

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE
HIDROCARBUROS EN EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN
FLUOROCARBONADOS POR COMPRESIÓN DE
VAPOR**

PRESENTADO POR:

GERVER IVÁN LAÍNEZ VELÁSQUEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE
HIDROCARBUROS EN EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN
FLUOROCARBONADOS POR COMPRESIÓN DE
VAPOR**

Presentado por :

GERVER IVÁN LAÍNEZ VELÁSQUEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

San Salvador, Febrero de 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

DEDICATORIA

A:

DIOS TODO PODEROSO

MI MADRE: MARINA DEL CARMEN VELÁZQUEZ

MI PADRE: EULALIO ANTONIO ESCOBAR LAÍNEZ

MIS HERMANOS: WALTER ANTONIO LAÍNEZ VELÁSQUEZ

KATHERINE VALENTINA ESCOBAR VELÁSQUEZ

WILSON GERARDO ESCOBAR VELÁSQUEZ

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso, por brindarme la sabiduría necesaria para el desarrollo de mi carrera, a la vez que siempre tuvo para mí las bendiciones y oportunidades necesarias para culminar mis estudios.

A querida familia, primeramente a mis padres Marina del Carmen Velásquez y Eulalio Antonio Escobar Laínez, por ser mi inspiración de superación, por todos sus consejos y por siempre estar conmigo en todo momento, brindándome el apoyo y cariño que tanto he necesitado. A mis hermanos, Walter, Katherine y Gerardo, gracias por acompañarme en esta larga travesía y por todo su apoyo, gracias por alegrarme todos los días con sus ocurrencias.

A mi estimado asesor de trabajo de graduación, Ingeniero Salomón Torres, gracias por ser un gran guía para la realización de este, gracias por todas las enseñanzas que me brindó, por todos los consejos que me dio, ya que estos me han servido para tomar las más grandes decisiones, los cuales estarán conmigo el resto de mi vida.

A mis apreciados compañeros, Delmy Noemy Molina, Luis Eduardo López, Luis Enrique Rosa Chávez Y José Erick Jiménez, gracias por toda la ayuda que me brindaron, ya que el desarrollo de la tesis no habría sido posible sin su valioso apoyo.

Gracias a todas las personas que me brindaron su apoyo, especialmente a Arístides Cañas, a Jorge Alberto Santamaría y a todo el personal de la unidad metal mecánica de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A todos los docentes que contribuyeron a mi formación académica, ya que a ellos les debo este logro.

Finalmente agradezco a todos los miembros de ASEIM, gracias compañeros por la ayuda que me brindaron a lo largo de mi trabajo de graduación y toda mi carrera.

RESUMEN

Los refrigerantes fluorocarbonados son los principales causantes los agujeros de la capa de ozono, ya que su uso indiscriminado ha provocado graves daños a esta, además de contribuir al calentamiento global. A partir de anterior, surge la necesidad de encontrar sustancias que no contribuyan al incremento del deterioro hecho hasta la actualidad, a la vez que su efecto refrigerante sea similar a los refrigerantes fluorocarbonados, es por ello que el desarrollo del presente trabajo es sumamente importante, ya que se busca una alternativa menos perjudicial.

De esta forma, se realizó el estudio de factibilidad para la reconversión de un equipo de refrigeración domiciliar, el cual originalmente operaba con R-12, a hidrocarburo (R-290), en el proceso de reconversión del equipo se realizaron cambios mínimos al sistema, ya que solo se debió cambiar el filtro secador, el tubo capilar y el aceite del compresor. Como herramientas auxiliares para la reconversión, se hizo uso del software DanCap y el programa desarrollado en EES, los cuales permitieron la ejecución del diseño del tubo capilar y la caracterización aproximada del equipo de refrigeración.

Se pudo comprobar que el reemplazo de propano en el equipo de refrigeración fue exitoso, ya que se logró una buena extracción de calor del espacio refrigerado, al mismo tiempo que se obtuvo un menor consumo de energía eléctrica, lo que implica un ahorro efectivo al usar el equipo con el nuevo refrigerante, además se mostró la oportunidad de disminuir emisiones de sustancias agotadoras del ozono en el país, a razón de 70.1 toneladas métricas por año, considerando únicamente los equipos del tipo residencial, por lo que esta cifra en realidad puede ser mucho mayor.

Puede constatarse la importancia del uso de los hidrocarburos, específicamente el R-290, en sustitución de los refrigerantes fluorocarbonados, ya que el equipo no requiere grandes cambios, a la vez que se obtiene un efecto refrigerante aceptable.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	I
1.0 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	1
1.1 HISTORIA DE LA REFRIGERACIÓN.....	1
1.2 TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN	10
1.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS	10
1.2.2 EL CICLO DE CARNOT INVERSO.....	17
1.2.3 CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR ...	19
1.2.4 CICLO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.....	29
1.3 COMPONENTES NECESARIOS PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	30
1.3.1 COMPRESORES	30
1.3.2 CONDENSADORES.....	32
1.3.3 EVAPORADORES	36
1.3.4 DISPOSITIVOS DE EXPANSIÓN	39
1.3.5 OTROS ACCESORIOS.....	44
1.4 REFRIGERANTES	45
1.4.1 HISTORIA DE LOS REFRIGERANTES	46
1.4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES SEGÚN TIPO DE MEZCLA	47
1.4.3 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	48
1.4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU INFLAMABILIDAD Y TOXICIDAD.....	50
1.4.5 NUMERACIÓN DE LOS REFRIGERANTES.....	53
1.5 IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LOS REFRIGERANTES FLUOROCARBONADOS.....	55
1.5.1 DESTRUCCIÓN DEL OZONO DE LA ATMÓSFERA.....	55
1.5.2 CONSECUENCIAS DEL AGOTAMIENTO DEL OZONO.....	57
1.5.3 CALENTAMIENTO GLOBAL.....	60
1.6 HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES.....	63
1.6.1 PROPIEDADES DE LOS HC	66

1.6.2	PRESENTACIÓN DE LOS CILINDROS DE REFRIGERANTE HC.	67
1.7	RIESGOS DEL USO DE HIDROCARBUROS EN REFRIGERACIÓN ...	68
1.7.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS	68
1.7.2	MEDIDAS DE SEGURIDAD A SEGUIR PARA EL USO DE HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES.....	69
1.7.3	CÁLCULO DE CARGA MÁXIMA DE REFRIGERANTE SEGÚN LA HABITACIÓN QUE CONTIENE EL EQUIPO.....	74
1.7.4	VENTILACIÓN.....	77
1.7.5	MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS	79
2.0	PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	84
2.1	COMPETENCIAS TÉCNICAS, TECNOLÓGICAS Y PROFESIONALES PARA EFECTUAR LA RECONVERSIÓN A HIDROCARBUROS DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	84
2.1.1	PERSONAL INVOLUCRADO EN LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE RECONVERSIÓN	84
2.2	LEGISLACIÓN AMBIENTAL PARA EL USO DE HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES.....	89
2.2.1	SUGERENCIA PARA LA ELABORACIÓN DEL REGLAMENTO PARA EL USO DE REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.	90
2.3	PROPUESTA DEL PROCEDIMIENTO PARA LA RECONVERSIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN A HIDROCARBUROS	93
2.3.1	RECUPERACIÓN Y MANEJO DE REFRIGERANTES	94
2.3.2	BARRIDO CON NITRÓGENO.....	97
2.3.3	CAMBIO DEL FILTRO SECADOR	98
2.3.4	PRUEBAS DE HERMETICIDAD Y DETECCIÓN DE FUGAS.....	98
2.3.5	VERIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS	100
2.3.6	VACÍO DEL SISTEMA.....	101
2.3.7	CARGA DE REFRIGERANTE	103
2.3.8	FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE RECONVERSIÓN.	108
3.0	DISEÑO Y/O ADAPTACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN PARA USO DE REFRIGERANTE HIDROCARBURO	110
3.1	DISEÑO TERMODINÁMICO	110

3.1.1	CARACTERIZACIÓN DEL CICLO UTILIZANDO R-12	111
3.1.2	CARACTERIZACIÓN DEL CICLO UTILIZANDO R-290	115
3.2	COMPARACIÓN TEÓRICA DE OPERACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN QUE UTILIZAN REFRIGERANTES FLUOROCARBONADOS Y REFRIGERANTES HIDROCARBUROS .	117
3.2.1	ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO REFRIGERADOR.	121
3.2.2	DISEÑO DEL TUBO CAPILAR.....	126
3.2.3	SOFTWARE PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN	132
3.3	INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS	135
3.3.1	PREPARACIÓN DEL EQUIPO PARA EFECTUAR EL CAMBIO DE REFRIGERANTE	135
3.3.2	RECONVERSIÓN DEL SISTEMA DE R-12 A R-290.	142
3.4	ANÁLISIS DE PRUEBAS EN EL EQUIPO	145
3.4.1	MODIFICACIONES DEL TUBO CAPILAR	145
3.4.2	VARIACIÓN DE CARGA SEGÚN CORRIENTE DE OPERACIÓN	146
3.4.3	CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	147
3.4.4	IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN OPERANDO CON R-290.....	149
3.5	DISEÑO MECÁNICO DEL BANCO DE PRUEBAS	150
4.0	COSTOS DE INSTALACIÓN Y PRUEBAS DE EQUIPOS	151
4.1	COSTOS DE LOS EQUIPOS Y HERRAMIENTAS INVOLUCRADAS EN EL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN.....	151
4.1.1	COSTOS DEL BANCO DE PRUEBAS.....	151
4.1.2	COSTOS DE LA INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS. ...	152
4.1.3	COSTOS TOTALES	153
4.2	COSTOS DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN.....	154
4.3	DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN	157
4.3.1	FACTIBILIDAD ECONÓMICA	158
4.3.2	FACTIBILIDAD AMBIENTAL	161

4.3.3 OPORTUNIDAD DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE REFRIGERANTES FLUOROCARBONADOS EN EL PAÍS.....	162
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	166
CONCLUSIONES	166
RECOMENDACIONES.....	168
BIBLIOGRAFÍA.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. SISTEMA DE REFRIGERACION IDEADO POR JACOB PERKINS.....	5
FIGURA 2. EFECTO JOULE-THOMSON	7
FIGURA 3 DIAGRAMA T-S DE UN CICLO INVERSO DE CARNOT.....	17
FIGURA 4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CICLO INVERTIDO DE CARNOT.....	18
FIGURA 5. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	19
FIGURA 6. DIAGRAMAS PH Y TS DE UN CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	21
FIGURA 7. PRINCIPALES ELEMENTOS DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	24
FIGURA 8 . INFLUENCIA DE LA IRREVERSIBILIDADES DEBIDAS A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL FUNCIONAMIENTO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	25
FIGURA 9. CICLO REAL DE REFRIGERACIÓN	27
FIGURA 10 COMPARACIÓN DE LOS CICLOS REAL E IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.....	28
FIGURA 11. ESQUEMA DE LOS COMPONENTES DEL CICLO SIMPLE DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.....	29
FIGURA 12. ESQUEMA DE COMPRESOR RECIPROCANTE MONOCILINDRICO.....	31
FIGURA 13. COMPRESOR ROTATIVO DEL TIPO CENTRÍFUGO.....	31
FIGURA 14 CONDENSADOR ENFRIADO POR AIRE, POR CONVECCIÓN NATURAL.....	33
FIGURA 15. ESQUEMA DE CONDENSADOR ENFRIADO POR AGUA.	34
FIGURA 16. CONDENSADOR DEL TIPO EVAPORATIVO.....	35
FIGURA 17. EVAPORADORES DEL TIPO DE SUPERFICIE DE PLACA.....	37
FIGURA 18. EVAPORADOR CON SUPERFICIES ALETEADAS	38
FIGURA 19. EVAPORADORES INUNDADOS	38

FIGURA 20. EVAPORADOR SECO.....	39
FIGURA 21. VALVULA DE EXPANSIÓN A PRESIÓN CONSTANTE.....	41
FIGURA 22. EVAPORADOR DEL TIPO INUNDADO, CON CONTROL POR MEDIO DE VÁLVULA DE FLOTADOR.....	42
FIGURA 23. TUBO CAPILAR	43
FIGURA 24. CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU TOXICIDAD Y POR SU INFLAMABILIDAD	52
FIGURA 25 DESTRUCCIÓN DEL OZONO CAUSADA POR LA DESINTEGRACIÓN DE LA MOLÉCULA CFC	56
FIGURA 26. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO O DE RADIACIÓN.	57
FIGURA 27. INCIDENCIA DE LOS RAYOS ULTRA VIOLETA SOBRE LA ATMÓSFERA.....	59
FIGURA 28. AGUJERO DE LA CAPA DE OZONO Y CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CLORO EN LA REGIÓN DEL POLO NORTE.....	60
FIGURA 29. EFECTO INVERNADERO.....	62
FIGURA 30. EXTINTOR DE POLVO SECO.....	72
FIGURA 31 DETECCIÓN DE FUGAS EMPLEANDO DETECTOR ELECTRÓNICO.....	81
FIGURA 32 APLICACIÓN DE ESPUMA SOBRE LAS UNIONES DE LAS TUBERÍAS PARA IDENTIFICAR LAS FUGAS.....	81
FIGURA 33. TALLERES DE RECONVERSIÓN DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	86
FIGURA 34. TÉCNICO DE REFRIGERACIÓN DANDO MANTENIMIENTO A UNA UNIDAD DE AIRE ACONDICIONADO.....	87
FIGURA 35 CILINDRO DE RECUPERACIÓN DEBIDAMENTE IDENTIFICADO.....	95
FIGURA 36 EQUIPO DE RECUPERACIÓN	96
FIGURA 37 BARRIDO DEL SISTEMA CON NITRÓGENO	97
FIGURA 38 ESTRUCTURA INTERNA DEL FILTRO	98
FIGURA 39 CONEXIÓN ADECUADA DE LAS MANGUERAS DEL MANÓMETRO	99

FIGURA 40. AISLAMIENTO DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS.	101
FIGURA 41. MEDICIÓN DE CORRIENTE EN LA ENTRADA DEL COMPRESOR.....	105
FIGURA 42. ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL MANÓMETRO PARA REALIZAR LA CARGA POR EL PARÁMETRO PRESIÓN.	107
FIGURA 43. FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE RECONVERSIÓN	109
FIGURA 44. POSICION DE LAS VÁLVULAS DE ACCESO DE BAJA Y ALTA PRESIÓN	111
FIGURA 45. DIAGRAMAS PH Y TS DE UN CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.	112
FIGURA 46. ANALISIS DE ELEMENTO DIFERENCIAL DE UN FLUIDO.	127
FIGURA 47 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO CAPILAR	131
FIGURA 48. SOFTWARE DANCAP 1.0 PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO CAPILAR	132
FIGURA 49. INTERFAZ DEL PROGRAMA EN ESS PARA LA CARACTERIZACION DEL CICLO DE REFRIGERACION	134
FIGURA 50. PROCESO DE SOLDADURA	137
FIGURA 51 MANOMETROS DE ALTA Y BAJA PRESION.	137
FIGURA 52. FILTRO SECADOR FLARE DE 1/4" O-D32 SPORLAND	138
FIGURA 53 CAPILAR INSTALADO EN EL EQUIPO DE REFRIGERACION.....	139
FIGURA 54 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL EQUIPO REFRIGERADOR	139
FIGURA 55. INSTALACION DEL TERMOSTATO.....	141
FIGURA 56 BOMBA DE VACIO	142
FIGURA 57 CILINDRO DE GAS PROPANO	143
FIGURA 58 CARGA DEL REFRIGERANTE R-290	144
FIGURA 59. INSTALACION DEL TUBO CAPILAR EN EL EVAPORADOR.....	146
FIGURA 60. MEDICION DE LA MASA DE REFRIGERANTE CARGADO AL SISTEMA.....	147
FIGURA 61 IDENTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN CON R-290.....	149

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. COMPARACIÓN DE LOS FLUJOS MÁSICOS PARA R-12 Y R-290.	120
GRÁFICO 2. COMPARACIÓN DEL DELTA DE PRESION REQUERIDO PARA AMBOS REFRIGERANTES	121
GRÁFICO 3. COMPARATIVA DEL TRABAJO A REALIZAR POR EL COMPRESOR PARA AMBOS REFRIGERANTES	122
GRÁFICO 4. COMPARATIVA DEL COEFICIENTE DE OPERACIÓN DEL EQUIPO	123
GRÁFICO 5. COMPARATIVA DEL CALOR RECHAZADO PARA AMBOS REFRIGERANTES	124
GRÁFICO 6. CONSUMO ELECTRICO DEL EQUIPO DE REFRIGERACION.	148
GRÁFICO 7. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN EN LA POBLACIÓN	163
GRÁFICO 8. EMISIONES DE REFRIGERANTE FLUOROCARBONADO POR TIPO DE POBLACIÓN..	164

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ACONTECIMIENTOS HISTÓRICOS DE LA REFRIGERACIÓN	9
TABLA 2 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU TOXICIDAD E INFLAMABILIDAD	51
TABLA 3 SERIES DE REFRIGERANTES	53
TABLA 4. PUNTO DE EBULLICIÓN Y VALORES CRÍTICOS PARA EL PROPANO, BUTANO, ISOBUTANO Y PROPILENO.	66
TABLA 5. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DE LOS HIDROCARBUROS PARA SU USO COMO REFRIGERANTES	67
TABLA 6 PRESENTACIONES DE DIFERENTES REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.....	68
TABLA 7. PROPIEDADES DE INFLAMABILIDAD DE LOS HC'S USADOS EN REFRIGERACIÓN.	69
TABLA 8 CAPACIDAD DE CARGA	75
TABLA 9. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN	112
TABLA 10 CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACION CON R-12	114
TABLA 11. CARACTERIZACION DEL CICLO DE REFRIGERACION UTILIZANDO REFRIGERANTE R-290	117
TABLA 12. CARACTERISTICAS TECNICAS DEL COMPRESOR PW4.5K9	118
TABLA 13. PRESIONES Y TEMPERATURAS DE OPERACIÓN.	148
TABLA 14. COSTOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	152
TABLA 15. COSTOS DE LA INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS	153
TABLA 16. COSTO TOTAL DEL PROYECTO	154
TABLA 17. TABLA PARA ESTIMAR EL COSTO DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN POR EQUIPO.....	156
TABLA 18. CONSUMO ELÉCTRICO DEL EQUIPO DE REFRIGERACION.....	159
TABLA 19. CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DE DIVERSOS REFRIGERANTES.....	161

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. RESOLUCIÓN DEL MINISTERIO DE ECONOMÍA EN CUANTO A LA LEGISLACIÓN NACIONAL DEL USO DE HIDROCARBUROS EN REFRIGERACIÓN.....	172
ANEXO 2. DIAGRAMA DEL CICLO Y TABLAS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL REFRIGERANTE R-12	174
ANEXO 3. DIAGRAMA DEL CICLO Y TABLAS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL REFRIGERANTE R-290	176
ANEXO 4. CARTA DE PROCESO DE LA RECONVERSIÓN.....	178
ANEXO 5. ESTRUCTURA METÁLICA DEL BANCO DE PRUEBAS	179
ANEXO 6. DETALLE DE GASTOS VARIOS.....	180
ANEXO 7 MODELO DE CARTA DE COBRO DEL PROCESO DE RECONVERSIÓN	181
ANEXO 8 CÓDIGO EES	182
ANEXO 9 GUÍA DE LABORATORIO	185

LISTADO DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

AA	Ahorro anual
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CE	Consumo Eléctrico
CF	Costo fijo
CFC	Refrigerante clorofluorocarbono
COP	Coeficiente de operación
COP_{Carnot}	Coeficiente de operación del ciclo de Carnot inverso
CV	Costo variable
f	Coeficiente de fricción
FW	Fluid Work, trabajo de un flujo
h	Entalpía específica
HC	Hidrocarburos
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarbonos
I	Corriente
LFL	Límite inferior de inflamabilidad
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
\dot{m}	Flujo másico de refrigerante
NFPA	National Fire Protection Association
ppm	Partes por millón.
P	Potencia del equipo de refrigeración
P_{comp}	Potencia eléctrica del compresor
Q_H	Calor rechazado en el condensador
Q_L	Calor absorbido en el evaporador
Re	Número de Reynolds
s	Entropía específica
T_H	Temperatura alta del ciclo de refrigeración
T_L	Temperatura baja del ciclo de refrigeración
T_{rf}	Temperatura de la región fría
T_{ca}	Temperatura de la corriente de aire
V	Voltaje
VFE	Valor de la factura eléctrica

W	Trabajo realizado por el compresor
Å	Angstrom
γ	Peso específico
η_{II}	Eficiencia del compresor correspondiente a la segunda ley de la termodinámica
ρ	Densidad
σ	Constante de Stefan- Boltzmann
v	Volumen específico

INTRODUCCIÓN

La refrigeración es uno de los grandes pilares del desarrollo que la humanidad tiene en la actualidad, ya que le ha permitido el desarrollo de la industria, la conservación de cualquier clase de producto, especialmente de los alimentos. Los avances que se tienen en la actualidad en los equipos de refrigeración son grandes, sin embargo el proceso para llegar hasta los equipos actuales ha sido muy largo, ya que en un principio no se tenía ninguna clase de máquina que permitiera producir hielo de manera artificial y la conservación de los alimentos era sumamente difícil. Sin embargo, el ingenio humano pudo ponerse de manifiesto al desarrollar la refrigeración hasta convertirla en toda una ciencia como lo es en la actualidad.

Para poder lograr el efecto de la refrigeración, la maquina frigorífica debe utilizar un fluido refrigerante, en el siglo pasado tuvieron un gran auge los refrigerantes fluorocarbonados, dentro de los cuales están los CFC, HCFC y HFC, los cuales tienen altos potenciales de destrucción de la capa de ozono y consecuentemente daños a la salud, contribuyendo también al calentamiento global. Los periodos de vida de estos refrigerantes, superan en algunos casos los 100 años. Dichos refrigerantes fueron usados de forma indiscriminada, por lo que el daño al ambiente es severo.

Como parte de los esfuerzos que la comunidad internacional ha efectuado para contrarrestar dichos daños, se firmaron los protocolos de Kioto y Montreal donde los países firmantes de los mismos, se comprometen a dejar de utilizar dichas sustancias en un periodo de tiempo establecido, lo que los obliga a buscar refrigerantes alternativos, los cuales deben cumplir con la función de

refrigerar, con la misma capacidad que lo hacían los refrigerantes fluorocarbonados.

Una de las alternativas para solventar ese problema, son los refrigerantes hidrocarburos, los cuales presentan excelentes propiedades termodinámicas, lo que los convierte en una buena opción de reemplazo, a la vez que poseen un nulo impacto en la capa de ozono, muy baja incidencia en el calentamiento global y presentan una relativa disponibilidad en la nación.

Sin embargo, por su naturaleza inflamable, los hidrocarburos requieren que se tomen medidas de seguridad adicionales, con relación al uso de los refrigerantes fluorocarbonados, tales como la eliminación de fuentes de ignición del sitio donde se efectuara la reconversión, limitar la capacidad del equipo de refrigeración, en función del tamaño de la habitación donde este operara, ya que esta limita su carga de refrigerante y la ventilación del espacio donde se encontrara el equipo, entre otros.

Como parte de las medidas que deben tomarse para el uso de hidrocarburos en refrigeración, se encuentra la capacitación del personal involucrado en el procedimiento de la reconversión, ya que estos deberán tener los conocimientos adecuados para su uso, además de las implicaciones legales del uso de estos.

Para poder efectuar la reconversión de los equipos de refrigeración, primero deben conocerse los parámetros de operación del sistema, cuando opera con el refrigerante original, a partir de eso debe verificarse que los componentes puedan trabajar con el refrigerante hidrocarburo, de lo contrario

estos deberán rediseñarse, lo cual puede ser efectuado a partir de un software, el cual se presentará posteriormente.

Luego de realizada la reconversión del equipo de refrigeración, deberán tomarse diferentes mediciones, con el objeto de compararlas con los valores teóricos, producto del análisis de los componentes y del sistema en general, también se realizara una comparación con los parámetros medidos, cuando el equipo operaba con el refrigerante original.

Finalmente se presentan los costos involucrados con el desarrollo del trabajo de graduación, incluyéndose los relacionados con la construcción del banco de pruebas, también se presenta el costo de la reconversión y un modelo de cobro del mismo, lo que le permitirá al técnico de refrigeración, tener una guía para realizar dicha acción. Además se realiza el análisis de factibilidad de la reconversión del equipo de refrigeración a hidrocarburo, la cual se aborda desde diferentes puntos de vista.

1.0 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Si se dispone de un sistema, cuya temperatura sea inferior al medio en el cual este se encuentre, se podrá observar que el calor fluirá espontáneamente del medio al sistema, sin embargo, en muchas aplicaciones se necesitara que algún medio tenga una temperatura más baja que la del ambiente que lo rodea. Este procedimiento se conoce como refrigeración, que se define como el proceso de reducir la temperatura de un medio confinado, manteniéndola debajo de la temperatura del medio circundante, con el objetivo de almacenar, preservar y conservar cualquier tipo de sustancia que se requiera. Una de las principales aplicaciones de la refrigeración se da en la industria de los alimentos, donde estos se pueden almacenar por largos periodos de tiempo, para que finalmente sean consumidos. También la refrigeración tiene como objetivo generar un ambiente que proporcione confort, tal es el caso de los aires acondicionados. El proceso de la refrigeración se logra gracias a la transferencia de calor desde un medio confinado, el cual tiene una temperatura inferior, hacia un medio con una temperatura superior, esto sin violar la segunda ley de la termodinámica. Esto es posible gracias a los refrigeradores, donde por medio de un líquido refrigerante, se transporta el calor desde un nivel de temperatura u otro superior.

1.1 HISTORIA DE LA REFRIGERACIÓN

Como ya se mencionó, para poder generar el proceso de refrigeración se debe poseer una maquina frigorífica, sin embargo en la antigüedad no se disponía de esta clase de equipos para la producción de hielo, por lo tanto, antes que se introdujeran los sistemas de refrigeración mecánicos y térmicos.

Las familias acaudaladas enfriaban sus alimentos con hielo transportado desde las montañas, el cual lo almacenaban en depósitos que consistían en fosas cavadas en la tierra, aisladas con madera y paja. De este modo, la nieve y el hielo apisonados se podían conservar por meses. Esta práctica es muy antigua, ya que hay escritos Chinos anteriores al primer milenio antes de Cristo, que detallan algunas ceremonias para llenar sótanos de nieve en invierno, para ser vaciados en verano.

También los griegos y romanos comprimían nieve en pozos aislados con paja y ramas de árboles. La nieve comprimida se convertía en hielo, que era usado en épocas de mayor temperatura.

Otros escritos antiguos describen cómo los egipcios, hindúes y otros pueblos, empleaban procedimientos para producir hielo artificialmente, en general parecidos en sus principios. Se llenaban con agua vasijas poco profundas de arcilla porosa u otro material parecido y se colocaban sobre gruesos lechos de paja durante la noche. Si las condiciones atmosféricas eran favorables: frío, aire seco y una noche sin nubes, la pérdida de calor, debida a la evaporación nocturna, originaba la formación de finas capas de hielo en la superficie. La paja impedía la conducción del calor desde la tierra más caliente y la forma de las vasijas, poco profundas y de una gran superficie, facilitaba la evaporación y la pérdida de calor por radiación. Estos primeros métodos de producir refrigeración son otro notable ejemplo de la habilidad humana, patente en toda la historia de la termotecnia y las máquinas térmicas, para desarrollar un arte útil mucho antes de la existencia de las correspondientes bases racionales y científicas; facultad de utilizar y crear lo que no se entiende que ha marcado la evolución de la humanidad.

Asimismo, hasta mediados del siglo XIX existían navieras especializadas que transportaban miles de toneladas de hielo desde Suecia y de los Grandes Lagos de Estados Unidos y Canadá, hacia las Indias orientales, Australia, las Antillas y América del Sur.

Posteriormente, se comenzaron a utilizar medios artificiales para la producción de hielo, esto por medio de procesos químicos y físicos, es decir, al añadir cierto tipo de sales al agua, como el nitrato sódico por ejemplo, se puede disminuir su temperatura. Este procedimiento fue ampliamente utilizado en la India en el siglo IV y además en la dominación musulmana de la península Ibérica. Los Omeyas introdujeron en Córdoba los sorbetes que elaboraban usando una mezcla de nieve con salitre.

Estos métodos se formalizaron y se llevaron a un nivel científico en el siglo XVII por Robert Boyle y por el astrónomo físico francés Philippe Laire. Más tarde, en el siglo XVIII, numerosos físicos y químicos emplean mezclas refrigerantes en el laboratorio. Destaca en su estudio Antoine Baumé, farmacéutico y catedrático del Collège de Pharmacie de París desde 1758, y miembro de la Academia de Ciencias desde 1771. En sus escritos expone que logro formar hielo artificial gracias a que el éter expuesto al aire se evapora con a gran velocidad y produce al evaporarse un frío muy sensible en el cuerpo que se evapora. Estas mezclas permitieron experimentos a bajas temperaturas y así, en 1715, utilizando una mezcla de nieve y nitrato amónico, Fahrenheit establecía el cero de su termómetro; en 1760 von Braun congeló el mercurio a -40°C .

En el siglo XIX numerosos científicos como: von Karsten en 1840, Hanemann en 1864, Rüdorff en 1869, Pfandler en 1875 y Brendel en 1892

estudiaron las leyes que rigen las mezclas frigoríficas, y las mezclas de hielo y sal común, que permiten disminuir su temperatura hasta $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, se emplearon corrientemente para congelar productos alimenticios, y todavía en 1904, Emilio Carbonell y en 1912, José Gres, registraron patentes españolas de mezclas refrigerantes para conservar alimentos.

Estos métodos sin embargo, son discontinuos y de capacidad muy limitada, por lo que no se puede hablar de refrigeración hasta la invención de los métodos continuos, de dos tipos básicos: consumidores de trabajo y consumidores de calor.

LA REFRIGERACIÓN MECÁNICA

La refrigeración mecánica es producida por una máquina funcionando continuamente, que consume trabajo. Este tipo de refrigeración se obtuvo por diversos caminos pero todos basándose en la expansión de un fluido, que puede efectuarse sin cambio de fase (despresurización de un gas) o, lo más frecuente, con cambio de fase (evaporación de un líquido). A pesar de que los primeros intentos de obtener frío mecánico fueron por evaporación de un líquido volátil, la primera máquina realmente operativa fue de expansión de aire. Por este motivo se denomina máquina frigorífica de compresión.

Se crearon al principio máquinas que aprovechando el principio de evaporación, lograban la producción de hielo, gracias a la generación de vacío dentro de campanas, donde se podía agregar sustancias como éter etílico, éter nitroso o ácido sulfúrico.

El ingeniero americano Jacob Perkins quien inventó el primer sistema de compresión de vapor en el cual se usaba vapor condensable como medio

refrigerante, trabajando este bajo un ciclo cerrado. Este sistema de refrigeración usaba el éter como medio refrigerante. El éter hervía en un evaporador, a baja temperatura y presión, para congelar el agua. Luego el vapor de éter obtenido se comprimía y condensaba a mayor temperatura y presión; finalmente, el éter líquido del condensador se introducía, a través de una válvula de expansión, dentro del evaporador a baja presión, donde la temperatura descendía de nuevo a su valor inicial, completando así el ciclo. Dicho sistema de refrigeración fue patentado en 1834. Este sistema de refrigeración fue el primer aparato impulsado mecánicamente para la producción de hielo, la cual se hacía en cantidades importantes.

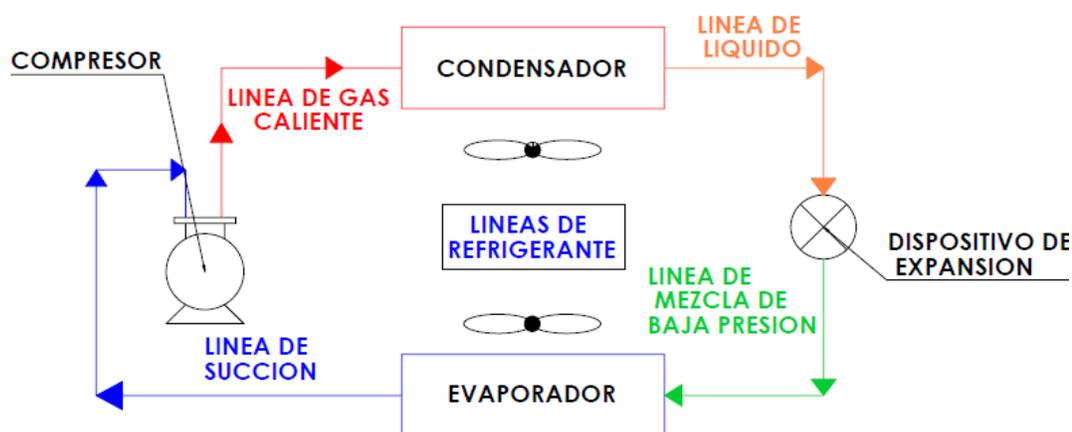


FIGURA 1. SISTEMA DE REFRIGERACION IDEADO POR JACOB PERKINS

Perkins obtuvo una patente inglesa e intentó desarrollar su máquina comercialmente. Diseñó una pequeña planta en la que se elaboraban bloques de hielo haciendo circular salmuera refrigerada por el éter comprimido con un compresor mecánico, alrededor de unas latas que contenían el agua. A pesar de que años más tarde se utilizó ampliamente su idea para la fabricación de hielo, el primer intento no tuvo éxito comercial. La sociedad civilizada tenía, por supuesto, necesidad de refrigeración, pero los problemas de financiar una industria que carecía de antecedentes y preparar la venta y distribución del

hielo, eran numerosos y complejos. Por más que la necesidad existiese y se contara con un prototipo, su máquina nunca tuvo éxito comercial, aunque el ciclo que proponía era el teóricamente correcto, además que su máquina contenía los cuatro elementos principales que se encuentran en los modernos sistemas de refrigeración; un compresor, un condensador, una válvula de la expansión y un evaporador.

En 1852, William Thomson (Lord Kelvin) desarrolló científicamente el principio de la refrigeración. Con el objetivo de conseguir un ambiente frío, el científico creó un circuito frigorífico hermético basado en la absorción del calor a través de un gas refrigerante. Para ello, se basó en 3 principios:

- El calor se transmite de la temperatura más alta a la más baja.
- Una sustancia necesita absorber calor para cambiar de estado líquido a gas.
- La presión y la temperatura están directamente relacionadas. En un recipiente cerrado, como una olla, necesitamos proporcionar menor cantidad de calor para llegar a la misma temperatura que en uno abierto.

De esta manera, Lord Kelvin definió el efecto Joule-Thomson, el cual se basaba en un experimento previo de Joule en el que un gas se expandía manteniendo constante su energía interna. En Física se puede demostrar con el proceso en el cual la temperatura de un sistema disminuye o aumenta al permitir que el sistema se expanda libremente manteniendo la entalpía constante.

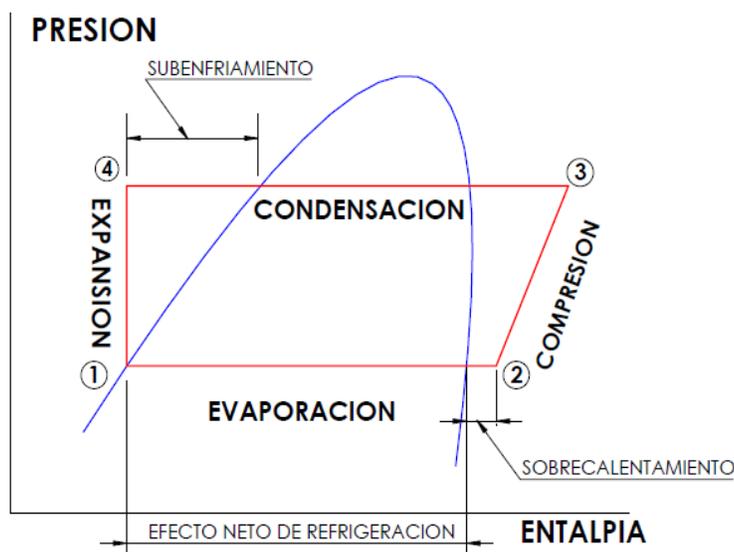


FIGURA 2. EFECTO JOULE-THOMSON

En 1855, el escocés radicado en Australia James Harrison patentó una máquina frigorífica por compresión de vapor de éter sulfúrico. El prototipo de esta máquina era capaz de producir 8 kg por hora de hielo.

Fue hasta alrededor del año de 1866 que se consiguió un aparato de uso comercial con el sistema por compresión de vapor, el cual fue patentado por Edmond Carré, cuyo hermano mayor Ferdinand inventó la máquina de absorción.

Edmond Carré hizo práctica su máquina moviendo el ácido sulfúrico por medio de un brazo conectado al émbolo de la bomba de vacío, que estaba accionada a mano. Con esto conseguía evitar la dilución superficial del ácido y aumentar la absorción. El aparato se empleaba para enfriar garrafas de agua; el cuello de la garrafa se adaptaba al tubo de aspiración de la bomba, en 2 ó 3 minutos la temperatura del agua descendía de 30°C a 0°C y llegaba a congelarse completamente de 20 a 25 minutos. El éxito de este aparato, en el ámbito doméstico y comercial fue muy grande.

Es de hacer notar que se descubrieron refrigerantes orgánicos en el año 1744 por Priestley, el cual descubrió que el amoníaco y el dióxido de carbono, los que mostraron poseer propiedades termodinámicas convenientes para ser usados en refrigeración y fue hacia el año 1867 que se utilizó dióxido de carbono (CO₂) como refrigerante en una máquina de compresión de vapor. Mientras tanto en el año 1873 se utilizó amoniaco (NH₃) como refrigerante en una máquina de compresión de vapor.

En 1874, un profesor de Física suizo, Raúl Pictet, usó el óxido de azufre para lograr un sistema de refrigeración por compresión. Con este sistema, en 1876, se realizó en Londres, la primera pista de patinaje sobre hielo. También en el año 1876, Coleman logra una máquina frigorífica de aire y el en el año 1877, se realiza envío de un buque de carne congelada que partió desde Argentina hacia Europa.

De esta forma el éter dio paso al amoníaco, al dióxido de azufre y al dióxido de carbono; mientras tanto continuaba la búsqueda de refrigerantes más seguros y de mejor rendimiento. Esta búsqueda culminó en 1930 cuando Thomas Midgley, Jr., de Dupont, anunció el primer fluorocarbono, el Freon-12, que condujo a la familia que ha dominado la refrigeración por compresión hasta que a finales de los 80.

La historia muestra de esta forma que la refrigeración ha sufrido muchas variantes desde que se comenzó a utilizar en la antigüedad, pasando desde métodos empíricos, hasta su formalización actual, donde esta se ha convertido en toda una ciencia, debido a su importancia para la sociedad. De manera resumida se muestra los principales hechos que marcaron la refrigeración hasta su funcionalidad en la actualidad.

TABLA 1. ACONTECIMIENTOS HISTÓRICOS DE LA REFRIGERACIÓN

HISTORIA DE LA REFRIGERACIÓN	
Antigüedad-siglo XVII	El principal método de refrigeración era hielo y nieve llevado desde las montañas y almacenado durante meses.
Siglo XVII-siglo XVIII	Se estudian las mezclas de hielo con sal, que logran disminuir su temperatura hasta $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, logrando congelar productos alimenticios.
Siglo XVIII	Se descubre que el éter en presencia del aire se evapora , produciendo de esta forma un frio capaz de congelar agua
1834	Jacob Perkins desarrolló la primera máquina de compresión de vapor, cargada con éter.
1851	John Gorrie patento la primera máquina para la producción de hielo
1852	William Thomson (Lord Kelvin) desarrollo científicamente el principio de la refrigeración.
1855	James Harrison patento una maquina frigorífica por compresión de vapor de éter sulfúrico.
1866	Edmond Carré consigue construir el primer aparato comercial de producción de hielo
1867	Se utiliza dióxido de carbono (CO_2) en una máquina de compresión de vapor
1868	Se utiliza amoniaco (NH_3) en una máquina de compresión de vapor
1874	Raúl Picter, usó el óxido de azufre para lograr un sistema de refrigeración por compresión. Con este sistema, en 1876, se realizó en Londres, la primera pista de patinaje sobre hielo.
1877	Se hace el primer envío de un buque con carne congelada desde Argentina hacia Europa
1930	Thomas Midgley, Jr de Dupont logra desarrollar el primer CFC (R-12) primero de su familia, los cuales han dominado la industria de la refrigeración por compresión de vapor hasta la actualidad.

1.2 TERMODINÁMICA DE LA REFRIGERACIÓN

Si se dispone de un sistema cuya temperatura sea inferior a la del medio circundante en que se encuentra, se observara que el calor fluiría espontáneamente del medio hacia el sistema. Para lograr el proceso de refrigeración, se deberá efectuar un proceso inverso, es decir, se deberá extraer el calor del sistema, manteniendo baja su temperatura y llevarlo a un nivel temperatura mayor. De acuerdo al segundo principio de la termodinámica, este proceso no puede desarrollarse de manera espontánea, ya que contradeciría la definición hecha por R. Clausius¹: el calor no se transmite nunca espontáneamente de un cuerpo a otro cuya temperatura sea más elevada.

Por lo tanto, para lograr y mantener temperaturas debajo de la temperatura del ambiente, esto sin contradecir el segundo principio de la termodinámica, se deberá emplear una cierta energía. De esta forma se define la técnica Refrigeración, que se refiere a la absorción de calor desde un nivel de temperatura bajo a uno superior.

1.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

1) TERMODINAMICA

Es el estudio de la energía, sus transformaciones y su relación con los estados de la materia.

2) SISTEMA TERMODINÁMICO

Un sistema termodinámico es una región en el espacio, o una cantidad de material dentro de una superficie encerrada. Los alrededores incluyen todo lo que es externo al sistema, y dicho sistema está separado de los alrededores por una frontera, la que puede ser móvil o fija, real o imaginaria.

¹ (BAEHR, 1965)

El estudio de la entropía y la energía son de suma importancia en cualquier sistema termodinámico. La entropía indica el desorden molecular que dicho sistema tiene en un estado o después de haber realizado cualquier proceso.

En tanto que la energía se refiere a la capacidad para producir un trabajo y puede encontrarse dentro de un cuerpo como energía interna o como producto de una transformación que el mismo sufra.

3) CALOR (Q)

Es el mecanismo por el cual se transfiere energía a través de las fronteras de diferentes sistemas con diferentes temperaturas, siempre en dirección de la menor temperatura. El calor se toma como positivo cuando la energía es agregada a un sistema.

MECANISMOS DE TRASFERENCIA DE CALOR

CONDUCCIÓN

Es la transmisión de calor desde un punto con una determinada temperatura hasta otro de menor temperatura, que puede ser dentro de un mismo cuerpo o de un cuerpo a otro. La velocidad de conducción de calor depende del material utilizado como conductor, los metales son buenos conductores de calor y uno de los mejores y más utilizados es el cobre. Otros materiales tales como el poliuretano, la lana de vidrio, el corcho son utilizados como aislantes térmicos.

Matemáticamente, este mecanismo de transferencia de calor se expresa como sigue²:

$$q = -k \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} = -k \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (W/m^2) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde k representa la conductividad térmica del material.

Es de hacer notar que el signo menos de la ecuación se debe a que está escrita en la dirección que fluye el calor, ya que como se mencionó, la temperatura T_2 es menor que T_1 y el signo negativo convierte en positiva esa diferencia.

Si la Ecuación 1 se escribe en forma diferencial, la ley de Fourier de la conducción de calor es:

$$q = -k \frac{dT}{dX} \quad \text{Ecuación 2}$$

CONVECCIÓN

La convección es el término que se utiliza para describir la transferencia de calor entre una superficie y un fluido adyacente que está en movimiento. Cabe destacar que entre mayor sea la velocidad del fluido, mayor será la transferencia de calor por convección. La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos tales como una bomba, un ventilador, etc. En cambio se le denominara convección natural cuando el movimiento del fluido sea producto de las fuerzas de empuje causadas por la diferencia de densidad ocasionada por la variación de temperaturas en ese fluido.

En forma matemática, la ecuación se le conoce como Ley de enfriamiento de Newton.

(BAEHR, 1965)²

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

h = es el coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual tiene unidades de $[W/m^2K]$

RADIACIÓN

Toda la materia cuando se encuentra en una temperatura superior al cero absoluto, emite energía térmica. Esta radiación está formada por fotones que tienen diferencias frecuencias. Los fotones que dejan la superficie de cualquier objeto no necesitan un medio para transportarse, como en el caso de la conducción y la convección (en los cuales la transferencia de calor ocurre a través de la materia). La velocidad a la que un cuerpo emite energía térmica dependerá de la temperatura y las características de su superficie.

Cuando un cuerpo absorbe toda la radiación que le incide, se denomina cuerpo negro y emitirá energía térmica a la mayor velocidad posible, la cual está dada por la ley de Stefan-Boltzmann³:

$$q = \sigma T_s^4 \quad (W/m^2) \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} W/m^2 K^4 = 0.1714 * 10^{-8} Btu/h \cdot ft^2 R^4$$

Es de hacer notar que la radiación emitida por cualquier superficie real es menor a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como:

(CENGEL & BOLES, 2009)³

$$q = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (W/m^2) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde ε es la emisividad de la superficie y su valor siempre estará comprendido entre 0 y 1.

4) ENTALPÍA (h)

En el estudio de la termodinámica se trabaja con combinaciones de energía, tal es el caso de la entalpía, la cual es la sumatoria de la energía interna de un cuerpo y el trabajo de flujo que esta produce⁴.

$$h \equiv u + pv \quad \text{Ecuación 6}$$

También se puede definir como la condición termodinámica de un material en la cual se considera la suma de todas las energías suministradas a la misma para mantenerla en la condición actual con respecto a una inicial, conocida arbitrariamente como punto de entalpía cero. Una muestra palpable de la entalpía sucede cuando se hace circular un fluido a través de cualquier dispositivo, ya sea si el equipo le brinda energía al fluido (compresor) o si el fluido brinda la energía (turbina), por lo tanto la entalpía será el cambio de energía que sufrirá el fluido al transitar por dicho dispositivo

5) PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINAMICA

El primer principio o la primera ley de la termodinámica, es conocida comúnmente como la ley de la conservación de la energía. La siguiente forma del primer principio de la termodinámica solo es válida en ausencia de reacciones químicas o nucleares.

$$[\textit{energía que entra}] = [\textit{energía que sale}] \quad \text{Ecuación 7}$$

Válida para cualquier tipo de sistema termodinámico.

⁴ (CENGEL & BOLES, 2009)

Se puede observar que el primer principio de la termodinámica, no es más que un balance de energía de un sistema, tal y como se enunció anteriormente, el primer principio de la termodinámica es conocido como la ley de conservación de la energía.

Es muy común en ingeniería, que los procesos se trabajen como procesos de flujo estacionario, lo que significa que las variables asociadas con el sistema no varían en el tiempo. Por consecuencia, el primer principio se puede escribir como⁵:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta \left\{ \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \right\} \quad \text{Ecuación 8}$$

Comúnmente la energía cinética y potencial puede despreciarse, por lo que la ecuación puede reescribirse como sigue:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_f - h_i) \quad \text{Ecuación 9}$$

6) SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINAMICA

El segundo principio o segunda Ley de la termodinámica hace hincapié que los procesos solo pueden efectuarse en una sola dirección. Esta ley puede ser descrito por varias formas, como tal es el caso de los enunciados de Clausius o el enunciado hecho por Kelvin- Plank, el cual establece que:

Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo.

Se puede observar que el segundo principio de la termodinámica hasta el momento no ha sido definido, como lo fue hecho con el primer principio. Para

⁵ (BAEHR, 1965)

poder definir matemáticamente el segundo principio, se hace uso del concepto de entropía.

Matemáticamente la entropía se puede expresar de la siguiente forma:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int. rev} \quad (kJ/kg) \quad \text{Ecuación 10}$$

Para el caso de un sistema abierto, la segunda ley de la termodinámica pues ser descrita en términos de la entropía como:

$$dS_{sistema} = \frac{\delta Q}{T} + \delta m_i s_i - \delta m_e s_e + S_{generada} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

$dS_{sistema}$ = cambio de la entropía del sistema durante el proceso en un tiempo dt

$\delta m_i s_i$ = incremento de la entropía, producto de la masa que entra al sistema

$\delta m_e s_e$ = entropía que conserva la masa luego de dejar el sistema.

$\frac{\delta Q}{T}$ = cambio entropía producto de la transferencia de calor entre el sistema y los alrededores con una temperatura T .

$S_{generada}$ = entropía generada producto de las irreversibilidades (siempre positivo)

La Ecuación 12 puede ser presentada en forma de integral, esto si se toma en cuenta que las propiedades de entrada y salida, flujo másico y las interacciones con los alrededores no varían con el tiempo.

$$(S_f - S_i)_{sistema} = \int \frac{\delta Q}{T} + \sum (ms)_{in} - \sum (ms)_{out} + S_{generada} \quad \text{Ecuación 12}$$

1.2.2 EL CICLO DE CARNOT INVERSO.

El ciclo termodinámico de Carnot es un proceso totalmente reversible, que se compone de dos procesos isotérmicos reversibles y dos procesos isentrópicos. Debido a que el ciclo es totalmente reversible, sus procesos pueden invertirse, y también se invertirán las direcciones de cualquier interacción de calor y trabajo, lo cual puede ser utilizado en refrigeración.

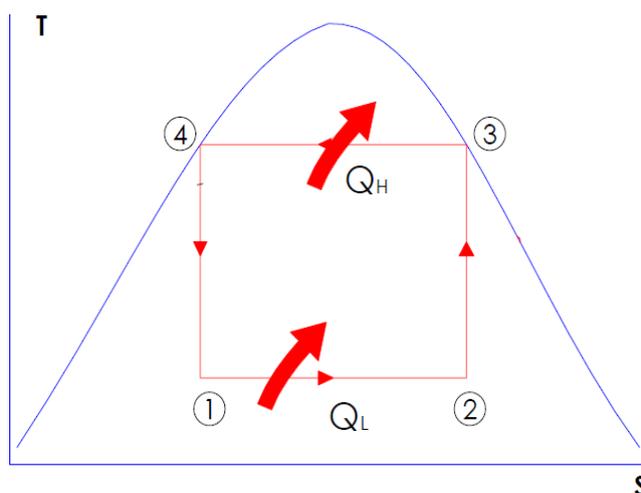


FIGURA 3 DIAGRAMA T-S DE UN CICLO INVERSO DE CARNOT

En esencia, un refrigerador ideal trabajara como un ciclo de Carnot inverso, el cual operara entre dos niveles de temperatura, en las cuales el calor absorbido Q_L desde la temperatura inferior T_L y el calor Q_H es rechazado a la temperatura más elevada T_H , este procedimiento se efectuara por medio de un fluido refrigerante, que se encarga de transmitir el calor desde un nivel de temperatura inferior a uno superior.

Para poder valorar energéticamente la maquina frigorífica, deberá auxiliarse de la definición del Coeficiente de Operación (COP), el cual es igual a

la relación entre el calor absorbido en el evaporador dividido entre el trabajo del compresor, matemáticamente se expresa como⁶:

$$COP_{Carnot} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad \text{Ecuación 13}$$

Cabe recalcar que la Ecuación 13 es válida únicamente para el ciclo inverso de Carnot, en el cual se presenta la máxima eficiencia teórica.

Hay que hacer notar que los ciclos reversibles tienen dos importantes propiedades:

1. Ningún ciclo de refrigeración puede tener un COP mayor que un ciclo de Carnot, operando en los mismos límites de temperatura
2. Todos los ciclos reversibles operando entre los mismos límites de temperatura, tendrán el mismo valor de COP.

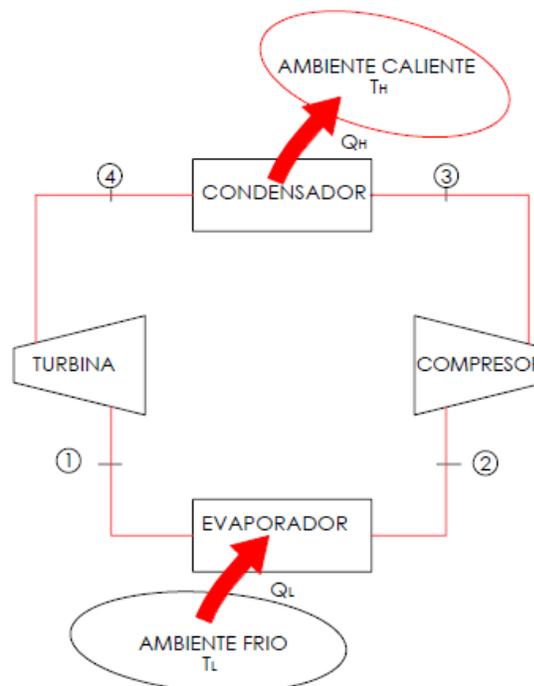


FIGURA 4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CICLO INVERTIDO DE CARNOT.

⁶ (BAEHR, 1965)

1.2.3 CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

El ciclo de Carnot inverso que se ha mostrado, es una excelente referencia con el que pueden compararse los ciclos reales de refrigeración, sin embargo este no es un ciclo que se utiliza en la práctica para refrigerar.

Si se toma como referencia el ciclo de inverso de Carnot, sustituyendo la turbina por un dispositivo de estrangulamiento, el cual es mucho más barato que la primera y prácticamente no requiere ningún tipo de mantenimiento.

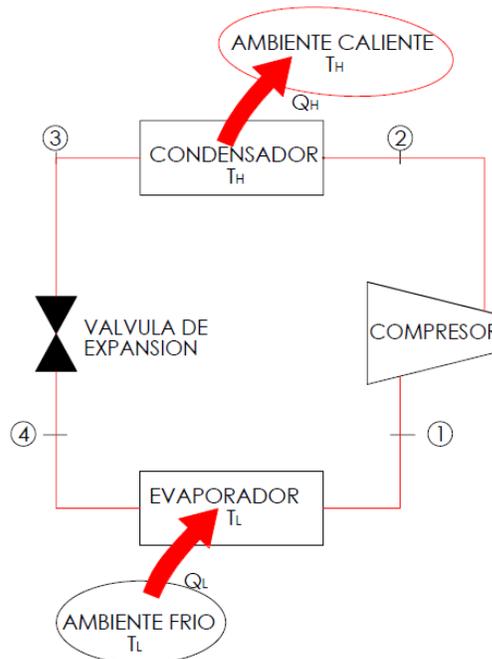


FIGURA 5. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

Además en el proceso de compresión solo deberá existir la fase de vapor. Al realizar estas modificaciones al ciclo se obtiene el ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

En el caso ideal, en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante se condensa y evapora alternadamente, considerando que todo el flujo es sin fricción, excepto cuando este pasa por la válvula de expansión y además, todos los procesos son adiabáticos, exceptuando los del condensador y el evaporador.

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor, es el que más se utiliza en la actualidad en refrigeradores, aires acondicionados y bombas de calor, el cual está constituido por 4 procesos principales:

- 1) Compresión isentrópica en un compresor, desde vapor saturado hasta vapor sobre calentado
- 2) Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3) Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- 4) Absorción de calor a presión constante en un evaporador

A partir de lo anterior se observa que el sistema trabaja con dos presiones: una presión alta, que se ubica en la tubería de descarga, la cual incluye al compresor, condensador, y tubo de estrangulación del líquido; y una presión baja en la que se tiene al dispositivo de control de flujo de refrigerante, tubo de succión y evaporador.

Esquemáticamente, el ciclo básico de refrigeración se muestra en la FIGURA 6 donde este es representado en un diagrama Presión-Entalpia y en uno Temperatura –Entropía, en el que se observan los cuatro procesos necesarios para su desarrollo.

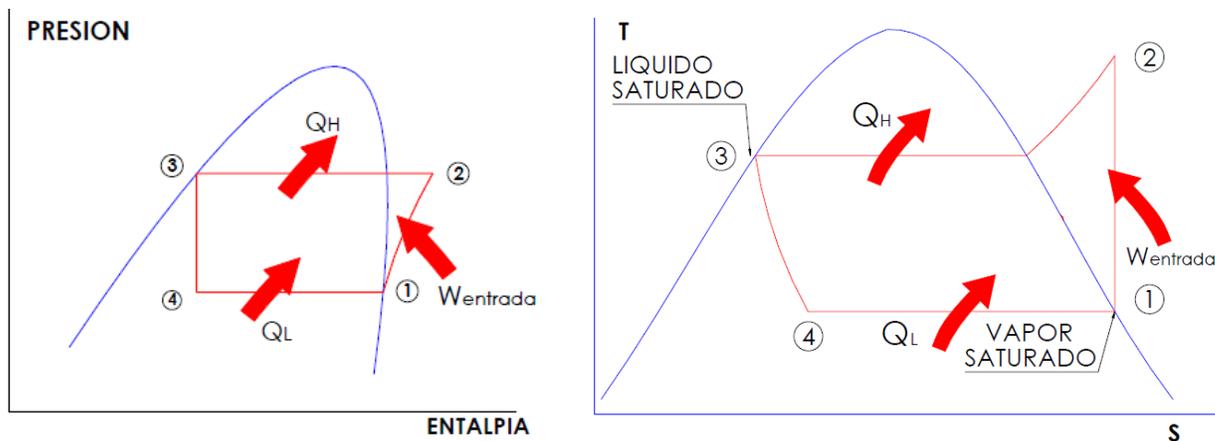


FIGURA 6. DIAGRAMAS PH Y TS DE UN CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

A partir de los diagramas mostrados, se procederá a realizar el análisis termodinámico de los procesos involucrados en el desarrollo del ciclo de refrigeración, para ello se hará uso del concepto del primer principio de la termodinámica, que establece que la energía no se puede crear ni destruir, solo se puede cambiar de forma. Haciendo la consideración de que los cuatro dispositivos involucrados en el desarrollo del ciclo son de flujo estacionario y observando que los cambios de energía cinética y potencial son despreciables, se procede a escribir la ecuación de la primera ley tomando en cuenta estas consideraciones:

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = h_e - h_i \quad \text{Ecuación 14}$$

Tomando en cuenta que en el condensador y en el evaporador no se involucra ninguna clase de trabajo, y además el compresor puede considerarse como adiabático, la ecuación 1 puede reescribirse de la siguiente forma:

$$q_{absorbido} + w_{compresor} = q_{rechazado} \quad \text{Ecuación 15}$$

A continuación se procederá a definir cada uno de los componentes en términos de energía entálpica⁷:

$$q_{absorbido} = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$w_{compresor} = h_2 - h_1 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$q_{rechazado} = h_2 - h_3 \quad \text{Ecuación 18}$$

En el compresor y en el proceso de estrangulamiento no se transfiere calor, mientras que solo existe trabajo en el proceso de compresión. Por lo tanto se puede definir el coeficiente de operación del ciclo COP, al igual como se realizó para el ciclo inverso de Carnot.

$$COP = \frac{q_{evap}}{w_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad \text{Ecuación 19}$$

Se debe hacer hincapié, en que las ecuaciones de la energía y del COP son válidas tanto para el ciclo ideal como en el real, en el que se presentan irreversibilidades en el compresor, condensador y evaporador.

Los sistemas de refrigeración se clasificaran tomando como base la capacidad de refrigeración, que es el flujo de calor transferido Q_{evap} en el evaporador $Q_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4)$. Con frecuencia esta capacidad se expresa en toneladas de refrigeración, que se define como un flujo de calor de 211 kJ/min o 200 Btu/min transferidos desde la región fría (o flujo de calor que pasa al fluido que circula por el evaporador). Otra magnitud utilizada con frecuencia es el flujo volumétrico de refrigerante en la entrada del compresor, el cual es el desplazamiento efectivo de este.

CICLO REAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

⁷ (BAEHR, 1965) (CENGEL & BOLES, 2009)

Hasta este momento, solo se ha efectuado el análisis del ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, sin embargo el ciclo real difiere de este en varios aspectos principalmente por las irreversibilidades que ocurren en varios componentes. Dos fuentes comunes de estas irreversibilidades son la fricción del fluido (causa de caídas de presión) y la transferencia de calor hacia o desde los alrededores.

Entre los efectos más importantes que se consideran en un ciclo real y no en un ciclo ideal está el sobrecalentamiento a la salida del evaporador, el subenfriamiento en la línea de líquido y el efecto de las caídas de presión. En el caso del ciclo ideal, el refrigerante sale del evaporador y entra al compresor como vapor saturado. Sin embargo, en la práctica, no es posible controlar el estado del refrigerante con tanta precisión, en el lugar de eso, es más fácil diseñar el sistema de modo que el refrigerante se sobrecaliente ligeramente en la entrada del compresor. Este ligero sobrecalentamiento asegura que el refrigerante se evapore por completo cuando entra al compresor. También la línea que conecta al evaporador con el compresor suele ser muy larga; por lo tanto, la caída de presión ocasionada por la fricción del fluido y la transferencia de calor de los alrededores al refrigerante puede ser muy significativa. El resultado del sobre calentamiento, de la ganancia de calor en la línea de conexión y las caídas de presión en el evaporador y a línea de conexión, consiste en un incremento en el volumen específico y por consiguiente en un incremento en los requerimientos de entrada de potencia al compresor puesto que el trabajo de flujo estacionario es proporcional al volumen específico.

- INFLUENCIA DE LAS IRREVERSIBILIDADES DEBIDAS A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LAS ACTUACIONES DEL CICLO

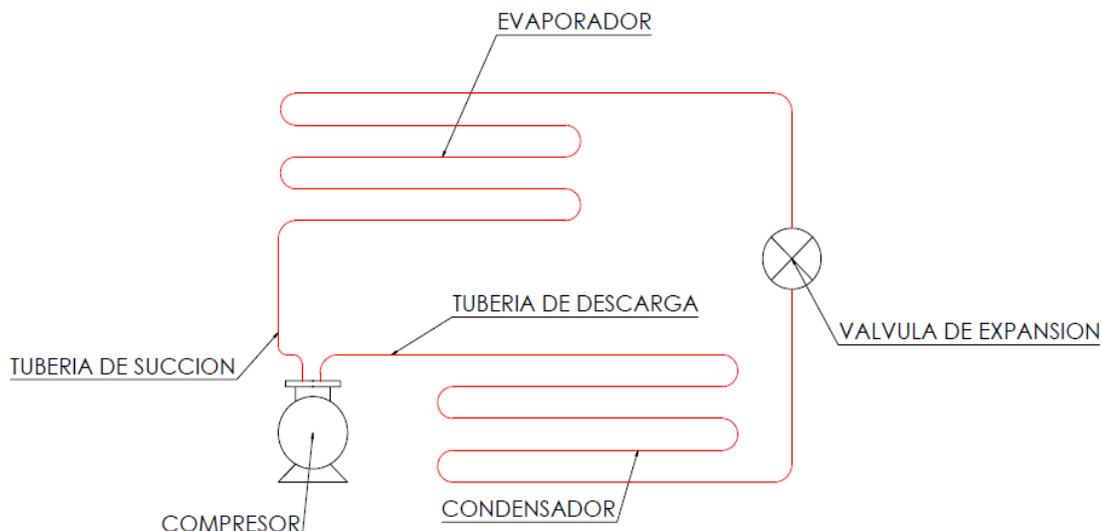


FIGURA 7. PRINCIPALES ELEMENTOS DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

La evaluación de las actuaciones del ciclo de refrigeración en los ejemplos anteriores se ha basado en la asignación de temperaturas o presiones de saturación del refrigerante en el evaporador y el condensador. Sin embargo, las temperaturas de funcionamiento del fluido de trabajo en un ciclo real están realmente determinadas por la temperatura que se debe mantener en la región fría y la temperatura del agua de refrigeración o del aire que se utiliza en el condensador. Además, para obtener flujos de calor lo suficientemente grandes, debe mantenerse una diferencia de temperaturas finita en los dos intercambiadores de calor.

En la FIGURA 8 se ilustra este punto. En el evaporador se transfiere calor de la región fría al refrigerante, que experimenta un cambio de fase a temperatura constante. Para que la transferencia de calor sea efectiva, la temperatura de saturación del refrigerante debe ser menor que la temperatura de la región fría T_{rf}

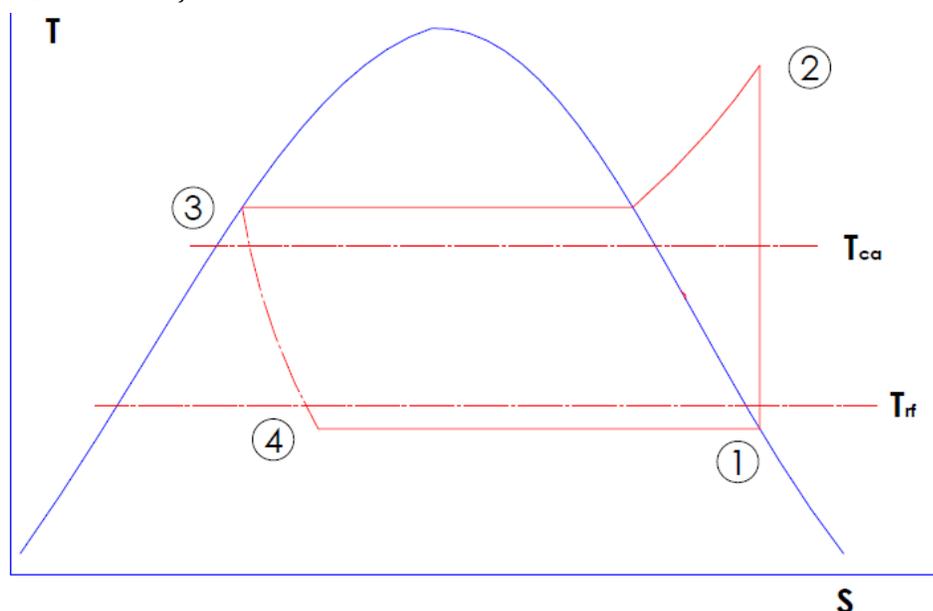


FIGURA 8 . INFLUENCIA DE LA IRREVERSIBILIDADES DEBIDAS A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL FUNCIONAMIENTO DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

El refrigerante se condensa al ceder calor a una corriente externa al ciclo. El agua y el aire fluyendo a presión atmosférica son dos sustancias habituales que se pasan por los tubos del condensador para extraer calor. Para conseguir que se transfiera este calor, la temperatura de saturación del refrigerante debe ser mayor que la temperatura de las corrientes atmosféricas (T_{ca} en la figura).

Las diferencias de temperaturas necesarias para que se lleven a cabo los procesos de transferencia de calor provocan irreversibilidades que no están incluidas en el modelo de refrigeración de Carnot. Partiendo de la Ecuación 19, el COP decrece cuando baja la temperatura media en el evaporador y cuando

sube la temperatura media del refrigerante en el condensador. Este efecto se analiza en el ejemplo siguiente. Estas irreversibilidades en los procesos de transferencia de calor se miden también mediante la producción de entropía exterior al ciclo. La determinación de la producción de entropía externa al condensador requiere una idealización, como se señala en el ejemplo siguiente.

- INFLUENCIA DEL SOBRECALENTAMIENTO y EL SUBENFRIAMIENTO EN EL FUNCIONAMIENTO DEL CICLO

Como no es posible controlar exactamente el estado del fluido que sale del evaporador el sistema se suele diseñar para que el fluido salga como vapor ligeramente sobrecalentado en lugar del vapor saturado del ciclo ideal. Esto asegura que por el compresor el fluido siempre circula en fase vapor. Este sobredimensionamiento conlleva un aumento volumen específico del vapor en comparación con el del vapor saturado a la misma presión. Desafortunadamente, esto supone un aumento de la potencia de entrada al compresor, ya que el trabajo en régimen estacionario es proporcional volumen específico. En el ciclo ideal se supone que el refrigerante sale del condensador en estado de líquido saturado. En la práctica, aunque las pérdidas de presión en el condensador son pequeñas, el fluido suele salir del condensador como líquido subenfriado. Este efecto es beneficioso, ya que la baja entalpía que resulta del efecto del subenfriamiento permite añadir una cantidad mayor de energía por unidad de masa en el proceso de evaporación. Sin embargo, téngase en cuenta que el subenfriamiento y el sobrecalentamiento aumentan el tamaño del condensador y del evaporador, lo que incrementa el coste inicial de los cambiadores de calor.

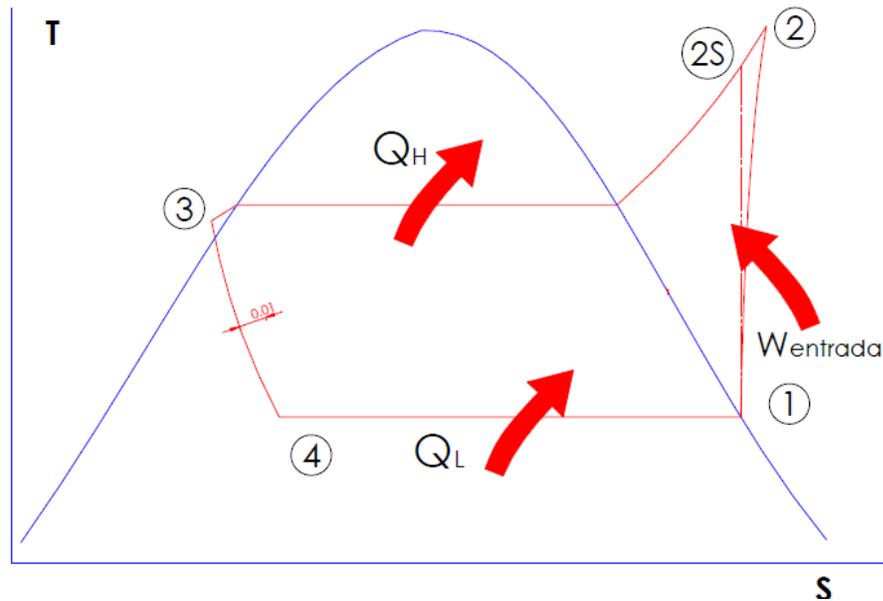


FIGURA 9. CICLO REAL DE REFRIGERACIÓN

El ciclo de refrigeración, bajo las consideraciones que se han señalado hasta el momento está representado en la FIGURA 9, en el cual pueden verse los cambios que han sufrido los puntos 2 y 3 en el diagrama T-S, en el cual se observa que el compresor no efectúa la compresión isentrópicamente, debido a las irreversibilidades que existen dentro del mismo, por lo tanto este posee un eficiencia, la cual se expresa por la Ecuación 20⁸.

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad \text{Ecuación 20}$$

Se observa que debido a las irreversibilidades que el sistema tiene, como ya se mencionó, los puntos del sistema han sufrido desplazamientos en el diagrama, sin embargo, el diagrama real del ciclo de refrigeración está representado por la FIGURA 10. A continuación se muestra las razones de las variaciones de los puntos con respecto al ciclo ideal.

PROCESOS:

⁸ (MILLS, 1997)

A-A': Efecto de subenfriamiento a la salida del condensador y caída de presión en el depósito receptor y en la tubería de líquido.

A'-B': Estrangulación real (No es totalmente isoentálpico).

B'-C': Proceso de evaporación con caída de presión

C'-C'': Efecto de sobrecalentamiento a la salida del evaporador y caída de presión en la tubería de succión.

C''-D'': Proceso de compresión real (No es isentrópico).

D''-D': Caída de presión necesaria para forzar la apertura de las válvulas de descarga.

D'-A: Proceso de condensación y caída de presión en el condensador y la tubería

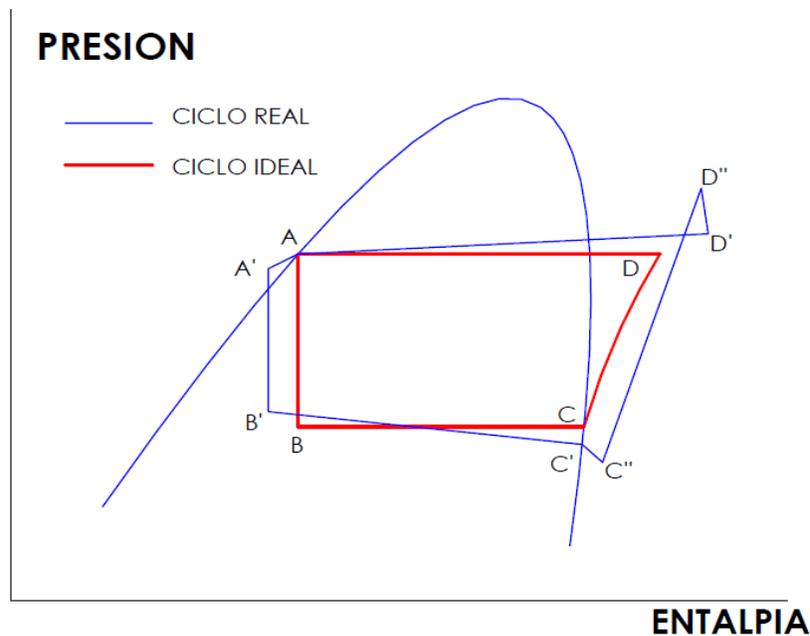


FIGURA 10 COMPARACIÓN DE LOS CICLOS REAL E IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

1.2.4 CICLO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

El ciclo de refrigeración por absorción es un ciclo térmico de activación por calor, es decir, el ciclo es posible sin la necesidad de la operación de un compresor, por lo tanto, solo existirá intercambio de energía térmica con los alrededores. Debido a lo anterior, en un ciclo de refrigeración por absorción, no es apreciable la conversión de calor en trabajo o de trabajo a calor. Los ciclos por absorción son usados en aplicaciones donde uno o más de los intercambiadores de calor utilizan fuentes de calor que de otra forma sería de desperdicio (un ejemplo de este caso son las centrales geotérmica, donde siempre existe calor residual).

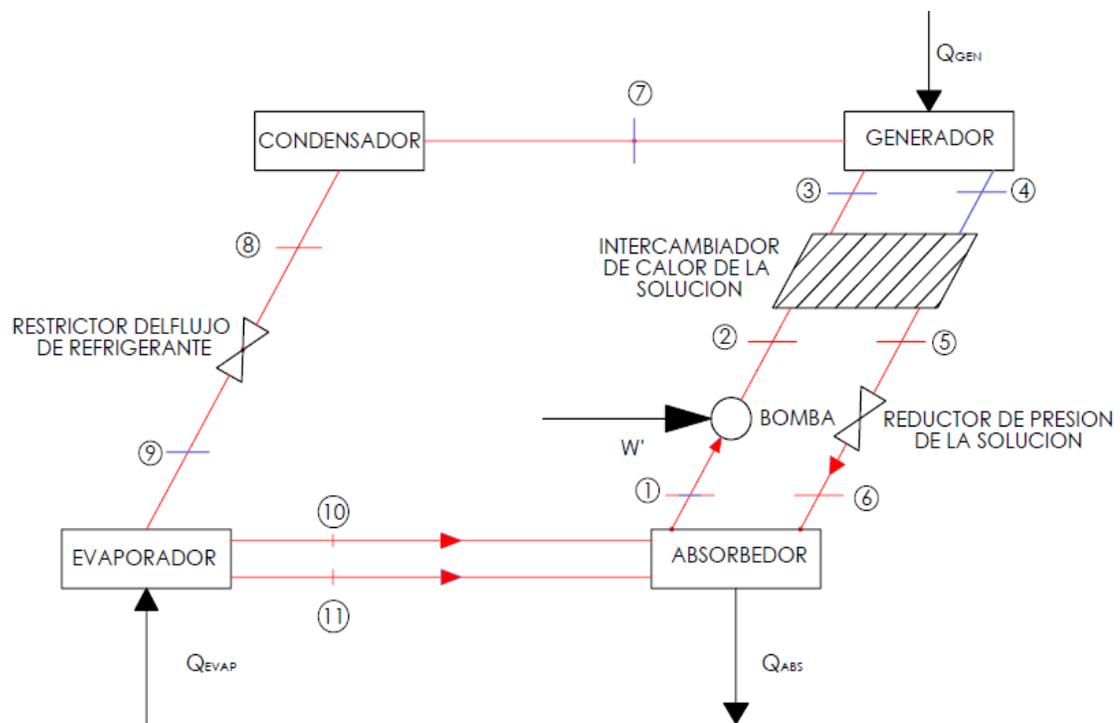


FIGURA 11. ESQUEMA DE LOS COMPONENTES DEL CICLO SIMPLE DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.

Las dos grandes ventajas de este tipo de ciclo en comparación de otros ciclos de refrigeración trabajando en similares condiciones es la siguiente:

- No se requiere equipos de gran tamaño con movimiento mecánico

- Cualquier fuente de calor residual puede ser utilizada, inclusive las de baja temperatura (por ejemplo el calor residual).

1.3 COMPONENTES NECESARIOS PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Para el total conocimiento del ciclo de refrigeración por compresión de vapor, es necesario hacer un recuento de los elementos que componen el equipo, los cuales se muestran seguidamente.

1.3.1 COMPRESORES

Los compresores son los dispositivos encargados de hacer pasar el fluido refrigerante desde la presión de evaporación, correspondiente a las condiciones del foco frío, a la presión de condensación del foco caliente, por lo que hay que hacer un aporte exterior de trabajo.

COMPRESORES ALTERNATIVOS

El compresor recíprocante, también denominado recíproco o alternativo es un tipo de compresor de gas que logra comprimir un volumen de gas en un cilindro cerrado, volumen que posteriormente es reducido mediante una acción de desplazamiento mecánico del pistón dentro del cilindro. En estos compresores la capacidad se ve afectada por la presión de trabajo. Esto significa que una menor presión de succión implica un menor caudal refrigerante; para una mayor presión de descarga, también se tiene un menor caudal.

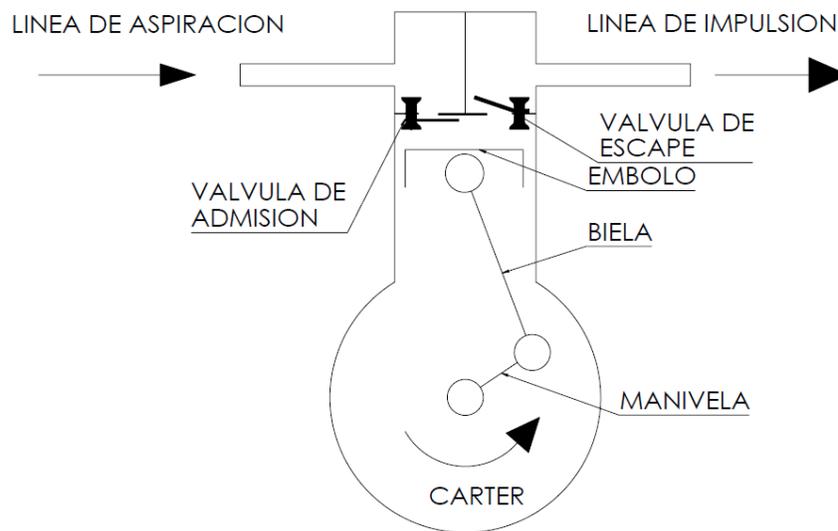


FIGURA 12. ESQUEMA DE COMPRESOR RECÍPROCANTE MONOCILÍNDRICO

COMPRESORES ROTATIVOS

Los compresores rotativos son particularmente adecuados para las aplicaciones en las que se requiere un desplazamiento volumétrico elevado a presiones de operación moderadas

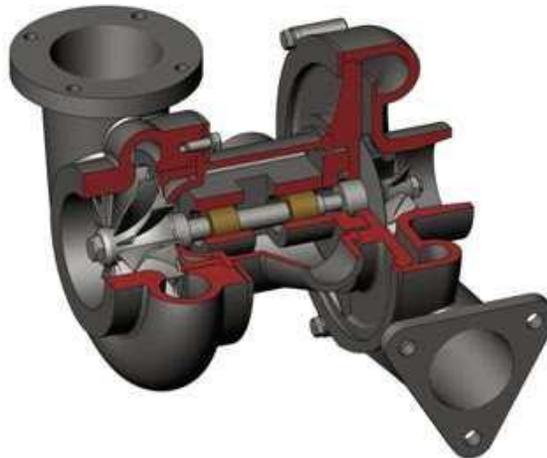


FIGURA 13. COMPRESOR ROTATIVO DEL TIPO CENTRÍFUGO

1.3.2 CONDENSADORES.

Cuando el refrigerante llega al condensador, lo hace en estado de vapor, saturado o recalentado, y posee una temperatura superior a la del medio de refrigeración que se va a utilizar en el condensador, generalmente aire o agua, por lo que el fluido refrigerante, a la temperatura del medio exterior, absorberá el calor latente del refrigerante, provocando su condensación, el cual, una vez licuado y en muchos casos, refrigerado en contracorriente con vapor del evaporador, pasa a la válvula de estrangulamiento, que lo lamina y expansiona, para volver de nuevo al evaporador, e iniciar un nuevo ciclo.

La disminución de presión, tiene como resultado la evaporación parcial del líquido refrigerante, entrando en el evaporador parcialmente licuado.

En el condensador se cede a un fluido refrigerante exterior, tanto el calor absorbido por el refrigerante en el evaporador, como el equivalente térmico del trabajo de compresión, pasando el fluido refrigerante del estado de vapor sobrecalentado al de líquido sub enfriado.

En la inmensa mayoría de los casos el medio refrigerante es el aire, o el agua o una mezcla de ambos, clasificándose en:

- Enfriados por aire
- Enfriados por agua
- Evaporativos

CONDENSADORES ENFRIADOS CON AIRE

Como se indica en su nombre, se emplea al aire como medio condensante. En estos condensadores la transferencia de calor generada

provoca un incremento de la temperatura del aire. La circulación del aire en este tipo de condensadores puede ser por convección natural o forzada por efecto



FIGURA 14 CONDENSADOR ENFRIADO POR AIRE, POR CONVECCIÓN NATURAL

de un ventilador.

Cuando se usa convección natural circula poco aire por el condensador, por lo que se hace necesaria una superficie mucho más grande. Normalmente se emplean este tipo de condensadores para unidades pequeñas como los refrigeradores domésticos y pueden ser de superficie de placa o de tubería aleteada, para ambos casos se debe procurar la libre circulación de aire a través del condensador.

CONDENSADORES ENFRIADOS CON AGUA

Constan de uno o varios serpentines por los que circula el vapor del fluido refrigerante y que están sumergidos en agua, por lo que el intercambio térmico se realiza entre el refrigerante y el medio condensante, el agua, a través de la superficie de los tubos. Se recomiendan para instalaciones en locales de temperatura ambiental superior a los 30°C, y en aquellos lugares en los que

existan grandes cantidades de polvo en los que no se puedan instalar condensadores refrigerados por aire. La carcasa de este tipo de condensadores se hace de chapa de acero, mientras que el serpentín es de cobre; como elementos auxiliares lleva una válvula de nivel, racores de entrada y salida de agua, tapón fusible y una válvula de seguridad.

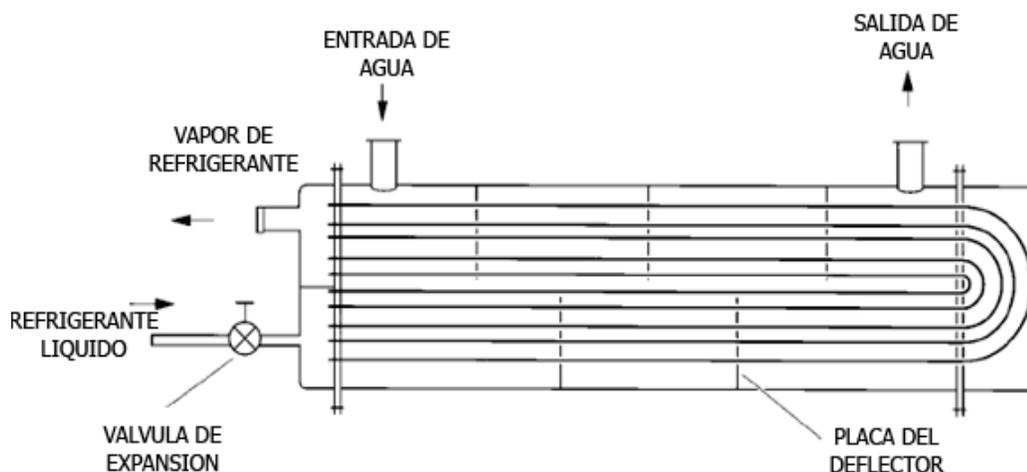


FIGURA 15. ESQUEMA DE CONDENSADOR ENFRIADO POR AGUA.

Es frecuente que en la superficie de los tubos, en el lado del agua, se forme un depósito de sarro causado principalmente por sólidos minerales que se precipitan del agua. Dicha capa no sólo reduce la transmisión sino que además restringe el área de paso en el lado del agua reduciendo la cantidad de ésta que circula. La formación de sarro se ve afectada por la calidad del agua y su posible tratamiento, la temperatura de condensación y la frecuencia de limpieza de los tubos. El agua utilizada como medio condensante puede utilizarse una sola vez (agua perdida) o recircularse, previo enfriamiento, en una torre de refrigeración.

CONDENSADORES EVAPORATIVOS

Emplean simultáneamente agua y aire como medios condensantes; se componen de un serpentín por el que circula el fluido refrigerante, un ventilador con su motor, boquillas de pulverización, sistemas de distribución de agua, tanque, bomba de circulación del agua y carcasa.

En estos condensadores el enfriamiento del refrigerante es dado primordialmente por la evaporación del agua atomizada o rociada, pero a su vez también se utiliza aire con el propósito de ir sacando el vapor de agua y así aumentar la velocidad de evaporación. La FIGURA 16 es un esquema de este tipo de condensadores.

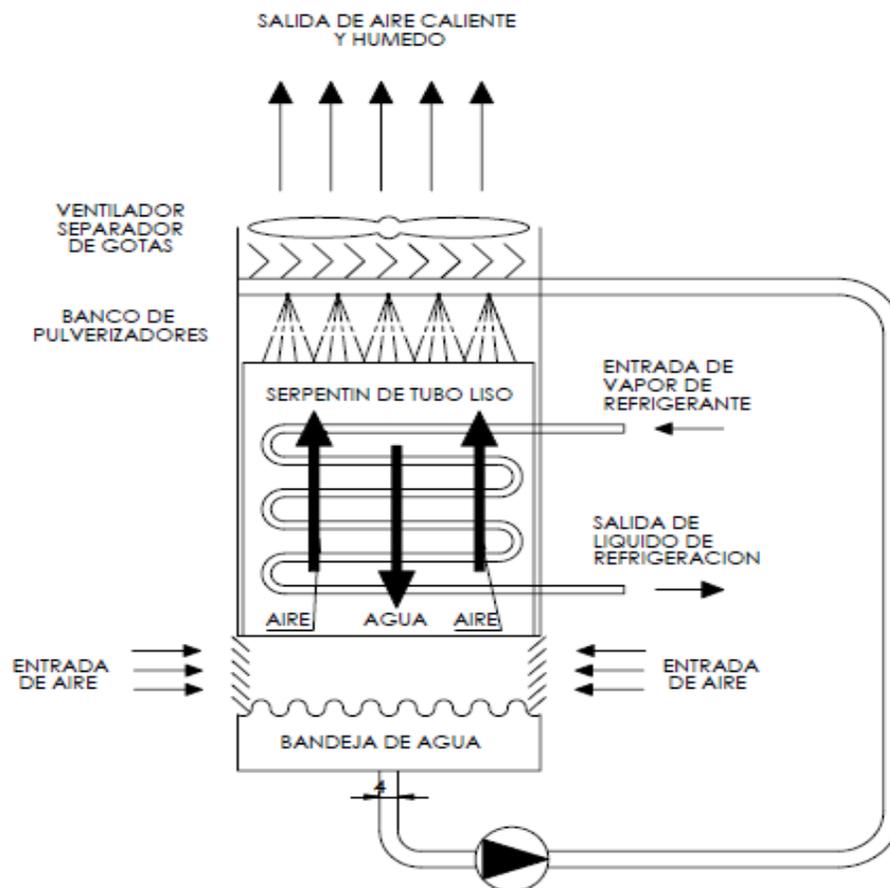


FIGURA 16. CONDENSADOR DEL TIPO EVAPORATIVO

1.3.3 EVAPORADORES

Los evaporadores son intercambiadores de calor en los que tiene lugar la evaporación del fluido refrigerante, extrayendo calor del espacio que queremos enfriar. Están constituidos por un haz de tuberías en las que se evapora el refrigerante, extrayendo de esta manera, calor del espacio que se requiere refrigerar.

Los evaporadores pueden ser de tipos variados, ya que la técnica del frío industrial abarca una muy amplia gama de aplicaciones, al tiempo que deben acomodarse a diferentes condiciones de trabajo que dependen, sobre todo de las temperaturas y del grado de humedad (calidad o título), del vapor a la entrada del evaporador. En función de los diferentes requisitos de las distintas aplicaciones, los evaporadores se fabrican con una amplia variedad de criterios, tipos, formas, tamaños y materiales, pudiéndose clasificar en la siguiente forma, según:

- El tipo de construcción
- El tipo de funcionamiento

Según su construcción, los evaporadores pueden ser de los siguientes tipos:

EVAPORADORES DE TUBO DESCUBIERTO:

La superficie de estos evaporadores puede decirse que tiene contacto directo con el refrigerante vaporizado en su interior. Comúnmente son empleados en aplicaciones con enfriamiento de líquido y con enfriamiento de aire. La acumulación de escarcha sobre la superficie del evaporador es muy complicada de evitarla, ya que se procura mantener la temperatura del espacio bajo 0°.

✚ EVAPORADORES DE SUPERFICIE DE PLACA

Su funcionamiento es similar al de los evaporadores de tubo descubierto, el refrigerante en su interior queda casi totalmente en contacto con la superficie. Este tipo de evaporador corresponde a una tubería doblada en serpentin instalada entre dos placas metálicas soldadas por sus orillas. Este tipo de evaporador tiene excelente respuesta en aplicaciones de refrigeración para mantención de productos congelados. Son ampliamente usados en refrigeradores y congeladores debido a su economía, fácil limpieza y modulación de fabricación.



FIGURA 17. EVAPORADORES DEL TIPO DE SUPERFICIE DE PLACA

✚ EVAPORADORES ALETEADOS

Los evaporadores aleteados son serpentines de tubo descubierto en los cuales se colocan aletas, las cuales tienen la función de aumentar el área de transferencia de calor; es decir incrementan la eficiencia para enfriar aire u otros. Por lo tanto no conviene la acumulación de escarcha por lo que se recomienda su utilización en aplicaciones donde la temperatura este por encima de 0°.



FIGURA 18. EVAPORADOR CON SUPERFICIES ALETEADAS

Según su funcionamiento, los evaporadores pueden ser:

✚ EVAPORADOR INUNDADO

Se conoce como evaporador inundado el que tiene la mayor parte del espacio interior disponible ocupado con líquido refrigerante, quedando solo un pequeño espacio libre disponible que se llena con el vapor que toma la línea de succión.

La denominación de inundado que se da a este tipo de evaporador se debe a la presencia de refrigerante líquido que inunda las tuberías del evaporador. Estos evaporadores están dotados de flotadores en los lados de alta y de baja presión, cuya función es la de regular la alimentación líquida del evaporador.

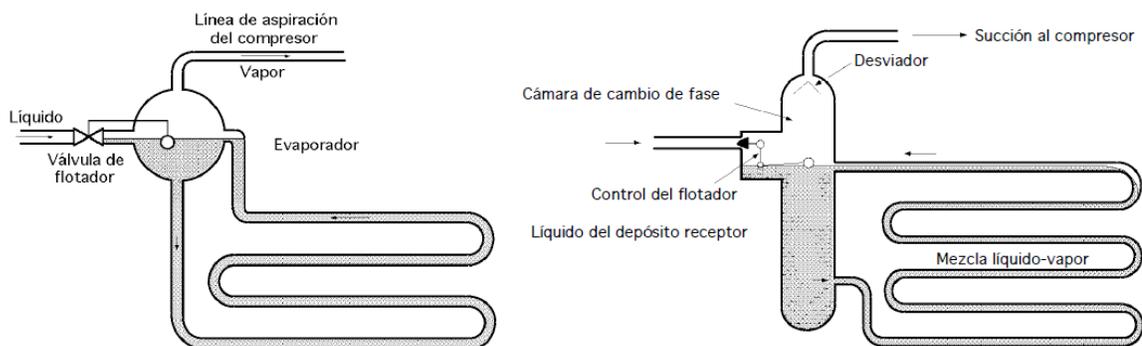


FIGURA 19. EVAPORADORES INUNDADOS

✚ EVAPORADOR SECO

Recibe la denominación de evaporador seco el que tiene todo el espacio interno ocupado por refrigerante en estado gaseoso, ya sea en estado de vapor húmedo o de vapor saturado, sin que haya en su interior fluido refrigerante en estado líquido. Para lograr esto se emplea una válvula de expansión instalada en la entrada de líquido al evaporador, lo que al provocar la expansión produce una rápida evaporación del refrigerante que penetra en el evaporador en estado gaseoso, después de lo cual completa su vaporización total en el interior de los tubos que componen el evaporador.

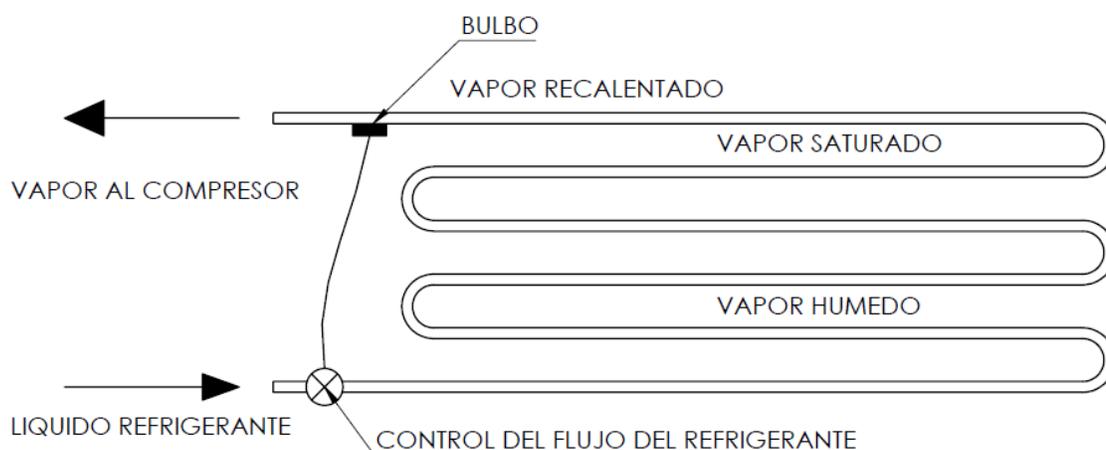


FIGURA 20. EVAPORADOR SECO.

1.3.4 DISPOSITIVOS DE EXPANSIÓN

En estos elementos se produce un cambio de la presión del fluido refrigerante mediante una transformación isoentálpica, desde la presión alta y temperaturas existentes en el condensador, hasta la baja presión y temperaturas requeridas en el evaporador.

Al disminuir la presión y la temperatura del fluido, cuando éste atraviesa una válvula de expansión, se reduce la entalpía específica del líquido, lo que

requiere que parte de él vaporice, absorbiendo en esta evaporación parcial el calor sobrante, (diferencia entre las entalpías específicas del líquido antes y después de la válvula). Además de la misión principal de reducir la presión y la temperatura del fluido, en la mayoría de las ocasiones la válvula de expansión cumple otra misión secundaria, que es regular el caudal del fluido refrigerante que pasa al evaporador, en función de diversas variables, lo que da lugar a distintos tipos de válvulas.

Las válvulas de laminación se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- a) Válvulas reguladores de caudal
- b) Válvulas que sólo cumplen la misión de expansionar, pero que no regulan el caudal, también denominadas válvulas restrictoras, son los orificios calibrados o diafragmas y los tubos capilares que son los más utilizados como válvulas de expansión dentro de este grupo

VÁLVULAS REGULADORAS DE CAUDAL

Dentro de la clasificación de las válvulas reguladoras de caudal se encuentran:

-  Válvulas de expansión a presión constante
-  Válvulas de flotador

VÁLVULA DE EXPANSIÓN A PRESIÓN CONSTANTE

Este tipo de válvula mide la presión en el evaporador y cuando esta desciende bajo el punto de control, la válvula se abre más, mientras que cuando se sube por encima del punto de control la válvula se cierra parcialmente. El uso de este tipo de válvulas se encuentra limitado a sistemas de menos de 10

ton en los que la carga crítica es empleada para evitar inundaciones del evaporador, es decir se usa principalmente cuando la temperatura de evaporación debe mantenerse en un cierto punto para controlar la humedad o para prevenir el congelamiento de agua que se enfría. La limitación de presión de estas válvulas puede usarse ventajosamente cuando se necesita una protección contra la sobrecarga del compresor debida a una presión de admisión alta.

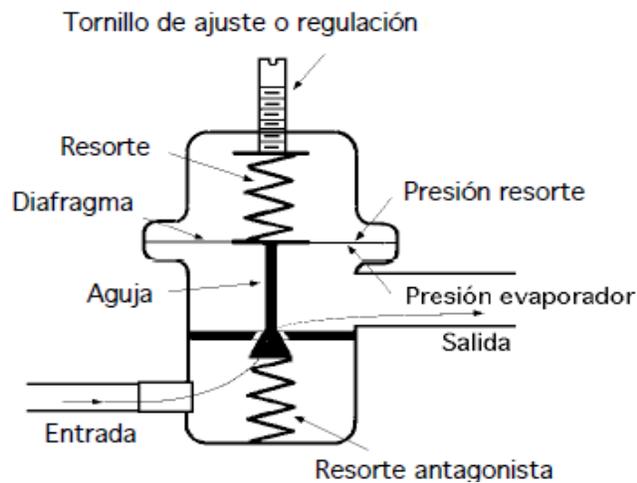


FIGURA 21. VALVULA DE EXPANSIÓN A PRESIÓN CONSTANTE

VÁLVULAS DE FLOTADOR

Este tipo de válvula de expansión mantiene un nivel constante de líquido en los recipientes que contienen refrigerante. Específicamente las válvulas consideradas de este tipo en refrigeración son las que poseen apertura lateral inferior, las mismas que mediante pequeñas aperturas o cierres mantienen el nivel requerido de refrigerante en el evaporador.

Por consecuencia del nivel constante de líquido la válvula de flotador siempre establece unas condiciones de flujo equilibrado entre el compresor y la válvula, es decir que la apertura o cierre de dispositivos se da en segundos por lo que no es apreciable.

Combinaciones de válvulas de flotador y solenoides de cierre se usan ampliamente en grandes instalaciones en las que pueden regular el flujo de evaporadores del tipo inundado en respuesta del nivel del líquido refrigerante en la envuelta del evaporador. No deben usarse estas válvulas en evaporadores del tipo de tubo continuo en donde no es posible establecer el nivel del líquido refrigerante para el control.

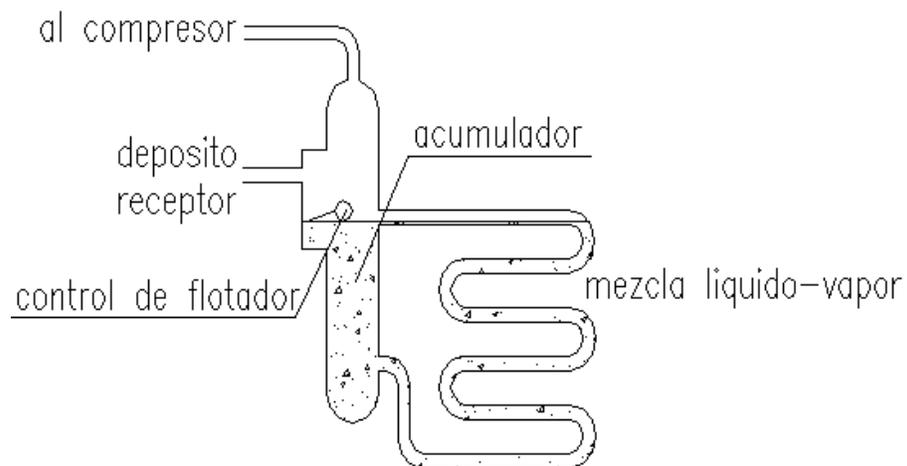


FIGURA 22. EVAPORADOR DEL TIPO INUNDADO, CON CONTROL POR MEDIO DE VÁLVULA DE FLOTADOR.

VALVULAS RESTRICTORAS O TUBOS CAPILARES

- Válvula de expansión capilar.

Consta de un tubo de cobre, de diámetro comprendido entre 0,6 mm y 1 mm, y longitud a determinar, para que se cree una pérdida de carga suficiente, que equilibre las diferencias entre las presiones de salida y entrada del evaporador.

- Tubos capilares.

Los tubos capilares son los restrictores más utilizados como válvulas de expansión, sobre todo en la refrigeración residencial.

Un tubo capilar consiste en un tubo de pequeño diámetro, generalmente de gran longitud, por el que circula el fluido refrigerante a una alta velocidad, donde se reduce su presión debido a la fricción, produciéndose la expansión brusca del refrigerante, al terminar dicho elemento. Aunque el uso de tubos capilares está muy extendido, este tipo de dispositivo, no permite la regulación automática del flujo de fluido refrigerante, por lo que en aquellas instalaciones frigoríficas en que se prevean unas variaciones sensibles de la carga térmica no deberán usarse.

Casi todos los tubos capilares se instalan de manera que son parte de un intercambiador de calor (se une la tubería de admisión al tubo capilar), el gas de admisión frío procedente del evaporador retarda la evaporación del líquido que pasa por el capilar.



FIGURA 23. TUBO CAPILAR

Entre las ventajas que poseen los capilares están: la simplicidad, la ausencia de partes móviles, el bajo costo. Además se puede contar con que las presiones del sistema se pueden igualar durante el tiempo que el ciclo está cortado, por lo que el motor puede ser de un bajo par de arranque.

Sin embargo existen desventajas con el uso de los tubos capilares, entre las que se cuentan:

- Son demasiados propensos a sufrir obstrucciones con sustancias extrañas
- No es posible ajustarlos a las variaciones de carga
- El peso de carga del refrigerante se debe procurar que se mantenga dentro de los límites para el cual fue diseñado el tubo capilar.

1.3.5 OTROS ACCESORIOS

PRESOSTATOS

El presostato actúa en función de la presión, tanto en la parte de alta como de baja presión; existe un modelo de presostato combinado de alta y baja presión que realiza funciones de control de la presión de baja y de la presión de alta con un solo interruptor, accionado por dos sistemas de fuelles, llevando escalas Indicadoras de las presiones de regulación, tanto de alta, como de baja y diferencial.

TERMOSTATO BIMETÁLICO

El termostato bimetálico, está compuesto por dos láminas metálicas de diferente coeficiente de dilatación; los dos metales están soldados o laminados juntos, de forma que al someterlos a una misma temperatura, se dilatan

desigualmente, provocando una deformación del conjunto, proporcional a la temperatura a que han sido expuestos.

TERMOSTATO CON BULBO Y CAPILAR

El bulbo es el elemento sensible, que contiene un gas dilatante que actúa en función de las variaciones de temperatura, y va conectado mediante un tubo capilar a un fuelle, que al acusar las diferencias de presión causadas por las variaciones de temperatura, acciona un interruptor que cierra o abre el circuito.

FILTROS SECADORES

Mientras que algunos tipos de refrigerantes reaccionan con la humedad existente en el circuito, con grandes inconvenientes para el sistema, caso del SO₂, otros no se ven afectados por tales circunstancias, caso de los freones, pero la humedad que se va acumulando reduce la efectividad de la máquina, por lo que tanto en el caso de utilizar unos u otros tipos de fluidos refrigerantes, se hace necesaria la utilización de secadores. Los secadores más utilizados y eficaces son los de tipo desmontable, a base de cloruro de calcio, silicagel, que se pueden emplear con cualquier tipo de refrigerante.

1.4 REFRIGERANTES

Para que una sustancia pueda ser empleada como refrigerante, deberá cumplir ciertas exigencias. Ya que las máquinas frigoríficas trabajan principalmente en la zona de vapor húmedo, la curva de tensión de vapor del refrigerante no debe indicar presiones demasiado elevadas o demasiado bajas

entre las temperaturas de trabajo T_L y T_H del ciclo de refrigeración. Las presiones demasiado elevadas no son deseadas, ya que encarecen notablemente la construcción de la instalación, mientras que las demasiado bajas crean problemas de estanqueidad en el circuito del refrigerante. Si entra aire en el circuito del refrigerante, el vapor de agua que lo acompaña solidifica y obstruye las válvulas. Además, a bajas presiones, el volumen específico v del vapor saturado es muy grande y las dimensiones de la instalación aumentan demasiado

1.4.1 HISTORIA DE LOS REFRIGERANTES

En los comienzos del desarrollo de los sistemas de refrigeración se utilizaron sustancias químicas como el dióxido de azufre, amoníaco y éter etílico, desde la década de los treinta, hasta décadas recientes, el campo ha sido dominado por la clase general de sustancias denominadas compuestos clorofluorocarbonados (CFC), denominados FREON de la compañía DuPont. Los más importantes se designan R-12, R-22 Y R-502 (mezcla del R-22 y R-115), los cuales fueron desarrollados en 1928 por el ingeniero americano Thomas Midgley como una alternativa para la sustitución de el amoníaco (NH_3), clorometano (CH_3Cl) y el dióxido de azufre (SO_2), que son tóxicos pero que eran de uso común en aquel momento como refrigerantes.

Sin embargo, al final de la década de los ochenta se tomaron medidas internacionales para restringir el uso de ciertos CFC, ya que se encontró que reducen la capa protectora de ozono de la atmósfera y también contribuyen al efecto invernadero, lo que causa calentamiento global. Para contrarrestar los efectos negativos de los CFC se crearon los hidroclorofluorocarbonos HCFC, los cuales causan un menor impacto en la capa de ozono y posteriormente, en

la década de los noventa se inicia un periodo en el que se investigan nuevos refrigerantes, como los compuestos hidrofluorocarbonados (HFC) y se prohíben los Freones, pero dicho cambio no ha sido ni será de forma inmediata, esto se desarrollara de manera paulatina.

Como ya se mencionó, los refrigerantes que actualmente operan ocasionan problemas ambientales, en especial a la capa de Ozono, es por ello que la tarea de todos los productores de refrigerantes es buscar sustancias para utilizarlas como refrigerantes alternativos, los cuales cumplan las características de funcionamiento que tienen los actuales refrigerantes, es por ello que se están efectuando investigaciones a nivel mundial para efectuar este cambio. Para ello los hidrocarburos se presentan como una buena alternativa para el desarrollo de este cambio, los cuales, según los estudios efectuados hasta la actualidad presentan una gran mejoría en sus propiedades termodinámicas y químicas con respecto a los CFC, HCFC y los HFC, lo cual es de gran importancia, ya que respalda el cambio.

1.4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES SEGÚN TIPO DE MEZCLA

REFRIGERANTES PUROS

Son aquellos que solo tienen un componente químico y su comportamiento está basado en las propiedades termodinámicas propias de la sustancia cuestión. Como ejemplos se pueden citar el FREON 12 (R-12), el FREON 11 (R-11), el propano (R-290), el amoniaco (NH₃), etc.

REFRIGERANTES AZEOTRÓPICOS.

Son mezclas de diferentes refrigerantes que se evaporan y condensan como una sola sustancia y no cambian su composición volumétrica o temperatura de evaporación cuando la mezcla se evapora o condensa a una presión constante. Los componentes de una mezcla Azeotrópica no pueden separarse de su composición por destilación. Las propiedades de un refrigerante Azeotrópico son completamente diferentes a las propiedades de los compuestos que conforman la mezcla y es conveniente tratar este tipo de refrigerante como una simple composición química. Como ejemplo se puede tomar los refrigerantes R-502, R-507, R-508B, etc.

REFRIGERANTES ZEOTRÓPICOS.

Son mezclas de refrigerantes que si tienen variaciones de temperatura cuando existe un cambio de fase (condensación o evaporación) esto se debe principalmente a que los componentes que conforman la mezcla tienen diferentes puntos de ebullición. A esta variación de temperatura se le llama deslizamiento de temperatura o "glide" que debe ser considerado cuando se instalen este tipo de refrigerantes en los sistemas. Es de recalcar que estos refrigerantes solamente deberán cargarse en fase de líquido, además que su composición química variara en caso de presentarse fugas, lo que traerá como consecuencia, una variación de sus propiedades refrigerativas.

1.4.3 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU COMPOSICIÓN QUÍMICA.

REFRIGERANTES CFC

Son hidrocarburos halogenados, con alto contenido de cloro. Se componen de moléculas de cloro, flúor y carbono. En general, presentan un

gran potencial de degradación de la capa de ozono. Actualmente, estos refrigerantes no deberían utilizarse, ni siquiera para la reparación o rellenado. En el caso de El Salvador, todavía se encuentran en el mercado de la refrigeración.

A este grupo pertenecen los refrigerantes:

- R-11
- R-12
- R-502.
- Etc.

REFRIGERANTES HCFC

Son hidrocarburos halogenados, con bajo contenido de cloro. Se componen de hidrógeno, flúor, carbono y cloro. Presentan un potencial intermedio de degradación de la capa de ozono. Actualmente, este refrigerante no puede utilizarse para su incorporación en equipos nuevos, debidos a las disposiciones legales, sin embargo en el mercado nacional aún puede encontrarse.

A este grupo de refrigerantes pertenecen:

- R-22.
- HCFC-123
- HCFC-124
- HCFC-141b
- Etc.

REFRIGERANTES HFC

Refrigerantes HFC: son hidrocarburos halogenados, que carecen de cloro en su composición. Se componen de hidrógeno, carbono y flúor

Los hidrofluorocarbonos HFC incluyen refrigerantes como el R-134a y el R-124, los contienen uno o más átomos de hidrógeno y su principal característica es que no tienen átomos de cloro. Los HFC son considerados, con cero potencial de daño a la capa de ozono., sin embargo presentan una alta incidencia en el calentamiento global, por lo que siguen siendo nocivos al ambiente. Dentro de esta clasificación de refrigerantes, se encuentra el R-134a, R-404a, entre otros.

1.4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU INFLAMABILIDAD Y TOXICIDAD

La ASHRAE clasifica también a los refrigerantes por su toxicidad e inflamabilidad de acuerdo a las concentraciones que se presentan cuando un refrigerante es emitido a la atmósfera y entra en contacto con las personas.

Dentro de las instalaciones que contendrán el equipo de refrigeración, el refrigerante puede fugarse a través de las uniones de las tuberías, sellos, o inclusive de los componentes durante su instalación, operación o en el caso de producirse un accidente. Por lo tanto, los refrigerantes deberán ser seguros para los humanos y los procesos de manufacturación, presentando muy poca, o en el mejor de los casos, una nula toxicidad o inflamabilidad.

En la norma 34-1997 de la ANSI/ASHRAE, la toxicidad de los refrigerantes está clasificada como clase A o B. Refrigerantes de la Clase A son de baja toxicidad. Un refrigerante de clase A es uno que no es tóxico cuando

su concentración es menor o igual a 400 ppm, basado en el índice Threshold Limit Value–Time-Weighted Average (TLV-TWA), o valor límite del umbral promedio ponderado de tiempo. La concentración TLV-TWA es una concentración a la que los trabajadores pueden estar expuestos al refrigerante en una jornada de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas sin sufrir efectos adversos. Concentración ppm significa partes por millón en masa.

Refrigerantes pertenecientes a la clase B son de alta toxicidad. Un refrigerante de clase B presenta evidencias de toxicidad cuando los trabajadores están expuestos a una concentración por debajo de 400 ppm basados en una concentración TLV-TWA.

Un refrigerante inflamable explota cuando se enciende. Si un refrigerante inflamable se fuga en el área de donde hay fuego, el resultado será una explosión inmediata. Actividades de reparación o soldadura no podrán ser realizadas en las instalaciones donde se encuentren equipos trabajando con estos refrigerantes.

TABLA 2 CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU TOXICIDAD E INFLAMABILIDAD

CLASE	DESCRIPCION
A1	Baja toxicidad e inflamabilidad baja
A2	Baja toxicidad e inflamabilidad media
A3	Baja toxicidad e inflamabilidad alta
B1	Alta toxicidad e inflamabilidad baja
B2	Alta toxicidad e inflamabilidad media
B3	Alta toxicidad e inflamabilidad alta

La norma 34-1997 del ANSI/ASHRAE cataloga la inflamabilidad de los refrigerantes dentro de la clasificación 1, 2 y 3. Los refrigerantes pertenecientes a la clase 1 no mostraran una propagación de la flama cuando están en presencia de aire a la presión atmosférica a una temperatura de 18.3 °C. Los refrigerantes pertenecientes a la clase 2 tienen un bajo límite de inflamabilidad (LFL) superior a 0.1 kg/m^3 , a 21.1 °C a presión atmosférica y un calor de combustión inferior de 19000 kJ/kg . Los refrigerantes pertenecientes a la clase 3 son altamente inflamables, con un LFL menor o igual a 0.1 kg/m^3 a 21.1 °C a presión atmosférica y un calor de combustión mayor o igual a 19000 kJ/kg .

Una clasificación segura de los refrigerantes se realizara tomando en cuenta su toxicidad e inflamabilidad. De acuerdo a la norma 34-1997 del ANSI/ASHRAE, los refrigerantes se clasifican como sigue:

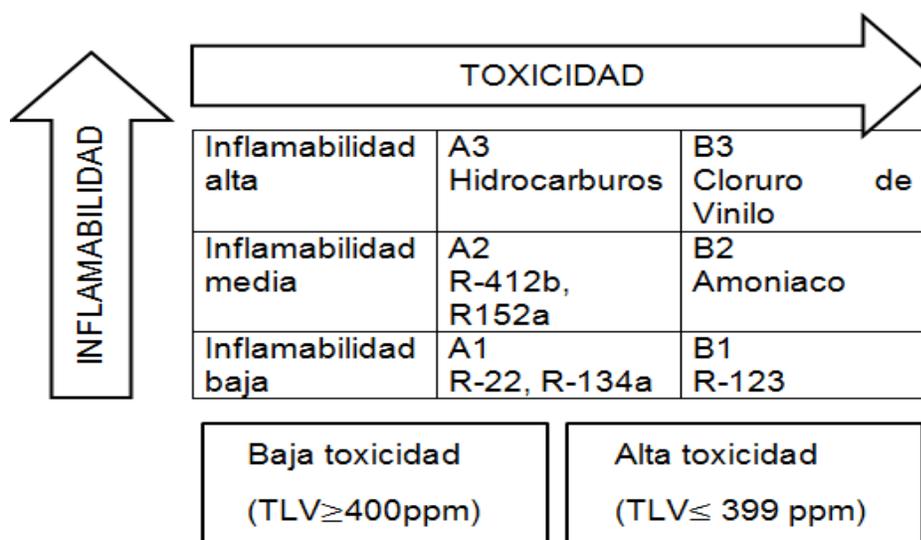


FIGURA 24. CLASIFICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES POR SU TOXICIDAD Y POR SU INFLAMABILIDAD

Para las mezclas zeotrópicas cuya inflamabilidad y toxicidad pueden cambiar a medida que cambia su composición, una clasificación dual de seguridad debe ser determinada. La primera clasificación indicara la

clasificación de la composición de la mezcla. La segunda clasificación muestra la clasificación de la mezcla en el peor de los casos de fraccionamiento.

1.4.5 NUMERACIÓN DE LOS REFRIGERANTES.

Antes de la invención de los clorofluorocarbonos (CFC), los refrigerantes eran llamados por sus nombres químicos. Pero debido a la complejidad de esos nombres, especialmente de los CFC y los HCFC, totalmente halogenados y también los no totalmente halogenados, un sistema de numeración fue desarrollado para hidrocarburos y halocarburos, la cual ha sido ampliamente utilizado en la industria de la refrigeración.

Como ya se mostró anteriormente, existen diferentes tipos de refrigerantes que son utilizados en la industria de la refrigeración y aire acondicionado en la actualidad, en seguida se hace una clasificación de los más comunes según la ASHRAE con la finalidad de no manejar nombres químicos para las sustancias.

TABLA 3 SERIES DE REFRIGERANTES

SERIE	NOMBRE	GAS
000	Metano	R-12
100	Etano	R-134a
400	Zeotropo	R-401 ^a
500	Azeotropo	R-502

De acuerdo con la norma 34-1997 de la ANSI/ASHRAE, la metodología para encontrar los números de refrigerantes puros es la siguiente:

- El dígito que se encuentra en el extremo derecho se refiere a la cantidad de moléculas de flúor que tiene el compuesto.

- El dígito siguiente a la izquierda se refiere a la cantidad de moléculas de hidrogeno que tiene el compuesto más uno.
- El dígito de siguiente a la izquierda se refiere a la cantidad de moléculas de carbono que tiene el compuesto menos uno (cuando este digito es cero no se escribe).
- El dígito a la extrema izquierda se refiere a los dobles enlaces que tienen las moléculas de carbono.

Como ejemplo se encontrara la fórmula del refrigerante 12 que químicamente se llama diclorodifluorometano y su fórmula es Cl_2F_2C (dos cloros, dos flúores y un carbono).

Tomando la regla. Se observa que posee dos átomos de Flúor, por lo que su número tendrá que terminar en 2.

Se observa que en su fórmula química no posee hidrógenos, pero la regla dice que para ese número se toma la cantidad de hidrógenos más uno, por lo tanto $0+1=1$, el cual es el segundo número. Siguiendo con la regla, el refrigerante posee 1 átomo de carbono, pero la regla dice que se tomara la cantidad de átomos menos 1, de donde $1-1=0$ y por ser cero, no se escribirá en la formula. La siguiente consideración se refiere a los dobles enlaces de los átomos de carbono, sin embargo el diclorodifluorometano no los posee, por lo tanto el número no se considera. Finalmente se observa que los únicos números que se obtuvo fueron el 1 y 2, de donde se toma como resultado el número del refrigerante R-12.

También es importante mencionar que los refrigerantes HC's obtienen sus números partiendo de esta regla. Por ejemplo el propano cuya fórmula química es C_3H_8 no tiene moléculas de Flúor, tiene 8 hidrógenos y tres carbonos

si sigue la regla antes mencionada, el número extremo de la derecha es 0, como posee 8 hidrógenos, se obtiene el segundo número que es $8+1=9$ y contiene además 3 átomos de carbono, por lo que el número correspondiente es $3-1=2$, de donde se obtiene que su número es el R-290.

Asimismo se menciona que para los refrigerantes inorgánicos se ha asignado la serie 700, solo agregando su peso molecular. Por ejemplo el CO₂ tiene como número de refrigerante R-744 (Peso Molecular del CO₂ =44), el amoníaco R-717.

1.5 IMPACTOS AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LOS REFRIGERANTES FLUOROCARBONADOS

Debido a la composición química de los refrigerantes fluorocarbonados, estos tienen una incidencia negativa a nivel ambiental, las cuales se presentan a continuación:

1.5.1 DESTRUCCIÓN DEL OZONO DE LA ATMÓSFERA.

Al ser los principales destructores del ozono, los refrigerantes que tienen en su composición química, átomos de cloro y de flúor, es decir los del tipo CFC, HCFC y HFC, deben eliminarse, ya que estos elementos al asociarse con las moléculas de ozono provocan su destrucción. Sin embargo, los principales destructores del ozono de la atmósfera son los clorofluorocarbonos, es decir los Freones. Estudios efectuados por los químicos estadounidenses F. Sherwood Rowland y Mario Molina demostraron que si bien dichos gases se mantenían inactivos por debajo de los 29 mil metros, más allá empezaban a actuar: a esa altura la radiación ultravioleta del sol incide directamente con las moléculas de

CFC, rompiéndolas en átomos de cloro y dejando fragmentos residuales en el ambiente (fotólisis ultravioleta en la atmósfera alta). En dichas condiciones, estos átomos se combinan con el ozono y forman óxido de cloro. El problema es que esta nueva molécula tiene la característica de tener un electrón sin pareja, lo que la hace muy reactiva. A partir de este proceso, se produce una reacción en cadena: un solo átomo de cloro puede eliminar más de 100,000 moléculas de ozono, es a partir de esta exorbitante cifra que aparece la urgente necesidad de eliminar los clorofluorocarbonos. La FIGURA 25 muestra la descomposición de la molécula CFC, la cual se produce por la acción de la Radiación UV sobre esta, y luego la asociación de radical cloro y su reacción con las moléculas de ozono.

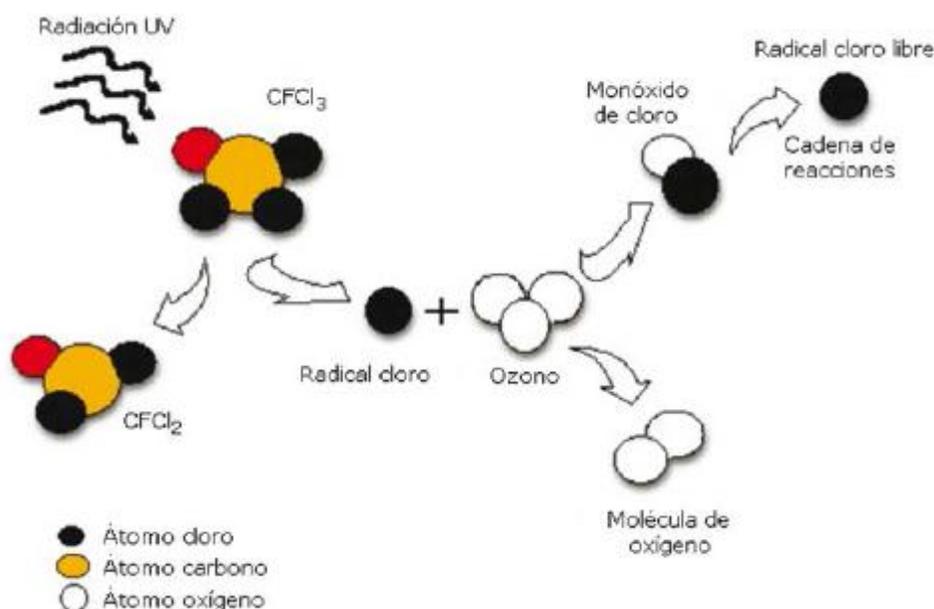


FIGURA 25 DESTRUCCIÓN DEL OZONO CAUSADA POR LA DESINTEGRACIÓN DE LA MOLÉCULA CFC

El problema radica en que al haber menos ozono en la atmósfera, la cantidad de radiaciones ultravioleta que llega a la Tierra es mayor. Los científicos estimaron que una mayor exposición, provocaría un aumento de los casos de cáncer de piel y cataratas, daños en el sistema inmunológico y una

disminución del ritmo de crecimiento de las plantas. Dado que algunos CFC perduran en la atmósfera durante más de 100 años, estos efectos durarían durante todo el siglo XXI

1.5.2 CONSECUENCIAS DEL AGOTAMIENTO DEL OZONO

El agotamiento de la capa de ozono lleva a un aumento de la radiación ultravioleta a nivel del suelo, el cual es un tipo de onda electromagnética, que se dividen en una escala conocida como espectro electromagnético, y abarca una amplia gama de longitudes de onda (λ) que varían desde menos de $10^{-10} \mu\text{m}$ para los rayos cósmicos, hasta longitudes de onda tan grandes como $10^{10} \mu\text{m}$ para las ondas de energía eléctrica. Es de hacer notar que la luz visible está comprendida entre longitudes de onda 400 a 700 μm y para el caso de la radiación ultravioleta, se encontrara entre longitudes de onda de 100 μm a 400 μm .

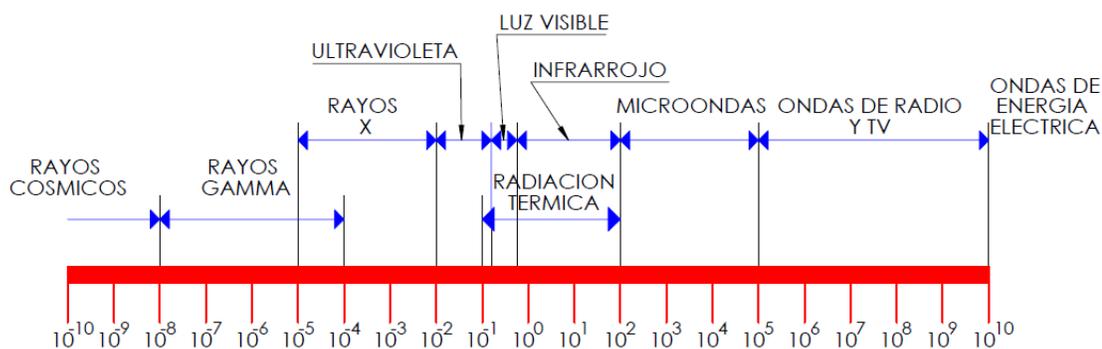


FIGURA 26. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO O DE RADIACIÓN.

La cantidad de radiación UV solar recibida en cualquier lugar particular sobre la superficie de la tierra depende de la posición del sol sobre el horizonte, de la cantidad de ozono en la atmósfera y de las condiciones de nubosidad y contaminación locales. La disminución del ozono atmosférico lleva consigo

aumentos de la radiación UV a nivel del suelo. La figura 27 muestra la incidencia de los rayos UV en la atmosfera.

La exposición a cantidades grandes de rayos UV, tiene incidencia en el ácido ribonucleico, el cual juega un factor importante en la herencia genética, el cual puede verse afectado por un aumento de la radiación ultravioleta, produciendo daños al ser humano y a los sistemas ecológicos.

Los rayos ultra violeta se dividen en tres tipos, de los cuales se verán a continuación:

- UV-A: Es la continuación de la radiación visible y es responsable del bronceado de la piel. Su longitud de onda varía entre 320 y 400 nm.
- UV-B: Llega a la Tierra muy atenuada por la capa de ozono. Es llamada también UV biológica, varía entre 280 y 320 nm y es muy peligrosa para la vida en general y, en particular, para la salud humana, en caso de exposiciones prolongadas de la piel y los ojos (cáncer de piel, melanoma, catarata, debilitamiento del sistema inmunológico); representa sólo el 5% de la UV y el 0.25% de toda la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra.

UV-C: Es en teoría la más peligrosa para el hombre, pero afortunadamente es absorbida totalmente por la atmósfera. Longitud de onda varía entre 200 y 280 nm.

El agotamiento del ozono y los cambios climáticos están relacionados de varios modos, pero el agotamiento del ozono no es una causa importante de los cambios climáticos. El ozono atmosférico influye de dos formas en el equilibrio de las temperaturas de la tierra. Absorbe la radiación ultravioleta solar que calienta la estratosfera.

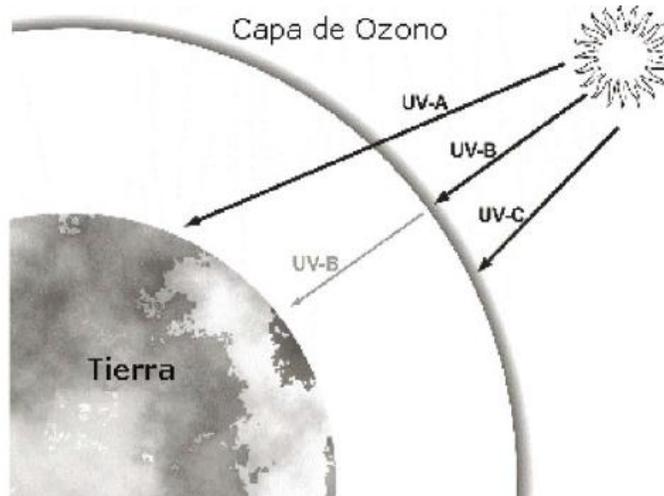


FIGURA 27. INCIDENCIA DE LOS RAYOS ULTRA VIOLETA SOBRE LA ATMÓSFERA.

También absorbe la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, atrapando de forma eficaz el calor en la tropósfera. Por consiguiente, el impacto en el clima de modificaciones en las concentraciones del ozono varía con la altitud a la que ocurren estos cambios del ozono. Las pérdidas importantes del ozono que han sido observadas en la estratosfera inferior, debidas a los gases que contienen cloro y bromo producidos por el hombre, han tenido un gran impacto en la atmósfera, produciendo los agujeros de la capa de ozono, los que como se mencionó anteriormente, son los culpables de una mayor incidencia de los rayos UV, los cuales principalmente se han concentrados sobre los polos (por fortuna) sin embargo estos si no se toman medidas para frenarlos, cada vez irán alcanzando zonas más alejadas de los polos. En la figura 28 se muestran los efectos adversos de los gases CFC en la atmosfera. Puede verse que el enorme agujero cubre todo el océano ártico, además de la alta concentración de monóxido de cloro, el cual es el principal causante de la destrucción del ozono.

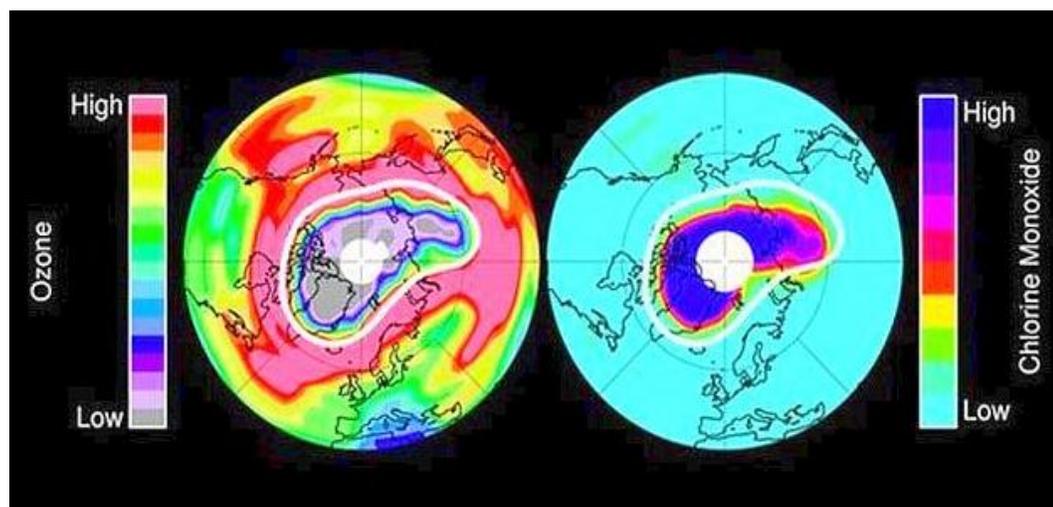


FIGURA 28. AGUJERO DE LA CAPA DE OZONO Y CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CLORO EN LA REGIÓN DEL POLO NORTE.

Para medir el grado de agotamiento de la capa de ozono que genera cualquier tipo de refrigerante, se hace uso del índice denominado Potencial de Destrucción de la capa de Ozono (ODP) muestra la combinación del porcentaje en peso de los átomos de cloro en el refrigerante y el tiempo de vida del mismo en la atmósfera. Las sustancias HCFC se están utilizando como sustitutos de los CFC porque muchas de sus propiedades son similares y son menos dañinos para el ozono al tener una vida media más corta y liberar menos átomos de cloro. Sus potenciales de disminución del ozono están entre 0.01 y 0.1. Pero como siguen siendo dañinos para la capa de ozono se consideran sólo una solución provisional y su uso ha sido prohibido en los países desarrollados a partir del año 2030.

1.5.3 CALENTAMIENTO GLOBAL

Como se muestra en la FIGURA 29, el efecto invernadero es debido a ciertos gases que son de origen natural como el vapor de agua y el CO₂, etc. pero hay otros gases que provocan efecto invernadero los cuales son causados

por la acción directa del ser humano, en particular los hidrofluorocarbonos, cuyo potencial de calentamiento global es muy elevado.

Los efectos probables del aumento de la presencia de gases de efecto invernadero se centran en un aumento de la temperatura atmosférica, lo que tiene como consecuencia directa el calentamiento global. Este calentamiento provoca una serie de consecuencias gravísimas para el planeta, y como consecuencia directa sobre su población, las cuales son las siguientes:

- La cantidad y frecuencia de precipitación variará, por lo que, muy posiblemente, aumente la superficie de las áreas afectadas por sequías y también su duración y por tanto su repercusión en zonas ya afectadas. Así mismo, en ciertas zonas, al aumentar las precipitaciones se producirán inundaciones, incluso en zonas donde no son habituales o siendo aún más destructivas en zonas donde se producen de forma estacional.
- Una atmósfera más calurosa provoca que el hielo cerca de los polos se derrita, lo cual de seguir al ritmo que sigue, tendera a elevar el nivel del mar. Además de la tragedia humana inmediata de este hecho, se inundarían tierras fértiles que dejarían de serlo, con las correspondientes hambrunas provocadas en ciertas zonas cuya dependencia de la agricultura o la ganadería es plena.
- Cambios abruptos en la temperatura y presión atmosférica traen como consecuencia la generación de tornados y huracanes.

En resumen, las consecuencias que puede esperar la población a nivel mundial, a raíz del cambio climático para el presente siglo, si no se frena las emisiones de los gases de efectos invernadero (GEI), se tendrán las siguientes consecuencias:

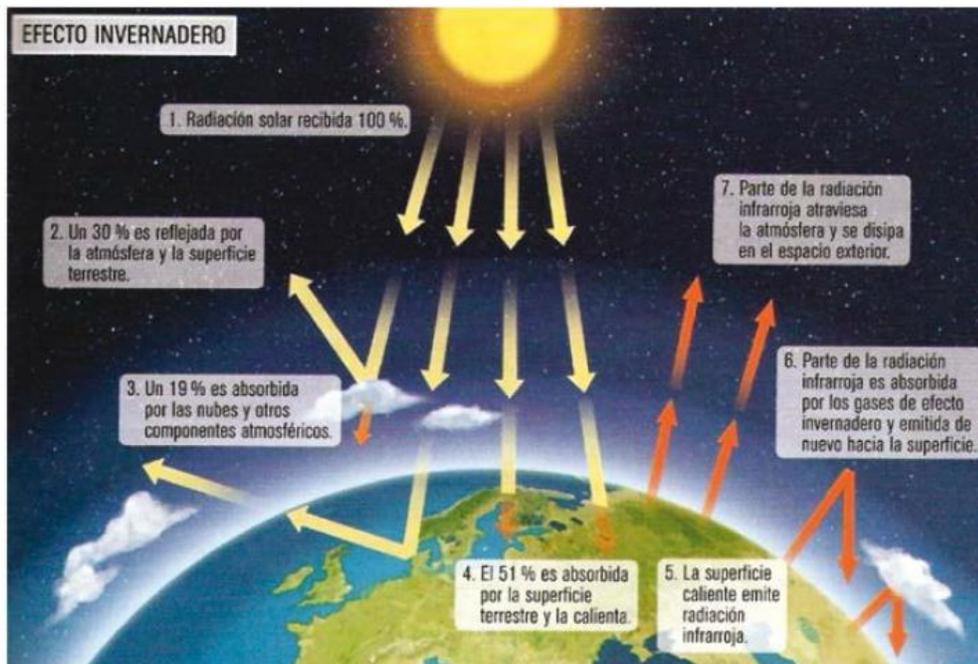


FIGURA 29. EFECTO INVERNADERO

- Aumento de sequías en unas zonas e inundaciones en otras.
- Mayor frecuencia de formación de huracanes.
- Progresivo deshielo de los casquetes polares, con la consiguiente subida de los niveles de los océanos.
- Incremento de las precipitaciones a nivel planetario, pero lloverá menos días y más torrencialmente.
- Aumento de la cantidad de días calurosos, traducido en olas de calor. Igualmente se espera que los extremos de calor y de frío sean mayores (veranos más calientes e inviernos más fríos).
- Desaparición de especies animales y vegetales del planeta.
- Reducción de los recursos agropecuarios en general, con incidencia especial en zonas cuya subsistencia depende directamente de estos recursos.

La situación futura de la capa de ozono no depende meramente de las concentraciones estratosféricas de cloro y de bromo producidos por el hombre.

También está influenciada, por las cantidades atmosféricas de varios compuestos de producción humana como el metano, óxido nitroso, y partículas de sulfatos, así como por el clima cambiante de la tierra. Por lo tanto, el cumplimiento pleno en todo el mundo de la reglamentación internacional acerca de las emisiones de CFC, HCFC y HFC posibilitará la recuperación de la capa de ozono que protege a la tierra de los rayos ultravioletas.

Para medir el grado en el que un refrigerante contribuye al calentamiento global, se hace uso del Potencial de Calentamiento Global (GWP), el cual mide la capacidad de un refrigerante para producir efecto invernadero. Para obtener el potencial de calentamiento global de un gas cualquiera, se compara con el dióxido de carbono, al que se le asigna el valor $GWP = 1$. Por ejemplo, para el R-22 el valor del GWP es 1700, lo que significa que un gramo de R-22 tendría un efecto en la atmósfera equivalente al que produciría 1700 gramos de dióxido de carbono. Los gases refrigerantes tales como los HCFC contribuyen al calentamiento de la tierra. Aunque tienen concentraciones atmosféricas pequeñas, su tiempo de vida en la atmósfera es muy largo. Como los refrigerantes que contribuyen al calentamiento global tienen diferentes tiempos de vida, se toman tiempos de 20, 50, 100 y 500 años para comparar sus efectos en la atmósfera.

1.6 HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES.

Son sustancias naturales obtenidas principalmente por destilación en las refinerías de petróleo. Los hidrocarburos como refrigerantes están disponibles para una amplia gama de aplicaciones en refrigeración, incluyendo la sustitución directa del CFC-12. Una de las principales ventajas de los

refrigerantes HC's contra los refrigerantes fluorocarbonados es que tienen muy bajo impacto ambiental en comparación y son compatibles con el cobre y el aceite mineral, es decir que se podrán utilizar las mismas tuberías y aceite que utilizan la mayoría de equipos de refrigeración, por lo cual, al ser utilizados como sustancias de reemplazo, se necesitara realizar muy pocos cambios en el sistema de refrigeración original y en sus componentes, sin embargo, se deben tomar las medidas de seguridad necesarias para evitar que la inflamabilidad sea un problema. Los más importantes como refrigerantes son el metano, etano, butano, propano (R-290), etileno e Isobutano (R-600a).

Fueron introducidos en Alemania en la mitad de la segunda década del siglo XX (1916). Su presencia en el mercado de refrigeración era grande entre los años de 1920 a 1930, sin embargo con la creación de los refrigerantes CFC, los refrigerantes naturales, incluidos los HC's, fueron desplazados por los anteriores, pero a pesar de ello, en el inicio de los años 50, fabricantes de equipos de refrigeración utilizaron refrigerantes hidrocarburos en el mercado europeo, posteriormente hubo un traslado mundial a equipos funcionando con Freón 12, lo que los dejó fuera del mercado de refrigeración. Su uso quedó limitado a grandes plantas de refrigeración industriales, dentro de la industria del petróleo y gas.

Ante la necesidad de buscar alternativas de refrigerantes por la problemática ambiental que se tiene en la actualidad, se pueden encontrar pequeños refrigeradores domésticos y algunos equipos de aire acondicionado operando con refrigerantes HC's.

Algunas consideraciones en cuanto al uso de los hidrocarburos en refrigeración son las siguientes:

- ❖ Se desempeñan muy bien, con buena capacidad y eficiencia. Los HC están disponibles para una amplia gama de aplicaciones. Son una excelente alternativa como reemplazo directo del CFC 12.
- ❖ Tienen un impacto ambiental muy bajo en comparación con los CFC, HCFC y los HFC.
- ❖ Son compatibles con el cobre y los aceites minerales comunes.
- ❖ Pueden usarse procedimientos de limpieza y servicios de mantenimiento similares a los usados con los refrigerantes fluorocarbonados, excepto por las consideraciones de seguridad adicionales que se deben acatar.
- ❖ Se necesitan muy pocos cambios en un sistema y sus componentes para poder usarlos como refrigerantes. Sin embargo, se necesita cuidado para que la inflamabilidad no presente problemas de seguridad.
- ❖ Los sistemas que usan HC deben diseñarse de manera tal que la fuga no sea peligrosa.
- ❖ Debe usarse el equipo apropiado durante la fabricación para cargar los sistemas y la carga aérea debe elegirse con cuidado.
- ❖ Los técnicos del servicio de mantenimiento y reparación deben estar capacitados para manejar hidrocarburos como refrigerantes con seguridad.

Los hidrocarburos más utilizados en refrigeración son:

- Propano (R-290)
- Butano. (R-600)
- Isobutano. (R-600-a)
- Propileno (R-1270)

1.6.1 PROPIEDADES DE LOS HC

Dentro de las propiedades físicas de los refrigerantes HC's se encuentran los puntos críticos, en donde valores de temperatura y presión superiores a estos, no son válidos para el ciclo simple de compresión de vapor, ya que la fase líquido y vapor no existen, y por lo tanto no se puede llevar a cabo el fenómeno de condensación, el cual es el principal parámetro para el cual el ciclo podrá realizarse. Estos datos, además del punto de ebullición normal a presión atmosférica, se muestran a continuación:

TABLA 4. PUNTO DE EBULLICIÓN Y VALORES CRÍTICOS PARA EL PROPANO, BUTANO, ISOBUTANO Y PROPILENO.

Refrigerante	R-290	R-600	R-600a	R-1270
Punto de ebullición normal (°C)	-42.1	-0.90	-11.7	-47.5
Temperatura crítica (°C)	96.8	152	135	96.2
Presión crítica (bar)	42.5	38.0	36.5	46.65

Hay que hacer la aclaración, que el procedimiento de reconversión de los sistemas de refrigeración se debe utilizar solamente hidrocarburos que estén destinados para la refrigeración, es decir no se puede utilizar aquellos que están destinados para uso doméstico, ya que contienen cantidades significativas de agua y otras impurezas que podrían contribuir a la degradación del aceite y a la reducción de la vida útil del compresor. Otro problema con el propano comercial es que la composición puede variar y cambiar drásticamente las propiedades del refrigerante de cilindro a cilindro. Los requisitos que deben seguirse para poder utilizar a los hidrocarburos como refrigerantes se resumen en la siguiente tabla:

TABLA 5. ESPECIFICACIONES DE CALIDAD DE LOS HIDROCARBUROS PARA SU USO COMO REFRIGERANTES

PARÁMETRO	VALOR
Grado de Pureza	Superior al 99.5%
Contenido de agua	Máximo 10 ppm
Contenido de otros HC	Máximo 5000 ppm
Impurezas Cloradas y Fluoradas	No debe contener (0 ppm)

El uso de los HC impuros causará los siguientes problemas en un sistema de refrigeración:

- Un alto nivel de humedad saturará el filtro secador, se congelará en el dispositivo de expansión y en presencia de otras impurezas, acelerará la producción de ácidos en el sistema, lo cual conducirá al daño metálico de cobre en el compresor.
- Un agente odorante puede dañar el aislamiento de la serpentina del motor del compresor.

Ya que en los cilindros pueden contenerse HC con mezcla de otros, de humedad, odorantes e impurezas, sólo debe usarse HC grado refrigerante que tengan bajos niveles de contaminación y humedad y que sean de una composición muy controlada.

1.6.2 PRESENTACIÓN DE LOS CILINDROS DE REFRIGERANTE HC

La compañía inglesa BOC ha puesto a disposición del mercado de refrigeración, diferentes presentaciones de refrigerante hidrocarburos, específicamente de propano, los cuales se proporcionan en la siguiente tabla:

TABLA 6 PRESENTACIONES DE DIFERENTES REFRIGERANTES HIDROCARBUROS

REFRIGERANTE	PRESENTACIONES			
R-290	3 kg	12 kg	46 kg	
R-600a	420 g	3.5 kg	12kg	46 kg
R-1270	3 kg	12 kg	46 kg	

1.7 RIESGOS DEL USO DE HIDROCARBUROS EN REFRIGERACIÓN

Los hidrocarburos presentan excelentes propiedades para ser utilizados como reemplazo de los refrigerantes fluorocarbonados, sin embargo su uso debe ser más cuidadoso, esto debido a la naturaleza inflamable de los mismos, por lo que se deberán tomar las precauciones adecuadas para su manipulación y el uso de estos en la refrigeración.

El principal riesgo que se tiene al usar a los hidrocarburos como refrigerantes son las fugas, ya que por su naturaleza inflamable pueden ocasionar accidentes, los cuales atentan contra la seguridad humana y en segundo plano, pueden provocar pérdidas económicas, por lo que se deberán desarrollar medidas de seguridad que permitan su uso sin ningún inconveniente.

1.7.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos son inflamables cuando se mezclan con en el aire, presentando dos límites, conocidos como el nivel mínimo y alto de inflamabilidad. Debido a esto reciben una clasificación A3 de la ASHRAE.

En el caso de existir una fuga, si se tiene una concentración menor a límite mínimo de inflamabilidad no habrá suficiente combustible que quemar. Si

la concentración es mayor que el límite superior, no existirá suficiente oxígeno para que la combustión se realice, sin embargo existirá riesgo de sofocamiento, ya que por tener una mayor densidad del aire, los HC's terminan desplazándolo.

Las propiedades de inflamabilidad de los HC's, proporcionan los datos necesarios para realizar el diseño seguro de los sistemas de refrigeración que operaran con ellos. Algunos parámetros que se pueden calcular a través de estas propiedades son la carga de refrigerante, el flujo de ventilación y la determinación del rango de temperaturas de operación de los componentes del sistema.

TABLA 7. PROPIEDADES DE INFLAMABILIDAD DE LOS HC'S USADOS EN REFRIGERACIÓN.

Refrigerante	Numero	LFL		Temperatura de auto ignición°C
		% (Vol)	ρ (kg/m ³)	
Propano	R-290	3.0	0.037	515
Butano	R-600	2.1	0.038	470
Isobutano	R-600a	1.8	0.043	460
Propileno	R-1270	2.5	0.043	455

Es de aclarar que es improbable que se presente la combustión en el interior de un sistema de refrigeración, debido que no hay presencia de aire atmosférico, por lo tanto ante la imposibilidad que ocurra este fenómeno hace que la instalación sea segura.

1.7.2 MEDIDAS DE SEGURIDAD A SEGUIR PARA EL USO DE HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES

La ejecución de la reconversión de los equipos para el uso de hidrocarburos, requiere de medidas de seguridad adicionales a las prácticas tradicionales de refrigeración, debido a la naturaleza inflamable de los mismos.

A continuación se brindaran las medidas que deberán seguirse en el lugar de trabajo para obtener buenos resultados en el proceso de reconversión.

- Cuando se maneja cualquier volumen de refrigerante, bien sea para su carga o descarga, es indispensable poseer guantes, gafas y vestimenta que cubra todo el cuerpo para evitar el contacto directo con el refrigerante. También el personal deberá contar con calzado industrial.
- El contacto con refrigerantes líquidos puede causar quemaduras que deben ser tratadas con abundante agua. Es necesaria atención médica inmediata.
- Los refrigerantes son generalmente más pesados que el aire, por lo que se depositan en el fondo del refrigerador (al existir fugas) e incluso en sótanos, por lo que es recomendable que los equipos de refrigeración se ubiquen en espacios ventilados.
- El gas refrigerante puede causar asfixia. Si alguna persona es afectada, se debe llevar a un espacio abierto, suministrarle respiración artificial y es necesaria atención médica inmediata.

En general se deberán seguir las medidas de seguridad que se han mencionado cuando se trabaja con cualquier tipo de refrigerante, sin embargo para el caso de utilizar hidrocarburos se deberán tomar medidas adicionales, para tener la certeza que el equipo operara de la forma esperada sin incurrir con ello en riesgo adicionales.

- Todos los refrigerantes a base de hidrocarburo son altamente inflamables, por lo que se deberán tomar las medidas de seguridad para el caso de posibles fugas, sin embargo estos no son tóxicos, por lo que se podrán combatir de manera más eficaz es caso de fuga.

- Se deberán tomar las medidas de seguridad de acuerdo con las normas nacionales que rigen para sustancias inflamables.
- Su manejo y aplicación debe ser realizada por personas certificadas en el uso de estas sustancias.
- No deben existir fuentes de ignición que formen parte del sistema o equipo de refrigeración, ya que las mezclas de hidrocarburos son inflamables en concentraciones entre 1.95% y 9.1%.
- Debido a lo anterior, el equipo de refrigeración debe ubicarse en un lugar suficientemente ventilado, para evitar, que en caso de fuga, se produzca una alta concentración de hidrocarburos.
- Las fuentes de ignición que deben tomarse en consideración son los componentes eléctricos del equipo, evitando la existencia de contactos eléctricos descubiertos.
- En el caso de ocurrir un incendio a causa de fuga de refrigerante, se deberá utilizar extintores de polvo seco. Si el incendio es mayor se debe aplicar la alarma para el caso.
- Si grandes cantidades de hidrocarburo son liberadas a la atmosfera, deben ser dispersadas con aire o agua en espray. El área debe ser evacuada y acondicionada inmediatamente para evitar incendios (apagar fuentes de calor e interruptores de corriente eléctrica).
- Instalar componentes a prueba de explosiones. Los motores, incluidos los ventiladores, bombas y compresores, deben ser de un modelo sin escobillas para evitar la generación de posibles chispas.

En el lugar donde se realicen las actividades de reconversión y además donde se ubiquen los refrigeradores, deberá colocarse letreros de advertencia que anuncien que está prohibido fumar, encender llamas o cualquier fuente que pueda provocar la combustión del hidrocarburo. Debe haber extintores de incendio disponibles en el lugar de trabajo y posteriormente junto a los equipos frigoríficos, colocando instrucciones claras para su uso.



FIGURA 30. EXTINTOR DE POLVO SECO.

En el caso de que el equipo no pueda ubicarse en un lugar suficientemente ventilado, se deberán colocar ventiladores para aumentar el flujo de aire, pero evitando, como se mencionó anteriormente, que en el arranque del motor se pueda generar chispas, para ello utilizando motores sin escobillas.

A continuación se enlistan los componentes que se consideran como fuente de ignición:

- ❖ Interruptores manuales de encendido y apagado
- ❖ Termostatos
- ❖ Relés de arranque, de sobre carga térmica, de voltaje, universales
- ❖ Conmutadores de flujo

- ❖ Interruptores manuales de encendido y apagado
- ❖ Regulador de velocidad del ventilador
- ❖ Reguladores de humedad
- ❖ Interruptores automáticos de caída de presión
- ❖ Reguladores programables
- ❖ Interruptor de caída del nivel de líquido
- ❖ Interruptores del diferencial de aceite
- ❖ Motor eléctrico
- ❖ Interruptor Térmico
- ❖ Capacitor
- ❖ Termostato
- ❖ Lámpara de iluminación Interna
- ❖ Interruptor normalmente cerrado
- ❖ Regleta de conexiones
- ❖ Líneas de Alimentación de Corriente
- ❖ Etc.

Además de aislar los componentes que puedan generar chispa, es de mencionar que para el desarrollo de la reconversión de cualquier equipo de refrigeración, deberá evitarse el golpe de herramientas con el piso o entre ellas, ya que producto de cualquier impacto pueden generarse chispas, las cuales en caso de fuga podrían ocasionar un incendio.

Finalmente se muestran medidas de seguridad adicionales para que prevenir cualquier riesgo en el uso de equipos de refrigeración HC:

- ❖ En las salas donde estará ubicado el equipo refrigerador, es suficiente con instalar un equipo de detección de fugas para que aisle la electricidad de toda del recinto, mediante un interruptor automático cuando se detecte la

existencia de refrigerante. El dispositivo de detección además debe iniciar la ventilación con un sistema de extracción apropiado desde una fuente de energía independiente.

❖ Se deben evitar las partes de máquinas de refrigeración cuyas superficies puedan tornarse excesivamente calientes. La superficie de todos los componentes que puedan tener contacto con el refrigerante liberado debe presentar una temperatura máxima que no supere los 100 °C (212 °F) por debajo de la temperatura de autoencendido del refrigerante utilizado

Debido a la complejidad de las labores que se realizaran y a la naturaleza misma de los refrigerantes HC's, para cualquier actividad relacionada con la reconversión de los equipos, incluyendo el mantenimiento y/o reparaciones que haya que efectuarles a los equipos, se deberá contar con un MÍNIMO DE DOS PERSONAS para la ejecución de estas actividades, ya que en el caso de presentarse cualquier emergencia, las personas estarán en la capacidad de resolver cualquier clase de inconvenientes.

1.7.3 CÁLCULO DE CARGA MÁXIMA DE REFRIGERANTE SEGÚN LA HABITACIÓN QUE CONTIENE EL EQUIPO.

El factor que limita el uso de refrigerantes HC's es la capacidad de carga del equipo, el tipo de uso para el que ha sido diseñado y el tamaño de la habitación donde estará ubicado. Los sistemas con capacidades de carga de 0.15 kg o inferiores pueden instalarse en habitaciones de cualquier tamaño, ya que la cantidad de refrigerante no es suficiente para generar un incendio. Un refrigerador domestico común utiliza alrededor de 145 gramos de refrigerante para operar, esto significa que un equipo de esta naturaleza podrá instalarse sin ningún problema en los hogares. Para los sistemas con capacidad de carga

superior a 0.15 kg, la habitación debe tener un tamaño tal que una pérdida repentina de refrigerante no ocasione que la concentración media supere el límite práctico de 0.008kg/m^3 ($0.00049944\text{ lb/ft}^3$). Los requisitos de capacidad de carga según la norma EN 378, están resumidos en la TABLA 8.

TABLA 8 CAPACIDAD DE CARGA

CATEGORÍA	EJEMPLOS	VOLUMENES PRÁCTICOS MÁXIMOS RECOMENDADOS
A (hogar y espacios públicos)	Hospitales, prisiones, teatros, escuelas, supermercados, hoteles, viviendas	<ul style="list-style-type: none"> • 1.5 kg. (3.3lb) por sistema sellado, siempre que no haya fuentes de ignición asociadas al sistema de refrigeración • 5kg. (4.99kg) en salas de máquinas especiales o al aire libre
B (comercios/ espacios privados)	Oficinas de negocios o de profesionales, sitios para la fabricación en general y para el trabajo	<ul style="list-style-type: none"> • 2.5 kg. (5.5lb) por sistema. • 10kg. (22lb) en salas de máquinas especiales o al aire libre
C (industria/ espacios restringidos)	Almacenes de refrigeración, industria de lácteos, de envasado de carne, refinerías, áreas restringidas en los supermercados, habitaciones en fábricas.	<ul style="list-style-type: none"> • 10 kg (22lb) para espacios donde hay personas • 25 kg. (55lb) si el lado de alta presión (excepto para condensadores enfriados por aire) se encuentra en una habitación especial para máquinas o al aire libre. • No tiene límites si todas las piezas que contienen refrigerante se colocan en una habitación especial para máquinas o al aire libre.

La carga permisible de refrigerante se calcula a partir del volumen de la habitación donde está instalado el equipo de refrigeración, la cual está dada por la siguiente ecuación⁹:

$$M_R = 0.2 * V_{hab} * LFL \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

M_R : Representa la carga máxima por circuito refrigerante

V_{hab} : Volumen de la habitación

LFL : Límite inferior de inflamabilidad

Por lo tanto, se deberá utilizar la ecuación dada para establecer cuanta será la carga máxima de refrigerante que deberá poseer un determinado equipo, conociendo el volumen de la habitación en la que estará ubicada.

Es de aclarar que en caso que el equipo se encuentre bajo tierra, por ejemplo sótanos, la carga de refrigerante no deberá exceder 1 kg (2.2 lb), aunque se encuentre en una habitación de volumen superior al calculado por la Ecuación 21. Es de tomar que el cálculo se realiza para 1 circuito individual de refrigerante, esto con base a la probabilidad que dos circuitos presenten falla simultáneamente.

En el caso de una fuga “catastrófica”, es posible que se produzca la estratificación del refrigerante. Esto tendría como resultado la formación de concentraciones inflamables en niveles inferiores. Para evitar que esto ocurra, el ventilador del sistema de refrigeración deberá proporcionar un mínimo de circulación de aire, tal como se detalla en la Ecuación 22. Se recomienda que el

⁹ (DURACOOOL, 2008)

ventilador sólo trabaje durante el ciclo de funcionamiento del compresor, ya que la probabilidad de que se produzca una fuga desastrosa es mínima cuando éste no está en funcionamiento. Asegúrese de que el ventilador se encuentre conectado a un cortacorriente que sólo se active en caso de que se detecte una fuga. La velocidad se calcula de la siguiente manera¹⁰:

$$V_{aire} = C * \frac{M_r}{LFL} \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

V_{aire} = velocidad mínima del flujo de aire del ventilador $m^3/h(ft^3/h)$

M_R : Representa la carga máxima por circuito refrigerante

La constante (C) depende de la fuente del flujo de aire:

C = 17 cuando el ventilador del vaporizador en un equipo de aire acondicionado proporciona el flujo de aire dentro de la habitación o

C = 20 cuando el ventilador del condensador en un equipo de refrigeración proporciona el flujo de aire dentro de la habitación.

Las distintas constantes son el resultado de la efectividad del mezclado del ventilador. Esto se debe principalmente a la velocidad del aire que se libera.

1.7.4 VENTILACIÓN

Cuando se disponga de una sala de máquinas, se deberá ventilar siempre hacia el exterior. En el caso que sea ventilación natural, se deberá asegurar que pueda existir la circulación libre alrededor de todas las partes del

¹⁰ (DURACOOOL, 2008)

sistema que contienen refrigerante. Las aberturas para entrada de aire del exterior deben ubicarse de manera tal que no se produzca un cortocircuito.

Cuando la carga de refrigerante de un circuito de refrigeración individual exceda la masa de la ecuación $M_R = 0.2 * V_{hab} * LFL$; la sala de máquinas que contenga refrigerantes de HC deberá tener ventilación mecánica capaz de proporcionar una velocidad de ventilación mínima, la cual depende del tipo de protección eléctrica presente dentro de la sala de máquinas.

La ecuación que rige la velocidad de la ventilación se muestra a continuación¹¹:

$$V_{min} = \frac{M_R}{t_r * SF * LFL} \quad \text{Ecuación 23}$$

Dónde:

V_{min} = representa la velocidad mínima del flujo de volumen del extractor, m^3/h ó ft^3/h .

M_R = representa la masa máxima de refrigerante dentro de cualquier circuito individual de todo sistema de refrigeración, kg (lb).

t_r = representa la duración mínima de liberación de refrigerante después de una fuga desastrosa, por lo general 0.17 hora.

SF = representa el coeficiente de seguridad, 0.5.

En todos los casos se debe conectar un detector de refrigerante al inicio de la ventilación mecánica. La ubicación del punto de muestreo debe estar a bajo nivel. La ventilación debe funcionar continuamente o utilizar un dispositivo

(DURACOOOL, 2008)¹¹

de detección de refrigerante que la ponga en funcionamiento cuando alcance el 20% del límite inferior de inflamabilidad (LFL). Pueden iniciarse velocidades de ventilación inferiores cuando se detecten concentraciones menores de refrigerante.

La entrada de la ventilación del extractor debe ubicarse al nivel del suelo y conducirse hacia un lugar seguro. Los puntos de descarga para aire ventilado o las aberturas para aire fresco deben ubicarse de manera tal, que se evite que el aire liberado sea llevado nuevamente dentro del edificio, como por ejemplo, las entradas del sistema de ventilación, puertas y ventanas que se abran y las fuentes de ignición. La expulsión de materiales inflamables no debe representar un riesgo en el exterior, como por ejemplo ingresar a un edificio o entrar en contacto con fuentes de ignición. El sistema de ventilación mecánica debe estar diseñado para mantener la habitación con una presión más baja que las áreas colindantes a fin de que no se produzca ninguna fuga de refrigerantes hacia otras áreas. Los ventiladores para la ventilación mecánica deben utilizar motores que no se enciendan mediante chispas. La cubierta y las paletas del ventilador deben diseñarse para evitar la generación de chispas como resultado del contacto entre metales. El equipo de ventilación mecánica debe instalarse con un control de emergencias independiente, ubicado en el exterior de la sala de máquinas pero próximo a ella.

1.7.5 MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS

Uno de los principales problemas que se presentan en los sistemas de refrigeración son las fugas del refrigerante. Si se presentan en el lado de alta presión, ocasionan la pérdida de refrigerante rápidamente, de manera que pronto llega el momento en que el sistema falla.

Si las fugas se encuentran en el lado de baja presión del sistema, el escape de refrigerante es más lento, pero también llega el momento en que el sistema va a fallar y si este defecto no se corrige a tiempo es posible que llegue a entrar aire al sistema y con él la humedad, produciendo consecuencias graves hasta el punto de ocasionar daños en el compresor.

La prueba de fugas es un paso importante y debe realizarse con mucho cuidado. Desde el momento de hacer vacío se está realizando la primera prueba de fugas, si el aire no puede evacuarse completamente es porque existe una fuga. El aumento de vacío depende de la magnitud de ésta. Si se ha logrado el vacío requerido pero éste no se mantiene indica que aún existe una fuga.

Existen varios métodos de detección de fugas, estos se presentan como sigue:

1. DIRECTOS

Son aquellos métodos que en el momento en que se realicen, no precisan necesariamente que el equipo este en operación, y permiten determinar el punto exacto en el que se produce la fuga. Se utilizará un método directo en todos los casos que queramos localizar una fuga, combinándose cuando proceda con otros de medición indirecta. Los principales métodos son:

- Detector electrónico.

Pueden utilizarse detectores de fugas electrónicos para revelar los refrigerantes de HC, pero es posible que su sensibilidad no sea apropiada o que se requiera su recalibración. (El equipo de detección debe calibrarse en un área libre de refrigerante).

Asegúrese de que el detector no represente una fuente potencial de ignición y que sea adecuado para los refrigerantes de HC. El equipo de detección de fugas debe ajustarse a un porcentaje del límite inferior de inflamabilidad (LFL) del refrigerante y debe calibrarse de acuerdo con el refrigerante utilizado y el porcentaje de gas apropiado.



FIGURA 31 DETECCIÓN DE FUGAS EMPLEANDO DETECTOR ELECTRÓNICO

- Agua jabonosa

Los fluidos jabonosos son apropiados para su utilización para la detección de fugas de refrigerantes de HC. Sin embargo, debe evitarse el uso de detergentes que contengan cloro ya que éste puede corroer el sistema de tuberías de cobre.

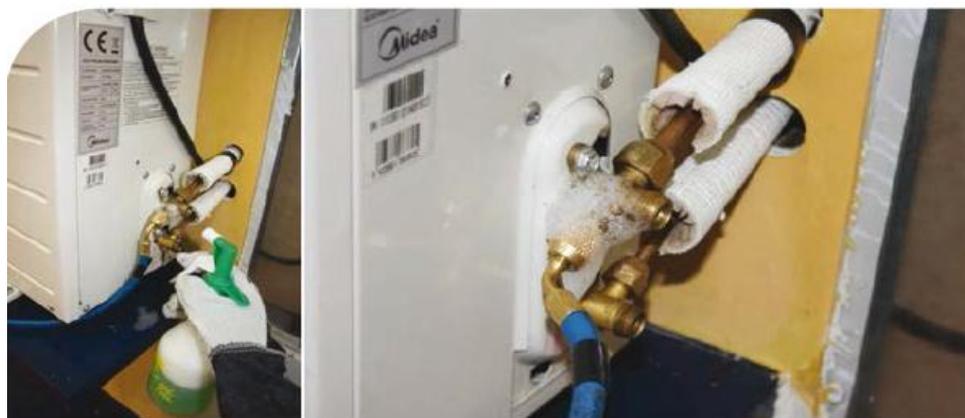


FIGURA 32 APLICACIÓN DE ESPUMA SOBRE LAS UNIONES DE LAS TUBERÍAS PARA IDENTIFICAR LAS FUGAS

Si existen sospechas de que se ha producido una fuga en un sistema con refrigerantes de HC, deberán eliminarse o extinguirse todas las fuentes posibles de ignición.

Otra forma directa para la localización de fugas estando el sistema en vacío, se puede utilizar un poco de aceite de compresor y colocarlo en las partes donde se sospeche pueda estar localizada la fuga; como uniones soldadas, uniones roscadas etc. Si no es posible localizar la fuga con el sistema en vacío se debe proceder a cargar refrigerante a presión y utilizando un detector de fugas o únicamente agua con jabón se vuelve a recorrer todas las partes sospechosas hasta localizar la fuga y corregirla. Si se encuentra una fuga de refrigerante que requiera soldadura, deberá recuperarse todo el refrigerante del sistema o aislarse (mediante el cierre de las válvulas) en algún sector alejado de la fuga del sistema. Luego deberá purgarse el sistema con nitrógeno y aspirarse para asegurar que se haya eliminado todo remanente del refrigerante retenido en el aceite del sistema. Luego deberá usarse nitrógeno para purgar el sistema durante el proceso de soldadura.

En el caso de presentarse orificios que sean demasiado grandes y no puedan soldarse, se deberá reemplazar la tubería, o si el orificio se encuentra en el evaporador, este deberá cambiarse.

2. Indirectos

Son aquellos que se basan en tomar mediciones sobre el sistema y que requieren que el equipo alcance determinadas condiciones de funcionamiento. Permiten sacar conclusiones sobre la posibilidad de fugas en el sistema, pero no localizarlas. Los principales métodos son:

- Presión en los sectores de alta y baja.
- Consumo del compresor.
- Temperaturas.
- Niveles de líquidos.
- Volumen de recarga.

Hasta este momento se han enunciado alguna de las posibles fallas que pueden existir en cualquier equipo de refrigeración, sin embargo existen otras que deberán tomarse en cuenta, para efectuar las reparaciones de la máquina frigorífica para que esta opere de manera satisfactoria, en el siguiente apartado se muestra una síntesis de las fallas, mostrando a la vez la causa probable de la ocurrencia de estas y las posibles soluciones a las mismas.

2.0 PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Para poder efectuar el procedimiento de reconversión a hidrocarburo en los equipos de refrigeración, deberá conocerse a profundidad el algoritmo del proceso, esto con el objetivo de que la práctica se realice de forma exitosa.

2.1 COMPETENCIAS TÉCNICAS, TECNOLÓGICAS Y PROFESIONALES PARA EFECTUAR LA RECONVERSIÓN A HIDROCARBUROS DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

El objetivo primordial de este apartado, es sensibilizar y fortalecer la capacidad técnica del personal involucrado en el desarrollo y aplicación de la reconversión de los sistemas de refrigeración, quienes deberán tener los conocimientos necesarios para desarrollar prácticas relacionadas con la aplicación de Buenas Prácticas en refrigeración y especialmente conocer las actividades indispensables para el desarrollo de la reconversión de los equipos a hidrocarburos.

2.1.1 PERSONAL INVOLUCRADO EN LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE RECONVERSIÓN

Para el desarrollo de las actividades relacionadas con la reconversión de los equipos de refrigeración a hidrocarburo, se verán involucrados instructores, técnicos, importadores de refrigerante, así como profesionales en el área de refrigeración. Es una amplia gama de personal involucrado en la aplicación de la técnica, ya que es un procedimiento que debe ser aplicado de manera exacta, para cumplir los objetivos que se desean, con la aplicación de la técnica de reconversión. A continuación se detallaran las atribuciones que cada uno de estos sujetos tendrán.

ATRIBUCIONES DEL PERSONAL DEL ÁREA INGENIERIL

Los conocimientos que poseen los profesionales en el área de refrigeración, específicamente ingenieros mecánicos y/o ingenieros químicos, son sumamente primordiales para la ejecución del proyecto de reconversión, ya que estos les permiten conocer la termodinámica del fluido refrigerante (HC's) y las propiedades de éste bajo las condiciones de trabajo; y con ello poder predecir el comportamiento que tendrá bajo diferentes circunstancias, permitiendo con ello conocer los aspectos importantes por los cuales se podrá desarrollar la reconversión de los equipos de refrigeración.

Las condiciones que deben tomarse en cuenta son:

- a) Las propiedades físicas del refrigerante HC (presión, entalpia, calor latente, densidad, volumen específico, etc.
- b) Las medidas de seguridad a seguir en el proceso de reconversión de los equipos y su posterior operación,
- c) Las proporciones de refrigerante alternativo con respecto al refrigerante original, la miscibilidad química de los HC's con los lubricantes y la tubería.
- d) Modificaciones que habrán que realizarse a los sistemas de refrigeración (en caso de haberlas) al realizar la reconversión.

ACTIVIDADES DE LOS INSTRUCTORES

Se deberá capacitar constantemente personal para que desarrollen la ejecución de la técnica de reconversión, es por ello que se debe contar con todo

un equipo de trabajo, los cuales tendrán como objetivo primordial entrenar a los técnicos de refrigeración.



FIGURA 33. TALLERES DE RECONVERSIÓN DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Los instructores serán los encargados de realizar cursos (talleres) en los cuales desarrollaran clases teóricas, donde se detallaran las características de los HC's, las ventajas y las medidas de seguridad adicionales con respecto a los refrigerantes fluorocarbonados. También se deberá generar conciencia ecológica en los participantes de los talleres, mostrándole la urgente necesidad de suspender el uso de refrigerantes fluorocarbonados, por otros más amigables con el ambiente.

Se contará con clases del tipo práctico, en las cuales los asistentes de los talleres podrán observar de primera mano la reconversión de los equipos de refrigeración, aplicando los conocimientos que ya poseen en refrigeración, ya que el procedimiento de reconversión incluye varios aspectos que se realizan en el desarrollo de las prácticas de refrigeración habituales.

Uno de los elementos primordiales que el curso deberá poseer es la capacitación de los asistentes en el tema de recuperación y posterior manejo de los refrigerantes para su posterior destrucción, ya que de nada serviría la aplicación de la técnica de reconversión, si el refrigerante es descargado a la atmósfera.

TÉCNICOS EN REFRIGERACIÓN.

Posterior a la capacitación que recibirán, los técnicos estarán en la capacidad de aplicar los conocimientos adquiridos para la aplicación de la reconversión de los equipos de refrigeración, efectuando con éxito el cambio de refrigerante.

Sin embargo, debe aclararse que para que estos puedan desempeñarse en el área de reconversión de equipos de refrigeración convencional a los HC's, deberán contar con una certificación que los respalde, ya que esta garantizará que tendrán los conocimientos, habilidades y destrezas, para prevenir cualquier inconveniente y a la vez minimizar los impactos que su labor puede generar al ambiente.



FIGURA 34. TÉCNICO DE REFRIGERACIÓN DANDO MANTENIMIENTO A UNA UNIDAD DE AIRE ACONDICIONADO.

El poseer una certificación le permitirá al técnico poder trabajar con los HC's y además tendrá los siguientes beneficios:

- Con las habilidades y los conocimientos adquiridos en la práctica de reconversión de los sistemas de refrigeración, se le reconocerá al técnico sus competencias laborales.
- Le permitirá al técnico identificar su condición en el mercado, facilitando con ello la búsqueda de empleo.
- La certificación demuestra a los empleadores la calidad con la cual presta sus servicios, logrando con ello estabilidad laboral.
- Ya que se pretende que los HC's estén presentes en el mercado de refrigerante, posteriormente el gobierno como los clientes exigirán certificación para realizar la contratación de sus servicios.

DISTRIBUIDORES E IMPORTADORES DE LOS REFRIGERANTES HC's

Los importadores de los refrigerantes HC's, son de gran importancia para la ejecución de la reconversión de los equipos de refrigeración, ya que son estos los encargados de proveer los refrigerantes para su comercialización en el mercado nacional, lo cual facilitara la labor de los entes encargados de la aplicación de la técnica de reconversión.

Para el caso del país, los establecimientos que distribuyan hidrocarburos para refrigeración, deberán ser autorizados por el gobierno central, ya que deberán cumplir con las condiciones que este les imponga.

2.2 LEGISLACIÓN AMBIENTAL PARA EL USO DE HIDROCARBUROS COMO REFRIGERANTES

En la actualidad El Salvador importa una considerable cantidad de productos del tipo fluorocarbonados, los que son utilizados como gases refrigerantes, agentes espumantes y/o propelentes y otros usos en el mercado nacional. Dichas sustancias son las principales destructoras de la capa de ozono, lo que hace necesario la reducción de su uso.

Es conocido que existen sustancias que pueden sustituir los productos regulados por el protocolo de Montreal, teniendo la ventaja de encontrarlos en el mercado nacional.

El país ha dado grandes avances en cuanto a la reducción de sustancias agotadoras del ozono, ya que con el apoyo del PNUD, el gobierno de El Salvador, por medio del ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), logro la reducción de importaciones de la línea base de 309 toneladas de refrigerantes CFC en el año 2009, a 34.73 toneladas métricas en el año 2007, lo que representa una reducción del 85% del consumo nacional. Dicha reducción fue comprometida por el gobierno, como parte del cumplimiento del protocolo de Montreal.

La reducción ha sido significativa, sin embargo los niveles deben reducirse a cero. En el caso de refrigerantes, una excelente alternativa son los hidrocarburos, tales como el propano, butano, Isobutano, Propileno, etc. Sin embargo su uso debe normarse, ya que por su naturaleza inflamable, puede ocasionar inconvenientes si se hacen malas prácticas, esto tanto para el procedimiento de carga de los equipos, como también para su posterior funcionamiento.

Lamentablemente en el país no se cuenta con una normativa que regule su uso, esto debido a que hasta en la actualidad, no se ha efectuado un estudio que permita demostrar que el uso de los refrigerantes HC's es apropiado, tanto en la operación de los equipos, como también en la seguridad en cuanto a su uso. Es por ello que por medio del presente estudio, se pretende hacer una sugerencia de elaboración de reglamento para el uso de los hidrocarburos en refrigeración, garantizando con ello que el procedimiento de reconversión de los equipos de refrigeración actuales, así como su posterior uso, se efectuara sin ningún tipo de percance.

2.2.1 SUGERENCIA PARA LA ELABORACIÓN DEL REGLAMENTO PARA EL USO DE REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.

1. Se deberá crear un ente rector que tendrá la función de ejecutar el programa para la disminución de sustancias agotadoras del ozono, así como también tendrá la obligación de normar el uso de los refrigerantes hidrocarburos. Dicha dependencia estará coordinada por el MARN, ya que es el ministerio encargado de los aspectos ambientales en el país, o también por la Dirección de Hidrocarburos y Minas del Ministerio de Economía. Esto según estime conveniente el estado.
2. Para efectos del reglamento, se deberán utilizar, en su última edición vigente, los códigos y normas que se consideren necesarios de instituciones relacionadas entorno al tema. Ejemplo: ASME (American Society of Mechanical Engineers, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), NFPA (National Fire Protection Association)
3. Será este mismo ente el encargado de certificar los equipos a los que se les aplicara la reconversión de uso de refrigerante fluorocarbonado a

hidrocarburo. También avalara el uso de equipo traído desde el extranjero, esto en caso de importarlos.

4. El personal encargado de desarrollar la reconversión de los equipos de refrigeración deberá capacitarse en torno a las sustancias agotadoras del ozono, de todos los aspectos involucrados en relación al uso de los hidrocarburos y de las técnicas de recuperación de refrigerantes. Luego de concluido el curso, se deberán entregar certificados y las respectivas credenciales a los participantes que aprueben el curso.

5. Antes de realizar una reconversión, instalación o mantenimiento de una unidad funcionando con refrigerante hidrocarburo, el técnico deberá estar debidamente identificado, presentando sus credenciales al dueño del equipo a tratar, recuperando el gas antes de efectuar cualquier operación.

6. Se deberá regular la importación de equipos de aire acondicionado automotriz, domiciliario o industrial, equipo de refrigeración domiciliario o industrial, bombas de calor, deshumidificadores, congeladores, enfriadores de agua, máquinas de fabricación de hielo o cualquier otro equipo que utilice refrigerante CFC o cualquier otra sustancia agotadora del ozono, presentada en el protocolo de Montreal.

7. Se deberá crear un registro de todas las personas naturales o jurídicas, que se encarguen de la importación de refrigerantes regulados por el protocolo de Montreal, así como también hidrocarburos destinados a la refrigeración (propano, butano, Isobutano, etc.). también deberá controlarse los equipos y/o elementos destinados a funcionar con HC's.

8. Para la disposición final de las sustancias señaladas en el numeral 4, los interesados deberán solicitar la autorización correspondiente a la entidad delegada por el gobierno en el primer apartado.

9. Los equipos que aun funcionen con los refrigerantes restringidos, deberán estar debidamente identificados, señalando que contienen sustancias que destruyen el ozono.
10. Los distribuidores de refrigerantes HC's deberán ser autorizados por el estado, con el objeto de cumplir la normativa del transporte y almacenamiento de los mismos.
11. Los establecimientos que vendan refrigerantes hidrocarburos localmente, deberán llevar un registro de cada una de las ventas en donde deberá especificarse:
 - La fecha de venta
 - El número de la certificación del comprador
 - Tipo de refrigerante vendido
 - Cantidad vendida
 - El uso para el cual fue vendido
12. El estado estará en su derecho de suspender permisos y sancionar a las personas y/o instituciones que no cumplan con las medidas requeridas para realizar cualquier practica en relación al uso de refrigerantes HC's.
13. En los talleres donde se efectúen los procedimientos de reconversión y en el lugar donde se contendrán los equipos de refrigeración, se deberá disponer de extintores del tipo de polvo seco.
14. Equipos funcionando con menos de 150 gramos de refrigerante hidrocarburo, podrán ubicarse en cualquier habitación (siempre y cuando no sea un sótano). Para cargas de refrigerantes mayores, se deberá hacer el cálculo de la cantidad máxima de refrigerante para la habitación que contendrá el equipo, utilizando la Ecuación 21.

Se deberán acatar las instrucciones giradas por el decreto legislativo N° 169, en el cual se especifica la LEY REGULADORA DEL DEPOSITO, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS DE PETRÓLEO, Publicado en el Diario Oficial N° 125, Tomo N° 360 del 08/07/03 con vigencia el 16/07/03.

Deberá consultarse el reglamento TECNICO CENTROAMERICANO para el TRANSPORTE TERRESTRE DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP) A GRANEL, Publicado en el Diario Oficial N° 236, Tomo N° 369 del 19/12/05 con vigencia el 01/06/06. Se deberá revisar el anexo 6 del presente reglamento.

2.3 PROPUESTA DEL PROCEDIMIENTO PARA LA RECONVERSIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN A HIDROCARBUROS

El eje principal de este estudio, es la reconversión de los sistemas de refrigeración que actualmente utilizan refrigerantes fluorocarbonados, ya que son los que más se utilizan en el mercado nacional, por esta razón se realizará el estudio orientado a la reconversión de los equipos de refrigeración, sustituyendo los refrigerantes fluorocarbonados por hidrocarburos, ya que estos presentan excelentes propiedades como refrigerantes.

Para ejecutar la reconversión de los equipos de refrigeración se utilizará la técnica de reemplazo directo, la cual consiste en sustituir los refrigerantes directamente del sistema, por otros que cumplan la función de refrigerar de manera similar de como lo hacen sus antecesores, es decir, deben ser refrigerantes que no exijan demasiados cambios al sistema, incrementando con ello los costos de operación.

El procedimiento que deberá seguirse para la ejecución de la reconversión se muestra a continuación.

1. Recuperar el refrigerante del sistema a convertir. Registrar el peso del refrigerante recuperado.
2. Barrido con Nitrógeno (limpieza)
3. Cambio de filtro secador
4. Prueba de hermeticidad y detección de fugas
5. Verificación de componentes eléctricos
6. Hacer vacío al sistema (evacuación)
7. Cargar el refrigerante HC, de acuerdo con las proporciones especificadas
8. Estabilizar el sistema
9. Sellar la conexión de carga

2.3.1 RECUPERACIÓN Y MANEJO DE REFRIGERANTES

Para poder efectuar la reconversión, primero se deberá recuperar el refrigerante, el cual se deberá eliminar del equipo, bajo las condiciones adecuadas, ya que lo que se pretende es una reducción significativa de los refrigerantes fluorocarbonados en el país. Jamás se deberán ventear los equipos al ambiente, ya que esto generaría graves daños a la atmósfera, lo cual es el principal problema que se quiere anular con la reconversión de los sistemas de refrigeración.

La recuperación de un refrigerante, se define como el procedimiento de extraerlo de un sistema con el fin de que este sea almacenado, reciclado, regenerado o transportado, posteriormente a la operación de recuperación. Las prácticas de recuperación implican la utilización de tres clases de material:

recipientes específicos, equipos de recuperación, materiales y demás herramientas necesarias para la aplicación del procedimiento.

Para el desarrollo de la operación de recuperación del refrigerante exige cumplir con los siguientes requerimientos:

- ✚ Extracción del refrigerante del equipo de refrigeración que se va a reconvertir.
- ✚ El refrigerante recuperado deberá almacenarse en un recipiente debidamente rotulado.
- ✚ Se deberá tener las herramientas necesarias para crear los accesos a las tuberías y conectar los recipientes recuperadores.

Debe aclararse que solamente los cilindros para recuperar gas están identificados para utilizar refrigerantes usados, es decir que no se debe utilizar cilindros diseñados para refrigerantes nuevos.



**FIGURA 35 CILINDRO DE RECUPERACIÓN
DEBIDAMENTE IDENTIFICADO**

Una consideración importante es que antes de utilizar un cilindro para recuperar refrigerante, se deben buscar en este posibles signos de daños, ya que por ningún motivo se deberán rellenar cilindros deteriorados, tampoco

deberán rellenarse ya caducados, es decir no se deberán utilizar cilindros con más de 5 años de uso.

Cuando se realice la extracción del refrigerante, se deberá registrar su peso, ya que esto permitirá principalmente conocer la carga de refrigerante con la cual el equipo frigorífico opera, para posteriormente cargar el equipo con el refrigerante HC, ya que se conoce su relación en peso.

Para realizar estas operaciones debe contarse con un juego de manómetros, los cuales permiten conocer las presiones a las que se encuentra el refrigerante, cuando se realice la carga, o en los casos de presurización, limpieza y vacío del sistema.

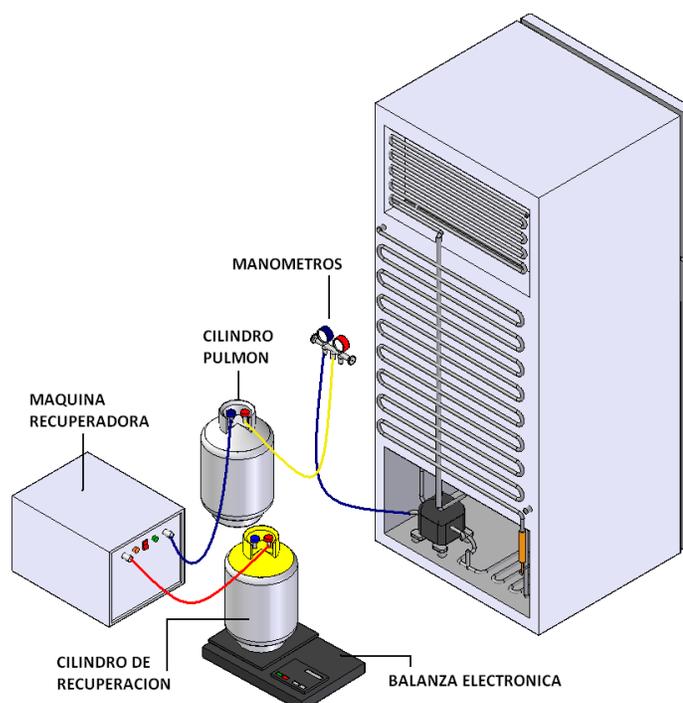


FIGURA 36 EQUIPO DE RECUPERACIÓN

En la FIGURA 36 muestra un equipo de refrigeración y la forma de colocar y conectar los elementos necesarios para realizar la recuperación del refrigerante.

2.3.2 BARRIDO CON NITRÓGENO

Es un Procedimiento empleado para retirar elementos extraños del interior de tuberías de refrigeración. El barrido se emplea en refrigeración para eliminar partículas sólidas. Como beneficio adicional retira altos contenidos de humedad presentes en las tuberías, las cuales se presentan cuando estas se conectan de forma inadecuada.

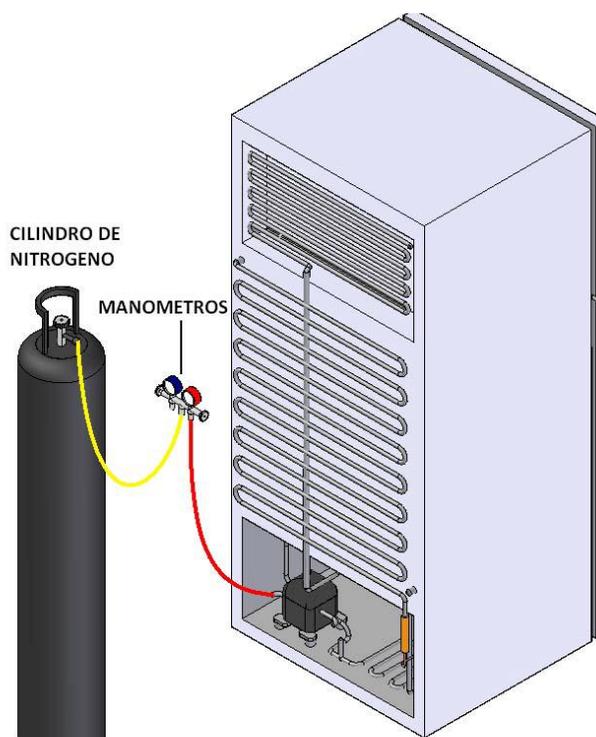


FIGURA 37 BARRIDO DEL SISTEMA CON NITRÓGENO

El proceso consiste básicamente en cargar el sistema con Nitrógeno, el cual se hace fluir por un extremo de la tubería del sistema y con ello permitir la eliminación de contaminantes, dejando el otro extremo de la tubería sin conectar, una práctica que se puede desarrollar para mejorar el barrido es obturar con la mano intermitentemente el extremo libre de la tubería para acelerar la salida de los residuos. Como referencia, en sistemas domésticos se

ajusta la presión de salida en el regulador de nitrógeno máximo a 120 psig (827.4 kPa).

2.3.3 CAMBIO DEL FILTRO SECADOR

Un filtro secador cumple con dos funciones primordiales. La primera es filtrar o detener cualquier impureza que se haya introducido al sistema con el fin de evitar que el tubo capilar sea obstruido, de ahí, que esté instalado antes de este dispositivo. Para desarrollar con esta función, el filtro está provisto de una malla a la entrada en forma cilíndrica y otra malla a la salida en forma circular, esto se observa en la FIGURA 38.



FIGURA 38 ESTRUCTURA INTERNA DEL FILTRO

La otra gran función de este dispositivo es remover cualquier remanente de humedad del sistema. Su instalación en la línea del líquido, después del condensador hace que el material desecante actúe rápidamente absorbiendo la humedad que se haya quedado dentro del sistema siempre y cuando la cantidad no haya sobrepasado el valor máximo de humedad que la sustancia desecante es capaz de retener.

2.3.4 PRUEBAS DE HERMETICIDAD Y DETECCIÓN DE FUGAS.

Para verificar la hermeticidad del sistema, este deberá presurizarse, el cual es un procedimiento empleado para verificar que no existan fugas en el sistema, también llamada prueba de estanqueidad.

El sistema se carga con un gas inerte (nitrógeno en este caso) que permita alcanzar un valor de presión estipulado por norma, por el fabricante o diseñador. Después de un lapso de tiempo determinado, se verifica que la lectura en el manómetro de salida del regulador de nitrógeno no haya disminuido, de lo contrario, existe una fuga en la tubería que debe ser reparada.

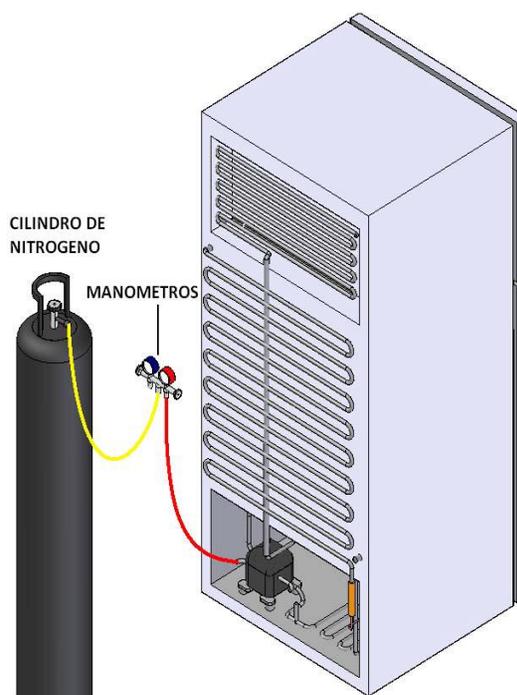


FIGURA 39 CONEXIÓN ADECUADA DE LAS MANGUERAS DEL MANÓMETRO

El procedimiento al igual que el barrido se efectúa haciendo fluir el nitrógeno por las tuberías, hasta que el sistema alcance un valor de presión establecido, el cual estará comprendido entre 120 y 150 psig.

Un ejemplo de presurización de un sistema se enuncia a continuación:

- ✚ Conecte la manguera de color amarillo del árbol de manómetros al regulador del cilindro con nitrógeno, acople la manguera de color rojo al tubo de

servicio en el compresor, luego verifique un buen ajuste en las conexiones para evitar fugas

✚ Abra la válvula del regulador hasta una presión máxima de 120 psig, de esta manera ya está presurizado el sistema.

✚ Con agua y jabón genere espuma, posteriormente colóquela sobre todas las conexiones realizadas, para verificar que estén en perfecto estado. Si en alguna de las conexiones la espuma empieza a formar burbujas quiere decir que existe una fuga, por lo tanto se debe abrir la conexión afectada, corregir el problema y conectar nuevamente.

Algunos fabricantes de equipos de refrigeración y aire acondicionado recomiendan presurizar el sistema en dos etapas, la primera se deberá mantener durante pocos minutos para encontrar las fugas más importantes y una segunda a mayor presión, la cual se deberá mantener durante 24 horas, con ello se lograra encontrar las fugas más pequeñas.

2.3.5 VERIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS

Para evitar cualquier accidente, se deberá realizar una verificación rigurosa de los componentes eléctricos, esto con la finalidad de asegurar que estos no se conviertan en una posible fuente de ignición, sobre todo los que estén localizados más cerca del compresor y los sitios de carga de HC.

Dichos componentes deberán aislarse en cajas herméticas, para que en caso de la generación de cualquier chispa, esta no pueda propagarse, evitando con ello que se produzca cualquier accidente.

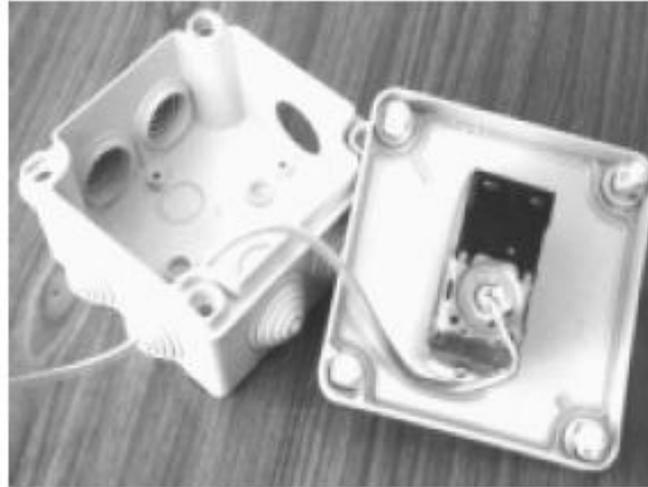


FIGURA 40. AISLAMIENTO DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS.

El termostato es el elemento con el que debe tenerse un especial cuidado, ya que por estar dentro del equipo de refrigeración, este contiene poco aire, es decir nula ventilación, por lo que una posible fuga en el evaporador, combinada con una chispa que este pueda generar, podría significar la combustión del propano fugado. Una buena alternativa sería colocar este componente fuera del espacio refrigerado, lo que anularía este peligro.

2.3.6 VACÍO DEL SISTEMA

El vacío es una operación que se realiza para extraer los gases no condensables y la humedad adsorbida por el sistema al momento de estar abierto. La idea fundamental es lograr el buen funcionamiento de todos los componentes y la eficiencia del filtro secador. Esta operación consiste en bajar la presión del sistema a tal punto que la temperatura de ebullición del agua sea muy inferior a la del ambiente, utilizando un equipo fabricado para este fin. De esta manera el agua se evapora y es extraída del sistema, ya que si se deja humedad en el sistema al combinarse esta con el refrigerante producen ácidos, los cuales producen corrosión en el sistema.

El vacío no deberá ser efectuado, tomando como referencia el tiempo, ya que con esto no se garantizara que se alcancen los valores deseados de este. Los factores que determinarán el tiempo en que se deberá efectuar el vacío son los siguientes:

- Capacidad del sistema
- Humedad presente en el circuito frigorífico
- Temperatura
- Restricciones internas y externas
- Capacidad de la bomba

Para medir el vacío se utilizara un Vacuómetro, para ello la manguera de alta se deberá conectar a este, el cual indicara cuando se alcance el valor del vacío deseado. El vacío se deberá efectuar en valores comprendidos entre 22 y 29 pulgadas de mercurio en el lado de baja y 500 micrones en el lado de alta. Con estas presiones de vacío alcanzadas se garantiza que toda la humedad del sistema ha sido sustraída.

Luego de conectar el Vacuómetro a la manguera de alta del juego de manómetros, pueden presentarse los siguientes casos:

✚ Si el Vacuómetro muestra un aumento en la presión y se detiene en un nivel de vacío no deseado, es posible que aún persista humedad en el sistema, al existir pequeñas gotas que estas se evaporan, generando un aumento en la presión interna. En este caso se deberá continuar con la operación de vacío por más tiempo y posteriormente se deberá repetir la medición.

✚ Si el Vacuómetro muestra un acelerado y constante aumento de la presión es señal que existen fugas en el sistema. Tenga en cuenta que el

problema puede existir en las conexiones realizadas para el vacío. Para este caso se deberán localizar las fugas y posteriormente se deberán reparar

✚ Si la medición en el Vacuómetro no sufre modificaciones con el tiempo, el sistema estará listo para ser cargado con refrigerante.

2.5.7 CARGA DE REFRIGERANTE

Después de realizadas las actividades antes señaladas, se está en disposición de realizar la carga del refrigerante, pudiendo desarrollarse por diferentes métodos, los cuales deberán garantizar que el equipo tendrá la cantidad de refrigerante necesaria para que este opere de forma satisfactoria

Recordando los apartados anteriores, para poder cargar correctamente un sistema de refrigeración se requiere:

- Un juego de manómetros.
- Un juego de mangueras flexibles
- Un cilindro refrigerante
- Un termómetro de contacto.
- Realizar un vacío correcto a la instalación utilizando una bomba de vacío.

CARGA DE REFRIGERANTE POR PESO

Para efectuar la carga de refrigerante por este método, se deberá buscar la relación de los pesos del refrigerante hidrocarburo con el refrigerante que operaba originalmente el equipo de refrigeración. Con la relación conocida, se procederá a cargar el equipo con el peso correspondiente de refrigerante hidrocarburo.

El procedimiento se realizara con los siguientes elementos:

- Juego de manómetros

- Cilindro de refrigerante hidrocarburo
- Báscula

La carga se podrá hacer tanto en la línea de baja como de alta presión, pero si la carga se realiza por este segundo método, se deberá tener el cuidado de tener el equipo de refrigeración apagado, ya que la presión generada podría ocasionar que el cilindro explote y producir un grave accidente en la persona que realice el cambio de refrigerante. Debe aclararse que para realizar la carga en fase de vapor, el cilindro del refrigerante deberá colocarse boca arriba, mientras que para realizarlo en forma líquida, el cilindro deberá invertirse.

POR CONSUMO DE ENERGÍA

Este método de carga de refrigerante es muy práctico en su ejecución, sin embargo, resulta un método impreciso, ya que no utiliza equipos de medición de alta sensibilidad. El método consiste primordialmente en medir la corriente de paso al compresor, por medio de un voltiamperímetro, la cual ira variando con la carga de refrigerante.

El fabricante del equipo, en la hoja de especificaciones del equipo de refrigeración brinda la corriente de operación del equipo, por lo tanto se ira introduciendo el refrigerante hasta que la corriente del compresor se acerque a este valor de corriente.

Debe aclararse que este tipo de carga deberá realizarse en el lado de baja, ya que como se mencionó anteriormente, las presiones en el lado de líquido son muy grandes, lo que fácilmente puede producir un accidente, por eso debe tenerse especial cuidado de no realizarlo en el lado de alta.



FIGURA 41. MEDICIÓN DE CORRIENTE EN LA ENTRADA DEL COMPRESOR.

CARGA POR PRESIÓN DE SUCCIÓN.

Este método es muy utilizado por los técnicos de refrigeración, ya que para realizar la carga, basta con conocer la temperatura a la cual se desea que opere el refrigerante; y llevarlo a la presión de operación correspondiente a dicha temperatura, es decir, llevar el sistema a operación en sus características normales de funcionamiento.

Debe señalarse que este método de carga es bastante práctico ya que al igual que el método por consumo, el sistema se llevara a los valores para los cuales este ha sido diseñado. Esta metodología será descrita a continuación:

1. Conecte la manguera de servicio del juego de manómetros a la válvula de líquido del refrigerante.
2. Presurizar la manguera de servicio del manifold y posteriormente purgar el manómetro, luego cerrar la válvula de baja y conectar con la carga del compresor.
3. Echar andar el compresor
4. Abrir un poco la válvula del manómetro de baja del juego. De esta forma saldrá líquido del cilindro, y se expandirá en la válvula del juego de manómetros.
5. Dejar que la presión del manómetro llegue a la presión de operación del equipo de refrigeración.
6. Si se observa que la manguera se escarcha, que el compresor cambia su ruido o que el aceite del compresor hace espuma, se deberá cerrar inmediatamente la válvula, luego esperar a que estos síntomas cambien y posteriormente continuar con el paso 5.
7. Comprobar en el visor que el sistema no tiene formación de burbujas
8. Cerrar la válvula del cilindro de refrigerante, así se vaciaran las mangueras del manómetro (evitando las fugas, que son un potencial peligro), luego cerrar la válvula de carga del lado de baja y retirar las mangueras de cada una de las válvulas.
9. El proceso de carga del refrigerante ha concluido.

Un esquema que facilita de mejor forma como será la disposición del manómetro para realizar la carga del propano, es mostrado en FIGURA 42, lo cual es de gran ayuda para realizar la conexión de manera correcta.

Cabe hacer la aclaración, que los métodos de carga de refrigerante que se han expuesto hasta el momento son aplicables para los refrigerantes fluorocarbonados, sin embargo los procedimientos también son aplicables para los hidrocarburos, ya que estos también están en una mezcla liquido-vapor dentro del cilindro contenedor, por lo tanto personal que esté capacitado para realizar cargas de refrigerantes convencionales no tendrá ningún inconveniente al realizarla con el refrigerante hidrocarburo.

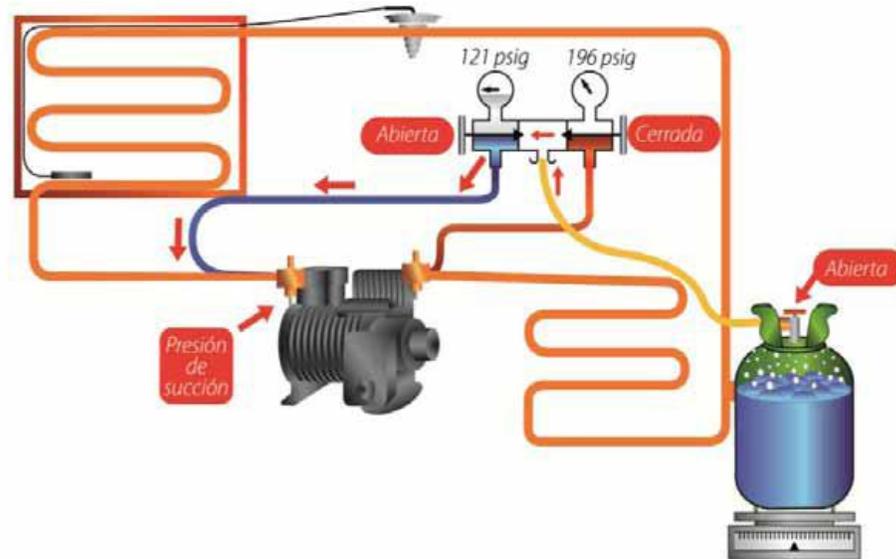


FIGURA 42. ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL MANÓMETRO PARA REALIZAR LA CARGA POR EL PARÁMETRO PRESIÓN.

Al cumplir con los pasos y procedimientos que se han detallado, como se ha indicado, se garantizará el éxito procedimiento de reconversión. Debe señalarse que dichas actividades forman parte de las buenas prácticas en refrigeración, las cuales además de asegurar que la aplicación del procedimiento de reconversión será exitoso, son vitales para la protección del medio ambiente, ya que el manejo del refrigerante se realizara de manera responsable, evitando con ello su liberación a la atmosfera, también permitirán

la optimización de los recursos, reduciendo a su vez los costos de mantenimiento y funcionamiento de los equipos reconvertidos.

2.3.8 FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE RECONVERSIÓN.

Con el objeto de garantizar que el proceso de reconversión tendrá éxito, se propone el flujograma que registrará dicho procedimiento. Es de aclarar que antes que se dé inicio al proceso de reconversión debe efectuar las siguientes valoraciones:

- La ejecución de la reconversión de los equipos de refrigeración deberá ser ejecutada por dos personas como mínimo, las que deberán estar certificadas para el uso de HC's como refrigerantes, las cuales a su vez deberán conocer las recomendaciones del fabricante del equipo, los requerimientos y posibles peligros del uso del refrigerante
- Verificar que se cuente con los debidos elementos de protección personal: lentes, guantes, zapatos industriales, camisa de manga larga, etc.
- Los trabajos se deberán ejecutar en un lugar con suficiente ventilación.
- Por ningún motivo se deberá fumar en el área de trabajo.
- Evaluar el equipo de trabajo y las herramientas con las que se dispone para la ejecución del procedimiento de reconversión
- Verificar las condiciones que se tienen en el lugar del desarrollo del trabajo, la zona de trabajo deberá estar limpia, libre de material o equipos que sean innecesarios en el procedimiento, ya que estos pueden causar cualquier tipo de inconveniente.
- Verificar que no existan fuentes probables de chispa, como por ejemplo malas conexiones eléctricas.
- Contar con un extintor de polvo seco.

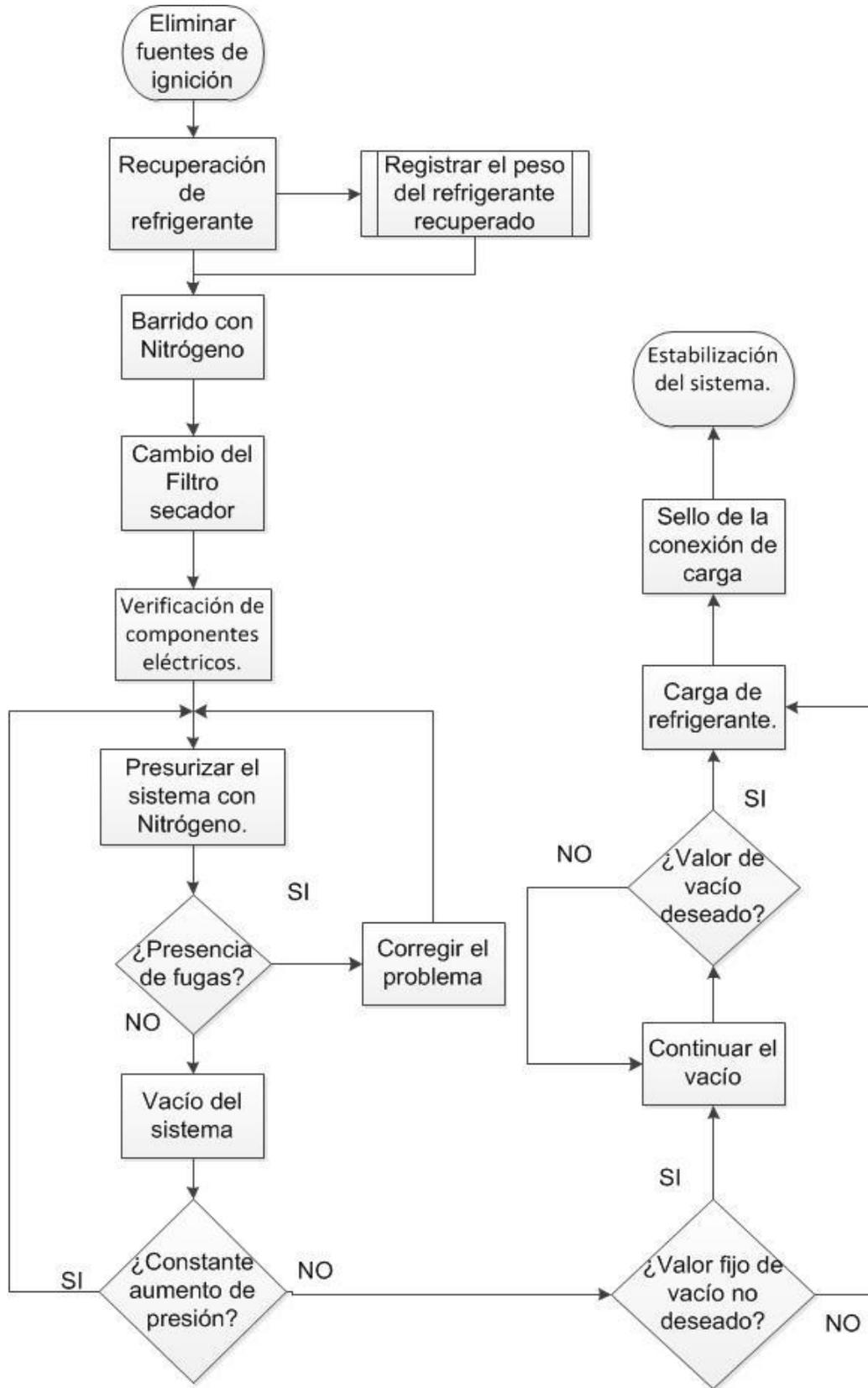


FIGURA 43. FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE RECONVERSIÓN

3.0 DISEÑO Y/O ADAPTACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN PARA USO DE REFRIGERANTE HIDROCARBURO

El principal objetivo del desarrollo del proyecto es la utilización del Propano (R-290), para lo cual, se deberá caracterizar el equipo de refrigeración al que se le practicara la sustitución del refrigerante, lo que dará a conocer sus parámetros de operación, lo que permitirá establecer si sus componentes deben rediseñarse o si podrán operar sin inconvenientes a la hora de trabajar con el nuevo refrigerante. Cabe destacar que el equipo al que se le efectuara la reconversión operaba originalmente con refrigerante R-12.

3.1 DISEÑO TERMODINÁMICO

Para el desarrollo del diseño termodinámico del equipo, se deben realizar algunas consideraciones, las que permitirán la simplificación del modelo.

HIPÓTESIS DEL MODELO TERMODINÁMICO

- El modelo a utilizar en el diseño termodinámico del sistema será el ciclo de refrigeración ideal
- El sistema opera en régimen estacionario
- Los cambios de energía potencial y cinética se consideraran despreciables en el desarrollo del ciclo
- No se considerara la transferencia de calor (ganancias o pérdidas) en la tubería y demás accesorios
- La expansión en el tubo capilar se considera isoentálpica
- No existe variación de temperatura del refrigerante en el evaporador

3.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL CICLO UTILIZANDO R-12

Para poder efectuar el diseño termodinámico del ciclo, este deberá caracterizarse, lo que permitirá conocer las condiciones de operación originales del equipo de refrigeración, y a partir de las mismas, desarrollar el diseño del equipo operando con el refrigerante R-290.

A partir de mediciones de presión, temperatura y corriente de operación, se logró medir las condiciones de funcionamiento del equipo de refrigeración a utiliza, dichos valores se muestran en la TABLA 9. Para poder medir presiones y temperaturas, se hizo uso de válvulas de acceso a las líneas de refrigerante de baja y alta presión, la disposición de las mismas se muestra en la FIGURA 44.



FIGURA 44. POSICION DE LAS VÁLVULAS DE ACCESO DE BAJA Y ALTA PRESIÓN

Con los datos medidos y los diagramas termodinámicos correspondientes al ciclo de refrigeración por compresión de vapor, se procederá a encontrar las propiedades del refrigerante en los 4 principales puntos del ciclo.

TABLA 9. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN

	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN ABSOLUTA (kPa)
Lado de baja presión	-31.667	93.36
Lado de alta presión	44.44	1068
Corriente nominal	1.4 Amperios	

Los valores de presión y temperatura que se obtuvieron productos de las mediciones, los que además se proporcionan en la TABLA 9, permiten encontrar las propiedades físicas del refrigerante en los 4 principales puntos del diagrama termodinámico, lo que permitirá definir en su totalidad el ciclo de refrigeración. Para encontrar el valor de dichos parámetros, se hará uso de las tablas de la ASHRAE¹², las que a su vez proporcionar los valores de diferentes propiedades físicas de los refrigerantes, incluidos el R-12 y el R-290, los cuales son de principal interés para el desarrollo de la investigación.

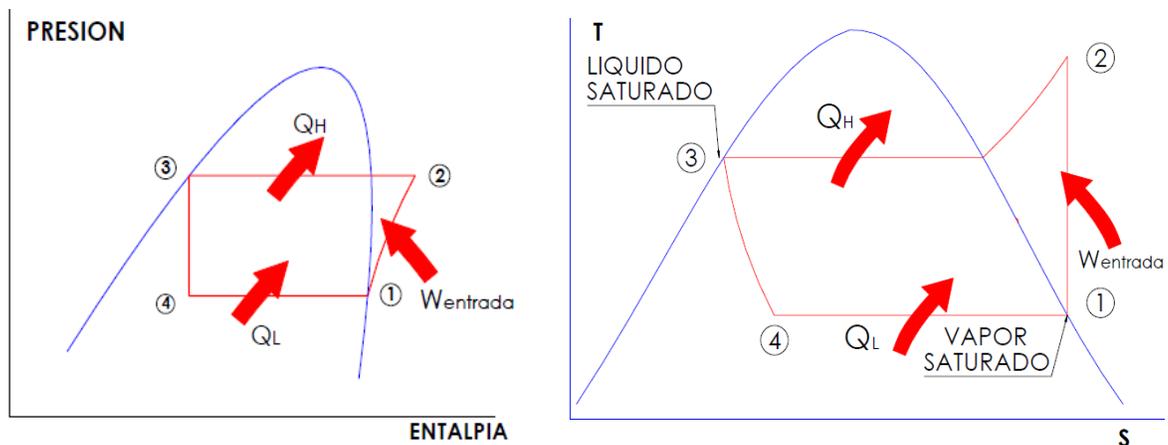


FIGURA 45. DIAGRAMAS PH Y TS DE UN CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

¹² ASHRAE; Fundamentals Handbook 2009; página.: 30.2

Se debe mencionar que para encontrar todos los valores de las propiedades termodinámicas para los principales puntos del ciclo de refrigeración, deberán tomarse las siguientes consideraciones:

- Punto 1

Dado que se conoce la temperatura y presión del punto, y tomando la consideración de que el fluido se encuentra en su estado de saturación, puede encontrarse el valor de la entalpía y entropía del mismo. Los valores se muestran a continuación:

$$h_1 = 173.4 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 0.7186 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

- Punto 2

De los datos técnicos del compresor, brindados por la compañía que los distribuye, se puede observar que este tiene una eficiencia estándar¹³, la cual está comprendida entre el intervalo de 80% y 90%, por lo que se optó por tomar el valor medio. Este valor permitirá encontrar las propiedades del refrigerante a la salida del mismo. La eficiencia isentrópica se define de la siguiente forma¹⁴:

$$\eta_{II} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde h_{2s} se calcula con la entropía del punto 1 y presión del punto 2, teniendo un valor de $h_{2s} = 216.8 \text{ kJ/kg}$. Con este dato y la ecuación anterior, se encuentra que el valor real de entalpía es de $h_2 = 224.5 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, además se

¹³ (Embraco, 2000)

¹⁴ (BAEHR, 1965)

puede encontrar el valor de entropía a la salidas del compresor, el cual tiene un valor de $s_2 = 0.7413 \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$.

- Punto 3

Este punto define la salida del condensador, en el cual se asumirá que se encuentra en líquido saturado, y conociendo su presión y temperatura, permite conocer los valores de entalpia y entropía del mismo.

$$h_3 = 79.08 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 0.2857 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{K}$$

- Punto 4

Se considera que el proceso de expansión del refrigerante se efectúa de forma aproximada como isoentálpico, por lo que en la entrada de evaporador, con la temperatura de evaporación, correspondiente a la presión de 93.36 kPa, se tiene que la entropía de dicho punto es de $s_4 = 0.3279 \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$

Con las propiedades ya definidas, se procede a presentarlas en la siguiente tabla:

TABLA 10 CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACION CON R-12

PUNTO	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg°C)
1	-31.67	93.36	173.4	0.7186
2	69.89	1069	224.5	0.7413
3	44.44	1069	79.12	0.2859
4	-31.67	93.36	79.12	0.3381

Con estos valores, el ciclo de refrigeración queda totalmente definido cuando el equipo opera con el refrigerante R-12, para el cual, se muestra su diagrama Presión - Entalpía (Ph), el que se presenta en el ANEXO 2.

3.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL CICLO UTILIZANDO R-290

Uno de los principales aspectos que deben tomarse en cuenta, para cuando el equipo opere con R-290, es que el refrigerante debe ser capaz de extraer la misma cantidad de calor del espacio a refrigerar, manteniendo en el mismo, una temperatura similar a la que tenía cuando operaba con R-12, con ello se garantizara que el equipo operara a condiciones similares, cumpliendo con el requerimiento para el que fue hecho.

- Punto 1

Ya que se desea tener la misma temperatura de evaporación, se trabajara a su correspondiente presión de saturación, además con la consideración que el fluido ingresara al compresor como vapor saturado, con esto se presentan los siguientes resultados: $T_1 = -31.67\text{ °C}$, $h_1 = 231.1\text{ kJ/kg}$ y $s_1 = 0.9577\text{ kJ/kg} \cdot K$

- Punto 2

Para definir este punto se tomaran las mismas consideraciones que se usaron para definir el punto a la salida del compresor cuando este opera con R-12, por ello tomando la Ecuación 24:

$$\eta_{II} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1}$$

Recordando que se ha elegido una eficiencia del compresor de 0.85, además para encontrar la entalpia considerando una compresión isentrópica

con $s_2 = s_1 = 0.9577 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ y tomando la presión de salida del compresor de 1515 kPa , correspondiente a una temperatura de saturación de $44.44 \text{ }^\circ\text{C}$, se encuentra que h_{2s} tiene un valor de 645.4 kJ/kg , y a partir de la relación de la eficiencia del compresor, se tendrá una entalpia de 664.3 kJ/kg , con lo cual se podrá encontrar los valores de temperatura y entropía reales a la salida del compresor, los que tendrán los siguientes valores: $T_2 = 64.74 \text{ }^\circ\text{C}$ y $s_2 = 2.479 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

- Punto 3

Este punto corresponde a la salida del condensador, donde se considerara que el refrigerante se encuentra como liquido saturado y con el valor de su presión y temperatura de saturación (1515 kPa y $44.44 \text{ }^\circ\text{C}$) podrá encontrarse el valor de su entalpia ($h_3 = 320.90 \text{ kJ/kg}$) y entropía ($s_3 = 1.402 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$)

- Punto 4

Este es el correspondiente a la salida del dispositivo de expansión, y recordando que en este punto el refrigerante sufre un proceso de expansión isoentálpico ($h_3 = h_4$) y con la presión de baja conocida, se puede encontrar el valor de entropía de $s_4 = 1.522 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

Ahora que ya se han definido las propiedades de cada uno de los principales puntos del ciclo, se procede a resumirlos en la tabla siguiente:

TABLA 11. CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN UTILIZANDO REFRIGERANTE R-290

PUNTO	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg°C)
1	-31.67	157	538.2	2.422
2	64.74	1515	664.3	2.479
3	44.44	1515	320.9	1.402
4	-31.67	157	320.9	1.522

El diagrama presión entalpía correspondiente al ciclo se presenta en el ANEXO 3.

3.2 COMPARACIÓN TEÓRICA DE OPERACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN QUE UTILIZAN REFRIGERANTES FLUOROCARBONADOS Y REFRIGERANTES HIDROCARBUROS

Ahora que el ciclo de refrigeración para el R-12 y el R-290 está caracterizado, se está en la capacidad de encontrar la transferencia de energía en forma de calor y trabajo de los mismos, lo que permitirá efectuar una comparación entre el R-12 y el refrigerante R-290, el cual ha sido seleccionado debido a que en el mercado nacional se encuentra con mayor facilidad (comparado con otros refrigerantes naturales como el Isobutano, Propileno, etc. Esto permitirá bajar los costos de la reconversión, evitando así mismo cualquier clase de contratiempo debido a su importación y/o comercialización.

Es de mencionar que para poder comparar el funcionamiento, los ciclos de refrigeración operando con R-12 y R-290, se deberán seleccionar diferentes parámetros, los cuales se definen como sigue:

- Tasa de calor absorbido por el evaporador. (Capacidad frigorífica)
- Flujo másico de refrigerante.
- Diferencia entre la presión alta y presión baja del sistema.

Para la evaluación de cada uno de los puntos expuestos, es necesario auxiliarse de las características y datos del equipo de refrigeración al que se le practicará la reconversión, del que se pudo conocer la ficha técnica del compresor, el cual corresponde a la marca Embraco, modelo PW4.5K9¹⁵, en la tabla siguiente se muestran las características técnicas del mismo.

TABLA 12. CARACTERISTICAS TECNICAS DEL COMPRESOR PW4.5K9

CARACTERISTICAS BASICAS	
Modelo	PW4.5K9
Aplicación	Baja presión de retorno (evaporación)
Referencia comercial	1/8 Hp
Capacidad frigorífica	380 Btu/h
Desplazamiento	4.5 cm ³
Torque máximo	9 N.m
Frecuencia	60 Hz
Refrigerante	R – 12
Corriente de operación	1.4 A
Voltaje	121 V

¹⁵ (Embraco, 2000), Página 5.

CAPACIDAD FRIGORÍFICA

A partir de las características del compresor se observa que la capacidad frigorífica, o la capacidad de absorción de calor en el evaporador Q_L para la cual está diseñado el compresor es de 380 Btu/h , equivalente a 0.1493 Hp ó 0.1114 kW .

Ya que la capacidad frigorífica está dada por las características técnicas del compresor, se deberá caracterizar el ciclo de refrigeración a partir de la misma. La ecuación que la expresa es la siguiente¹⁶:

$$Q_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad \text{Ecuación 25}$$

En la sección anterior se definieron los principales puntos del ciclo de refrigeración, tanto para R-12 como para el R-290, a partir de los cuales se puede encontrar el flujo de refrigerante para ambos casos, lo que permitirá compararlos.

$$\dot{m}_{R12} = \frac{0.1114}{173.4 - 79.16} = 0.001182 \text{ kg/s} = 4.2537 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{R290} = \frac{0.1114}{538.2 - 320.9} = 0.0005127 \text{ kg/s} = 1.8456 \text{ kg/h}$$

Al comparar los flujos de refrigerante para ambos casos se puede notar que el flujo de refrigerante al usar R-290 disminuye notablemente que para el caso del R-12, la relación de flujos de ambos refrigerantes se calcula como sigue:

$$\%relacion = \dot{m}_{R290}/\dot{m}_{R12} = 1.8456/4.2537$$

$$\%relacion = 43.4 \%$$

¹⁶ (BAEHR, 1965)

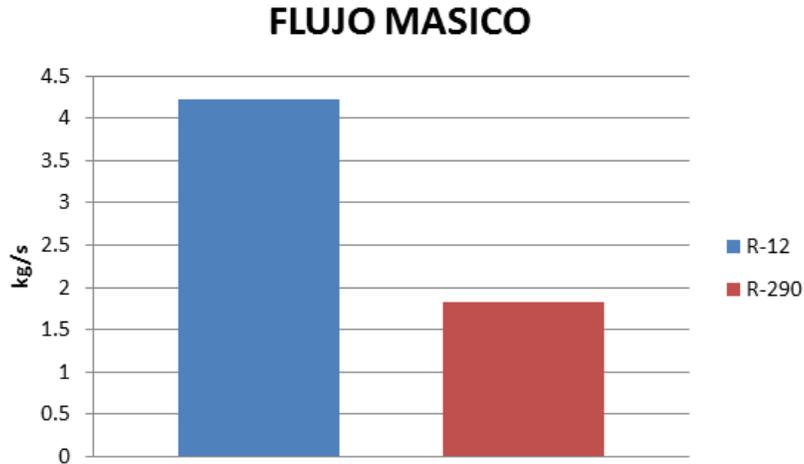


GRÁFICO 1. COMPARACIÓN DE LOS FLUJOS MÁSICOS PARA R-12 Y R-290.

Puede notarse que al usar R-290, el flujo se disminuye en un 56.61%, el GRÁFICO 1 muestra de forma esquematizada dicha relación. Es importante señalar que la carga de refrigerante propano deberá realizarse tomando como referencia la relación de anterior. De manera más explícita, la carga de propano deberá ser la que se obtenga del cálculo de la Ecuación 26:

$$m_{R290} = 0.434 * m_{R12} \quad \text{Ecuación 26}$$

DIFERENCIA ENTRE LA PRESIÓN ALTA Y PRESIÓN BAJA DEL SISTEMA.

La diferencia de presiones permitirá posteriormente, verificar si el compresor podrá trabajar con el propano, ya que este posee un rango de presiones establecido y al sufrir un cambio en el refrigerante, dicho rango cambiara.

$$\frac{\Delta P_{R290}}{\Delta P_{R12}} = \frac{1515 - 157}{1069 - 93.36} = 139.20\%$$

Puede observarse que el compresor deberá elevar la presión del propano en un 39.20% más que para el caso de usar R-12, lo que da como resultado un aumento de 382.5 kPa, que se traduce como sobre carga para el compresor.



GRÁFICO 2. COMPARACIÓN DEL DELTA DE PRESION REQUERIDO PARA AMBOS REFRIGERANTES

3.2.1 ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO REFRIGERADOR.

En esta sección se procederá a efectuar un análisis de los principales elementos que conforman el ciclo de refrigeración, el cual podrá validar o refutar el uso de los mismos cuando operen con el refrigerante sustituto.

- COMPRESOR

A partir del análisis de la diferencia entre las presiones de alta y baja, puede observarse que el compresor, cuando opere con R-290, deberá elevar la presión del refrigerante en un 39.20% más que si lo efectuase con R-12, es decir se gastara más energía por kg de refrigerante comprimido para el refrigerante sustituto.

La ecuación termodinámica que rige el compresor está dada por la siguiente relación¹⁷:

$$W = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad \text{Ecuación 27}$$

A partir de la TABLA 10 y la TABLA 11, se obtienen los valores de trabajo del compresor para los dos refrigerantes en cuestión:

$$W_{R12} = \dot{m}_{R12}(h_2 - h_1) = 0.001181(224.5 - 173.4) = 0.06035 \text{ kW}$$

$$W_{R290} = \dot{m}_{R290}(h_2 - h_1) = 0.0005125 * (664.3 - 538.2) = 0.06459 \text{ kW}$$

Los límites de operación del compresor son los mismos, para lo cual se puede observar que hay un aumento del 7 % en el trabajo necesario para comprimir el R-290 con respecto al R-12, significando con ello que el compresor podrá utilizarse para trabajar con propano.

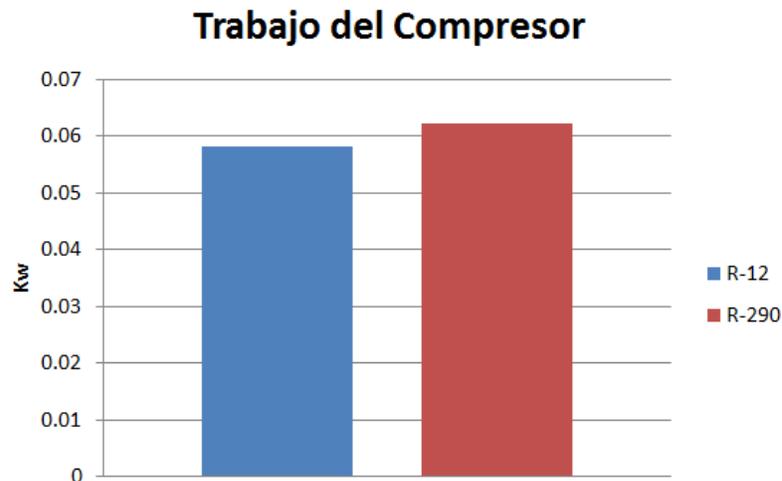


GRÁFICO 3. COMPARATIVA DEL TRABAJO A REALIZAR POR EL COMPRESOR PARA AMBOS REFRIGERANTES

¹⁷ (BAEHR, 1965)

También se puede hacer una comparación del Coeficiente de Operación (COP) del equipo utilizando ambos refrigerantes, esto a partir del GRÁFICO 4. Puede observarse que hay una reducción del 14.3%.

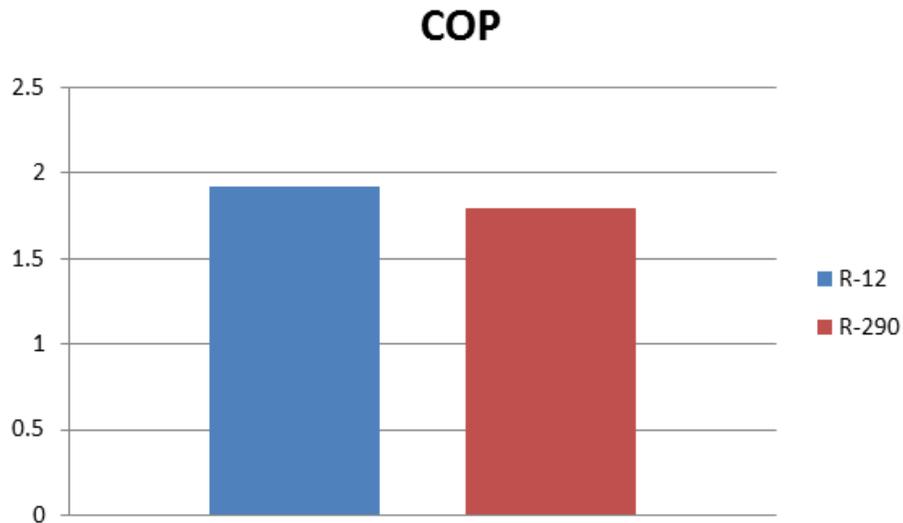


GRÁFICO 4. COMPARATIVA DEL COEFICIENTE DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

- CONDENSADOR

La capacidad de un condensador es de acuerdo a la velocidad de rechazo de calor Q_{rej} (W), la que se define como el total del calor removido por el condensador durante el proceso de súper calentamiento, condensación y subenfriamiento del refrigerante en el condensador. Está representado por¹⁸:

$$Q_H = \dot{m} * (h_2 - h_3) \quad \text{Ecuación 28}$$

Al introducir los valores correspondientes para ambos refrigerantes, el valor del calor de rechazo para los dos casos es el siguiente:

¹⁸ (BAEHR, 1965)

$$Q_{HR-12} = 0.001181 * (224.5 - 79.12) = 0.1717 \text{ kW}$$

$$Q_{HR-290} = 0.0005125 * (664.3 - 320.9) = 0.176 \text{ kW}$$

Puede verse que hay un incremento del 2.5 % en el calor que debe rechazarse cuando se utiliza refrigerante R-290, sin embargo por ser una variación muy pequeña, puede establecerse que el condensador no requerirá ser sustituido.

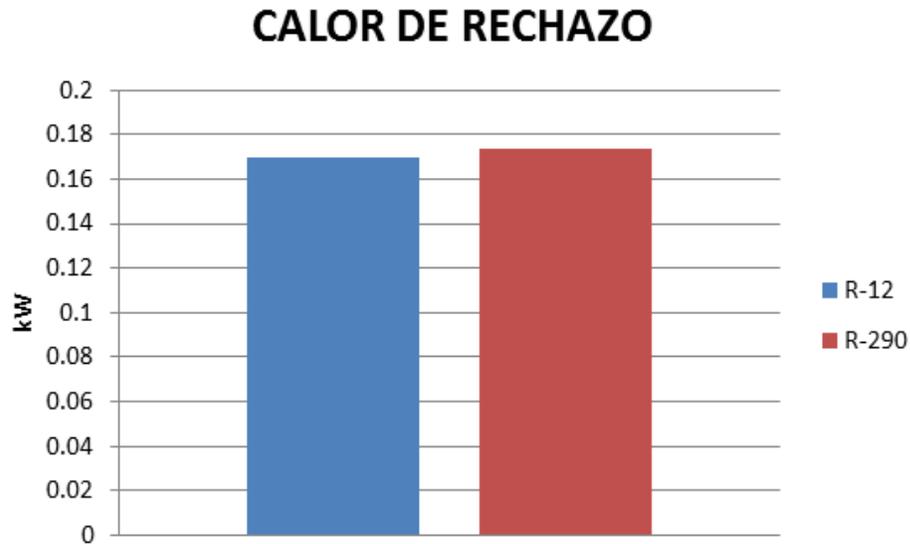


GRÁFICO 5. COMPARATIVA DEL CALOR RECHAZADO PARA AMBOS REFRIGERANTES

Otra alternativa para el cálculo del calor de rechazo, es tomando la consideración de que el compresor sea del tipo hermético¹⁹ (tal es el caso del equipo de refrigeración que se utilizara en este proyecto), en donde el calor liberado por el compresor es absorbido por el refrigerante. Si las ganancias y pérdidas de calor del aire del ambiente en el evaporador, condensador, tubería de succión y descarga son ignoradas, el calor a disipar por el condensador viene dado por:

¹⁹ (WANG, 2000), Página 10.21

$$Q_H = \frac{Q_L + 0.7475P_{comp}}{\eta_{comp}}$$

Ecuación 29

Dónde:

P_{comp} = potencia del compresor, hp

η_{comp} = eficiencia del compresor hermético

Donde la potencia del compresor es de 1/8 hp para ambos casos, ya que se ha demostrado que este puede conservarse, y recordando además que este mismo está diseñado para una capacidad de refrigeración ya establecida, tomando además una eficiencia de $\eta_{comp} = 0.85$, el calor de rechazo para el uso de los dos refrigerantes en cuestión, tiene un valor de:

$$Q_H = \frac{0.1114 + 0.7475(1/8)}{0.85} = 0.241 \text{ kW}$$

Este último valor obtenido es más cercano al calor que debe rechazarse, ya que incluye el calor absorbido por el refrigerante en el compresor.

- EVAPORADOR

Se ha definido que el evaporador deberá tener una capacidad preestablecida de extracción de calor (la cual está restringida por el compresor), la que puede obtenerse de los datos técnicos del compresor, que se proporcionan en la TABLA 12.

A partir de esa consideración puede concluirse que no se necesita cambiar este intercambiador de calor, ya que extraerá la misma cantidad de calor independientemente del tipo de refrigerante que utilice.

- **FILTRO SECADOR**

Este elemento deberá cambiarse, ya que el sistema de refrigeración estuvo operando por un tiempo desconocido, en donde cabe la gran posibilidad que el filtro este saturado de suciedad, lo que impedirá que desarrolle satisfactoriamente la labor de filtrado del refrigerante.

Para el caso del propano, los filtros secadores que se utilizan para el refrigerante R-134a podrán utilizarse, para el que se recomienda un material con poros de 3 Å por ejemplo, UOP XH 7, XH 9 o XH 11, Grace 594, CECA siliporite H3R²⁰.

3.2.2 DISEÑO DEL TUBO CAPILAR

Uno de los métodos para la selección de los tubos capilares es mediante el método de prueba y error, sin embargo este método es empírico, lo cual puede conducir a una mala selección del mismo, implicando con ello la elección de un capilar con el diámetro y longitud inadecuadas. Para este caso, se utilizaran ecuaciones basadas en principios de dinámica de fluidos para el dimensionamiento del mismo.

DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN PARA DISEÑO DEL TUBO CAPILAR

Se considera el diagrama de cuerpo libre de un diferencial de masa dM de un fluido (en este caso refrigerante), en donde se puede observar que dicho elemento diferencial se mueve debido a la diferencia de presiones que se tienen sobre las caras de los extremos, donde además se ven involucradas las fuerzas de rozamiento F_s y el peso mismo del elemento. Es de aclarar que para objeto de análisis, no se muestran las componentes normales de las fuerzas que

²⁰ (Embraco, 2000) PAGINA 6.

actúan sobre el cuerpo y que el movimiento del elemento diferencial ocurre en el plano del papel.

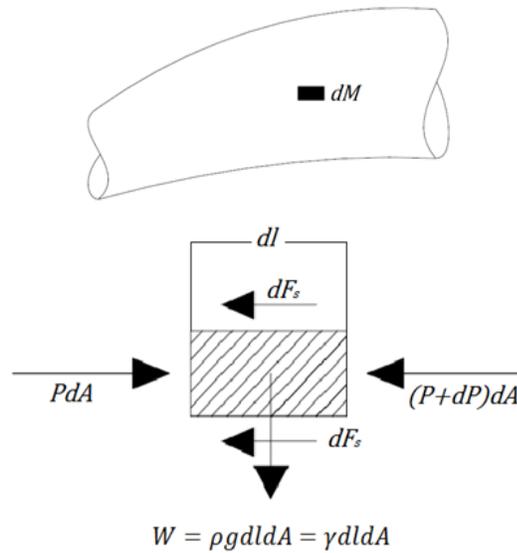


FIGURA 46. ANÁLISIS DE ELEMENTO DIFERENCIAL DE UN FLUIDO.

El análisis inicia a partir de la segunda ley de Newton y utilizando el diagrama de cuerpo libre del elemento diferencial:

$$\sum F = ma$$

$$PdA - (P + dP)dA - dF_s = \frac{\gamma}{g} dl dA \left(\frac{dV}{dt} \right)$$

Sustituyendo $dl/dt = dV$ y dividiendo por γdA se tiene

$$-\frac{dP}{\gamma} - \frac{dF_s}{\gamma dA} = \frac{V dV}{g}$$

Ecuación 30

Tomando en cuenta que el término $dF_s/\gamma dA$ representa las pérdidas debido a la fricción, el cual se representa como una pérdida de carga representada por dH_L y siendo este término igual a la ecuación de Darcy-Weisbach en su forma diferencial:

$$dH_L = f \frac{dl V^2}{D 2g} \quad \text{Ecuación 31}$$

Al sustituir la ecuación 31 en la 30 se tiene lo siguiente:

$$\frac{dP}{\gamma} = - \frac{VdV}{g} - f \frac{dl V^2}{D 2g} \quad \text{Ecuación 32}$$

Esta última ecuación se utilizara para realizar el diseño del tubo capilar. La Ecuación 32 indica que la caída de presión del líquido refrigerante se debe a la aceleración y al rozamiento del mismo dentro de las paredes del tubo capilar. Debido a esto se despreciará la caída de presión debida a la aceleración del refrigerante y se diseñara el capilar en función del rozamiento que este sufra.

Con las consideraciones efectuadas, sustituyendo γ por ρg y reacomodando la expresión, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$dP = -f \frac{V^2 dl}{2Dv} \quad \text{Ecuación 33}$$

La velocidad queda determinada por la ecuación de flujo másico, en la cual se considerara además que la velocidad adopta su valor medio, la cual se sustituirá en la Ecuación 34

$$\dot{m} = \rho V_m A$$

$$V = \dot{m} v / A \quad \text{Ecuación 34}$$

Sustituyendo el término $A = \pi D^2 / 4$ en la ecuación anterior, y posteriormente en la Ecuación 33, se obtiene la siguiente expresión:

Finalmente la expresión de la caída de presión queda definida por:

$$dP = - \frac{8f \dot{m}^2 v}{\pi^2 D^5} dl \quad \text{Ecuación 35}$$

Si se considera que pequeñas caídas de presión son producidas por los incrementos diferenciales de longitud, la ecuación diferencial obtenida en el

paso anterior, los diferenciales pueden aproximarse a deltas de presión y longitud, esto es posible sin caer en grandes errores de cálculo, por lo que la de la caída de presión debido al rozamiento queda así determinada:

$$\Delta P = \frac{8f\dot{m}^2\nu}{\pi^2 D^5} \Delta l \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde se considera que los valores de fricción y volumen específico del fluido refrigerante dependerán de las condiciones del estado termodinámico en el que se esté analizando.

Para el cálculo del coeficiente de fricción se hará uso de una expresión alternativa a la ecuación de Colebrook, debido a que esta es explícita, facilitando de esta manera los cálculos. Dicha ecuación fue la que fue propuesta por Swamee and Jain²¹, la cual se presenta a continuación:

$$f = \frac{0.25}{(\log(e/(3.7D) + 5.74/Re^{0.9}))^2} \quad \text{Ecuación 37}$$

Dónde:

e : Rugosidad del tubo capilar, expresada en metros

D : Diámetro del tubo capilar

El siguiente elemento de la ecuación (Re), corresponde al número de Reynolds, cuya expresión se presenta seguidamente²²:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del fluido en cuestión.

²¹ (WANG, 2000) Capítulo 25, pág. 24

²² (MILLS, 1997)

Al realizar el análisis de la Ecuación 36 la cual depende de factores como el diámetro y el flujo másico de refrigerante, los cuales son valores constantes y el segundo dependerá del tipo de refrigerante (R-12 o R-290). En cambio los términos restantes dependerán de la presión, refiriéndose a la densidad y el coeficiente de fricción.

Puede observarse que decrementos en la presión producirá incrementos de longitud, lo que significa que para encontrar la longitud total del capilar deberá hacerse de funciones de programación repetitivas, ya que el procedimiento debe efectuarse en pequeños intervalos de caída de la temperatura, desde su valor de condensación, hasta el de evaporación. Cabe destacar que entre menor sea el intervalo de caída, la precisión de los cálculos se incrementara aún más, para el caso del desarrollo de los cálculos se tomara una caída de temperatura de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. El proceso viene representado esquemáticamente por la FIGURA 47.

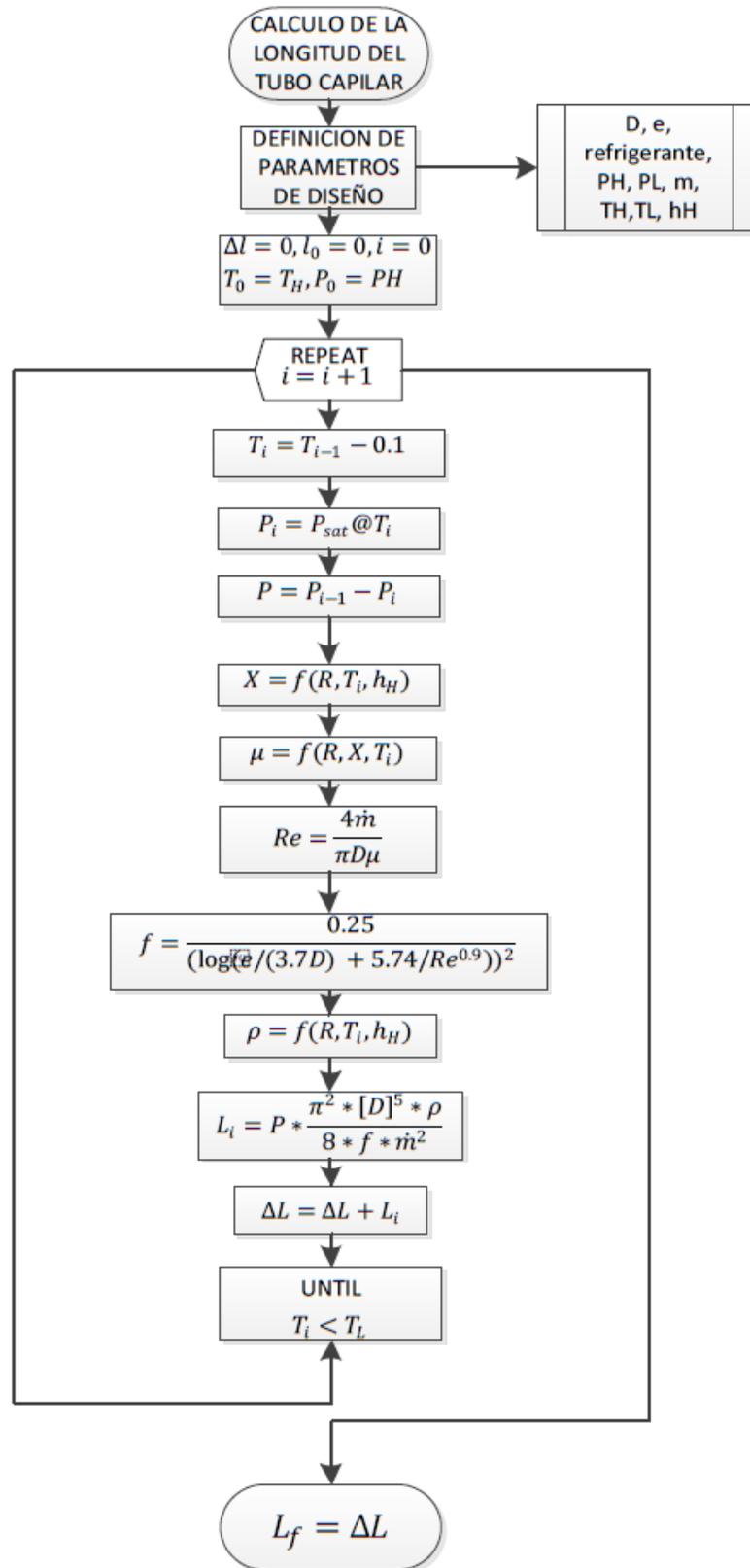


FIGURA 47 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO CAPILAR

3.2.3 SOFTWARE PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN

Para el desarrollo del proyecto se hace necesaria la utilización de un software que permita la caracterización del ciclo de refrigeración, además que permita conocer la longitud y diámetro del tubo capilar, siendo esto posible para diferentes condiciones de operación.

El primer software que se utilizara en la caracterización de los elementos del equipo de refrigeración es proporcionado por Danfoss, el cual es denominado *Danfoss Capillary Tube Selector, DanCap 1.0*, el cual permite elegir de una lista de refrigerantes y con las condiciones de operación establecida, devuelve la longitud de capilar y su respectivo diámetro.

Danfoss Capillary Tube Selector

DanCap™ Version 1.0 Database 1.0

Refrigerant: R290

Input Data:

- A Heat load of the system: 111.4 W
- B Evaporating temperature: -31.67 °C
- C Condensing temperature: 44.4 °C
- D Return gas temperature: 0 °C

Capillary Tube Recommendation

Flow Rate: 7.9 l/min (N₂ at delta p 10 nbar)

Length	Inner Diameter
1.51 m	0.66 mm
3.64 m	0.79 mm
7.69 m	0.91 mm
16.62 m	1.07 mm
20.98 m	1.12 mm
35.93 m	1.24 mm
39.75 m	1.27 mm
58.40 m	1.37 mm
64.02 m	1.40 mm

Optimal selection is highlighted in green.

Homepage: compressors.danfoss.com

Help Print Settings

FIGURA 48. SOFTWARE DANCAP 1.0 PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO CAPILAR

Para el caso de las condiciones seleccionadas en la caracterización del ciclo usando R-12, el programa indica que deberá usarse una longitud de 3.64 m para un diámetro de 0.79 mm . Cabe destacar que el programa resalta en verde la selección óptima, sin embargo no se encontró capilares de 0.66 mm en las distribuidoras locales de productos de refrigeración.

El segundo software a utilizar es EES (Engineering Equation Solver), en donde se desarrolló un programa para realizar los cálculos correspondientes al diseño del capilar y caracterización del ciclo de refrigeración. Cabe destacar que para la utilización del software EES, se cuenta con una licencia académica limitada, la cual fue obtenida de la editorial Mc Graw Hill, bajo la siguiente denominación: Thermodynamics: An Engineering Approach by Yunus A. Cengel and Michael A. Boles 6th Edition, ISBN 0-07-352921-4, McGraw-Hill Inc, 2008.

En este programa se podrán introducir las temperaturas de operación, al igual que el software proporcionado por Danfoss, pero cabe destacar que contiene otras variables de entrada, tal como el diámetro del tubo capilar, así como también podrá seleccionarse el refrigerante original del equipo de refrigeración, entre los cuales están el R-12, R-22 o R-134a. También se podrá elegir el refrigerante hidrocarburo para la reconversión, además del R-290 se encontrarán a los refrigerantes Isobutano (R-600a), Amoniaco (R-717), Propileno (R-1270), Butano (R-600) y Etileno (R-1150).

También el programa permite conocer algunos parámetros de operación del equipo, tales como las presiones de operación, flujo másico de refrigerante, longitud requerida del tubo capilar, capacidad frigorífica, trabajo del compresor, calor rechazado y el coeficiente de operación (COP), esto para el refrigerante que se requiere reemplazar y su sustituto.

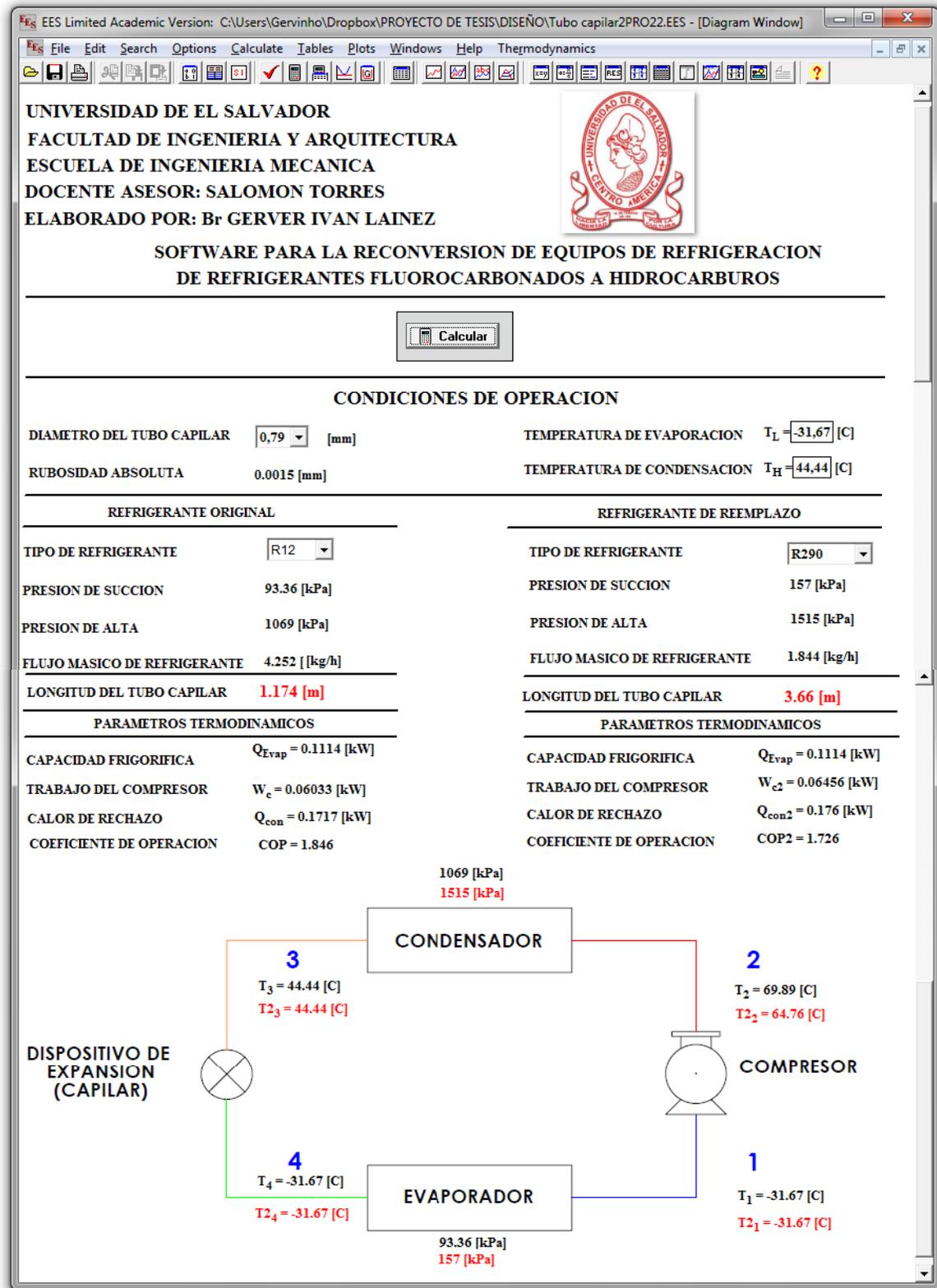


FIGURA 49. INTERFAZ DEL PROGRAMA EN EES PARA LA CARACTERIZACION DEL CICLO DE REFRIGERACION

El software EES ofrece ciertas ventajas frente a otros programas, permite realizar cálculos iterativos, que involucran propiedades termodinámicas, que de otra manera utilizarían una gran cantidad de recursos y tiempo para su ejecución manual. Dada esta versatilidad del software, el programa desarrollado permite comparar las características principales del ciclo termodinámico, esto para el caso de los refrigerantes fluorocarbonados que desean sustituirse, junto con los del tipo hidrocarburo. También se incluye el refrigerante inorgánico Amoníaco (R-717), ya que este presenta al igual que los hidrocarburos excelentes propiedades termodinámicas, las cuales pueden ser utilizadas en refrigeración. La FIGURA 49 es la interfaz del programa desarrollado.

3.3 INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS

En este apartado se pretende mostrar una síntesis de las diferentes actividades que se hicieron en el equipo de refrigeración, al que se le practicaron las pruebas de operación, el cual contempla el uso de propano (R290) como refrigerante.

3.3.1 PREPARACIÓN DEL EQUIPO PARA EFECTUAR EL CAMBIO DE REFRIGERANTE

Para comenzar el desarrollo de las prácticas de reconversión, deben efectuarse una serie de pasos preliminares, los cuales permitirán preparar al equipo de refrigeración para su operación con R-290. Dichos pasos se muestran seguidamente:

- **RECUPERACIÓN DEL REFRIGERANTE**

La recuperación del refrigerante deberá efectuarse en los cilindros adecuados y el equipo indicado. Lo anterior quedó detallado en el capítulo II.

- LIMPIEZA DE LOS COMPONENTES.

Esto se desarrolló utilizando una combinación de aire comprimido y el agente limpiador R-141b. La limpieza se realizó siguiendo el procedimiento de obturación de un extremo de la tubería del evaporador y condensador, colocando al otro extremo de los mismos, la alimentación con aire comprimido, con las presiones cercanas a las de su operación, esto para evitar especialmente, el rompimiento de la canalización interna del evaporador. La obturación se llevó a cabo hasta que se dejó de percibir la presencia de suciedad en los mismos, de esta forma se garantiza que ninguna partícula dañara el sistema, específicamente en el tubo capilar.

- CAMBIO DEL ACEITE LUBRICANTE DEL COMPRESOR

Primero se vació el contenido de aceite del compresor, registrando el volumen del mismo, ya que posteriormente se colocó la misma cantidad para el correcto funcionamiento del compresor. Es de señalar que los refrigerantes hidrocarburos tienen compatibilidad química completa con casi todos los lubricantes que se utilizan en refrigeración²³, esto en todas las condiciones de funcionamiento. Los únicos lubricantes que no deberán utilizarse serán los que presenten contenido de silicona o silicato. Por lo tanto, se cargó el compresor con aceite del tipo mineral, el que es comúnmente utilizado en los equipos que operan con R-12, R-134a, etc.

- UNIÓN POR SOLDADURA DE LOS COMPONENTES.

Para la conexión de los elementos que componen el equipo de refrigeración, se utilizó tubo de cobre de 1/4", utilizando como fundente una

²³ (DURACOOOL, 2008) Página 8

varilla de plata fosfórica al 15%, la cual permite soldar tubería de hierro con cobre.



FIGURA 50. PROCESO DE SOLDADURA

- **INSTALACIÓN DE MANOMETROS**

Se instalaron 2 manómetros para censar la presión de operación del sistema, siendo ubicados estos, en las tuberías de succión y descarga del compresor.



FIGURA 51 MANOMETROS DE ALTA Y BAJA PRESION.

Cabe destacar que los manómetros usados son del tipo que se usa en refrigeración, específicamente para R-12 y R-22, deberá utilizarse por tanto, una tabla de las propiedades físicas del propano, para conocer su temperatura a las presiones de operación.

- CAMBIO DEL FILTRO SECADOR

Este elemento es el encargado de retener todas las impurezas y cualquier remanente de humedad que pueda existir en el refrigerante, sin embargo, con el paso del tiempo, este va perdiendo sus propiedades de filtrado, ya que hay impurezas, tal como suciedad o partículas metálicas, producto de labores de corte y unión de tubería, las cuales quedan atrapadas en su interior, es por ello que se optó por su reemplazo.

Esta labor deberá ser ejecutada en todo procedimiento de reconversión de equipos de refrigeración a hidrocarburo. El filtro secador seleccionado, será el mismo que se utiliza para el R-134a, ya que este cumple con los requerimientos para el R-290. Se eligió un filtro secador flare de 1/4", O-D32 Sporland.



FIGURA 52. FILTRO SECADOR FLARE DE 1/4" O-D32 SPORLAND

- **INSTALACIÓN DEL TUBO CAPILAR**

A partir de los dos software disponibles, se encontró que para las condiciones de operación previstas, la longitud del tubo capilar estará comprendida entre 3.64 y 3.66 m, por lo que se escogerá esta última, para un diámetro de capilar de 0.79 mm (0.031 inch).



FIGURA 53 CAPILAR INSTALADO EN EL EQUIPO DE REFRIGERACION.

- **INSTALACIÓN DEL CIRCUITO ELÉCTRICO**

Para la operación del equipo de refrigeración es necesario contar con un circuito eléctrico, el cual deberá energizar los componentes eléctricos del sistema. El diseño del mismo se muestra en la siguiente figura:

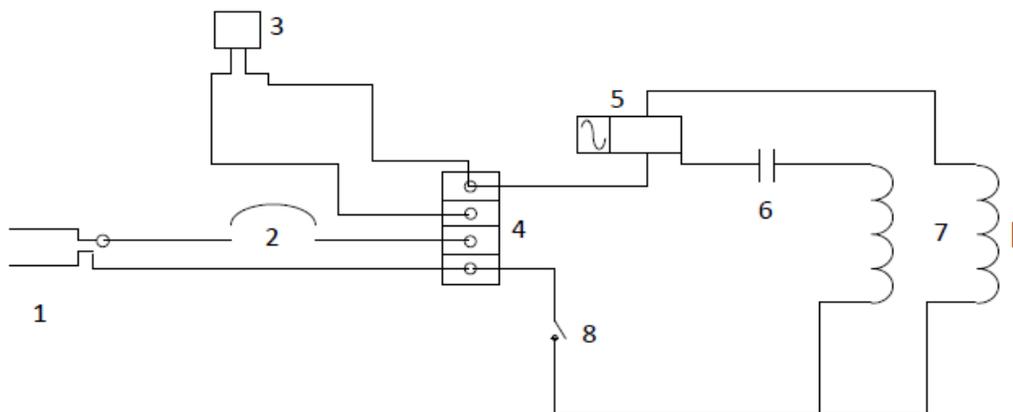


FIGURA 54 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL EQUIPO REFRIGERADOR

Los elementos que conforman el circuito eléctrico son los que se detallan a continuación:

1. Alimentación de energía eléctrica, la cual será de 121 V, para una potencia de compresor de $1/8$ hp.
2. Protección termomagnética, la cual tiene la función de salvaguardar al circuito eléctrico de sobre corrientes (15 A)
3. Termostato, tiene la función de cortar la alimentación eléctrica al compresor, en caso de bajar de una temperatura establecida. También permitirá la alimentación eléctrica en caso de tener una temperatura superior a la fijada. Puede observarse que este elemento trabaja en un rango de temperaturas, por ejemplo -15 °C y -5 °C.
4. Regleta de conexiones, permite la conexión de los cables eléctricos con los diferentes elementos del circuito eléctrico.
5. Relé, debido a las altas corrientes de arranque, este cierra sus contactos por acción magnética, lo que permite energizar el circuito de arranque. Al estabilizarse la corriente, el relé abre nuevamente sus contactos.
6. Capacitor de arranque, produce un desfase entre los campos magnéticos del estator y del rotor, lo que permite que se genere un par inducido, permitiendo el arranque del compresor.
7. Motor monofásico, es el elemento que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, lo que permite la operación de compresión del gas refrigerante.
8. Interruptor térmico, protege al compresor por corrientes superiores a la nominal (1.4 A).

Es de gran importancia señalar que de los componentes enlistados, el termostato el que podría generar más riesgo en su operación. Sin embargo, este fue colocado estratégicamente en la parte exterior del espacio a refrigerar, evitando que en caso de fuga, el recinto confinado, combinado con una posible chispa generada, pueda provocar cualquier incidente.



FIGURA 55. INSTALACION DEL TERMOSTATO

- PRESURIZACIÓN DEL SISTEMA

Se realiza una presurización del sistema, con el objetivo de encontrar posibles fugas. Al principio se encontraron algunas, específicamente en los manómetros, sin embargo estas fueron eliminadas. La presurización se efectuó a 275 kPa por un tiempo de 1 hora. El método de detección de fugas utilizado fue por medio de agua jabonosa, aplicada especialmente en las partes donde hubo soldaduras de tuberías.

- VACÍO DEL SISTEMA

Finalmente se efectuó el vacío al sistema, lo cual garantiza la extracción de los gases no condensables y la humedad residual en el equipo. Ya que el

equipo no era el adecuado para refrigeración, se realizó el procedimiento por 1 hora, a una presión de 20 pulgadas de mercurio de vacío.



FIGURA 56 BOMBA DE VACIO

3.3.2 RECONVERSIÓN DEL SISTEMA DE R-12 A R-290.

Con todos los procedimientos que se han ejecutado en la preparación del sistema, se está en la capacidad de efectuar la carga con propano al equipo refrigerador, tomando en consideración las medidas de seguridad mínimas, siendo una de las más esenciales, que la práctica se haga en un lugar suficientemente ventilado y alejado de cualquier fuente de chispas.

Una de las principales limitantes del proyecto, es que no se cuenta con propano específicamente para refrigeración, es decir, no cumple las exigencias de pureza. Debido a lo anterior, no se tiene una disponibilidad del refrigerante en sus condiciones requeridas, es por ello que se optó por la utilización de propano para uso de antorchas, ya que se consideró que este tiene una mayor

pureza, comparado con el GLP que está destinado a ser usado de forma domiciliar.

Cabe destacar que el cilindro que se adquirió tiene una capacidad de 14.1 onzas, el cual cuenta con una válvula restrictiva del paso del refrigerante, a la cual tuvo que adaptársele una válvula con centro flare de 1/4", esto para poder conectar las mangueras del manómetro.



FIGURA 57 CILINDRO DE GAS PROPANO

PROCEDIMIENTO DE CARGA DEL PROPANO

La carga del propano al sistema se realizó teniendo como referencia la corriente nominal para la que está diseñado el compresor, la cual es de 1.4 A, ya que de realizarse una carga demasiado grande, se tendrán corrientes demasiado elevadas, lo que hará que la protección térmica del compresor, desconecte la alimentación eléctrica, algo que no es deseado en el sistema.

Debe mencionarse, que la carga se efectuó a través de la válvula de servicio del compresor

La carga del sistema deberá efectuarse siguiendo el valor que indica la Ecuación 26, es decir, la carga de propano será aproximadamente el 40% con relación al R-12.



FIGURA 58 CARGA DEL REFRIGERANTE R-290

Los pasos que se siguieron para la realización de la carga se muestran a continuación:

1. Verificación que el espacio este suficientemente ventilado.
2. Conectar la manguera de baja presión a la válvula flare del cilindro de propano, posteriormente debe ventearse un poco de refrigerante, esto para purgar el aire de las mangueras y así evitar introducirlo al sistema,

seguidamente conectar la manguera de carga a la válvula de servicio del compresor.

3. Aunque como se indicó, la carga se realizó tomando como referencia la corriente del compresor, deberá medirse el peso del refrigerante cargado. Para cargar coloque la tenaza amperimétrica en un cable de alimentación del compresor, luego abra lentamente la válvula del manómetro y siga este procedimiento hasta alcanzar como máximo 1.4 amperios.

Con todos los pasos anteriores ejecutados, se concluyó de manera satisfactoria el procedimiento de reconversión del equipo de refrigeración, para lo cual, se auxilió de la carta de proceso, mostrada en el ANEXO 4, donde se muestran los pasos a seguir, así como también, los tiempos involucrados para la ejecución de estos procesos.

3.4 ANÁLISIS DE PRUEBAS EN EL EQUIPO

En esta sección se realiza un análisis de pruebas del equipo operando con R-290, las que se compararan con algunos parámetros medidos del equipo cuando este funcionaba con R-12, lo que permitirá evaluar y validar el procedimiento de reconversión a hidrocarburo.

3.4.1 MODIFICACIONES DEL TUBO CAPILAR

Se realizaron pruebas con 3 capilares diferentes. La primera de ellas se efectuó siguiendo la sugerencia de la Asociación Dominicana de Técnicos de Refrigeración y Acondicionamiento de Aire INC, ADOMTRA, los cuales manifestaron que los sistemas que operan con R-12 no requieren ningún cambio en sus componentes al efectuar la reconversión, sin embargo ellos efectúan la practica con Hidrocarburo específicamente para refrigeración, razón por la cual, al cargar el sistema, este no opero como se esperaba, ya que la

caída de presión fue muy pequeña. El capilar original del equipo tiene una longitud aproximada de 1.27 m y un diámetro de 0.031 in .

Ya que se pudo comprobar que el capilar original no cumplía con la caída de presión requerida, se tuvo que perforar un agujero en el evaporador para introducir un nuevo capilar, posteriormente se selló la conexión con un adhesivo epóxico.

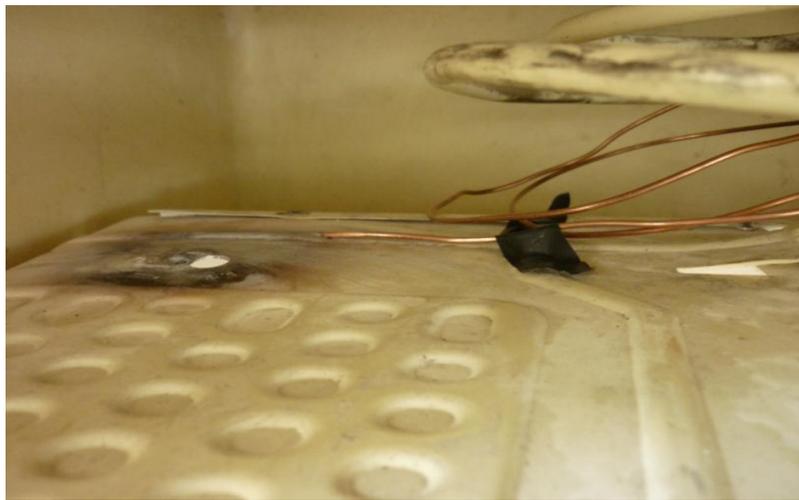


FIGURA 59. INSTALACION DEL TUBO CAPILAR EN EL EVAPORADOR.

Debido a la disponibilidad de tubos capilares, se instaló un capilar de 0.036 in de diámetro y 3 m de longitud, de la cual se requiera aproximadamente 8 m .

Después fue anexado un tubo capilar de 0.031 in de igual longitud. Según los software disponibles, para este diámetro se necesita una longitud aproximada de 3.8 m , por lo que combinado con el otro tramo de capilar, se logró la caída de presión necesaria.

3.4.2 VARIACIÓN DE CARGA SEGÚN CORRIENTE DE OPERACIÓN

Como ya se mencionó, la corriente de operación del sistema para el compresor usado, corresponde a 1.4 A , por lo que la carga se realizó tomando

la corriente de operación como parámetro. Para conocer la masa de refrigerante cargado, se colocó el cilindro de propano sobre una balanza de 3 brazos, cuando se llegó a la corriente deseada, se suspendió la carga, midiendo



FIGURA 60. MEDICION DE LA MASA DE REFRIGERANTE CARGADO AL SISTEMA

nuevamente la masa del cilindro, obteniendo una diferencia de 35 g, siendo esta la masa de refrigerante con la que el equipo de refrigeración operara.

3.4.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

De la sección 3.1.2 se estableció que las temperaturas de operación del equipo utilizando R-290, deberán ser las mismas de cuando operaba con R-12, a partir de eso se estimó que las presiones de baja y alta tendrían que ser de 157 y 1515 *kPa* respectivamente, sin embargo esto es válido para el modelo de operación del ciclo ideal de refrigeración. Dentro de las hipótesis del modelo termodinámico, se indicó que el modelo sería diseñado bajo este concepto, no obstante, se sabe que el sistema trabaja en un ciclo con irreversibilidades, las cuales provocan caídas de presión en los componentes, además se debe

recordar que el gas utilizado no es para uso exclusivo de refrigeración y el uso de las tablas termodinámicas podría estar lejos de los valores reales de operación, correspondientes a presiones y temperaturas.

Bajo estas consideraciones, se presentan los valores de presiones, para los cuales el equipo estará operando:

TABLA 13. PRESIONES Y TEMPERATURAS DE OPERACIÓN.

	TEMPERATURA (°C)	PRESION ABSOLUTA (kPa)
Succión	31.8	135.827
Descarga	73	1273.462

En cuando al consumo de energía, se pudo observar que el uso del refrigerante R-290 presenta una reducción en la corriente de operación, esto para las presiones de trabajo requeridas.

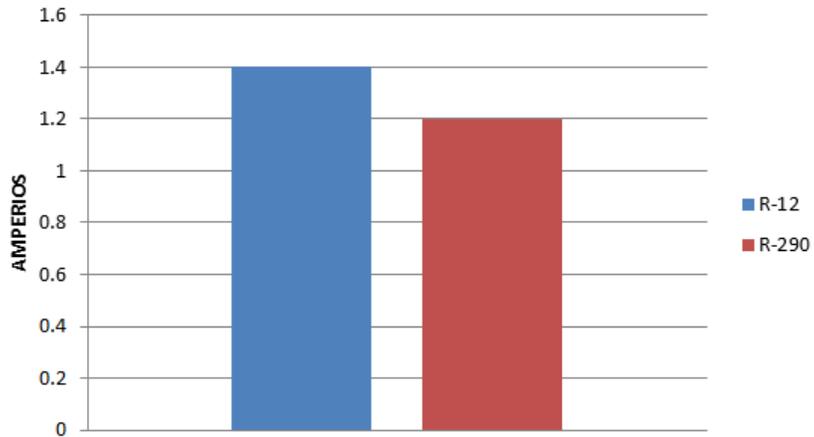


GRÁFICO 6. CONSUMO ELECTRICO DEL EQUIPO DE REFRIGERACION.

A partir del grafico anterior, se puede efectuar una comparativa del valor de la corriente de operación del equipo, cuando este trabaja con propano, versus cuando lo hacía con R-12.

3.4.4 IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN OPERANDO CON R-290.

Posteriormente al procedimiento de reconversión, es necesario identificar el equipo de refrigeración, haciendo uso de una etiqueta, en la cual se indique el tipo de aceite que contenido en el sistema, así como también, el tipo de refrigerante cargado y la cantidad. De esta forma, al tener un inconveniente en el futuro, cualquier técnico sabrá la cantidad de refrigerante y el tipo de aceite que deberá usarse en dicho equipo. También se indica la longitud de tubo capilar para las condiciones de trabajo establecidas y los parámetros eléctricos del sistema. La viñeta de identificación del equipo de refrigeración, posterior al proceso de reconversión es la siguiente:

**ESTE EQUIPO CONTIENE
REFRIGERANTE HIDROCARBURO**

R-290 CARGA kg

ACEITE:

PRESIONES DE OPERACION (kPa)

ALTA: BAJA:

LONGITUD DEL CAPILAR m

CORRIENTE NOMINAL A

VOLTAJE V

FIGURA 61 IDENTIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN CON R-290.

3.5 DISEÑO MECÁNICO DEL BANCO DE PRUEBAS

El banco de pruebas servirá como base para colocar el equipo de refrigeración al que se le efectuaran las pruebas, siendo estas realizadas después de haber efectuado la reconversión del sistema frigorífico.

Además de contener los elementos del circuito frigorífico, el banco deberá contener el circuito eléctrico, el cual será encargado de proveer energía para que el compresor opere, brindar un circuito de control de los ciclos refrigerativos y además una protección que proteja al equipo en caso de corrientes de sobrecarga.

El banco de pruebas tendrá como estructura hierro cuadrado de 1 pulgada, chapa 14. Las dimensiones del mismo se muestran en el ANEXO 5.

4.0 COSTOS DE INSTALACIÓN Y PRUEBAS DE EQUIPOS

En esta sección se hace una síntesis de los diferentes elementos que componen el equipo refrigerador, incluido el banco en donde se efectuaron las pruebas de carga con gas propano, para lo cual se realizará un análisis económico, el cual pretende determinar cuál es el monto utilizado para la realización del proyecto, también se pretende sugerir el costo que implica la reconversión de los equipos de refrigeración, ya que el proyecto posteriormente podrá ser expandido de forma comercial.

4.1 COSTOS DE LOS EQUIPOS Y HERRAMIENTAS INVOLUCRADAS EN EL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN

Para la evaluación económica se pretende mostrar los costos involucrados con el desarrollo del proyecto, esto con el objeto de conocer el costo total del banco de pruebas y además poder estimar la viabilidad económica del procedimiento de reconversión a hidrocarburo de los equipos de refrigeración. Es por esta razón que los costos se mostraran de forma seccionada.

4.1.1 COSTOS DEL BANCO DE PRUEBAS

En esta sección se muestran los costos de los materiales involucrados con la construcción del mueble del banco de pruebas, también se enlistan, el valor del equipo de refrigeración y los costos involucrados para el acondicionamiento del mismo, para contener el evaporador en un recinto más pequeño que el original.

De esta forma, los costos involucrados en el procedimiento de reconversión, se muestran detalladamente a continuación:

TABLA 14. COSTOS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
5	Acero estructural (tubo)	12.0625	60.3125
1	Plywood 3/4	35.00	35.00
3	Plywood 1/2	24.00	72.00
1	Refrigeradora	10.00	10.00
1	Empaque refrigeradora	10.74	10.74
4	Solvente mineral 1/8	2.70	10.80
2	Comejenol 1/4	9.20	18.40
2	Válvula pinchadora	2.68	5.36
1	Espuma SIKA	14.6	14.60
1	Sellador Silicón	3.50	3.50
2	Masilla metal 1/8	8.00	16.00
-	Pintura	-	57.90
-	Lijas	-	17.70
SUB TOTAL			332.31
	Gastos varios		104.22
COSTO TOTAL			\$436.53

Debe aclararse que dentro del rubro de gastos varios, se incluye la compra diferentes elementos y herramientas tales como sierras para cortar hierro, brochas, remaches tipo pop, brocas de diferentes diámetro, discos y cepillo para esmeriladora, cinta adhesiva, bisagras, entre otros. El detalle de estos aparece en el ANEXO 6.

4.1.2 COSTOS DE LA INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS.

Con el banco de pruebas listo, se está en la capacidad de montar el equipo al que se le practicara el procedimiento de reconversión, en el cual contempla la instalación de los componentes que conforman al sistema de refrigeración, elementos de medición (manómetros), soldadura de tubería, además de la instalación del circuito eléctrico que gobierna el equipo de pruebas y la carga de refrigerante.

TABLA 15. COSTOS DE LA INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRUEBAS

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
3	Cable TSJ 14-3	1.20	3.60
4	Cable THW 12	0.5	2
1	Toma macho	1.10	1.10
15	Grapa plástica	0.07	1.05
1	Caja térmica	3.8	3.8
1	Dado térmico 15 A	4.6	4.6
2	Spray negro	2.4	4.8
4	Perno Hex rosca	0.15	0.6
4	Tuerca mariposa	0.1	0.4
4	Arandela plana	0.03	0.12
1	Gas propano 14OZ TX9	5.5	5.5
1	Relay 1/8 Hp, RL-18	4.52	4.52
1	Antorcha QTX-11E	22.88	22.88
4	Válvula flare 1/4	0.75	3.00
20	Tubo capilar 0.031 pulg	0.305	6.10
2	Varilla de plata al 15%	5.85	11.7
1	Filtro secador flare 1/4	9.92	9.92
1	Aceite mineral 750 ml	5.24	5.24
2	Tee cobre 3/8	0.54	1.08
1	Termostato Danfoss	9.12	9.12
1	Flux QFX-4	2.1	2.10
1	Manómetro de baja	3.65	3.65
1	Manómetro de alta	3.72	3.72
5	Terminal tipo bandera	0.21	1.05
1	Pintura verde 1/8	9.58	9.58
1	Epóxico	2.95	2.95
COSTO TOTAL			\$124.18

La TABLA 15 muestra el detalle de las herramientas, materiales y demás artículos que se utilizaron en el desarrollo de la instalación del equipo de pruebas y su posterior carga con R-290.

4.1.3 COSTOS TOTALES

Hasta el momento se tiene el resultado de los costos involucrados en la construcción del banco de pruebas, así como también, se tiene el valor

económico en el montaje y posterior carga de refrigerante R-290 al equipo de refrigeración, por lo que se está en la capacidad de estimar los costos totales en el procedimiento de reconversión a hidrocarburo.

La siguiente tabla muestra por lo tanto, el costo total del proyecto:

TABLA 16. COSTO TOTAL DEL PROYECTO

DETALLE	VALOR
BANCO DE PRUEBAS	436.53
EQUIPO DE PRUEBAS	128.18
COSTO TOTAL (\$)	560.71

4.2 COSTOS DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN

Además de la ejecución de las actividades para el procedimiento de la reconversión de un equipo de refrigeración a hidrocarburo (R-290), los técnicos certificados deberán tener una guía de como efectuar los cobros por la realización de dichas prácticas, las cuales a su vez les permitirán tener un registro de los materiales que utilizan, y las cantidades que utilizan de los mismos.

A partir del análisis termodinámico del ciclo de refrigeración para el refrigerante R-290, la experiencia adquirida en la construcción del banco de pruebas e instalación de los componentes del sistema, se pudo constatar que los elementos del equipo se conservan en su mayoría, a excepción del cambio del filtro secador y el redimensionamiento del tubo capilar. Lo anterior pone de manifiesto la simplicidad del procedimiento de reconversión.

Algunos materiales como el aceite mineral, material de aporte para la soldadura de tuberías, gas nitrógeno, fundente Flux e inclusive el refrigerante,

no se pueden cuantificar de la misma forma para todos los equipos de refrigeración, ya que estos se presentan en diferentes capacidades y poseen diferentes condiciones de operación, es por ello que se trabajara con valores estimados de cada uno de estos.

Tomando como referencia las consideraciones anteriores, las cantidades estimadas de los materiales, a utilizar en los procedimientos de reconversión a propano, de diferentes equipos de refrigeración del tipo residencial, son las siguientes:

- Cilindro de nitrógeno será utilizado en promedio en 3 procedimientos de reconversión
- Lata de refrigerante, dos procedimientos de reconversión
- Fundente flux, 10 reconversiones
- Aceite mineral, presentación de 750 *ml* por reconversión

Uno de los aspectos que deben considerarse en el cobro del procedimiento de reconversión de cualquier equipo de refrigeración, es el monto de la mano de obra del técnico encargado, la cual se considera que un valor conservador es tomar el 35% del monto de los materiales que se usaran en el proceso. También se deberá incluir un porcentaje en concepto de imprevistos que puedan existir a la hora de realizar las tareas de reconversión, para lo cual se estima que un valor adecuado sería un 10% del monto total de los materiales.

Debe aclararse que el técnico de refrigeración deberá cobrar por separado cualquier al procedimiento que este fuera de las actividades de reconversión del equipo, tales como problemas con el sistema eléctrico,

reparaciones de los intercambiadores de calor (en el caso que el sistema haya sufrido alguna fuga previa y el equipo este fuera de operación), mantenimiento del sistema etc.

Para poder conocer el valor de la reconversión de un equipo de refrigeración a R-290, deberá auxiliarse de la TABLA 17, donde se presenta el detalle de los materiales, componentes y cobro de mano de obra e imprevistos.

TABLA 17. TABLA PARA ESTIMAR EL COSTO DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN POR EQUIPO

CONCEPTO	CANTIDAD	P.U	COSTO
Aceite mineral	1	5.24	5.24
Filtro secador	1	9.92	9.92
Tubo Capilar	20	0.305	6.1
Varilla de plata	3	5.85	17.55
Fundente Flux	0.1	2.1	0.21
Termostato	1	9.12	9.12
Refrigerante (kg)	0.5	5.5	2.75
Nitrógeno	0.333	11.24	3.74
Sistema de arranque del compresor	1	4.52	4.52
Válvulas pinchadoras	2	2.68	5.36
Válvulas de rosca Flare	1	0.75	0.75
Tubería de cobre	-	-	-
Mano de obra	0.35	65.26	22.84
Imprevistos	0.1	65.26	6.53
COSTO TOTAL			\$94.63

El caso mostrado corresponde a la instalación del equipo de pruebas del presente trabajo de graduación.

Con estas consideraciones, los técnicos de refrigeración estarán en la capacidad de conocer el costo del procedimiento de reconversión de cualquier equipo de refrigeración a propano, para posteriormente realizar el cobro del trabajo a los propietarios de los equipos. En función de lo anterior, se redacta una propuesta de carta de cobros, presentada en el ANEXO 7, la cual permitirá documentar los datos de operación del sistema de refrigeración, la ubicación, la marca y modelo del equipo.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSIÓN

Hasta el momento se ha demostrado que el proyecto es factible técnicamente, ya que el procedimiento de reconversión de los equipos de refrigeración a hidrocarburo (R-290) puede ejecutarse sin ningún inconveniente, sin embargo debe averiguarse si el procedimiento es viable económicamente, lo cual es lo que se pretende conocer en esta etapa.

Para la evaluación financiera se tomara como referencia los costos de la TABLA 17, lo que puede representar el costo que tendría que pagar un cliente por la realización del procedimiento de reconversión a uno de sus equipos.

Como se vio en la etapa de pruebas, el equipo de refrigeración operando con R-290, tuvo un descenso en la corriente de operación, con respecto a cuándo este utilizaba refrigerante fluorocarbonado R-12, lo que indica que se podrá tener una ventaja económica por esta razón. Al usar R-290 se tiene una reducción de 0.2 A. Con el dato anterior se procederá a encontrar el ahorro económico por el uso de propano como refrigerante.

4.3.1 FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Ya que se conoce la corriente de operación del equipo de refrigeración, además del voltaje en el cual opera, se puede conocer la potencia del mismo, esto a partir de la siguiente ecuación:

$$P = V * I \quad \text{Ecuación 39}$$

De donde:

P: Potencia del equipo de refrigeración

V: Voltaje

I: Corriente

Con los datos medidos en el capítulo anterior, el cálculo de la potencia eléctrica del equipo operando con R-290 y con R-12 serían los siguientes:

$$P_{R290} = 121 * 1.2 = 145.2 \text{ W}$$

$$P_{R12} = 121 * 1.4 = 169.4 \text{ W}$$

Puede observarse un descenso del 14.3 % de la potencia eléctrica requerida por el compresor, cuando este opera con refrigerante R-290.

Para encontrar el consumo eléctrico del equipo, debe recordarse que la potencia debe estar en función del tiempo de operación del equipo. Para el caso del equipo refrigerador en vacío, es decir sin carga térmica, la duración de operación dura aproximadamente 1.5 minutos, teniendo un tiempo muerto de 20 minutos, significando con ello que el compresor trabaja cada 21.5 minutos, dando como resultado 2.7907 ciclos por hora. A partir de lo anterior, se concluye que el compresor opera 4.186 minutos por cada hora transcurrida.

El consumo eléctrico (CE) se calcula tomando en cuenta el periodo de operación y la potencia eléctrica del equipo:

$$CE = \text{tiempo de operacion} * P * 24 * 365 / 1000 \{kWh/año\} \quad \text{Ecuación 40}$$

Tomando la consideración que el equipo de refrigeración tendrá los mismos periodos de funcionamiento, es decir que operara 4.186 minutos por hora y además operara bajo las mismas condiciones para ambos refrigerantes (carga térmica), el consumo eléctrico anual se presenta en la siguiente tabla:

TABLA 18. CONSUMO ELÉCTRICO DEL EQUIPO DE REFRIGERACION

REFRIGERANTE	CE (kWh/año)
R-290	88.7398512
R-12	103.529826

Al igual que para el caso del cálculo de la potencia eléctrica requerida por el compresor al usar R-290, puede observarse una reducción en el consumo de energía de 14.3 %, lo que significa que se tendrá un ahorro en la factura eléctrica.

Para la determinación del costo anual del uso del refrigerante R-290, comparado con el R-12, se hace uso de la siguiente relación:

$$VFE = CE * (CV_{consumo} + CV_{distribucion}) + CF_{comercializacion}$$

Dónde:

VFE: Valor de la factura eléctrica

CF: Costo fijo

CV: Costo variable

Tomando como referencia el pliego tarifario vigente a partir del 1 de enero de 2015, presentados por la SIGET²⁴, también se considerara que el consumo eléctrico promedio en los hogares salvadoreños, está situado entre el rango de consumo eléctrico de 100 *kWh/mes* y 199 *kWh/mes* y utilizando los valores correspondientes para la compañía de distribución de energía eléctrica CAESS, la ecuación que permitirá encontrar el valor anual en dólares del consumo eléctrico del equipo refrigerador es la siguiente:

$$VFE = CE * (0.194431 + 0.033071) + 0.879704 * 12$$

$$VFE = 0.2275 * CE + 10.5564$$

Ecuación 41

Para encontrar el ahorro anual, se procederá encontrar la diferencia del valor de la factura eléctrica del equipo de refrigeración, operando con R-12 y R-290:

$$AA = VFE_{R12} - VFE_{R290}$$

$$AA = 0.2275 * (CE_{R12} - CE_{R290}) = 0.2275(103.529826 - 88.7398512)$$

$$AA = 3.36$$

Lo anterior indica que al usar R-290 se tendrá un ahorro anual de \$3.36, equivalente a una reducción del 14.3 % en la factura de energía eléctrica, al usar R-290 como refrigerante, significando con ello, la existencia de factibilidad económica para el dueño del equipo de refrigeración, que a pesar de ser muy pequeña, viene a sustentar el procedimiento de cambio de refrigerantes fluorocarbonados a hidrocarburos, en los equipos de refrigeración por compresión de vapor.

²⁴ (SIGET, 2014) Pliego Tarifario 2015

4.3.2 FACTIBILIDAD AMBIENTAL

Hasta el momento se ha demostrado que el proyecto es factible, tanto técnicamente como económicamente, además se indicó que en el Capítulo I, que los refrigerante fluorocarbonados presentan un severo impacto en el ambiente, específicamente al deterioro de la capa de ozono y contribuyen a acelerar el calentamiento global.

Debido a las razones anteriores, a través de los protocolos celebrados en Kyoto y Montreal, se ordenó a los países firmantes de los mismos, el cese a la producción y funcionamiento de los equipos con refrigerantes fluorocarbonados, específicamente los CFC y los HCFC, razón por la cual se hizo necesaria la búsqueda de alternativas.

Los hidrocarburos son una excelente alternativa para la sustitución de los refrigerantes fluorocarbonados, ya que como se mostró en el Capítulo I, presentan una baja incidencia en la capa de ozono y el calentamiento global, siendo medidas estos efectos perjudiciales por medio de los índices ODP y GWP, los cuales comparados a los CFC y HCFC son sumamente pequeños.

A continuación se muestra una comparación de estos índices, de los refrigerantes R-12 y R-290.

TABLA 19. CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DE DIVERSOS REFRIGERANTES.

REFRIGERANTE	T. VIDA EN LA ATMOSFERA	ODP	GWP
R-290	<1 hora	0	20
R-12	102 AÑOS	1	8100

A partir de la tabla mostrada, queda suficientemente justificado el uso del refrigerante R-290 en sustitución del R-12, ya que comparados, el propano

presenta un tiempo de vida despreciable, un nulo ODP y un potencial de calentamiento global 405 veces menor que el R-12. Esto indica que el uso del refrigerante R-290 en los equipos de refrigeración es factible en términos ecológicos, ya que comparado a los refrigerantes fluorocarbonados, el propano presenta un bajo impacto ambiental, lo que lo convierte en un excelente refrigerante de reemplazo.

4.3.3 OPORTUNIDAD DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE REFRIGERANTES FLUOROCARBONADOS EN EL PAÍS

El gobierno de El Salvador, a través del ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN, y dando cumplimiento a los protocolo de Montreal, a partir del año 2010, se prohibió la importación de sustancias agotadoras de la capa de ozono, específicamente de los refrigerantes CFC y a partir de Octubre del 2013, comenzó una serie de acciones orientadas a la reducción gradual de los refrigerantes del tipo HCFC, hasta su total eliminación en el año 2030.

Sin embargo, a pesar de las medidas que el gobierno ha comenzado a implementar, la inmensa mayoría de equipos de refrigeración siguen operando con refrigerantes fluorocarbonados, los cuales en el final de su vida útil, si el refrigerante no es recuperado correctamente, o si estos presentan fugas, su contenido tendrá como punto final, inevitablemente la atmosfera, contribuyendo al deterioro de la capa de ozono y al calentamiento global.

A partir de lo anterior, queda evidenciada la urgente necesidad de la implementación de un cambio en el tipo de refrigerante que utilizan los equipos de refrigeración en general, lo cual como se ha demostrado, es suplido perfectamente por el propano.

Según el censo de población y vivienda correspondiente al 2007, realizado por el Ministerio de Economía, a través de la DIGESTYC²⁵, en el país existe un aproximado de 1,406,485 familias, de las cuales, 65.8 % corresponde a hogares del tipo urbano, mientras que el 34.2 % pertenecen al área rural. Para estimar el número de equipos de refrigeración con los que cuentan las familias salvadoreñas en total, se considerará que debido al mayor poder adquisitivo de las familias que habitan el área urbana, un 90 % posee al menos un equipo de refrigeración, mientras que considera que un 60 % de las hogares del área rural poseen un equipo, tomando dichos porcentajes como referencia, el total de equipos de refrigeración del tipo residencial que existen en el país ascendería a los 1,121,532.

DISTRIBUCION DE EQUIPOS REFRIGERADORES EN LA POBLACION

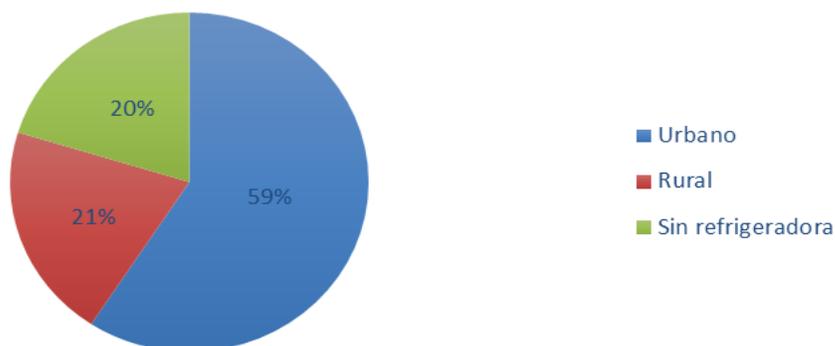


GRÁFICO 7. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN EN LA POBLACIÓN

Cabe destacar que en este número no se incluyen equipos de refrigeración del sector industrial, además no se toman en consideración todos los equipos de aire acondicionado, lo que haría que la cantidad considerada sea de mayor valor.

²⁵ (DIGESTYC)

Tomando como referencia las consideraciones anteriores, si se realizara la reconversión a todos los equipos de refrigeración del tipo residencial, además si se supone que un refrigerador promedio, contiene una masa de refrigerante fluorocarbonado de 250 g, y en el supuesto que 1 de cada 4 aparatos falla por año, en total se dejaría de emitir 70.1 toneladas métricas de refrigerantes fluorocarbonados a la atmosfera anualmente.

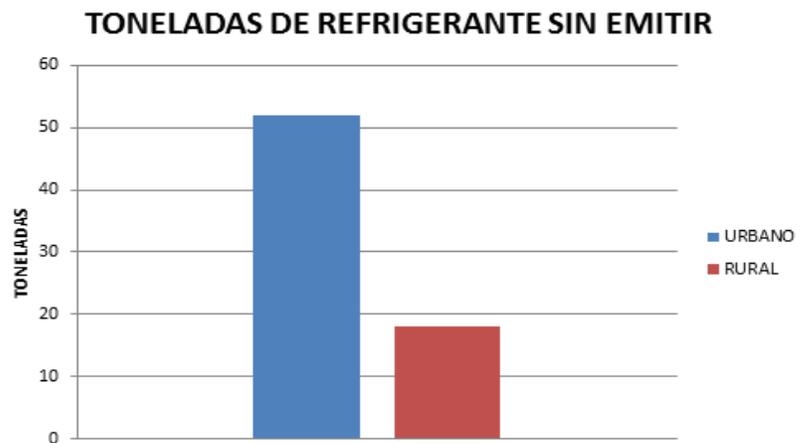


GRÁFICO 8. EMISIONES DE REFRIGERANTE FLUOROCARBONADO POR TIPO DE POBLACIÓN

A partir del GRÁFICO 8, puede verse que el proyecto tendría su máximo impacto en el área urbana, ya que por diversos factores, pueden encontrarse un mayor número de equipos de refrigeración en los hogares de dicho sector. Sin embargo deberá tener un cuidado más riguroso en cuanto a los aspectos de seguridad, ya que en la mayoría de los casos, las casas ubicadas en las ciudades son menos espaciales que las del tipo rural, deberá entonces verificarse que la habitación tenga una buena ventilación para la ubicación del refrigerador, esto específicamente en los equipos que tengan una carga mayor a 150 g, como se detalló en el Capítulo I.

Queda evidenciado que el beneficio ecológico de usar refrigerantes hidrocarburos es grande, ya que se dejarían de emitir una gran cantidad de

moléculas de refrigerantes causantes del deterioro de la capa de ozono y que contribuyen grandemente al calentamiento global, razón por la cual, el proyecto es de gran relevancia para toda el país.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los refrigerantes hidrocarburos, en especial el R-290, presentan excelentes propiedades termodinámicas, las cuales puede ser aprovechadas en refrigeración, teniendo un desempeño equiparable a los refrigerantes fluorocarbonados.

De no acatar las medidas de seguridad indicadas, se corre el riesgo de sufrir accidentes, esto cuando se desarrollen los trabajos de la reconversión, así como también en el posterior uso de los equipos de refrigeración. Sin embargo al hacer uso de las recomendaciones brindadas, se minimizan los riesgos de cualquier accidente.

Los softwares utilizados son de gran beneficio, ya que permiten conocer de manera aproximada, las condiciones de operación del equipo de refrigeración operando con R-290, versus al R-12.

Como ya se mencionó, el funcionamiento del equipo de refrigeración no es tan satisfactorio, comparado con sus condiciones originales, sin embargo presento una disminución en la corriente de operación, contrario a los cálculos del COP presentados en el software desarrollado en EES, esto se debe a que el equipo se cargó con base a la corriente de operación, la cual es de $1.4 A$, cuando se alcanzó este valor se suspendió la carga, pero pudo notarse que las presiones difirieron de los cálculos, posteriormente el sistema se estabilizo y tuvo como producto, un descenso de $0.2 A$.

Se presentaron los costos involucrados en el procedimiento de reconversión, donde se incluyen los referentes al banco de pruebas y los

involucrados con el cambio del R-12 por R-290, lo cual muestra el costo de reconversión del equipo de refrigeración, el cual podrá tomarse como referencia para futuros procedimientos.

Se demostró que el mayor beneficio de la reconversión es en el aspecto ambiental, en donde el país tiene un gran potencial de reducción de las emisiones a la atmosfera, por un valor superior a las 70 toneladas anualmente, esto considerando únicamente un estimado de los equipos de refrigeración residenciales, lo que indica que la cifra estaría muy lejana de la real, ya que no se consideran los equipos del tipo industrial.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que las personas que se encarguen de efectuar la reconversión reciban una capacitación intensiva con respecto al tema. De no tener conocimiento de las implicaciones que conlleva hacer un uso inadecuado de los hidrocarburos, pueden producirse accidentes que pueden atentar contra su integridad física, por lo tanto antes de hacer cualquier actividad relacionada al tema, deberán certificarse.

En el país no existe una normativa para el uso de los hidrocarburos en refrigeración, por lo que es necesario crear una legislación especial para su uso, lo que permitirá normarlos y hacer un uso responsable de los mismos.

Después de ejecutado el procedimiento de reconversión del equipo de R-12 a R-290, se pudo constatar que los componentes principales del sistema, pueden conservarse sin mayor problema, sin embargo, en el caso del compresor, se observó que sufre un excesivo calentamiento, a pesar que presenta un descenso en la corriente de operación. Lo anterior a raíz que no es el adecuado para operar con R-290, por tanto se recomienda que en futuros procedimientos de reconversión, se utilicen compresores específicamente para propano. El calentamiento del compresor podría deberse también a la edad de este, ya que el usado presenta un notorio deterioro producto de esta, por tanto se recomienda realizar pruebas con uno que no rebase los 2 años de operación.

En cuanto al aceite del compresor y el filtro secador, se recomienda que siempre se reemplacen cuando se efectuó la reconversión, esto debido a que no se conoce con seguridad del estado de estos, razón por la cual, es

beneficioso su sustitución. En el caso del aceite mineral, deberá especificarse la norma ISO correspondiente.

A pesar que el equipo ejecutó el proceso de refrigeración, este no lo hizo bajo las condiciones esperadas, ya que pudo observarse que las temperaturas en el evaporador y el efecto refrigerante, no son semejantes a la operación del equipo con R-12, además se observó que la longitud del tubo capilar tuvo que modificarse, esto contrario a los estudios que se han realizado fuera del país, los cuales indican que el equipo de refrigeración operando con R-290, tiene un desempeño similar a los sistemas que utilizan refrigerantes fluorocarbonados, una de las causas podría ser a que el propano utilizado en el proyecto, no es el adecuado para ser usado en refrigeración, por lo cual se recomienda que se realice el análisis del equipo de refrigeración operando con hidrocarburo específico para refrigeración.

Se recomienda llenar los datos de la viñeta de identificación de los equipos de refrigeración, ya brindará una referencia a los técnicos que en el futuro trabajen con el sistema que fue reconvertido a propano.

Se sugiere que la institución rectora del procedimiento de reconversión de los equipos de refrigeración a hidrocarburo, sea la Universidad de El Salvador, a través de la Escuela de Ingeniería Mecánica, siendo esta la responsable de capacitar a los técnicos de refrigeración, a la vez que se deberá encargar de certificarlos, esto en conjunto del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Se sugiere que la EIM desarrolle un estudio más amplio en el área de refrigeración, específicamente en el uso de los refrigerantes HC

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAE. (2009). *2009 ASHRAE HANDBOOK; FUNDAMENTALS*. ATLANTA: ASHRAE.

BAEHR, D. I. (1965). *TRATADO MODERNO DE TERMODINAMICA (TEORIA Y APLICACIONES TECNICAS)*. BARCELONA, ESPAÑA: Imprenta Clarasó.

BOc. (14 de 05 de 2014). *BOCONLINE*. Recuperado el 14 de 05 de 2014, de <http://www.boconline.co.uk/en/products-and-supply/refrigerant-gases/natural-refrigerants/care40-r290/care40-r290.html>

CENGEL, Y. A., & BOLES, M. (2009). *TERMODINAMICA (Vol. VI)*. MEXICO: EDAMSA IMPRESIONES S.A de C.V.

DANFOSS. (2006). *CAPILARY TUBE SELECTION SOFTWARE*. Recuperado el 25 de 10 de 2014, de <http://www.danfoss.com/Spain/BusinessAreas/Refrigeration+and+Air+Conditioning/Product+Selection+Tools+Details/DanCap.htm>

DIEZ, P. F. (s.f.). *REFRIGERACION Y CALEFACCION*. Recuperado el 27 de 07 de 2013, de <http://libros.redsauce.net/>

DIGESTYC. (s.f.). *DIRECCION GENERAL DE ESTADISTICAS Y CENSOS*. Recuperado el 19 de ENERO de 2015, de <http://www.digestyc.gob.sv/index.php/temas/des/poblacion-y-estadisticas-demograficas/censo-de-poblacion-y-vivienda/hogares-censos.html>

DURACOOOL, I. (2008). *MANUAL DE CAPACITACIÓN SOBRE PRODUCTOS REFRIGERANTES DE HIDROCARBURO (HC)*. Recuperado el 21 de DICIEMBRE de 2014, de ecosave: <http://www.ecosave.com.mx/documents/duracool.pdf>

Embraco. (JULIO de 2000). TABLA DE APLICACION DE COMPRESORES DE 50 Hz Y 60 Hz, R-12, R-134a Y MEZCLAS (BLENDS). BRASIL: www.embraco.com.br.

- LAINEZ VELASQUEZ, G. I. (2013). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DROP-IN PARA LA RECONVERSIÓN DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DE FLUOROCARBONOS A HIDROCARBUROS*. UNIVESIDAD DE EL SALVADOR, SAN SALVADOR.
- MILLS, A. F. (1997). *TRANSFERENCIA DE CALOR*. COLOMBIA: PANAMERICANA FORMAS E IMPRESOS S.A.
- MINEC. (05 de OCTUBRE de 2014). *DIRECCION REGULADORA DE HIDROCARBUROS Y MINAS*. Recuperado el 05 de OCTUBRE de 2014, de <https://www.edrhym.gob.sv/drhm/documentos.aspx>
- PIXOTO, R. A. (s.f.). *MMA.GOV.BR*. Recuperado el 13 de 05 de 2014, de http://www.mma.gov.br/estruturas/ozonio/_arquivos/uso_de_fluidos_refrigerantes_hidrocarbonetos_em_refrigerao_domstica_comercial_e_ar_cond_estacionrio.pdf
- R290, A. P. (AGOSTO de 2001). *SALVADOR COBO*. Recuperado el 30 de NOVIEMBRE de 2014, de <http://salvadorcobo.files.wordpress.com/2011/07/apicaciones202020propano202020r-2902020danfooss.pdf>
- SCHAUM, R. V. (1987). *MECANICA DE LOS FLUIDOS E HIDRAULICA*. MEXICO D.F: McGraw-Hill.
- SIGET. (30 de DICIEMBRE de 2014). *www.siget.gob.sv*. Recuperado el 14 de ENERO de 2015, de SITIO WEB DE SIGET: <http://www.siget.gob.sv/index.php/tema-sistema-documento-tarifas-2297-pliego-tarifario-vigente-a-partir-del-1-de-enero-de-2015-pliego-tarifario-vigente-a-partir-del-1-de-enero-de-2015>
- WANG, S. K. (2000). *HANDBOOK OF AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION*. NEW YORK: McGraw-Hill.

ANEXO 1. RESOLUCIÓN DEL MINISTERIO DE ECONOMÍA EN CUANTO A LA LEGISLACIÓN NACIONAL DEL USO DE HIDROCARBUROS EN REFRIGERACIÓN



RII No. 008/2014

OFICINA DE INFORMACIÓN Y RESPUESTA del MINISTERIO DE ECONOMÍA DE EL SALVADOR, San Salvador, a las quince horas treinta y ocho minutos, del día veintiocho de mayo del año dos mil catorce.

Admitase la solicitud de información **MINEC-2014-132**, de fecha diecisiete de marzo de dos mil catorce, presentada por el señor **GERVER IVAN LAINEZ VELAZQUEZ**, con su Documento Único de Identidad número 04228067-0, mediante el cual solicita se le proporcione “Reglamento para el uso de propano como refrigerante.” (sic), teniendo como lugar para oír notificaciones el correo electrónico glainez56@hotmail.com.

Analizado el fondo de la misma, y cumpliendo los requisitos que establece el art.66 de La Ley de Acceso a la Información Pública y los arts. 50, 54 del Reglamento de la Ley de Acceso a la Información Pública, en adelante solo denominados Ley y Reglamento; Leídos los autos y considerando:

- I. El impulso del derecho de petición y respuesta que a todos los ciudadanos atañe está robustecido en el art. 18 de la Constitución de la República.
- II. Habiéndose realizado las gestiones internas, mediante envío de correos desde el panel de control del Sistema Gestiones de Solicitudes (SGS), a la unidad administrativa de esta Cartera de Estado, que pudiese tener en su poder la información solicitada por el señor **Gerver Iván Láinez Velázquez**, a fin de dar respuesta oportuna a la petición. La unidad responsable manifiesta que que el MINEC no ha gestionado ningún proyecto de construcción en este año 2014, por tanto en nuestros archivos **no existe dicha información.**

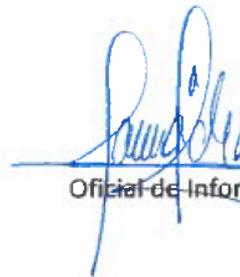
- III. Ya la ley dispone en el art. 73 que nos encontramos ante un caso de información **INEXISTENTE**, lo que impide brindar lo requerido por el peticionario Señor Edwin Alexander Escobar Gómez.

POR TANTO: Esta oficina fundamentada los arts. 3, 4, 62, 64, 65 de la Ley, conforme los fines de facilitar a toda persona el derecho de acceso a la información pública mediante procedimientos sencillos y expeditos, la promoción de la participación ciudadana; los principios de máxima

El Estado de El Salvador

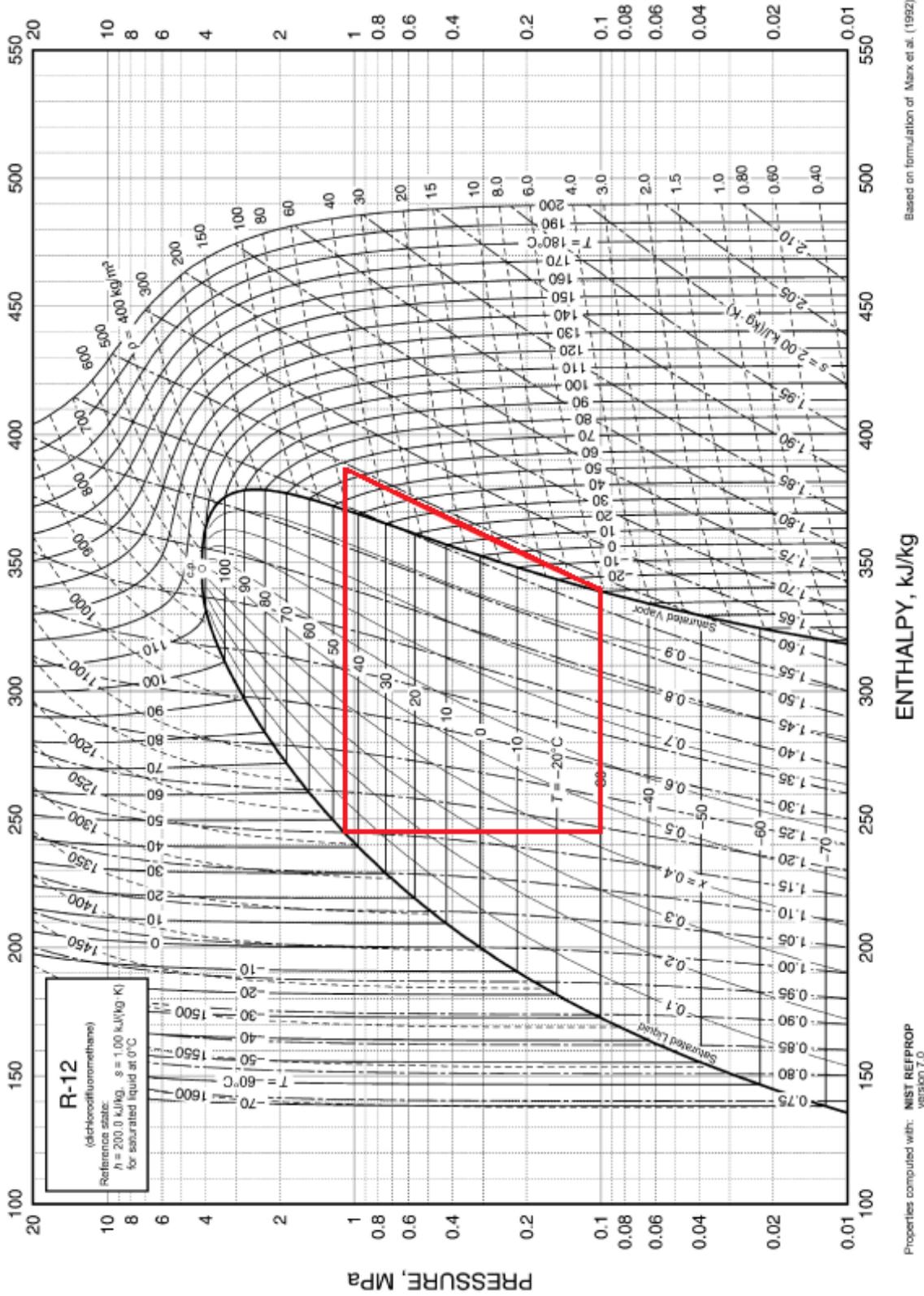


54, 55 y 56 del Reglamento; en consecuencia, **RESUELVE: COMUNÍQUESE** la ausencia de la información solicitada por el Señor Gerver Iván Láinez Velázquez, **HABILÍTESE** al solicitante a presentar recurso de apelación en los cinco días hábiles posteriores a la recepción de la presente. **NOTIFÍQUESE.**


Oficial de Información



ANEXO 2. DIAGRAMA DEL CICLO Y TABLAS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL REFRIGERANTE R-12

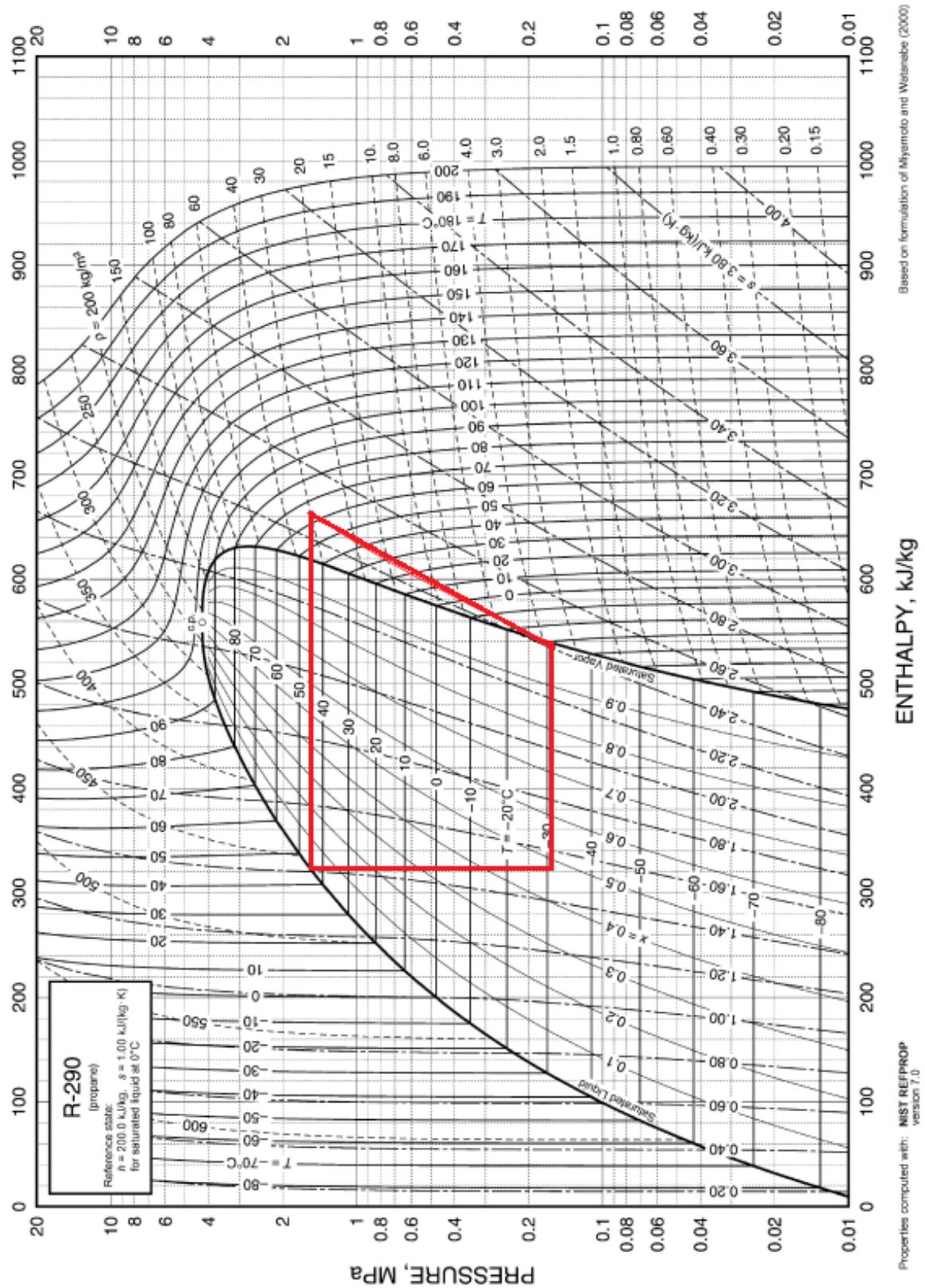


Thermophysical Properties of Refrigerants

Refrigerant 12 (Dichlorodifluoromethane) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor

Temp.,* °C	Pres- sure, MPa	Density, kg/m ³		Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c _p , kJ/(kg·K)		c _p /c _v	Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp.,* °C
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
-100	0.00119	1679.1	10.0040	113.32	306.09	0.6077	1.7210	0.819	0.449	1.182	1035	118.5	1005.0	6.78	116.7	4.27	26.48	-100
-90	0.00286	1652.8	4.3948	121.53	310.59	0.6538	1.6861	0.824	0.465	1.176	990	121.4	819.0	7.18	112.0	4.67	24.90	-90
-80	0.00619	1626.3	2.1355	129.81	315.19	0.6978	1.6576	0.831	0.481	1.172	945	124.1	684.9	7.58	107.4	5.08	23.35	-80
-70	0.01228	1599.5	1.1286	138.17	319.87	0.7400	1.6344	0.840	0.497	1.168	902	126.7	584.0	7.97	103.0	5.50	21.81	-70
-60	0.02261	1572.3	0.63992	146.62	324.61	0.7806	1.6156	0.850	0.513	1.166	859	129.1	505.1	8.37	98.8	5.93	20.30	-60
-50	0.03911	1544.7	0.38494	155.18	329.39	0.8197	1.6004	0.861	0.530	1.165	816	131.2	441.8	8.76	94.7	6.38	18.81	-50
-40	0.06409	1516.5	0.24342	163.86	334.18	0.8577	1.5882	0.873	0.548	1.166	775	133.0	389.8	9.16	90.7	6.84	17.35	-40
-30	0.10026	1487.7	0.16057	172.67	338.94	0.8946	1.5784	0.886	0.566	1.169	733	134.5	346.2	9.55	86.9	7.32	15.91	-30
-29.75 ^b	0.10133	1487.0	0.15900	172.89	339.06	0.8955	1.5782	0.887	0.567	1.169	732	134.5	345.2	9.56	86.8	7.33	15.88	-29.75
-28	0.10910	1481.9	0.14841	174.44	339.89	0.9019	1.5767	0.889	0.570	1.170	725	134.7	338.3	9.63	86.1	7.41	15.63	-28
-26	0.11854	1476.0	0.13736	176.23	340.83	0.9091	1.5751	0.892	0.574	1.171	717	135.0	330.6	9.71	85.3	7.51	15.35	-26
-24	0.12860	1470.1	0.12731	178.02	341.78	0.9163	1.5735	0.895	0.578	1.171	709	135.2	323.2	9.79	84.6	7.61	15.06	-24
-22	0.13931	1464.1	0.11815	179.81	342.72	0.9234	1.5720	0.898	0.582	1.172	701	135.4	316.0	9.87	83.8	7.71	14.78	-22
-20	0.15070	1458.1	0.10978	181.62	343.65	0.9305	1.5706	0.901	0.586	1.174	693	135.6	309.0	9.95	83.1	7.80	14.50	-20
-18	0.16279	1452.1	0.10213	183.42	344.59	0.9376	1.5693	0.904	0.590	1.175	684	135.8	302.2	10.03	82.4	7.90	14.23	-18
-16	0.17562	1446.1	0.09512	185.24	345.52	0.9447	1.5680	0.907	0.594	1.176	676	136.0	295.6	10.10	81.6	8.01	13.95	-16
-14	0.18920	1440.0	0.08870	187.06	346.44	0.9517	1.5667	0.910	0.598	1.178	668	136.1	289.2	10.18	80.9	8.11	13.67	-14
-12	0.20358	1433.8	0.08280	188.89	347.37	0.9587	1.5655	0.913	0.602	1.179	660	136.3	283.0	10.26	80.2	8.21	13.40	-12
-10	0.21878	1427.6	0.07737	190.72	348.29	0.9656	1.5644	0.917	0.607	1.181	652	136.4	276.9	10.34	79.4	8.31	13.12	-10
-8	0.23483	1421.4	0.07237	192.56	349.20	0.9726	1.5633	0.920	0.611	1.183	644	136.5	271.0	10.42	78.7	8.41	12.85	-8
-6	0.25176	1415.1	0.06777	194.41	350.11	0.9795	1.5623	0.923	0.616	1.184	636	136.6	265.2	10.50	78.0	8.52	12.58	-6
-4	0.26960	1408.8	0.06352	196.27	351.01	0.9863	1.5613	0.927	0.620	1.186	628	136.6	259.6	10.58	77.3	8.62	12.31	-4
-2	0.28839	1402.5	0.05959	198.13	351.91	0.9932	1.5603	0.930	0.625	1.189	620	136.7	254.1	10.66	76.6	8.73	12.04	-2
0	0.30815	1396.1	0.05595	200.00	352.81	1.0000	1.5594	0.934	0.630	1.191	612	136.7	248.7	10.74	75.9	8.84	11.77	0
2	0.32891	1389.6	0.05258	201.88	353.69	1.0068	1.5586	0.938	0.635	1.193	604	136.7	243.5	10.82	75.1	8.95	11.51	2
4	0.35071	1383.1	0.04946	203.76	354.57	1.0136	1.5577	0.942	0.640	1.196	596	136.7	238.4	10.90	74.4	9.06	11.24	4
6	0.37358	1376.5	0.04656	205.65	355.45	1.0203	1.5569	0.946	0.645	1.199	588	136.7	233.4	10.98	73.7	9.17	10.98	6
8	0.39756	1369.9	0.04386	207.56	356.32	1.0270	1.5561	0.950	0.650	1.202	580	136.6	228.6	11.07	73.0	9.28	10.71	8
10	0.42267	1363.2	0.04135	209.46	357.18	1.0337	1.5554	0.954	0.656	1.205	572	136.5	223.8	11.15	72.3	9.39	10.45	10
12	0.44895	1356.5	0.03901	211.38	358.03	1.0404	1.5547	0.958	0.661	1.208	564	136.5	219.1	11.23	71.6	9.51	10.19	12
14	0.47643	1349.7	0.03683	213.31	358.88	1.0471	1.5540	0.962	0.667	1.211	556	136.3	214.6	11.31	70.9	9.62	9.94	14
16	0.50514	1342.8	0.03480	215.24	359.71	1.0537	1.5533	0.967	0.672	1.215	548	136.2	210.1	11.40	70.2	9.74	9.68	16
18	0.53513	1335.9	0.03290	217.18	360.54	1.0603	1.5527	0.971	0.678	1.219	540	136.1	205.7	11.48	69.6	9.86	9.42	18
20	0.56642	1328.9	0.03112	219.14	361.36	1.0669	1.5521	0.976	0.685	1.223	532	135.9	201.4	11.57	68.9	9.98	9.17	20
22	0.59905	1321.8	0.02946	221.10	362.17	1.0735	1.5515	0.981	0.691	1.228	524	135.7	197.2	11.65	68.2	10.10	8.92	22
24	0.63305	1314.6	0.02790	223.07	362.97	1.0801	1.5509	0.986	0.697	1.232	516	135.5	193.1	11.74	67.5	10.23	8.67	24
26	0.66846	1307.4	0.02643	225.05	363.76	1.0866	1.5503	0.991	0.704	1.237	508	135.2	189.0	11.83	66.8	10.36	8.42	26
28	0.70531	1300.1	0.02506	227.04	364.54	1.0932	1.5498	0.997	0.711	1.242	499	134.9	185.0	11.92	66.1	10.49	8.17	28
30	0.74365	1292.7	0.02377	229.04	365.31	1.0997	1.5492	1.002	0.718	1.248	491	134.7	181.1	12.01	65.4	10.62	7.92	30
32	0.78350	1285.2	0.02256	231.06	366.07	1.1062	1.5487	1.008	0.726	1.254	483	134.3	177.3	12.10	64.8	10.75	7.68	32
34	0.82491	1277.6	0.02142	233.08	366.81	1.1127	1.5481	1.014	0.734	1.260	475	134.0	173.5	12.19	64.1	10.89	7.43	34
36	0.86791	1269.9	0.02034	235.12	367.54	1.1192	1.5476	1.020	0.742	1.267	467	133.6	169.8	12.28	63.4	11.03	7.19	36
38	0.91253	1262.2	0.01933	237.16	368.26	1.1257	1.5470	1.026	0.750	1.274	459	133.2	166.1	12.38	62.7	11.18	6.95	38
40	0.95882	1254.3	0.01838	239.22	368.96	1.1322	1.5465	1.033	0.759	1.282	450	132.8	162.5	12.48	62.1	11.33	6.72	40
42	1.00680	1246.3	0.01748	241.29	369.65	1.1387	1.5459	1.040	0.768	1.290	442	132.4	159.0	12.57	61.4	11.48	6.48	42
44	1.05660	1238.1	0.01662	243.38	370.33	1.1451	1.5454	1.048	0.778	1.299	434	131.9	155.5	12.67	60.7	11.63	6.25	44
46	1.10810	1229.9	0.01582	245.47	370.98	1.1516	1.5448	1.055	0.788	1.308	426	131.4	152.0	12.78	60.0	11.79	6.01	46
48	1.16140	1221.5	0.01505	247.59	371.62	1.1580	1.5443	1.063	0.798	1.318	417	130.9	148.6	12.88	59.4	11.96	5.78	48
50	1.21660	1213.0	0.01433	249.71	372.24	1.1645	1.5437	1.072	0.810	1.329	409	130.3	145.3	12.99	58.7	12.13	5.55	50
52	1.27370	1204.4	0.01365	251.85	372.85	1.1710	1.5431	1.081	0.821	1.340	400	129.7	141.9	13.10	58.0	12.31	5.33	52
54	1.33270	1195.6	0.01300	254.01	373.43	1.1774	1.5425	1.090	0.834	1.353	392	129.1	138.7	13.21	57.3	12.49	5.10	54
56	1.39380	1186.6	0.01238	256.18	373.99	1.1839	1.5418	1.100	0.847	1.366	383	128.4	135.4	13.33	56.7	12.68	4.88	56
58	1.45680	1177.5	0.01180	258.38	374.53	1.1904	1.5411	1.111	0.861	1.381	375	127.7	132.2	13.45	56.0	12.87	4.66	58
60	1.52190	1168.1	0.01124	260.58	375.05	1.1969	1.5404	1.122	0.876	1.397	366	127.0	129.1	13.57	55.3	13.08	4.44	60
62	1.58920	1158.6	0.01071	262.81	375.54	1.2033	1.5397	1.135	0.892	1.414	357	126.3	125.9	13.70	54.7	13.29	4.23	62
64	1.65860	1148.9	0.01021	265.06	376.00	1.2099	1.5389	1.148	0.910	1.433	348	125.5	122.8	13.83	54.0	13.51	4.01	64
66	1.73020	1139.0	0.00973	267.33	376.44	1.2164	1.5381	1.162	0.929	1.453	339	124.6	119.7	13.96	53.3	13.75	3.80	66
68	1.80410	1128.8	0.00927	269.62	376.84	1.2229	1.5372	1.177	0.949	1.476	330	123.8	116.7	14.11	52.6	13.99	3.59	68
70	1.88020	1118.3	0.00883	271.94	377.22	1.2295	1.5363	1.193	0.971	1.501	321	122.9	113.6	14.26	52.0	14.25	3.39	70
75	2.08110	1090.9	0.00782	277.84	377.99	1.2461	1.5337	1.241	1.037	1.576	298	120.4	106.1	14.66	50.3	14.96	2.88	75
80	2.29750	1061.4	0.00691	283.94	378.48	1.2629	1.5306	1.302	1.122	1.677	274	117.7	98.6	15.11	48.7	15.80	2.40	80
85	2.53040	1029.1	0.00608															

ANEXO 3. DIAGRAMA DEL CICLO Y TABLAS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL REFRIGERANTE R-290



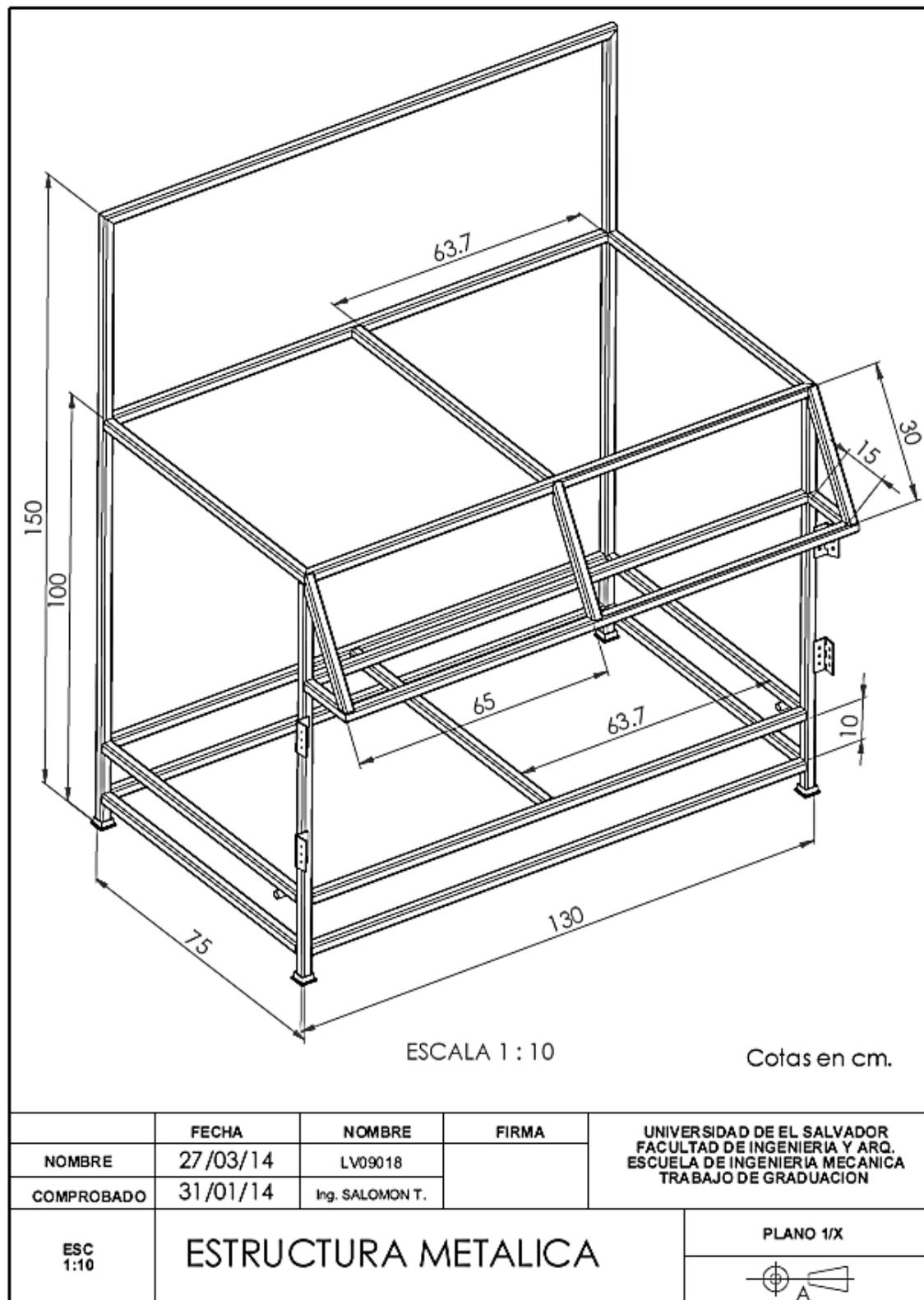
Refrigerant 290 (Propane) Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor

Temp., °C	Pressure, MPa	Density, kg/m ³ Liquid	Volume, m ³ /kg Vapor	Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg·K)		Specific Heat c _p , kJ/(kg·K)		c _p /c _v	Velocity of Sound, m/s		Viscosity, μPa·s		Thermal Cond., mW/(m·K)		Surface Tension, mN/m	Temp., °C
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor		
-150	0.00001	694.6	4316.4	-123.78	402.06	-0.6903	3.5796	1.962	1.020	1.227	1880	168.8	1343.0	3.55	192.9	3.68	31.84	-150
-140	0.00003	684.5	864.49	-104.09	412.43	-0.5366	3.3426	1.977	1.054	1.218	1813	174.9	985.4	3.80	187.7	4.28	30.29	-140
-130	0.00012	674.4	223.53	-84.23	423.12	-0.3929	3.1514	1.994	1.087	1.210	1745	180.7	761.7	4.05	182.2	4.90	28.76	-130
-120	0.00041	664.3	70.785	-64.21	434.11	-0.2576	2.9962	2.012	1.119	1.203	1679	186.3	611.6	4.31	176.4	5.55	27.24	-120
-110	0.00116	654.0	26.386	-43.99	445.38	-0.1298	2.8697	2.032	1.151	1.197	1612	191.7	505.0	4.56	170.4	6.23	25.73	-110
-100	0.00290	643.7	11.231	-23.56	456.88	-0.0083	2.7664	2.054	1.184	1.192	1545	196.8	425.7	4.82	164.4	6.94	24.23	-100
-90	0.00645	633.3	5.3300	-2.90	468.58	0.1077	2.6820	2.078	1.220	1.188	1478	201.5	364.5	5.08	158.2	7.67	22.74	-90
-80	0.01305	622.8	2.7676	18.03	480.44	0.2189	2.6130	2.106	1.258	1.184	1411	205.9	315.9	5.34	152.1	8.43	21.27	-80
-70	0.02440	612.0	1.5487	39.25	492.41	0.3259	2.5566	2.137	1.300	1.182	1345	209.9	276.4	5.60	145.9	9.22	19.81	-70
-60	0.04269	601.1	0.92250	60.81	504.44	0.4294	2.5107	2.172	1.346	1.181	1278	213.5	243.6	5.85	139.8	10.04	18.37	-60
-50	0.07057	589.9	0.57905	82.75	516.48	0.5298	2.4734	2.212	1.397	1.182	1213	216.5	216.0	6.11	133.8	10.88	16.94	-50
-42.11 ^b	0.10133	580.9	0.41388	100.36	525.95	0.6070	2.4491	2.246	1.440	1.183	1161	218.4	197.2	6.31	129.2	11.57	15.83	-42.11
-40	0.11112	578.4	0.37985	105.12	528.48	0.6275	2.4433	2.256	1.453	1.184	1147	218.9	192.6	6.36	128.0	11.76	15.54	-40
-38	0.12105	576.1	0.35076	109.65	530.87	0.6468	2.4380	2.265	1.464	1.185	1134	219.3	188.3	6.41	126.8	11.94	15.26	-38
-36	0.13166	573.8	0.32437	114.20	533.26	0.6660	2.4330	2.275	1.476	1.185	1121	219.6	184.1	6.47	125.6	12.12	14.98	-36
-34	0.14297	571.4	0.30037	118.77	535.64	0.6851	2.4282	2.285	1.488	1.186	1108	220.0	180.1	6.52	124.5	12.30	14.70	-34
-32	0.15502	569.0	0.27853	123.36	538.01	0.7041	2.4236	2.295	1.501	1.187	1095	220.3	176.1	6.57	123.3	12.48	14.42	-32
-30	0.16783	566.6	0.25861	127.97	540.38	0.7231	2.4192	2.305	1.513	1.188	1082	220.6	172.3	6.62	122.2	12.67	14.15	-30
-28	0.18144	564.2	0.24041	132.61	542.75	0.7419	2.4150	2.316	1.526	1.189	1069	220.9	168.6	6.67	121.1	12.86	13.87	-28
-26	0.19589	561.8	0.22376	137.26	545.11	0.7607	2.4109	2.327	1.539	1.191	1056	221.1	165.0	6.73	120.0	13.05	13.60	-26
-24	0.21119	559.4	0.20851	141.94	547.46	0.7795	2.4071	2.338	1.553	1.192	1043	221.3	161.5	6.78	118.8	13.24	13.33	-24
-22	0.22739	556.9	0.19452	146.64	549.80	0.7982	2.4034	2.349	1.566	1.193	1030	221.5	158.1	6.83	117.7	13.43	13.06	-22
-20	0.24452	554.5	0.18167	151.36	552.13	0.8168	2.3999	2.361	1.580	1.195	1016	221.6	154.7	6.89	116.6	13.63	12.79	-20
-18	0.26261	552.0	0.16984	156.11	554.46	0.8353	2.3965	2.373	1.595	1.197	1003	221.8	151.5	6.94	115.5	13.83	12.52	-18
-16	0.28170	549.5	0.15894	160.88	556.77	0.8538	2.3933	2.385	1.609	1.198	990	221.8	148.3	6.99	114.4	14.03	12.25	-16
-14	0.30181	546.9	0.14889	165.68	559.08	0.8722	2.3903	2.397	1.624	1.200	977	221.9	145.2	7.05	113.4	14.23	11.98	-14
-12	0.32300	544.4	0.13961	170.50	561.37	0.8906	2.3874	2.410	1.639	1.202	964	221.9	142.2	7.10	112.3	14.44	11.71	-12
-10	0.34528	541.8	0.13103	175.35	563.65	0.9090	2.3846	2.423	1.655	1.205	951	221.9	139.3	7.16	111.2	14.65	11.45	-10
-8	0.36870	539.2	0.12308	180.22	565.92	0.9273	2.3819	2.436	1.671	1.207	938	221.8	136.4	7.22	110.1	14.86	11.18	-8
-6	0.39329	536.6	0.11571	185.12	568.18	0.9455	2.3794	2.450	1.687	1.209	925	221.8	133.6	7.27	109.1	15.08	10.92	-6
-4	0.41909	533.9	0.10887	190.05	570.42	0.9637	2.3769	2.464	1.704	1.212	912	221.6	130.9	7.33	108.0	15.29	10.65	-4
-2	0.44613	531.3	0.10252	195.01	572.65	0.9819	2.3746	2.478	1.721	1.215	899	221.5	128.2	7.39	107.0	15.52	10.39	-2
0	0.47446	528.6	0.09661	200.00	574.87	1.0000	2.3724	2.493	1.739	1.218	885	221.3	125.6	7.45	106.0	15.74	10.13	0
2	0.50410	525.9	0.09111	205.02	577.06	1.0181	2.3703	2.508	1.757	1.221	872	221.1	123.0	7.51	104.9	15.97	9.87	2
4	0.53510	523.1	0.08598	210.06	579.24	1.0362	2.3682	2.524	1.776	1.225	859	220.8	120.5	7.57	103.9	16.20	9.62	4
6	0.56749	520.4	0.08120	215.14	581.41	1.0542	2.3663	2.540	1.795	1.229	846	220.5	118.1	7.63	102.9	16.44	9.36	6
8	0.60131	517.6	0.07673	220.25	583.55	1.0722	2.3644	2.556	1.815	1.232	833	220.2	115.7	7.69	101.9	16.68	9.10	8
10	0.63660	514.7	0.07255	225.40	585.67	1.0902	2.3626	2.573	1.835	1.237	819	219.8	113.3	7.75	100.9	16.93	8.85	10
12	0.67340	511.9	0.06865	230.57	587.77	1.1082	2.3608	2.591	1.856	1.241	806	219.3	111.0	7.82	99.9	17.18	8.60	12
14	0.71175	509.0	0.06498	235.79	589.85	1.1261	2.3592	2.609	1.878	1.246	793	218.9	108.8	7.88	99.0	17.44	8.34	14
16	0.75168	506.0	0.06155	241.03	591.91	1.1440	2.3575	2.627	1.901	1.251	780	218.4	106.6	7.95	98.0	17.70	8.09	16
18	0.79324	503.1	0.05833	246.32	593.94	1.1620	2.3560	2.646	1.925	1.256	766	217.8	104.4	8.02	97.0	17.97	7.85	18
20	0.83646	500.1	0.05530	251.64	595.95	1.1799	2.3544	2.666	1.949	1.262	753	217.2	102.3	8.09	96.1	18.24	7.60	20
22	0.88139	497.0	0.05246	256.99	597.93	1.1978	2.3529	2.687	1.975	1.268	739	216.6	100.2	8.16	95.1	18.53	7.35	22
24	0.92807	493.9	0.04978	262.39	599.88	1.2157	2.3514	2.708	2.001	1.275	726	215.9	98.1	8.23	94.2	18.81	7.11	24
26	0.97653	490.8	0.04726	267.83	601.80	1.2336	2.3500	2.730	2.029	1.282	713	215.2	96.1	8.31	93.3	19.11	6.87	26
28	1.0268	487.6	0.04488	273.31	603.68	1.2515	2.3486	2.753	2.058	1.290	699	214.4	94.1	8.38	92.3	19.41	6.62	28
30	1.0790	484.4	0.04264	278.83	605.54	1.2695	2.3471	2.777	2.088	1.298	685	213.5	92.2	8.46	91.4	19.72	6.38	30
32	1.1331	481.1	0.04053	284.40	607.35	1.2874	2.3457	2.802	2.119	1.307	672	212.6	90.3	8.54	90.5	20.05	6.15	32
34	1.1891	477.8	0.03853	290.01	609.13	1.3053	2.3443	2.827	2.152	1.316	658	211.7	88.4	8.63	89.6	20.38	5.91	34
36	1.2472	474.4	0.03664	295.68	610.87	1.3233	2.3429	2.855	2.187	1.326	645	210.7	86.5	8.71	88.7	20.72	5.68	36
38	1.3072	471.0	0.03485	301.39	612.57	1.3413	2.3414	2.883	2.224	1.337	631	209.7	84.7	8.80	87.8	21.07	5.44	38
40	1.3694	467.5	0.03315	307.15	614.21	1.3594	2.3399	2.913	2.263	1.349	617	208.6	82.8	8.89	86.9	21.43	5.21	40
42	1.4337	463.9	0.03154	312.96	615.81	1.3774	2.3384	2.944	2.304	1.362	603	207.4	81.0	8.99	86.0	21.81	4.98	42
44	1.5002	460.3	0.03002	318.83	617.36	1.3955	2.3368	2.977	2.348	1.375	589	206.2	79.3	9.08	85.2	22.20	4.76	44
46	1.5690	456.5	0.02857	324.76	618.86	1.4137	2.3352	3.012	2.395	1.391	575	204.9	77.5	9.19	84.3	22.60	4.53	46
48	1.6400	452.7	0.02720	330.75	620.29	1.4319	2.3335	3.050	2.445	1.407	561	203.6	75.8	9.29	83.5	23.03	4.31	48
50	1.7133	448.9	0.02589	336.80	621.66	1.4502	2.3317	3.089	2.499	1.425	547	202.2	74.1	9.40	82.6	23.47	4.09	50
55	1.9072	438.8	0.02288	352.23	624.77	1.4962	2.3268	3.201	2.652	1.478	511	198.3	69.8	9.70	80.5	24.65	3.55	55
60	2.1168	428.0	0.02020	368.14	627.36	1.5429	2.3210	3.337	2.841	1.548	474	194.1	65.7	10.03	78.4	26.00	3.02	60
65	2.3430	416.3	0.01781	384.60	629.29	1.5903	2.3139	3.509	3.086	1.641	437	189.3	61.5	10.42	76.3	27.56	2.52	65
70	2.5868	403.6	0.01565	401.75	630.37	1.6389	2.3052											

ANEXO 4. CARTA DE PROCESO DE LA RECONVERSIÓN

CARTA DE PROCESO										
UBICACIÓN:		RESUMEN								
ACTIVIDAD: Procedimiento de reconversión		Actividad	Actual		Propuesto		Ahorros			
FECHA:		Operacion	Tiempo (min)	Distancia (m)	Cantidad	Tiempo (s)	Distancia (m)	Cantidad	Tiempo (s)	Distancia (m)
ELABORADO POR:		Transporte								
DIAGRAMA EMPIEZA EN:		Demora								
DIAGRAMA TERMINA EN:		Inspeccion								
METODO:Propuesto		Almacenaje								
DIBUJO No.: 1		Totales								
HOJA 1 DE 1		Costo								
Unidad de distancia (m)	Unidad de tiempo (min)	SÍMBOLO				DESCRIPCIÓN DEL PROCESO				
3 m	2 min	○ → ◐ ◑ ▽	Transportar materiales al banco de pruebas.							
	5 min	● → ◐ ◑ ▽	Eliminacion de Fuentes de Ignicion							
-	20 min	● → ◐ ◑ ▽	Recuperación del refrigerante							
	10 min	● → ◐ ◑ ▽	Realizar Barrido con Nitrogeno							
-	10 min	● → ◐ ◑ ▽	Cambiar filtro secador							
	20 min	● → ◐ ◑ ▽	Verificar Componentes electricos							
-	10 min	● → ◐ ◑ ▽	Presurizacion del sistema y deteccion de fugas.							
	25 min	● → ◐ ◑ ▽	Vacio del sistema							
-	5 min	● → ◐ ◑ ▽	Carga del refrigerante							
	2 min	● → ◐ ◑ ▽	Sello de conexión de la carga.							
-	480 min	● → ◐ ◑ ▽	Estabilizacion del sistema							
		○ → ◐ ◑ ▽								
-		○ → ◐ ◑ ▽								
		○ → ◐ ◑ ▽								
-		○ → ◐ ◑ ▽								

ANEXO 5. ESTRUCTURA METÁLICA DEL BANCO DE PRUEBAS



ANEXO 6.DETALLE DE GASTOS VARIOS

CANTIDAD	DESCRIPCION	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
3	broca acero 1/8	1.3	3.9
3	rollo tirro	1.1	3.3
1	cuchilla Hobby	3.85	3.85
3	bisagras 2*3 pulgadas	2.25	6.75
3	cuchilla SNAP	1.1	3.3
4	Brocha	2.75	11
100	Remache POP 3/16	0.0596	5.96
2	Broca acero 3/16	1.2	2.4
2	Perno Hex 3/8	0.97	1.94
4	Resorte industrial V26C	3.75	15
4	Rodo plancha 2 pulgadas	1.8	7.2
3	Sierra Lenox	1.4	4.2
2	Disco pulidora 3/4	2.3	4.6
4	Cinta aislante negra	1.15	4.6
4	Destornilladores	2.65	10.6
1	Pasador	1.5	1.5
2	Perno 1/2	0.65	1.3
2	Tuerca 1/2	0.11	0.22
1	Cepillo rotativo	6.25	6.25
1	Pegamento	5.5	5.5
100	Remache POP 1/8	0.0085	0.85
COSTO TOTAL			104.22

ANEXO 7 MODELO DE CARTA DE COBRO DEL PROCESO DE RECONVERSIÓN

Ubicación : _____
 Empresa (uso industrial): _____
 Área (uso industrial): _____
 Capacidad del sistema: _____
 Marca y modelo del equipo _____

TABLA DE COSTOS DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSION.			
CONCEPTO	CANTIDAD	P.U	COSTO
Aceite mineral			
Filtro secador			
Tubo Capilar			
Varilla de plata			
Fundente Flux			
Termostato			
Refrigerante (kg)			
Nitrógeno			
Sistema de arranque del compresor			
Válvulas pinchadoras			
Válvulas de rosca Flare			
Mano de obra			
Imprevistos			
COSTO TOTAL			

PARAMETROS DE MEDICION	
Corriente de operación	
Voltaje	
Tipo de aceite	
Presiones de trabajo	
Baja	Alta

Observaciones: _____

Persona encargada: _____

Firma: _____

ANEXO 8 CÓDIGO EES

```

{UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
TRABAJO DE GRADUACION
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE HIDROCARBUROS EN EQUIPOS DE
REFRIGERACIÓN FLUOROCARBONADOS POR COMPRESIÓN DE VAPOR
ASESOR: ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO
DESARROLLADO POR: GERVER IVAN LAINEZ VELASQUEZ
CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2015.}
"!MODULO PARA EL CALCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO CAPILAR DEL REFRIGERADOR
ORIGINAL"
"!=====
PROCEDURE cap(R$d$;D;m;e;T_H;T_L;h_H;P_H;P_L:L_F;DELTA_L;mu;Re;f;rho;T;i;X)
DELTA_L:=0
L[0]:=0
i:=0
T[0]=T_H
DELTA_L=0
P[0]=P_H
repeat
i:=i+1
T[i]=T[i-1]-0,1
X_l=0
X_g=1
P[i]=P_sat(R$;T=T[i])
P:=P[i-1]-P[i]
X=Quality(R$;T=T[i];h=h_H)
mu_l=Viscosity(R$;X=X_l;T=T[i])
if(T[i]<-23) and (R$='R12') then
mu_g[i]=(1E-8)*T[i]+1E-5
else
mu_g[i]=Viscosity(R$;X=X_g;T=T[i])
endif
mu=X*(mu_g[i]-mu_l)+mu_l
Re:=(4*m/(Pi*(D/1000)*mu))
f:=(0,25^0,5/(log10(e/(3,7*D)+5,74/(Re^0,9))))^2
rho=Density(R$;T=T[i];h=h_H)
L[i]:= (1000*P*(((Pi^2)*(D/1000)^5) *rho)/(8*f*(m^2)))
DELTA_L:=0,999*(DELTA_L+L[i])
Until (T[i]<T_L)
T:=T[i]
L_F=DELTA_L
END
"!MODULO PARA EL CALCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO CAPILAR DEL EQUIPO
FUNCIONANDO CON EL REFRIGERANTE DE REEMPLAZO!"
"!=====
PROCEDURE
capi(R2$d$;D2;m2;e;T_H;T_L;h_H2;P_H2;P_L2:L_F2;DELTA_L2;mu_2;Re2;f2;rho2;T2;j;X2)
DELTA_L2:=0
L2[0]:=0
j:=0
T2[0]=T_H
DELTA_L2=0
P2[0]=P_H2
repeat
j:=j+1

```

```

T2[j]=T2[j-1]-0,1
X_l2=0
X_g2=1
P2[j]=P_sat(R2$;T=T2[j])
X2=Quality(R2$;T=T2[j];h=h_H2)
P2:=P2[j-1]-P2[j]
mu_l2=Viscosity(R2$;X=X_l2;T=T2[j])
if(T2[j]<-23) and (R2$='R12') then
mu_g2[j]=(1E-8)*T2[j]+1E-5
else
mu_g2[j]=Viscosity(R2$;X=X_g2;T=T2[j])
endif
mu_2=X2*(mu_g2[j]-mu_l2)+mu_l2
Re2:=(4*m2/(Pi*(D2/1000)*mu_2))
f2:=(0,25^0,5/(log10(e/(3,7*D2)+5,74/(Re2^0,9))))^2
rho2=Density(R2$;T=T2[j];h=h_H2)
L2[j]:= (1000*P2*(((Pi^2)*((D2/1000)^5)) *rho2)/(8*f2*(m2^2)))
DELTA_L2:=0,999*(DELTA_L2+L2[j])
Until (T2[j]<T_L)
T2:=T2[j]
L_F2=DELTA_L2
END
CALL capi(R2$;d$;D2;m2;e;T_H;T_L;h_H2;P_H2;P_L2:L_F2;DELTA_L2;mu_2;Re2;f2;rho2;T2;j;X2)
"!FIN DEL MODULO DE CALCULO DEL TUBO CAPILAR DEL REFRIGERANTE DE REEMPLAZO"
"!=====
CALL cap(R$;d$;D;m;e;T_H;T_L;h_H;P_H;P_L:L_F;DELTA_L;mu;Re;f;rho;T;i;X)
"!FIN DEL MODULO DE CALCULO DEL TUBO CAPILAR DEL REFRIGERANTE ORIGINAL"
{PARAMETROS DE DISEÑO}
D=Lookup('Diametro';1;d$)
Q_Evap=0,1114 [kW]
Q_Evap=m*(h[1]-h[4])
q_evap1=(h[1]-h[4])
M11=m*3600 [kg/h]
h[4]=h_H
X_1=1
h[1]=Enthalpy(R$;T=T_L;X=X_1)
e=0,0015 [mm]
X_H=0
P_H=Pressure(R$;T=T_H;X=X_1)
h_H=Enthalpy(R$;X=X_H;P=P_H)
P_L=P_sat(R$;T=T_L)
"!=====
D2=Lookup('Diametro';1;d$)
Q_Evap=m2*(h2[1]-h2[4])
q_evap2=(h2[1]-h2[4])
M22=m2*3600 [kg/h]
h2[4]=h_H2
X_12=1
h2[1]=Enthalpy(R2$;T=T_L;X=X_12)
X_H2=0
P_H2=Pressure(R2$;T=T_H;X=X_12)
h_H2=Enthalpy(R2$;X=X_H2;P=P_H2)
P_L2=P_sat(R2$;T=T_L)
"!=====
"!ANALISIS DEL CICLO DE REFRIGERACION OPERANDO CON REFRIGERANTE ORIGINAL"
P[1]=P_L
T[1]=T_L
{CONDICIONES DE ENTRADA}

```

```

P[2]=P_H
"!Análisis del compresor"
W_cID=m*(h_2s-h[1])
S[1]=Entropy(R$;T=T_L;X=X_1)
h_2s=ENTHALPY(R$;P=P[2];S=S[1]) "calculo de entalpia a la salida del compresor"
Eff=0,85
W_c=W_cID/Eff
W_c=m*(h[2]-h[1])
S[2]=Entropy(R$;h=h[2];P=P[2])
T[2]=Temperature(R$;P=P[2];S=S[2])
"!Análisis del condensador"
T[3]=T_H
P[3]=P[2]
h[3]=h_H
S[3]=Entropy(R$;h=h[3];P=P[3])
Q_con=m*(h[2]-h[3])
"!Análisis del tubo capilar"
T[4]=T_L
X[4]=X
P[4]=P_L
S[4]=entropy(R$;h=h[4];P=P[4])
COP=abs(Q_Evap/W_c)
"!=====
"!ANÁLISIS DEL CICLO DE REFRIGERACION OPERANDO CON REFRIGERANTE DE
REEMPLAZO"
P2[1]=P_L2
T2[1]=T_L
{CONDICIONES DE ENTRADA}
P2[2]=P_H2
"!Análisis del compresor"
W_cID2=m2*(h_22s-h2[1])
S2[1]=Entropy(R2$;T=T_L;X=X_12)
h_22s=ENTHALPY(R2$;P=P2[2];S=S2[1]) "calculo de entalpia a la salida del compresor"
{Eff=0,8}
W_c2=W_cID2/Eff
W_c2=m2*(h2[2]-h2[1])
S2[2]=Entropy(R2$;h=h2[2];P=P2[2])
T2[2]=Temperature(R2$;P=P2[2];S=S2[2])
"!Análisis del condensador"
T2[3]=T_H
P2[3]=P2[2]
h2[3]=h_H2
S2[3]=Entropy(R2$;h=h2[3];P=P2[3])
Q_con2=m2*(h2[2]-h2[3])
"!Análisis del tubo capilar"
T2[4]=T_L
X2[4]=X2
P2[4]=P_L2
S2[4]=entropy(R2$;h=h2[4];P=P2[4])
COP2=abs(Q_Evap/W_c2)

```

ANEXO 9 GUÍA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA



GUIA DE LABORATORIO PARA LA RECONVERSION DE EQUIPOS DE REFRIGERACION POR COMPRESION DE VAPOR A PROPANO

I OBJETIVO GENERAL

Realizar la reconversión de un equipo de refrigeración para que opere con refrigerante R-290.

II OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Conocer los medidas de seguridad que deben tomarse para la reconversión
- Identificar los procedimientos que deben seguirse para cargar con propano el sistema
- Realizar el procedimiento de carga y medir la masa del refrigerante

III TIEMPO REQUERIDO: 2 horas

IV MATERIALES, HERRAMIENTAS Y EQUIPOS

- Maquina recuperadora de refrigerante
- Cilindro de recuperación de refrigerante
- Juego de manómetros para refrigeración
- Balanza
- Cilindro de Nitrógeno
- Cilindro de refrigerante R-290.
- Extintor de polvo seco
- Herramientas varias.

V INTRODUCCION

La reconversión de los equipos de refrigeración, del uso de los refrigerantes fluorocarbonados a hidrocarburos, es de suma importancia para la humanidad, ya que se reduce el uso de sustancias nocivas para la capa de Ozono y el ambiente en general.

La práctica consiste en la recuperación del refrigerante original, pesarlo y de acuerdo a eso, sacar una relación matemática, para encontrar la cantidad de propano que deberá cargarse al sistema.

VI EJECUCION DEL PROCEDIMIENTO DE RECONVERSION

1. ELIMINAR FUENTES DE IGNICIÓN

Deberá examinarse que en los alrededores del banco de pruebas, estén libres de cualquier fuente que pueda producir cualquier tipo de chispas, deberán eliminarse o cambiar de sitio, todo equipo o fuente de ignición. Por ningún caso debe permitirse que alguna persona fume en el área de trabajo.

2. RECUPERACIÓN DE REFRIGERANTE

La recuperación del refrigerante deberá efectuarse en los cilindros adecuados y el equipo indicado deberá tomarse lectura de la cantidad de refrigerante recuperado, ya que esto servirá de base para saber la cantidad de propano que habrá de cargarse.



FIGURA 1 DISPOSICION DEL EQUIPO DE RECUPERACION DE REFRIGERANTE

3. BARRIDO CON NITRÓGENO

En este paso se pretende limpiar los componentes del equipo de refrigeración con gas nitrógeno como agente limpiador, de esta forma se pretende evacuar cualquier impureza que este contenida en el equipo, así como también, la humedad que pueda estar alojada en el mismo.

4. CAMBIO DE FILTRO SECADOR

Cuando se realiza cambio de refrigerante, se recomienda el cambio de este componente, ya que con el paso del tiempo pierde sus propiedades de filtrado.



FIGURA 2 FILTRO SECADOR

5. VERIFICACION DE LOS COMPONENTES ELECTRICOS

Debe verificarse que no haya componentes eléctricos que puedan producir alguna chispa cerca del equipo de pruebas. El termostato debe estar instalado fuera del espacio refrigerado.



FIGURA 3 TERMOSTATO

6. PRESURIZACION DEL SISTEMA

Debe cargarse nitrógeno al sistema, esto con el objetivo de comprobar si existe estanqueidad en el mismo. Utilice agua con espuma de detergente para buscar posibles fugas, se recomienda buscar de forma más cuidadosa en las partes donde se hayan hecho uniones con soldadura, entre tubería y los diferentes componentes y en la derivación de los manómetros. Si no existe fuga, pasar al siguiente paso.

7. VACIO DEL SISTEMA

Se realiza vacío al sistema, para garantizar la extracción de los gases no condensables y la humedad residual en el equipo. Deberá hacerse un vacío de 22 a 29 pulgadas de mercurio de vacío, en un tiempo de 25 minutos. Si se mantiene la presión de vacío del sistema, se está en la capacidad de pasar al siguiente paso.



FIGURA 5 BOMBA DE VACIO

8. CARGA DE REFRIGERANTE

Para realizar la carga del propano al sistema, deberá tomarse en cuenta el valor del peso del refrigerante recuperado, en el caso de que este sea del tipo fluorocarbonado, deberá cargarse aproximadamente el 40% de propano.

Posteriormente que se ha cargado, ponga en marcha el equipo, tome la tenaza amperimétrica y mida la corriente de consumo, para el compresor utilizado, la corriente de operación es de 1.2 A, si la corriente es superior a este valor, deberá extraerse refrigerante del equipo, si es menor, a la nominal, cargue cuidadosamente hasta alcanzar el valor nominal.



FIGURA 6. MEDICION DE LA MASA DE REFRIGERANTE CARGADO AL SISTEMA

9. SELLO DE CARGA Y ESTABILIZACION DEL SISTEMA.

Ya que la carga se realizó a través de la válvula de servicio del compresor, no habrá necesidad de realizar ningún tipo de sellado. Luego de haber obtenido la corriente de operación, deje operando el equipo para que estabilice.

Finalmente deberá llenar la siguiente tabla, comparando los datos obtenidos de las mediciones, con los valores recomendados de operación para el equipo de pruebas.

CONDICIONES DE OPERACION		
	RANGO	VALOR MEDIDO
CORRIENTE	1.2-1.4 A	
PRESION DE ALTA	225-250 psig	
PRESION DE BAJA	5-10 psig	
CARGA DE REFRIGERANTE	35-40 g	