69	20.692	0.9966	0.00888	302.57	428.22	125.65	1.3282	1.6954
70	21.162	1.0027	0.00864	304.31	428.40	124.08	1.3331	1.6947
71	21.640	1.0090	0.00840	306.07	428.56	122.49	1.3381	1.6940
72	22.126	1.0155	0.00816	307.85	428.71	120.86	1.3431	1.6933
73	22.620	1.0222	0.00793	309.64	428.84	119.19	1.3482	1.6925
74	23.123	1.0291	0.00770	311.45	428.94	117.49	1.3532	1.6917
75	23.634	1.0363	0.00748	313.27	429.03	115.76	1.3583	1.6908
76	24.154	1.0437	0.00727	315.11	429.09	113.98	1.3635	1.6899
77	24.683	1.0514	0.00706	316.97	429.13	112.16	1.3686	1.6889
78	25.221	1.0595	0.00685	318.86	429.15	110.29	1.3738	1.6879
79	25.768	1.0679	0.00665	320.77	429.13	108.36	1.3791	1.6868
80	26.324	1.0766	0.00645	322.69	429.09	106.40	1.3844	1.6857
81	26.890	1.0857	0.00625	324.63	429.01	104.38	1.3897	1.6844
82	27.465	1.0953	0.00606	326.60	428.91	102.31	1.3951	1.6831
83	28.050	1.1054	0.00587	328.61	428.75	100.14	1.4005	1.6817
84	28.645	1.1159	0.00569	330.64	428.56	97.92	1.4061	1.6802
85	29.250	1.1271	0.00550	332.71	428.33	95.62	1.4116	1.6786
86	29.866	1.1390	0.00532	334.81	428.05	93.24	1.4173	1.6769
87	30.491	1.1515	0.00514	336.95	427.71	90.75	1.4231	1.6751
88	31.128	1.1649	0.00497	339.14	427.31	88.17	1.4289	1.6731

89	31.776	1.1793	0.00479	341.37	426.84	85.46	1.4349	1.6709
90	32.435	1.1948	0.00462	343.66	426.29	82.63	1.4410	1.6685
91	33.105	1.2116	0.00444	346.01	425.65	79.64	1.4472	1.6659
92	33.788	1.2300	0.00427	348.44	424.91	76.47	1.4537	1.6631
93	34.482	1.2502	0.00410	350.95	424.04	73.09	1.4603	1.6599
94	35.190	1.2728	0.00392	353.56	423.03	69.46	1.4672	1.6564
95	35.910	1.2983	0.00375	356.30	421.83	65.53	1.4744	1.6524
96	36.644	1.3277	0.00356	359.21	420.38	61.17	1.4820	1.6477
97	37.393	1.3624	0.00337	362.33	418.62	56.29	1.4902	1.6422
98	38.158	1.4051	0.00317	365.77	416.41	50.64	1.4992	1.6356
99	38.940	1.4610	0.00295	369.72	413.48	43.77	1.5095	1.6271
100	39.742	1.5443	0.00268	374.70	409.10	34.40	1.5225	1.6147
101	40.570	1.7576	0.00221	384.42	398.59	14.18	1.5482	1.5861
101.1	40.670	1.9523	0.00195	391.16	391.16	0.00	1.5661	1.5661

Fuente: simulador CoolPack

APÉNDICE 6

A6.1 FICHA TÉCNICA DEL COMPRESOR

Especificación Técnica
Ingeniería de Productos



Modelo	LM	Voltaje Nominal (V)		Refrigerante	Enfriamiento
		60 Hz	50 Hz		
AE2415AS	AE334DS	115-127	100	R134A	Forzada

Dados Básicos

Rango de voltaje de operación (V):	60 Hz: 100 - 134	50 Hz: 90 - 110
Aplicación:	Baja Presión de Evaporación (LBP)	
Rango de temperatura de evaporación:	-34.4°C to -12.2°C (-30°F to +10°F)	
Tipo de Motor:	CSIR	
Clase del torque de arranque:	Alto Torque de Arranque (HST)	
Tipo de expansión:	Tubo Capilar	
Tipo de aceite:	Sintético	Viscosidad: 32 cSt @ 40°C
Carga de aceite:	453 ml	
Desplazamiento:	18,08 cc/rev	
Peso neto:	11,4 Kg	
Homologación:	—	

Rendimiento Esperado

Condiciones para las pruebas:	ASHRAE	CECOMAF
Voltaje de la prueba:	127V/60Hz	
Capacidad frigorífica (+/-5%) (Btu/h):	1525	
(Kcal/h):	384	
(W):	447	
Potencia (+/-5%) (W):	410	
Amperaje (+/-5%) (A):	5,88	
Eficiencia – EER (-9.04%/+10.5%) (Btu/Wh):	3,72	
(Kcal/Wh):	0,94	
(W/W):	1,09	