

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO TECNICO-ECONÓMICO EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO AL SUSTITUIR REFRIGERANTES CON CONTENIDO DE CLORO POR REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.

Mayta A., Cyntia.

Vera S., Jesús.

Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO TECNICO-ECONOMICO EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO AL SUSTITUIR REFRIGERANTES CON CONTENIDO DE CLORO POR REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. Rodolfo Grullón

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Gianfranco Ruggiero

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.
Mayta A., Cyntia J.
Vera S., Jesús.
Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

Caracas, 26 de noviembre de 2.007

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

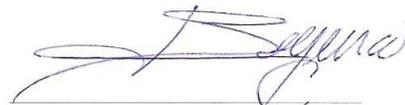
CYNTIA MAYTA y JESUS VERA

**Titulado: "ESTUDIO TECNICO-ECONOMICO EN EQUIPOS DE AIRE
ACONDICIONADO AL SUSTITUIR REFRIGERANTES CON CONTENIDO DE
CLORO POR REFRIGERANTES HIDROCARBUROS"**

*Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al
Titulo de Ingeniero Mecánico.*


Prof. Miguel Padilla
Jurado




Prof. Julio Segura
Jurado


Prof. Rodolfo Grullón
Tutor

"Hacia el 50º Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante"

RESUMEN

Mayta A., Cyntia y Vera S., Jesús

ESTUDIO TECNICO-ECONOMICO EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO AL SUSTITUIR REFRIGERANTES CON CONTENIDO DE CLOR POR REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.

**Tutor Académico: Prof. Ing. Rodolfo Grullón. Tutor Industrial: Ing. Gianfranco
Ruggiero. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Mecánica. 2007, n° pag. 125.**

Refrigerantes, Hidrocarburos, Aire acondicionado, Reconversión

En el presente trabajo se realizó la reconversión de un equipo de aire acondicionado de uso domestico, de capacidad de enfriamiento de una tonelada de refrigeración, por hidrocarburo. Para la elección de dicho hidrocarburo se efectuó una matriz de selección, la cual tomaba en cuenta los factores más importantes involucrados en el proceso de reconversión y se eligió el que reuniera mayor cantidad de los mismos, arrojando como resultado el propano. Uno de los propósitos de este trabajo es crear conciencia en las buenas prácticas de la refrigeración y el aire acondicionado, evitando utilizar sustancias agotadoras de la capa de ozono y el calentamiento global. El proceso utilizado para la reconversión del refrigerante R-22 en el equipo de aire acondicionado fue la reconversión directa, el mismo consiste en la sustitución de un refrigerante por otro, sin hacer reemplazos en los componentes de la unidad acondicionadora. Se pudo comprobar que el reemplazo de propano en la unidad de aire acondicionado fue exitoso ya que proporcionaba el mismo estado de confort que el R-22 debido a que su comportamiento termodinámico es muy similar porque alcanza temperaturas y presiones muy similares. Por otro lado, se comprobó un menor consumo de energía al realizar el proceso de reconversión, lo que implica ahorro efectivo al usar el equipo de aire acondicionado con el nuevo refrigerante.

DEDICATORIA

Dedicado a Dios y a nuestros padres, gracias por confiar en nosotros.

Jesús Alberto Vera Siverio.
Cyntia Jacquelin Mayta Avalos.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar inicialmente nuestro agradecimiento a nuestra **Universidad Central de Venezuela**, por haber permitido nuestra formación como profesionales de la ingeniería, con criterios y bases sólidas, y además por habernos brindado los mejores momentos de nuestra vida dentro de sus instalaciones.

A nuestro Tutor Académico Prof. Ing. Rodolfo Grullón, quien presto su valiosa colaboración en la realización de este trabajo, guiándonos de manera correcta para alcanzar los objetivos propuestos.

Al Prof. Ing. Julio Segura nuestro más sincero agradecimiento por haber permitido el desarrollo de este trabajo, bajo condiciones técnicamente cómodas y apropiadas dentro de la Sala de Tesistas de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Al todo el personal de FONDOIN, especialmente al Ing. Gianfranco Ruggiero, por el apoyo brindado en la elaboración de este trabajo especial de grado.

A la compañía INDARTELCA, especialmente al Sr. Angelo de Zordo, por su valiosa colaboración y grandiosa ayuda.

Un agradecimiento especial va dedicado el personal de la planta de la compañía CLIMAR, especialmente al Sr. Víctor Garrido y al Sr. Antonio Lugo, quienes prestaron su apoyo incondicional en buena parte de este trabajo; a ellos nuestra profunda gratitud.

Al Ing. Uxmal Amezcua, por su colaboración técnica, que sirvió de mucho en la toma de decisiones.

A la Profa. Ing. Tibisay Zambrano por su gran ayuda y tiempo en el desarrollo de este trabajo, además por sus valiosos consejos.

Un agradecimiento especial a todos nuestros familiares que de una manera u otra siempre creyeron en nosotros y en que lograríamos nuestras metas.

A todos aquellos amigos y compañeros de clases que siempre estuvieron presentes en los momentos en que más los necesitamos y además que contribuyeron en la elaboración de nuestro Trabajo Especial de Grado.

A todas esas personas importantes en nuestras vidas y que ocupan un lugar privilegiado en nuestro corazón, por darnos ese animo y esa confianza en si mismos para seguir adelante y no desfallecer. Gracias por existir.

SIMBOLOGÍA

A: ampere

ASTM: American Society of Testing Materials

Btu: unidad térmica británica (British thermal unit)

°C: grado Celsius

\overline{CE} : corriente eléctrica promedio

$\overline{CE}_{\text{PROPANO}}$: corriente eléctrica promedio del equipo utilizando propano

$\overline{CE}_{\text{R-22}}$: corriente eléctrica promedio del equipo utilizando R-22

CFC: clorofluorocarbonado

cm²: centímetro cuadrado

COP: coeficiente de operación

\overline{CTE} : capacidad total de enfriamiento promedio

$\overline{CTE}_{\text{PROPANO}}$: capacidad total de enfriamiento promedio del equipo utilizando propano

$\overline{CTE}_{\text{R-22}}$: capacidad total de enfriamiento promedio del equipo utilizando R-22

Ec.: ecuación

EER: relación de eficiencia energética

EER_C: relación de eficiencia energética respecto del compresor

\overline{EER} : relación de eficiencia energética promedio

$\overline{EER}_{\text{PROPANO}}$: relación de eficiencia energética promedio del equipo usando propano

$\overline{EER}_{\text{C PROPANO}}$: relación de eficiencia energética promedio del compresor usando
propano

$\overline{EER}_{\text{R-22}}$: relación de eficiencia energética promedio del equipo usando R-22

$\overline{EER}_{\text{C R-22}}$: relación de eficiencia energética promedio del compresor usando R-22

°F: grado Fahrenheit

h: hora

HCFC: hidroc fluorocarbonado

HFC: hidrofluorocarbonado
Hz: hertz
J: joule
kg: kilogramo
kJ: kilojoule
km: kilómetro
kPa: kilopascal
l: litro
m: metro
m³: metro cúbico
mA: miliampere
mbar: milibar
M_{R-22}: masa de R-22 dada por el fabricante
min: minuto
M_{manguera}: masa de propano en la manguera del manómetro
M_{propano}: masa de propano
M_{R-22}: masa de R-22
MT_{propano}: masa total de propano
mV: milivoltio
mΩ: miliohmio
nm: nanómetro
Nº: número
Nº_{med}: número de mediciones
Pa: pascal
P_{Bc}: peso de la bombona cargada
P_{Bv}: peso de la bombona vacía
 \overline{PE} : potencia eléctrica promedio
 \overline{PE}_C : potencia eléctrica promedio respecto del compresor

$\overline{PE}_{\text{PROPANO}}$: potencia eléctrica promedio del equipo utilizando propano

$\overline{PE}_{\text{R-22}}$: potencia eléctrica promedio del equipo utilizando R-22

$P_{f_{\text{bombona}}}$: peso final de la bombona

$P_{o_{\text{bombona}}}$: peso inicial de la bombona

ppb: parte por billón

ppm: parte por millón

psi: libra por pulgada cuadrada (pounds per square inch)

psig: libra por pulgada cuadrada manométrica (pounds per square inch gauge)

s: entropía; segundo

T: temperatura

$\overline{T}_{\text{amb}}$: temperatura ambiente promedio

$\overline{T}_{\text{bhi}}$: temperatura de bulbo húmedo promedio en el compartimiento interno

$\overline{T}_{\text{bsi}}$: temperatura de bulbo seco promedio en el compartimiento interno

\overline{T}_{ce} : temperatura promedio en el compartimiento externo

\overline{TE} : tensión eléctrica promedio

V: voltio

vol: volumen

V_{propano} : volumen de propano

$V_{\text{R-22}}$: volumen de R-22

W: watt

$\Delta_{\text{R-22}}$: diferencia de R-22

$\Delta\% \overline{CE}$: diferencia porcentual de la corriente eléctrica promedio

$\Delta\% \overline{CTE}$: diferencia porcentual de la capacidad total de enfriamiento promedio

$\Delta\% \overline{EER}$: diferencia porcentual de la relación de eficiencia energética promedio

$\Delta\% \overline{EER}_C$: diferencia porcentual de la relación de eficiencia energética promedio
respecto del compresor

$\Delta\% \overline{PE}$: diferencia porcentual de la potencia eléctrica promedio

$\Delta\% \bar{T}_{bhi}$: diferencia porcentual de la temperatura de bulbo húmedo promedio en el compartimiento interno

$\Delta\% \bar{T}_{bsi}$: diferencia porcentual de la temperatura de bulbo seco promedio en el compartimiento interno

ΣCE : sumatoria de la corriente eléctrica

ΣCTE : sumatoria de la capacidad total de enfriamiento

ΣPE : sumatoria de la potencia eléctrica

ΣT_{amb} : sumatoria de la temperatura ambiente

ΣT_{bhi} : sumatoria de la temperatura de bulbo húmedo en el compartimiento interno

ΣT_{bsi} : sumatoria de la temperatura de bulbo seco en el compartimiento interno

ΣT_{ce} : sumatoria de la temperatura en el compartimiento interno

ΣTE : sumatoria de la tensión eléctrica

$\Sigma \phi$: sumatoria de la humedad relativa

$\bar{\phi}$: humedad relativa promedio

Ω : ohmio

μ : micrón

ρ_{aire} : densidad del aire

$\rho_{propano}$: densidad del propano

ρ_{R-22} : densidad del R-22

ω : humedad específica

$\% P_{R-22}$: porcentaje de la diferencia en peso del R-22

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
SIMBOLOGÍA.....	VI
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INDICE DE TABLAS	XIV
INTRODUCCIÓN.	1
1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
CAPITULO I. EL PROBLEMA.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
2. JUSTIFICACIONES.....	10
2.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	10
2.2. JUSTIFICACIÓN PERSONAL.....	11
3. OBJETIVOS.....	11
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
4. ALCANCES.....	12
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	13
1. FONDOIN.....	13
2. ACONDICIONADORES DE AIRE.....	14
2.1. DEFINICIÓN.....	14
2.2. PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO:.....	14
2.3. FUNCIONAMIENTO.....	18
2.4. RELACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	20
2.5. CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO.....	20
2.6. TIPOS DE ACONDICIONADORES DE AIRE.....	20
2.6.1. DOMÉSTICOS.....	20
2.6.2. COMERCIALES.....	22
2.6.3. INDUSTRIALES.....	23
3. TERMODINÁMICA.....	24
3.1. DEFINICIÓN.....	24
3.2. PSICROMETRÍA.....	26
3.2.1. DEFINICIÓN.....	26
3.2.2. PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE.....	29
4. REFRIGERANTES.....	33
4.1. DEFINICIÓN.....	33
4.2. SELECCIÓN DE LOS REFRIGERANTES.....	34
4.3. APLICACIÓN DE LOS REFRIGERANTES.....	35

4.4. TIPOS DE REFRIGERANTES.....	35
4.4.1. REFRIGERANTES HALOGENADOS.....	35
4.4.2. REFRIGERANTES NATURALES.....	37
4.4.3. MEZCLAS REFRIGERANTES.....	40
4.4. CLASIFICACIONES DE SEGURIDAD PARA REFRIGERANTES	42
4.5. CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD DE LAS MEZCLAS DE REFRIGERANTES:	44
4.6. EFECTOS QUE CAUSAN LOS REFRIGERANTES AL AMBIENTE....	45
4.6.1. DISMINUCIÓN DEL POTENCIAL DEL OZONO:.....	45
4.6.2. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL:.....	46
4.6.3. IMPACTO DEL CALENTAMIENTO EQUIVALENTE TOTAL:.....	47
5. PROCESOS DE RECONVERSION.....	49
5.1. DEFINICIÓN.....	49
5.2. JUSTIFICACIÓN PARA REALIZAR LA RECONVERSIÓN.....	50
5.3. EQUIPO NECESARIO PARA REALIZAR LA RECONVERSIÓN.....	50
CAPÍTULO III. MARCO METODOLOGICO.....	54
1. CONSUMO DE REFRIGERANTES HCFC EN VENEZUELA.....	54
2. SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE ECOLÓGICO.....	58
2.1. REFRIGERANTES SUSTITUTOS DEL R-22.....	58
2.2. EVALUACIÓN DE LOS SUSTITUTOS DEL R-22.....	60
2.3. MATRIZ DE SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE A UTILIZAR.....	64
3. MEDIDAS PREVENTIVAS AL UTILIZAR REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.....	66
3.1. CONDICIONES PARA QUE OCURRA LA COMBUSTIÓN.....	67
3.2. MEDIDAS DE PREVENCIÓN.....	68
CAPITULO IV. PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSIÓN DE 70	70
REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO.....	70
1.1. MEDIDAS ANTES DE REALIZAR LA RECONVERSIÓN.....	70
1.2. PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSIÓN.....	71
1.2.1. PASOS PARA LA RECONVERSIÓN DIRECTA.....	71
1.2.2. PASOS PARA LA RECONVERSIÓN POR RETROFIT.....	74
CAPÍTULO V. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	78
1. MATERIALES UTILIZADOS.....	78
2. ENSAYOS DEL EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO.....	80
2.1. DESCRIPCIÓN DEL CUARTO CALORIMÉTRICO.....	80
2.2. ENSAYO DEL EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO CON REFRIGERANTE R-22.....	82
2.3. RECUPERACIÓN DEL R-22.....	84
2.4. RECONVERSIÓN DEL EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO CON PROPANO.....	87
2.4.1. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE PROPANO A UTILIZAR.....	87
2.4.2. CARGA DEL EQUIPO CON PROPANO.....	90

2.5. ENSAYO DEL EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO CON PROPANO.	92
CAPÍTULO VI. CÁLCULOS.....	94
1. CÁLCULOS PARA EL R-22.....	94
1.2. TEMPERATURA DE BULBO SECO PROMEDIO (COMPARTIMIENTO INTERNO).....	94
2. CÁLCULOS PARA EL PROPANO.....	98
3. DIFERENCIAS PORCENTUALES ENTRE LOS RESULTADOS DE AMBOS REFRIGERANTES.....	101
CAPITULO VII. COSTOS Y FACTIBILIDAD ECONOMICA.....	104
1. COSTOS DE LOS MATERIALES PARA LA RECONVERSIÓN.....	104
2. COSTOS OPERATIVOS PARA LA RECONVERSIÓN.....	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
CONCLUSIONES.....	107
RECOMENDACIONES.....	109
BIBLIOGRAFIA Y FUENTES ELECTRONICAS.....	111
BIBLIOGRAFÍA.....	111
FUENTES ELECTRONICAS.....	116
ANEXOS.....	117

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Ciclo de Acondicionamiento de Aire y Diagramas Temperatura-Entropía. (Fuente: Wark 1991)	19
Figura N° 2. Equipo de Aire Acondicionado de Ventana. (Fuente: www.aventurini.com.ar).....	21
Figura N° 3. Equipo de Aire Acondicionado "Split". (Fuente: www.climaclus.com)	21
Figura N° 4. Equipo de Aire Acondicionado Portátil. (Fuente: www.mundogar.com)	22
Figura N° 5. Consola de Pared de un Equipo de Aire Acondicionado "Split". (Fuente: www.articulo.mercadolibre.com.ve).....	22
Figura N° 6. Consola de Techo de un Equipo de Aire Acondicionado "Split". (Fuente: www.audiotronics.es).....	23
Figura N° 7. Equipo de Aire Acondicionado Industrial. (Fuente: www.infofred.com)	24
Figura N° 8. Diagrama de Mollier. (Fuente: www.cec.uchile.cl)	26
Figura N° 9. Carta psicrométrica. (Fuente: Marks 1984).....	29
Figura N° 10. Procesos de acondicionamiento de aire. (Fuente: Cengel 1998).....	30
Figura N° 11. Proceso de calentamiento y enfriamiento. (Fuente: Cengel 1998).....	30
Figura N° 12. Proceso de deshumidificación. (Fuente:Cengel 1998)	31
Figura N° 13. Procesos de humidificación. (Fuente: Cengel 1998).....	32
Figura N° 14. Proceso de mezcla de aire. (Fuente: Cengel 1998).....	33
Figura N° 15. Gráfica Temperatura – Presión del R-22 y el Propano. (Fuente: Los Autores).....	61
Figura N° 16. Gráfica Temperatura – Presión del R-22 y el Propileno. (Fuente: Los Autores).....	61
Figura N° 17. Gráfica Temperatura – Presión del R-22 y el Care-50. (Fuente: Los Autores).....	62
Figura N° 18. Conexión de los instrumentos para recuperar el R-22. (Fuente: Los Autores).....	85

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Sustancias que Dañan la Capa de Ozono. (Fuente: FONDOIN 2006).....	4
Tabla N° 2. Calendario de Eliminación Mundial de las Sustancias Agotadoras del Ozono. (Fuente: FONDOIN 2006).....	5
Tabla N° 3. Refrigerantes Halogenados Más Comunes. (Fuente: Los Autores).....	37
Tabla N° 4. Refrigerantes Hidrocarburos Más Comunes. (Fuente: Los Autores)	38
Tabla N° 5. Mezclas Más Comunes. (Fuente: Los Autores).....	42
Tabla N° 6. Clasificación de Seguridad de algunos refrigerantes más utilizados. (Fuente: Los Autores)	45
Tabla N° 7. Potencial de Destrucción de la Capa de Ozono, Potencial de Calentamiento Global y Tiempo de Vida en la Atmósfera de Diferentes Gases Refrigerantes. (Fuente: Los autores).....	48
Tabla N° 8. Cantidad, en toneladas métricas, de refrigerante R-22 que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)	54
Tabla N° 9. Cantidad, en toneladas métricas, de refrigerante R-123 que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)	55
Tabla N° 10. Cantidad, en toneladas métricas, de refrigerante R-124 que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)	55
Tabla N° 11. Cantidad, en toneladas métricas, de refrigerante R-141b que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)	56
Tabla N° 12. Cantidad, en toneladas métricas, de refrigerante R-142b que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)	56
Tabla N° 13. Consumo total, en toneladas métricas, de refrigerantes HCFC en Venezuela. (Fuente: Los autores).....	57
Tabla N° 14. Porcentaje de cada uno de los refrigerantes HCFC consumidos por año. (Fuente: Los autores).....	57
Tabla N° 15. Propiedades Físicas y Químicas del refrigerante R-22 y sus sustitutos. (Fuente: Los autores).....	60
Tabla N° 16. Matriz de selección del refrigerante sustituto. (Fuente: Los autores)....	66
Tabla N° 17. Datos del Ensayo del Equipo de Aire Acondicionado Cargado con R-22. (Fuente: Los Autores)	83
Tabla N° 18. Densidades del R-22 y del Propano. (Fuente: Los autores).....	88
Tabla N° 19. Presiones de Trabajo del Equipo de Aire Acondicionado Con Propano. (Fuente: Los Autores)	91
Tabla N° 20. Datos del Ensayo del Equipo de Aire Acondicionado Cargado con Propano. (Fuente: Los Autores)	93
Tabla N° 21. Precios de los refrigerantes. (Fuente: Los Autores).....	104
Tabla N° 22. Costos operativos de la reconversión del equipo de aire acondicionado. (Fuente: Los Autores)	105
Tabla N° 23. Costo estimado del consumo de energía. (Fuente: Los Autores).....	106

INTRODUCCIÓN.

1. CONSIDERACIONES GENERALES.

El ozono de la estratosfera juega un importante papel para la vida en el planeta, ya que proporciona un escudo natural para impedir que la radiación ultravioleta llegue a la superficie, considerada como dañina para los seres vivos. Esta capa absorbe las ondas de longitudes comprendidas entre 200 y 250 nm conocidas como ultravioleta C (UV-C), y reduce considerablemente el paso de la radiación comprendida entre las longitudes de onda de 280 y 320 nm conocidas como ultravioleta B (UV-B). Uno de los principales problemas ambientales detectados en los últimos años ha sido la destrucción del ozono estratosférico por el incremento de átomos de cloro libres liberados por los productos clorofluorocarbonados emitidos a la atmósfera por diferentes actividades. Estos son productos muy poco reactivos, lo que hizo que fueran la solución óptima para la fabricación de refrigerantes, goma espuma, extintores, aerosoles, etc. En las últimas décadas se han fabricado y usado en cantidades crecientes, que poco a poco se han ido acumulando en la atmósfera, sin considerar que su principal ventaja, la estabilidad, ha sido también el origen de sus efectos dañinos.

En esta capa de la atmósfera las radiaciones UV-C rompen las moléculas de los clorofluorocarbonos (proceso de fotodisociación) y liberan átomos libres de cloro, los cuales mediante un conjunto de reacciones aun no muy conocidas, es capaz de destruir miles de moléculas de ozono halladas en áreas de la atmósfera donde la densidad de este es mayor, es decir entre 25 a 30 km de altura. El cloro en estado natural se encuentra en la estratosfera en una concentración de una parte por billón (ppb), pero la cantidad de cloro en la estratosfera ha aumentado desde 1.5 en 1970, hasta 4.1 ppb en el año 2000. El cloro atómico actúa como catalizador, por lo que un

solo átomo puede atacar cientos de miles de moléculas de ozono. La destrucción de estas moléculas no solo aumenta la cantidad de radiación ultravioleta que alcanza la superficie terrestre, sino que favorece la absorción de las ondas de 9600 nm que deben ser irradiadas hacia el espacio, lo que favorece el calentamiento global y todas sus consecuencias. Debido a la destrucción de la capa de ozono en los seres humanos se incrementarían los casos de cáncer de piel, cataratas y otras lesiones de la vista e insuficiencia en el sistema inmunológico. En el resto de los seres vivos aparecerían efectos similares que mermarían la producción agrícola, la vida silvestre, los bosques y la diversidad biológica, reduciendo la producción de alimentos y la supervivencia.

Los productos clorofluorocarbonados e hidroc fluorocarbonados, así como también los hidrof luorocarbonados, tienen altos potenciales de calentamiento, miles de veces superiores al dióxido de carbono y el metano; son prácticamente indestructibles en la troposfera y sus periodos de vida superan en algunos casos los 100 años. A medida que la presencia de los gases que causan este calentamiento siga en aumento, los efectos serán catastróficos por las pérdidas materiales producto de las tormentas, inundaciones y sequías extremas que modificarán las ciudades, las costas, las zonas de cultivo, la productividad y la supervivencia de las especies.

Los sistemas de refrigeración comerciales han utilizado refrigerantes clorofluorocarbonados e hidroc fluorocarbonados. Debido a la utilización masiva de estos refrigerantes contaminantes de la atmósfera, y al daño que ocasionan a través del tiempo, en los países desarrollados los mismos están siendo sustituidos por otros elementos que no contienen cloro y por lo tanto no causan daño a la capa de ozono. Sin embargo en los países en vías de desarrollo, incluyendo Venezuela, los mismos se siguen utilizando.

Con este trabajo se quiere incrementar el entendimiento del daño al medio ambiente para proponer el reemplazo de los refrigerantes comerciales con contenido

de cloro que se utilizan en las industrias venezolanas por hidrocarburos, que no causan daños atmosféricos ni contribuyen al calentamiento global. Además se pretende desarrollar un estudio que determine los cambios del proceso del funcionamiento de los equipos de aire acondicionados con las modificaciones que implicarían el reemplazo de las variables relacionadas a refrigerantes ecológicos, los cuales evitan su emisión a la atmósfera. Este trabajo puede brindar una serie de beneficios por medio de los cuales los usuarios logran obtener mejor calidad de servicio y ahorros sustanciales en el mantenimiento correctivo de equipos.

2. ANTECEDENTES.

En 1974, dos destacados científicos, Sherwood Rowland y Mario Molina, de la Universidad de California en Berkeley, Estados Unidos de América, propusieron la teoría de que la capa de ozono que protege a nuestro planeta de los rayos ultravioletas provenientes de la energía solar estaba siendo afectada por gases clorofluorocarbonados emanados desde la tierra. Su investigación fue instigada por el científico británico James Lovelock quien descubrió que los clorofluorocarbonos se hallaban más o menos uniformemente distribuidos en la atmósfera global, lo que indicaba que no se descomponían como la mayor parte de las demás sustancias químicas artificiales. Fue en la década de los 80 cuando investigaciones de otras instituciones científicas y expediciones a los lugares más afectados confirmaron la hipótesis. Al fenómeno generado por estos descubrimientos se le denominó Ciencia del Ozono o Ciencia Atmosférica.

Ante el descubrimiento de que los clorofluorocarbonos y otras sustancias creadas por el hombre estaban destruyendo la capa de ozono, la comunidad internacional negoció y adoptó la **Convención de Viena** para la protección de la capa de ozono en 1985 y ratificada por 184 países, incluida Venezuela. A continuación, en 1987 se adoptó el **Protocolo de Montreal**, ratificado por 184 países sobre sustancias

que agotan la capa de ozono; cuyo objetivo es reducir y finalmente eliminar el uso de sustancias que agotan la capa de ozono. En la tabla N° 1 se indican cuales son las sustancias que dañan la capa de ozono, sus características y aplicaciones.

Tabla N° 1. Sustancias que Dañan la Capa de Ozono. (Fuente: FONDOIN 2006)

LISTAS Y GRUPOS	SUSTANCIAS	CARACTERISTICAS Y APLICACIONES
Lista A, Grupos I y II	CFC 11, CFC 12, CFC 113, CFC 114, CFC 115, Halón 1211, Halón 1301 y Halón 2402	Son las más destructivas del ozono y también las que han sido más utilizadas. Los clorofluorocarbonos se han utilizado como refrigerantes, en aerosoles, espumas sintéticas y solventes. Los halones son agentes extintores de fuego.
Lista B, Grupos I, II y III	10 clorofluorocarbonos, tetracloruro de carbono y 1,1,1 tricloroetano	Son 10 clorofluorocarbonos menos utilizados; algunos se han empleado como refrigerantes o carecen de aplicaciones; las otras dos sustancias son utilizadas como materia prima para clorofluorocarbonos y como solventes
Lista C, Grupos I, II y III	38 hidroclofluorocarbonos, 34 hidrobromofluorocarbonos y bromoclorometano Bromometano o bromuro de metilo	Algunos son sustitutos temporales de los clorofluorocarbonos y se les conoce como sustancias de transición por tener menores potenciales de agotamiento del ozono, pero la mayoría carece de aplicaciones al igual que el bromoclorometano. Es un plaguicida muy tóxico y peligroso que tiene sustitutos para la mayoría de sus usos.
Lista D	7 mezclas con clorofluorocarbonos, 29 mezclas con hidroclofluorocarbonos y 2 con bromuro de metilo	Son mezclas identificadas como productos comerciales que se han utilizado mayormente en refrigeración, aunque las mezclas de hidroclofluorocarbonos tienen aplicaciones como sustancias de transición.

En 1990 se realiza la **Enmienda de Londres al Protocolo de Montreal**, donde se establece el calendario de eliminación para las sustancias que agotan la capa de ozono. En 1992, se acuerda la **Enmienda de Copenhague**, donde se extiende la lista de sustancias controladas y perfecciona el calendario de eliminación tanto para países desarrollados como para países en desarrollo. En 1997, se acuerda la **Enmienda de Montreal**, que establece un sistema de licencias que permita controlar las

exportaciones e importaciones de las sustancias. En 1999, se acuerda la **Enmienda de Beijing**, que perfecciona el calendario de eliminación de los hidroclorofluorocarbonos y del bromuro de metilo. En la tabla N° 2 se muestra el calendario para la eliminación de las sustancias agotadoras del ozono.

Tabla N° 2. Calendario de Eliminación Mundial de las Sustancias Agotadoras del Ozono. (Fuente: FONDOIN 2006)

LISTAS Y GRUPOS	SUSTANCIAS	ELIMINACION EN PAISES DESARROLLADOS	ELIMINACION EN PAISES EN DESARROLLO
A-I	5 tipos principales de clorofluorocarbonos	1996	2010
A-II	Halones	1994	2010
B-I	Otros clorofluorocarbonos	1996	2010
B-II	Tetracloruro de carbono	1996	2010
B-III	Metilcloroformo	1996	2015
C-I	Hidrofluorocarbonos	2030	2040
C-II	Hidrobromofluorocarbono	1996	1996
C-III	Bromoclorometano	2002	2002
D	Bromuro de metilo	2005	2015

Durante el último siglo los seres humanos hemos alterado significativamente mediante diversas actividades (la quema de combustibles fósiles que emiten dióxido de carbono, metano y óxido nitroso; la destrucción de bosques que retienen el dióxido de carbono de la atmósfera en su vegetación) la química del aire. El nivel de dióxido de carbono ha aumentado en un 25%, el nivel de óxido nitroso en un 19% y el nivel de metano en un 100%. Como resultado, el planeta se está calentando rápidamente.

En 1988 se creó el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, el cual se compone de un grupo de 2500 expertos que fueron designados por los gobiernos de todo el mundo. El Panel emitió un informe en el que concluía que el calentamiento de la Tierra es un hecho científico y que su causa son las actividades humanas. El informe pronosticó que los niveles de calentamiento esperados para este siglo podrían ser mayores de los que se hayan visto en los últimos 10000 años. Los estudios

climáticos del pasado siglo indican que el mundo ya se está calentando. Los niveles de los océanos ya están subiendo. Los 10 años más calurosos de la historia han ocurrido desde 1980.

El 11 de diciembre de 1992 se acordó el **Convenio para combatir el Cambio Climático Global** y luego en 1997 se acuerda el **Protocolo de Kyoto** que fija un calendario para reducir progresivamente las emisiones de gases de efecto invernadero, estableciendo obligaciones diferentes para países desarrollados y en desarrollo. En este protocolo no solo figuran el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, los clorofluorocarbonos y los hidroclorofluorocarbonos sino también los Hidrofluorocarbonos. El **Protocolo de Kyoto** obliga a los países desarrollados a alcanzar una reducción mundial de las emisiones del 5,2% entre 2008 y 2012, frente a 1990. Para lograrlo, el protocolo prevé distintas obligaciones de recorte de la contaminación, que en conjunto garantizan la reducción del 5,2%.

A continuación se citan algunos de los protocolos, convenciones y sus enmiendas ratificados por Venezuela, los cuales están relacionados con la protección de la capa de ozono y la reducción del calentamiento global:

- **Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono**, Gaceta Oficial N° 34818, del 19 de julio de 1988.
- **Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono**, Gaceta Oficial N° 34134, del 11 de enero de 1989.
- **Enmienda de Londres al Protocolo de Montreal**, Gaceta Oficial N° 4580 Extraordinario, del 21 de mayo de 1993.
- **Convenio de Cambios Climáticos Globales**, Gaceta Oficial N° 4825 Extraordinario, del 27 de diciembre de 1994.

- **Enmienda de Copenhague al Protocolo de Montreal**, Gaceta Oficial N° 5180 Extraordinario, del 4 de noviembre de 1997.
- **Enmienda de Montreal al Protocolo de Montreal**, Gaceta Oficial N° 37217, del 12 de junio de 2001.
- **Protocolo de Kyoto**, Gaceta Oficial N° 38081, del 7 de diciembre de 2004.

La ratificación de estos acuerdos ha conducido a que en Venezuela se haya creado un marco jurídico con leyes y regulaciones vinculadas con el tema:

- **Ley Penal del Ambiente**, Gaceta Oficial N° 4358 Extraordinario, del 3 de enero de 1992.
- **Decreto N° 989, del Arancel de Aduanas**, Gaceta Oficial N° 5039 Extraordinario, del 6 de febrero de 1996.
- **Decreto N° 3220, relativo a las Normas para Reducir el Consumo de las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono**, Gaceta Oficial N° 5293 Extraordinario, del 26 de enero de 1999.
- **Ley Orgánica de Aduanas**, Gaceta Oficial N° 5353 Extraordinario, del 17 de junio de 1999.
- **Constitución de la República Bolivariana de Venezuela**, Gaceta Oficial N° 5453 Extraordinario, del 24 de marzo de 2000.
- **Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos**, Gaceta Oficial N° 5554 Extraordinario, del 13 de noviembre de 2001.
- **Decreto N° 3228, relativo a las Normas para Regular y Controlar el Consumo, la Producción, Importación, Exportación y el Uso de las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono**, Gaceta Oficial N° 5735 Extraordinario, del 11 de noviembre de 2004.
- **Decreto N° 4335, mediante el cual se dicta la reforma del decreto N° 3228 de fecha 8 de noviembre de 2004, contentivo de las Normas para Regular y**

Controlar el Consumo, la Producción, Importación, Exportación y el Uso de las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono, Gaceta Oficial N° 38392, del 7 de marzo de 2006.

Desde el punto de vista técnico, se han desarrollado a nivel mundial programas para buenas prácticas en la refrigeración que tienen como objetivos mejorar los rendimientos de los equipos, evitar el uso de las sustancias agotadoras de la capa de ozono y/o que contribuyan al calentamiento global, además de crear planes de gestión de refrigerantes con el fin de mejorar el aprovechamiento de los mismos, evitando su pérdida y estimulando su recuperación. Estos programas son auspiciados por las Naciones Unidas a través de varios programas para el medio ambiente y para el desarrollo. También existen procedimientos y técnicas establecidas para hacer la reconversión de equipos de aire acondicionado, las cuales han sido bien estudiadas aunque no en Venezuela.

En el ámbito nacional hay una tendencia orientada a no usar los refrigerantes ecológicos con el argumento que los equipos no están diseñados para operar con los mismos y se pueden dañar, o que el costo de los refrigerantes ecológicos es más elevado, incluso argumentos referentes a reducción en los rendimientos y la vida útil de los equipos.

CAPITULO I. EL PROBLEMA

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En diversos países se cuenta con equipos y sistemas que aún utilizan compuestos químicos, que causan modificaciones desfavorables en la atmósfera y por ende pueden causar diversos daños sobre los seres vivos que habitan en ellos. En Venezuela se cuenta con un extenso parque de equipos de aire acondicionado en el sector industrial y comercial, que funcionan con refrigerantes hidroclorofluorocarbonados, por lo que nos vemos en la necesidad de realizar el estudio técnico del efecto producido sobre los principales componentes electromecánicos en equipos acondicionadores de aire ante la sustitución de un refrigerante hidroclorofluorocarbonados por uno ecológico, el cual nos ofrezca las siguientes ventajas:

- No dañar la capa de ozono.
- No contribuir al efecto invernadero.
- No tóxico.
- Debe ser estable en condiciones normales.
- Debe ser tan eficiente energéticamente como el refrigerante hidroclorofluorocarbonado sustituido.
- La sustitución no implicará cambios significativos de componentes electromecánicos en el equipo.

Este estudio fue realizado en “Climar C.A.” con un equipo de aire acondicionado de uso comercial con una potencia de una tonelada de refrigeración suministrado por dicha empresa. Las especificaciones del equipo son dadas en este trabajo.

2. JUSTIFICACIONES.

Desde mediados de la década del 80, se pretende sustituir completamente los sistemas de refrigeración comercial que utilizan compuestos refrigerantes que dañan la capa de ozono, incluyendo los clorofluorocarbonos por aquellos compuestos de baja o ninguna reducción de la capa de ozono, tal como los hidroclofluorocarbonos, pero se ha comprobado que estos también tienen efectos adversos desde el punto de vista ecológico; solo pueden ser considerados como refrigerantes de transición y los mismos también desaparecerán del mercado. Por lo tanto surge la necesidad de hacer un estudio con la finalidad de sustituir los refrigerantes hidroclofluorocarbonos por otras alternativas con menor impacto ambiental.

2.1. Justificación Técnica.

Las modificaciones de cualquier naturaleza en los equipos producen cambios en el comportamiento de los mismos. Se debe realizar un estudio exhaustivo de las posibles consecuencias que puedan ocasionar la modificación de los componentes electromecánicos del equipo de aire acondicionado, ya que esto puede conducir a pérdidas materiales e incluso humanas. La sustitución de un refrigerante en un equipo de acondicionamiento de aire tiene consecuencias las cuales pueden ser favorables o desfavorables debido a que los equipos están diseñados para operar con un fluido de trabajo en particular.

De acuerdo con la reglamentación para la protección del ambiente y la preservación de la capa de ozono, Venezuela tiene como plazo hasta el 2040 para la eliminación total del consumo de refrigerantes hidroclofluorocarbonados. Con este propósito y para apoyar al sector industrial y comercial surge la inquietud de este trabajo de investigación, el cual tiene como finalidad aprovechar el mismo equipo de aire acondicionado que operaba con refrigerante hidroclofluorocarbonado y

adaptarlo a operar con refrigerante ecológico, y de esta manera comprobar la factibilidad de dicho proceso. La reconversión industrial es un proceso que permite la aplicación de tecnologías con el propósito de generar ventajas competitivas.

2.2. Justificación Personal.

Crear conciencia de la buena práctica en la refrigeración, ya que la misma no solo puede conducir a la obtención de mejores rendimientos en los equipos, sino enfocados en el aspecto ecológico, ya que algunas de las sustancias usadas en la actualidad tienen efectos colaterales, algunos ampliamente estudiados como la reducción en la capa de ozono y el calentamiento global. Otros efectos no son tan evidentes como el incremento en enfermedades de la piel o de la vista.

3. OBJETIVOS.

3.1. Objetivo General.

Realizar un estudio técnico del efecto producido en equipos acondicionadores de aire de uso comercial ante la sustitución de un refrigerante hidroclorofluorocarbonado (HCFC) por uno ecológico (hidrocarburo).

3.2. Objetivos Específicos.

- Determinar cual de los refrigerantes HCFC es el más usado en el área de acondicionamiento de aire en Venezuela.
- Identificar cuales son los refrigerantes ecológicos que podrían ser utilizados en el área del aire acondicionado, para llevar a cabo el proceso de reconversión industrial.

- Realizar un análisis comparativo para establecer cual es el refrigerante ecológico más adecuado y que represente la mejor alternativa en el sector comercial.
- Analizar las medidas preventivas que deberán adoptarse en el sistema de aire acondicionado, para garantizar una operación sin riesgo de explosión.
- Seleccionar la norma más adecuada para calcular el rendimiento energético del equipo de aire acondicionado.
- Realizar un ensayo técnico en un equipo de aire acondicionado para demostrar la factibilidad del proceso de reconversión.
- Analizar como incide el proceso de reconversión en el rendimiento energético (COP o EER) del equipo de aire acondicionado.
- Establecer el paso a paso para efectuar el proceso de reconversión para varios refrigerantes y en especial para el propano por ser de mayor disponibilidad en el mercado y además por sus bajos costos.

4. ALCANCES.

- Determinar la posibilidad de utilizar el propano como refrigerante, destacando sus ventajas y desventajas.
- Verificar si utilizando el equipo original es posible realizar una reconversión directa (drop-in), es decir, sin cambio de sus componentes (compresor, motor, filtro, etc.)
- Investigar si el proceso de reconversión esta asociado a un ahorro de energía.
- Hacer un estudio comparativo entre el equipo reconvertido y el original, destacando el costo de reconversión y su recuperación en ahorro efectivo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

1. FONDOIN.

FONDOIN (Fondo de Reconversión Industrial) es una fundación pública sin fines de lucro, encargada de promover y garantizar la aplicación de los convenios internacionales firmados por el Estado venezolano relativos al control de las sustancias agotadoras de la capa de ozono. Fue creado en octubre de 1992, y es la primera y única institución de carácter técnico en Venezuela especializada en el tema del uso, consumo, producción y manejo de sustancias que agotan la capa de ozono.

FONDOIN está adscrito al Ministerio de Industrias Ligeras y Comercio y recibe aportes del Fondo Multilateral para la aplicación del Protocolo de Montreal, creado para cooperar con los países en desarrollo en el cumplimiento de sus compromisos internacionales para preservar la capa de ozono y eliminar el uso de las sustancias que la destruye.

El objetivo de FONDOIN es eliminar gradualmente el consumo de las sustancias agotadoras de la capa de ozono, mediante la reconversión industrial y tecnológica de las empresas que las usan, la promoción de las buenas prácticas en empresas de refrigeración y la ejecución de las asignaciones del Ministerio de Industrias Ligeras y Comercio en materia de reconversión ambiental, tecnológica, energética y laboral.

Para llevar adelante su misión, FONDOIN trabaja en coordinación con los Ministerios de Industrias Ligeras y Comercio, Ambiente y Recursos Naturales, Relaciones Exteriores y con otros entes industriales, además de contar con el apoyo de organismos internacionales tales como la Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), el Programa de las Naciones Unidas para el

Desarrollo (PNUD), el Banco Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

2. ACONDICIONADORES DE AIRE.

2.1. *Definición.*

Una unidad acondicionadora de aire es un conjunto de equipos que tiene la finalidad de lograr un tratamiento del aire mediante el control simultáneo de su temperatura, humedad, higiene y distribución. Estas unidades constituyen una de las aplicaciones de la refrigeración, que es la rama de la ciencia que trata con el proceso de reducción de la temperatura de un espacio material, debajo de la temperatura circundante.

2.2. *Principales componentes de los equipos de aire acondicionado:*

Los componentes básicos de una unidad de aire acondicionado, son:

- **Evaporador:** Es un equipo intercambiador de calor, que tiene como objetivo proveer una transferencia continua y eficiente de calor desde el medio que se desea enfriar, al fluido refrigerante. En los evaporadores más comunes el refrigerante fluye por los tubos, mientras que el aire que se desea enfriar fluye por el exterior de los mismos.

Los evaporadores que se usan en sistemas de aire acondicionado se clasifican en dos tipos: evaporadores de expansión directa y evaporadores inundados. Los evaporadores de expansión directa contienen la cantidad de refrigerante líquido necesario, reduciendo la cantidad de refrigerante en el sistema; mientras que los

evaporadores de tipo inundado constan de un acumulador donde almacena el refrigerante y solo permite el paso de refrigerante líquido al evaporador.

- **Compresor:** Su función es aumentar la presión de vaporización, hasta la presión a la cual el gas puede ser condensado. Esta presión es elevada, lo que proporciona la energía necesaria para hacer que el refrigerante circule a través de la tubería y el equipo, venciendo la resistencia de fricción. Además, el gran diferencial de presión creado motiva la expansión súbita en la válvula de expansión, causando una caída de temperatura.

Existen dos tipos de compresores, los de desplazamiento positivo y los centrífugos. Los compresores de desplazamiento positivo trabajan reduciendo el volumen de un gas en un espacio confinado y aumentando con ello su temperatura. Tal es el caso de los compresores recíprocos, los rotatorios y los de tornillo. Los compresores centrífugos trabajan aumentando la energía cinética del gas (incrementando la velocidad), la cual luego se convierte en aumento de presión al reducir la velocidad del fluido.

- **Condensador:** Es un intercambiador de calor, que elimina del sistema la energía ganada por el evaporador y el compresor, transfiriendo calor al aire atmosférico o el agua, dependiendo del tipo de condensador. En el condensador enfriado por aire el refrigerante circula a través de un serpentín y el aire, impulsado por un ventilador, pasa por el exterior de los tubos. Los condensadores enfriados por agua generalmente son del tipo de concha y tubos, se acompañan de una torre de enfriamiento para bajar la temperatura del agua de condensación y pueden manejar capacidades mayores que los condensadores enfriados por aire.
- **Tubo Capilar:** Es el dispositivo, consistente en un simple tubo de cobre, que normalmente se emplea para mantener el diferencial de presión requerida entre el

condensador y el evaporador. En la fase de diseño del circuito de refrigeración puede seleccionarse algún diámetro interno disponible y luego se ajusta la longitud hasta lograr el efecto de enfriamiento en el evaporador, la presión de condensación y la temperatura de retorno al compresor que se desean.

- **Válvula de expansión:** Es un dispositivo que controla el caudal de líquido refrigerante que entra al evaporador. Como su nombre lo indica, la válvula hace que el refrigerante que sale del condensador se expanda, disminuyendo su presión hasta un punto en el que se mantenga constante en el evaporador. Existen dos tipos de válvulas de expansión
 - Válvula de expansión automática: Se acciona directamente por la presión existente en el evaporador. Funciona cuando el compresor esta en marcha, si no permanece cerrada. A medida que la presión en el evaporador desciende la válvula se abre y permite pulverizar el refrigerante dentro del evaporador.
 - Válvula de expansión termostática: Este tipo de válvula se controlan por temperatura. Poseen una cámara hermética, donde se expande el refrigerante, y un bulbo sensor que, mediante las variaciones de temperatura controla la apertura o cierre de la válvula. También actúan sí el compresor esta en marcha.
- **Filtro secador:** El filtro secador se instala a la entrada del capilar de un sistema de refrigeración para que al recibir el líquido refrigerante prevenir el ingreso de humedad y sustancias extrañas en él. Este dispositivo se selecciona en la fábrica en función del gas refrigerante a emplear en el sistema.
- **Indicador de líquido:** Este dispositivo se instala en la línea del líquido para observar el flujo del refrigerante. Tiene como objetivo, determinar si la carga de

refrigerante es adecuada, o si existe una restricción en la línea de líquido. Cuando el refrigerante líquido fluye a través de la línea, el indicador permanece transparente. Si aparecen burbujas, éstas indican la presencia de un gas y que no fluye la cantidad adecuada de líquido.

- **Intercambiador de calor entre líquido y succión:** Este dispositivo subenfía el refrigerante líquido que sale del condensador, transfiriendo calor del mismo al gas de succión que sale del evaporador, el cual a su vez se sobrecalienta. Este intercambiador se utiliza para impedir la formación súbita del gas de vaporización en la línea de líquido, para impedir el flujo de retorno del líquido al compresor y mejorar la eficiencia del sistema.
- **Válvula de solenoide:** Es una válvula accionada electrónicamente que se encuentra en una posición totalmente abierta o totalmente cerrada, y no regula en absoluto. Se utiliza en los puntos donde se desea detener el flujo de refrigerante.
- **Regulador de presión de succión:** Es una válvula que se instala en la línea de succión, entre el evaporador y el compresor, y que limita la presión de succión a un valor máximo preestablecido, con el fin de evitar una elevada presión de succión durante el descenso de temperatura o la descongelación.
- **Regulador de presión del evaporador:** Esta construido de manera similar al regulador de presión de succión, y se instala en la línea de succión, a la salida del evaporador. Limita la presión del evaporador a un valor mínimo preestablecido, y se utiliza en los casos en que la temperatura del evaporador se deba mantener por encima de un cierto nivel.
- **Lubricante:** El lubricante se utiliza en los compresores de aire acondicionado para lubricar las superficies que están en contacto y fricción entre sí, reduciendo

el desgaste de las piezas y disminuyendo la resistencia a la fricción. El lubricante lleva cabo algunas funciones adicionales además de la lubricación. En el caso de los compresores de desplazamiento positivo, el lubricante provee un sello líquido entre los lados de alta y baja presión (descarga y succión) del compresor. También actúa como medio de intercambio dinámico de calor entre los componentes que producen calor durante su funcionamiento y la cara interna de la carcasa del compresor.

Existen dos tipos de lubricantes que se utilizan en los equipos de aire acondicionado: los lubricantes minerales, que se obtienen por destilación del petróleo, y los lubricantes sintéticos, que se obtienen en procesos especiales realizados en plantas petroquímicas. Estos últimos se dividen en alquilbencenos, poliolésteres y alquilglicoles.

2.3. Funcionamiento.

El acondicionamiento de aire funciona como un ciclo cerrado que se repite indefinidamente y donde no hay pérdida de materia. El refrigerante en estado de gas saturado entra al compresor, y en él se eleva su presión y temperatura. Cuando sale del compresor, el refrigerante pasa al condensador, en donde el aire exterior pasa a través de él, absorbiendo calor del refrigerante, provocando un enfriamiento hasta llegar al estado de líquido saturado. Luego, el refrigerante pasa a la válvula de expansión, en donde se regula su caudal y se disminuye su presión a entalpía constante. El refrigerante, que se encuentra en forma de una mezcla gas-líquido, entra al evaporador, y en él se efectúa un intercambio de calor, calentándose el refrigerante hasta llevarlo a la condición de gas saturado, y entonces se inicia de nuevo el ciclo.

Dentro de este ciclo se pueden identificar dos niveles de presión basados en la presión de operación. El lado de alta presión, que está bajo la presión del

condensador, y el lado de baja presión, bajo la presión del evaporador. El lado de alta presión incluye el compresor, el condensador, el dispositivo de expansión y todos los tubos de interconexión entre estos elementos y el dispositivo de expansión. El lado de baja incluye el evaporador, los tubos de interconexión entre él y el compresor y la salida del dispositivo de expansión. En la figura N° 1 se muestra el ciclo y los diagramas (ideal y real) T-s de un equipo de aire acondicionado.

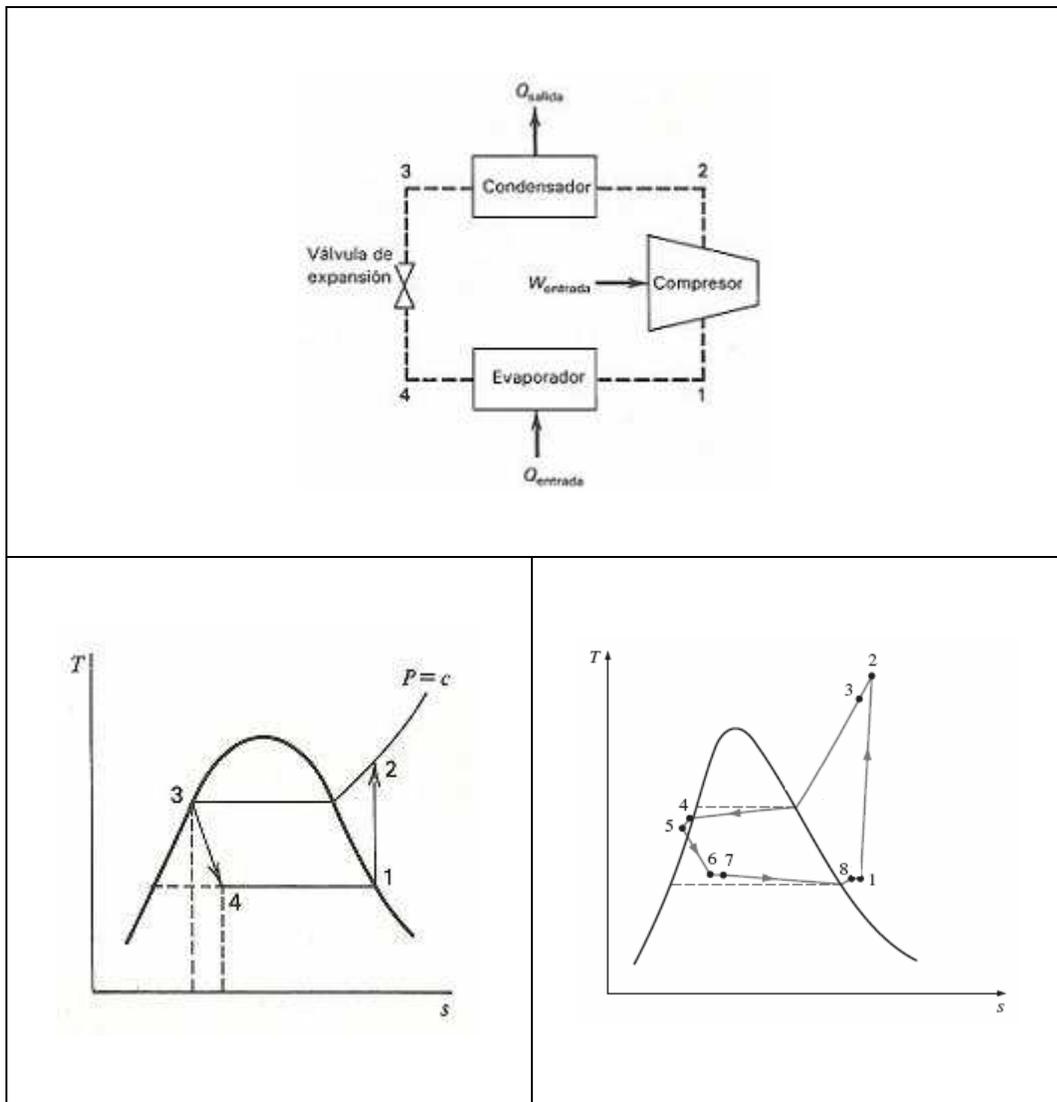


Figura N° 1. Ciclo de Acondicionamiento de Aire y Diagramas Temperatura-Entropía. (Fuente: Wark 1991)

2.4. Relación de eficiencia energética.

La relación de eficiencia energética (EER en inglés) de un equipo de acondicionamiento de aire es una expresión de la eficiencia del ciclo y se define como la relación entre el calor absorbido del ambiente y el trabajo de entrada al equipo, y se calcula mediante la expresión:

$$EER = \frac{Q_L}{W_{ent}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, EER es la relación de eficiencia energética.

Q_L es el calor absorbido del ambiente.

W_{ent} es el trabajo de entrada del equipo.

2.5. Capacidad de enfriamiento.

La capacidad de enfriamiento de un acondicionador de aire es la rapidez con que puede extraer calor del espacio refrigerado, la cual se expresa en toneladas de refrigeración. Una tonelada de refrigeración corresponde a una absorción de calor de 12000 Btu/h ó 288000 Btu/día, que es el equivalente del calor que se debe extraer para fundir 1 tonelada de hielo a 0 °C en 24 horas.

2.6. Tipos de acondicionadores de aire.

2.6.1. Domésticos.

- **De ventana:** Los equipos de aire acondicionado de ventana se fabrican bajo el concepto de facilitar su montaje y mantenimiento. Pueden ser montados en la ventana de una habitación, o en una apertura hecha con ese propósito en una

pared. Solo requieren de una estructura ligera de apoyo y de protección contra el clima, de la cual puede extraerse totalmente para su mantenimiento, y un tomacorriente con la tensión, frecuencia y capacidad de corriente requerida por el aparato.



Figura N° 2. Equipo de Aire Acondicionado de Ventana. (Fuente: www.aventurini.com.ar)

- **Tipo “Split”:** Son los equipos que más se están instalando en la actualidad ya que presentan muchas ventajas frente a los de ventana y son relativamente económicos. La unidad que contiene el compresor se encuentra en el exterior del edificio y se comunica con la unidad interior (evaporador - condensador) mediante unos tubos, por lo que el agujero que hay que practicar en la pared es relativamente pequeño. Aunque de un costo mayor, las unidades “split” tienen la ventaja de un menor nivel de ruido, en comparación con las unidades de ventana.



Figura N° 3. Equipo de Aire Acondicionado “Split”. (Fuente: www.climaclusos.com)

- **Compacto:** Al igual que los acondicionadores de aire de ventana, todo el equipo está instalado en una consola que contiene todos los componentes del sistema. Se las emplea habitualmente en instalaciones comerciales donde el espacio es muy limitado y las necesidades de enfriamiento no pueden ser satisfechas por otro tipo de acondicionamiento de aire.
- **Portátil:** Incorporan todo el sistema en una caja acoplada con ruedas de tal forma que se puede transportar fácilmente de una estancia a otra. Dispone de una manguera flexible que expulsa el aire caliente hacia el exterior. No requiere de instalación, se transportan con facilidad y emiten muy poco ruido.



Figura N° 4. Equipo de Aire Acondicionado Portátil. (Fuente: www.mundogar.com)

2.6.2. Comerciales.

- **Tipo “Split” con consola de pared:** Se utiliza especialmente en comercios y locales pequeños. Son de fácil instalación y mantenimiento. Los locales donde se utilicen deben tender a ser cuadrados en vez de muy rectangulares.



Figura N° 5. Consola de Pared de un Equipo de Aire Acondicionado “Split”. (Fuente: www.articulo.mercadolibre.com.ve)

- **Tipo “Split” con consola de techo:** Es ideal en pequeños locales y comercios con alta rotación de clientes y ambientes abiertos. Su instalación es sencilla y de bajo costo para el tipo de aplicación.



Figura N° 6. Consola de Techo de un Equipo de Aire Acondicionado “Split”. (Fuente: www.audiotronics.es)

- **Central:** La idea es la misma que en los tipos “split” pero la instalación es mucho mayor. Este diseño se aplica con frecuencia en acondicionamiento completo de edificios y locales donde se requiere de confort extra y de un mayor nivel de decorado. Tiene alta estabilidad térmica y su mantenimiento es relativamente espaciado en el tiempo.

2.6.3. Industriales.

Los equipos de aire acondicionado industrial son prácticamente del mismo tipo que los equipos comerciales y domésticos, solo se diferencian en que se utilizan para lograr condiciones adecuadas para procesos de manufactura o salas de procesos. Los equipos para acondicionamiento industrial se diseñan según la necesidad específica de enfriamiento, humidificación, caudal y filtrado de aire, y sistemas de control requeridos.

En algunos casos, debido al tamaño de las unidades industriales, están utilizando condensadores enfriados por agua, por lo que se emplean chillers para enfriar el agua. Un chiller es una unidad de refrigeración que, utilizando la misma operación de los

equipos de acondicionamiento de aire, se utilizan para enfriar agua o cualquier otro fluido en fase líquida.

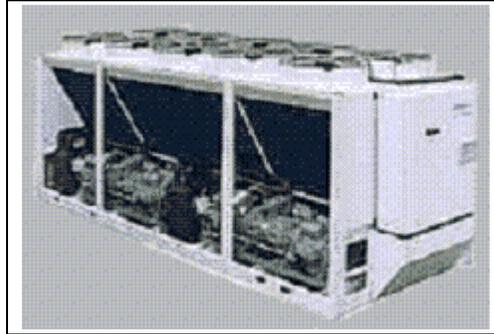


Figura N° 7. Equipo de Aire Acondicionado Industrial. (Fuente: www.infofred.com)

3. TERMODINÁMICA.

3.1. Definición.

La termodinámica es la ciencia que estudia los aspectos de la energía, sus transformaciones y la interacción energía- materia. El acondicionamiento de aire y la refrigeración están íntimamente ligados con la termodinámica. Para poder comprender el comportamiento del refrigerante dentro del sistema se debe tener conocimiento de los siguientes conceptos:

- **Temperatura:** Es el estado relativo de calor o frío de un cuerpo. Para medir la temperatura se utilizan escalas que se basan en dos temperaturas de referencia, llamados puntos fijos: el punto de fusión del hielo y el punto de ebullición del agua a presión atmosférica.

- **Energía:** Es la capacidad de un cuerpo de realizar trabajo mecánico mientras realiza un cambio de estado. La energía puede estar presente en diversas formas, como energía cinética, potencial, interna, etc.
- **Trabajo:** Es la resultante de aplicar una fuerza sobre un cuerpo y obtener movimiento en sentido de la fuerza aplicada.
- **Calor:** Es la transferencia de energía de un cuerpo a otro como consecuencia de un diferencia de temperatura entre los dos. Esta transferencia de energía se puede realizar mediante tres formas: Convección, que es la transferencia de energía térmica por movimiento de masa; Conducción, que es la transferencia de energía como vibración molecular; y Radiación, que es la transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas.
- **Ley Cero de la Termodinámica:** Esta ley establece que cuando dos cuerpos tienen temperaturas iguales con un tercer cuerpo, tienen a su vez igualdad de temperaturas entre ellos dos.
- **Primera Ley de la Termodinámica:** Esta ley establece que el aumento de energía interna de un sistema es igual al calor absorbido por el mismo, menos el trabajo realizado por el sistema.
- **Segunda Ley de la Termodinámica:** Establece que un proceso periódico no producirá otro efecto que el de tomar calor de un foco calorífico y convertirlo íntegramente en trabajo.
- **Gráfico de Mollier:** En este gráfico se muestran de forma tabulada las propiedades termodinámicas de las sustancias en función de su temperatura, presión y volumen. Este gráfico es de gran ayuda tanto para calcular uno o varios

procesos y representar los cambios de estado que se producen en ellos. El diagrama de Mollier solo representa una porción del espacio completo que se limita a las temperaturas y presiones más usuales.

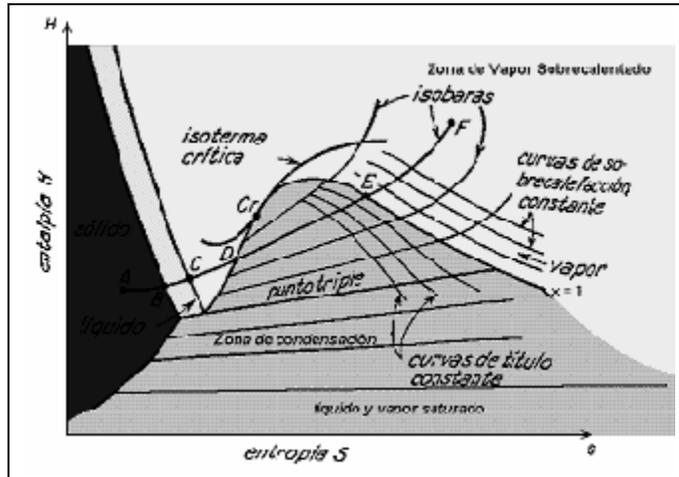


Figura N° 8. Diagrama de Mollier. (Fuente: www.cec.uchile.cl)

3.2. Psicrometría.

3.2.1. Definición.

Es la ciencia que trata de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y del efecto de la humedad atmosférica, temperatura, circulación y pureza del aire sobre los materiales y sobre el confort humano. La psicrometría se aplica en general al tratamiento del aire, actuando sobre los parámetros ya mencionados, provocando efectos de enfriamiento o calentamiento, no solo en la fisiología humana sino también para crear condiciones para conservar, transformar o manejar productos o materiales sin perjudicar su apariencia y propiedades.

A continuación se presentan un grupo de conceptos claves en cualquier estudio psicrométrico:

- **Temperatura de bulbo seco:** Es la temperatura de la atmósfera que indica un termómetro ordinario.
- **Temperatura de bulbo húmedo:** Es la temperatura que indica un termómetro cuyo bulbo esta cubierto por una mecha húmeda y expuesto a una corriente rápida de aire. Esta es la temperatura que se obtiene de la evaporación del agua, y se mide con un psicrómetro.
- **Temperatura de rocío:** Es la temperatura a la cual empieza la condensación de vapor cuando el aire se enfría a presión constante.
- **Temperatura de saturación adiabática:** Es la temperatura que alcanza el aire cuando pasa por un canal largo de agua hasta que se satura, lo que permite determinar fácilmente la humedad específica y relativa del aire.
- **Humedad relativa (ϕ):** Es la cantidad de vapor que el aire contiene en relación con la cantidad máxima de vapor que el aire puede contener a la misma temperatura. Se define según la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde, P_v es la presión del vapor en el aire.

P_g es la presión de saturación del vapor a la misma temperatura.

- **Humedad específica (ω):** También llamada contenido de humedad, es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire. Se calcula utilizando la ecuación siguiente:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde, m_v es la masa de vapor en el aire.

m_a es la masa de aire.

- **Calor latente:** Es el calor que se requiere para evaporar una cantidad de vapor de agua en una cantidad determinada de aire atmosférico a la temperatura de bulbo húmedo.
- **Calor sensible:** Es la cantidad de calor que se transfiere a la mezcla de vapor y aire para aumentar su temperatura, o la cantidad de calor que debe extraerse para disminuirla
- **Entalpía de mezcla:** Es la cantidad de calor total de la mezcla de aire y vapor de agua, y es la suma de calor latente y calor sensible.
- **Carta Psicrométrica:** La carta psicrométrica (Figura N° 9) es una gráfica de la relación de humedad en función de la temperatura de bulbo seco y como parámetros la humedad relativa, la temperatura de bulbo húmedo y la entalpía de la mezcla por masa de aire seco, y en las que se pueden determinar las propiedades de las mezclas de aire y de vapor de agua. En las cartas psicrométricas se puede indicar la zona de comodidad para el humano, como el intervalo de condiciones que son más convenientes para el bienestar. Un acondicionador de aire, para considerarse adecuado, debe entonces poder mantener un ambiente dentro de la zona de comodidad cualesquiera fueran las condiciones atmosféricas.

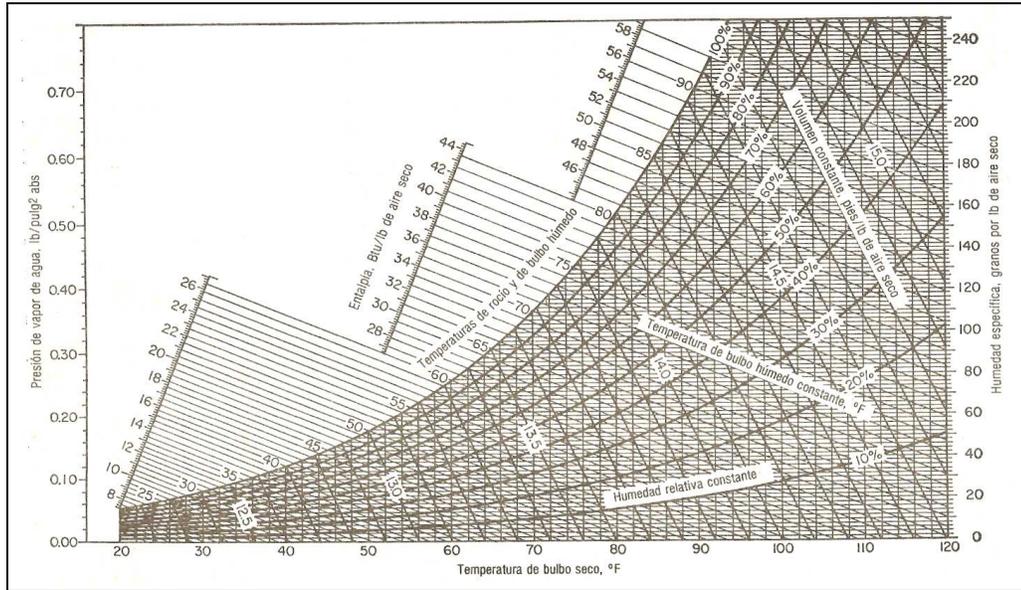


Figura N° 9. Carta psicrométrica. (Fuente: Marks 1984)

3.2.2. Procesos de acondicionamiento de aire.

Los procesos psicrométricos que modifican la temperatura y la humedad del aire incluyen calentamiento y enfriamiento de aire por encima del punto de rocío, deshumidificación, humidificación y mezclado de aire. Mediante estos procesos, en diversas secuencias, es posible tratar cualquier tipo de aire dado y producir una atmósfera con las características requeridas. En la figura N° 10 se muestra como se identifican estos procesos en la carta psicrométrica.

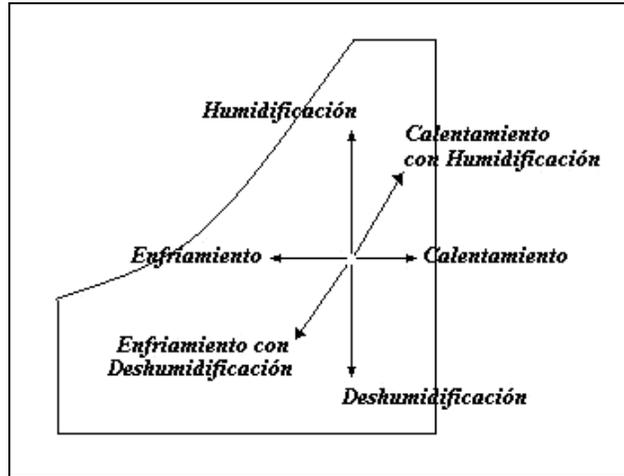


Figura N° 10. Procesos de acondicionamiento de aire. (Fuente: Cengel 1998)

3.2.2.1. Calentamiento y enfriamiento por encima del punto de rocío.

Estos procesos implican que no se produce condensación del vapor. La presión barométrica y la composición no se alteran, y las presiones parciales permanecen constantes. En la figura N° 11 se muestra la representación de estos procesos en la carta psicrométrica.

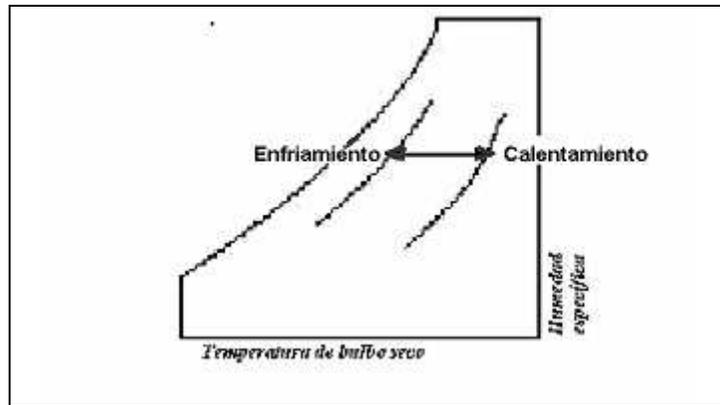


Figura N° 11. Proceso de calentamiento y enfriamiento. (Fuente: Cengel 1998)

3.2.2.2. Deshumidificación.

La deshumidificación, o enfriamiento por debajo del punto de rocío, involucra la condensación del vapor, al final, el aire se encuentra saturado y se tiene aparición de líquido. Este proceso puede llevarse a cabo en una superficie enfriadora, en la cual el aire pasa sobre tubos con salmuera o refrigerante que circula en su interior. En la figura N° 12 se muestra como se representaría este proceso en la carta psicrométrica.

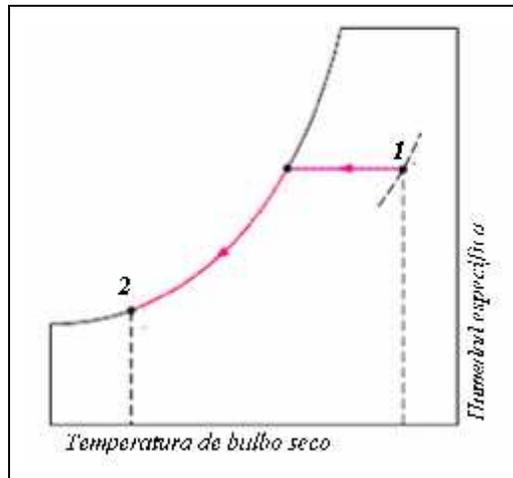


Figura N° 12. Proceso de deshumidificación. (Fuente:Cengel 1998)

3.2.2.3. Humidificación.

La humidificación, o saturación adiabática, es un proceso adiabático (no se extrae ni se adiciona calor) que se realiza en una cámara de rocío por la cual se hace pasar aire. El calor de vaporización del agua que se evapora se obtiene del enfriamiento del aire que pasa por la cámara. Las opciones más comunes para la humidificación de una corriente de aire son: el empleo de rociadores de agua y la humidificación con vapor. Cuando se emplean rociadores de agua a la misma temperatura del aire, se obtiene una humidificación a temperatura de bulbo húmedo constante; en cambio, cuando se mezcla vapor con el aire se obtiene una

humidificación con una variación de temperatura de bulbo húmedo y a una temperatura de bulbo seco casi constante. Cuando se desea enfriar el aire con humidificación se hace circular directamente a través de los rociadores de agua. Cuando lo que se quiere es calentar el aire con humidificación, antes de que pase por los rociadores se hace circular a través de una sección de calentamiento. La representación de estos procesos en la carta psicrométrica se representan en la figura N° 13.

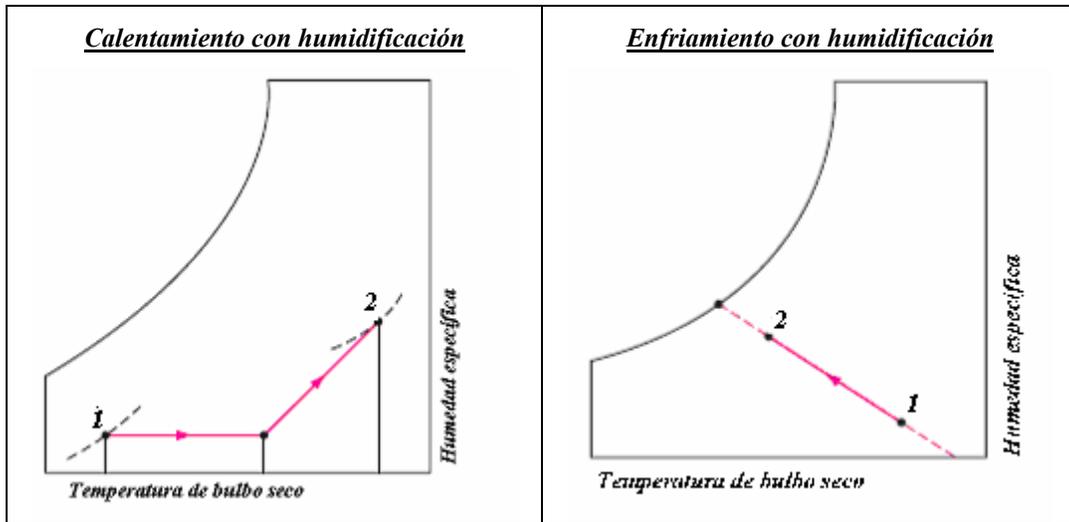


Figura N° 13. Procesos de humidificación. (Fuente: Cengel 1998)

3.2.2.4. Mezclado de aire.

La mezcla de dos corrientes de aire (estado 3) puede ser representada en un diagrama psicrométrico mediante un punto sobre la línea que une los puntos que especifican las condiciones de temperatura y humedad de cada una de las corrientes (estados 1 y 2). La ubicación del punto de mezcla sobre la línea depende del caudal de cada una de las corrientes de aire, es decir, la mezcla se acercará más a la condición de la corriente de mayor flujo. El lugar exacto se obtiene calculando la temperatura en el estado 3 según la fórmula:

$$T_{bs3} = \frac{T_{bs1} \cdot Q_1 + T_{bs2} \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde, T_{bs1} es la temperatura de bulbo seco en el estado 1.

T_{bs2} es la temperatura de bulbo seco en el estado 2.

T_{bs3} es la temperatura de bulbo seco en el estado 3.

Q_1 es el caudal en el estado 1.

Q_2 es el caudal en el estado 2.

En la figura N° 14 se presenta la representación de este proceso en la carta psicrometrica.

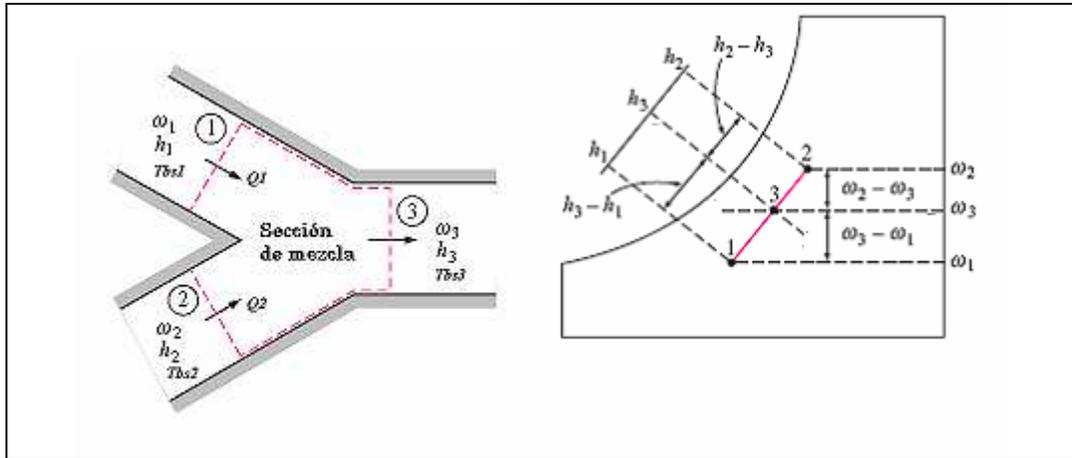


Figura N° 14. Proceso de mezcla de aire. (Fuente: Cengel 1998)

4. REFRIGERANTES.

4.1. Definición.

Un refrigerante es un fluido (líquido o gaseoso) que actúa como agente enfriador, absorbiendo calor de otro cuerpo o sustancia. Respecto al ciclo de refrigeración, el refrigerante es un fluido de trabajo del ciclo que alternativamente se

vaporiza y se condensa al absorber y entregar calor, respectivamente. Para que pueda utilizarse como refrigerante en el ciclo de refrigeración, un fluido debe poseer ciertas propiedades químicas, físicas y termodinámicas que lo hagan seguro y económico.

4.2. Selección de los refrigerantes.

La elección del refrigerante depende generalmente de los siguientes parámetros:

- Las consideraciones económicas (costo de inversión material, costo de producción).
- Tipo y capacidad del equipo (tecnología del compresor y demás componentes).
- Aplicación (nivel de temperatura a alcanzar).

También se debe de tener en cuenta los siguientes aspectos al momento de elegir un refrigerante:

- No debe ser, en lo posible, ni inflamable, ni tóxico, ni explosivo, tanto en estado puro como cuando esté mezclado con el aire en determinada proporción.
- No reaccionar desfavorablemente con los aceites o materiales empleados en los equipos de refrigeración.
- No reaccionar desfavorablemente con la humedad.
- Máxima capacidad de refrigeración con la mínima demanda de potencia.
- Que la temperatura de descarga sea la más baja posible para alargar la vida del compresor.

- El coeficiente de conductancia debe ser lo más elevado posible para reducir el tamaño y costo del evaporador y del condensador.
- La presión en el evaporador debe ser superior a la atmosférica, para evitar la entrada de aire y de humedad en el sistema en caso de fuga.
- El punto de congelación deberá ser inferior a la temperatura mínima de trabajo.
- Tener bajo precio y fácil disponibilidad.

4.3. Aplicación de los refrigerantes.

- Aplicaciones de baja temperatura, cuando la temperatura en el evaporador esta entre $-25\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-31,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) y $0\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-17,7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ejemplo: freezers.
- Aplicaciones de media temperatura, cuando la temperatura en el evaporador esta entre $0\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-17,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) y $25\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ejemplo: neveras domésticas.
- Aplicaciones de alta temperatura, cuando la temperatura en el evaporador esta entre $25\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) y $45\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ejemplo: equipos de aire acondicionado.

4.4. Tipos de refrigerantes.

4.4.1. Refrigerantes halogenados.

Se denominan así por contener en su estructura molecular átomos de cloro, flúor o ambos. Sustituyeron a la mayor parte de los refrigerantes naturales, como el amoníaco (NH_3) y el bióxido de carbono (CO_2). Son derivados halogenados de los hidrocarburos, químicamente estables, de baja toxicidad, con características térmicas muy buenas y muy estables a nivel de la troposfera, pero se descomponen en la estratosfera debido a la acción combinada de la baja temperatura y la radiación ultravioleta, destruyendo la capa de ozono y contribuyendo al calentamiento global.

Los refrigerantes halogenados se designan con una letra “R” seguida de tres números que indican:

- El primero, el número de átomos de carbono menos 1.
- El segundo, el número de átomos de hidrógeno más 1.
- El tercero, el número de átomos de flúor.

Los refrigerantes halogenados se clasifican en:

- **Clorofluorocarbonos (CFC):** Son cada uno de los derivados de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de cloro y flúor. Tienen un alto potencial de destrucción de la capa de ozono.
- **Hidroclorofluorocarbonos (HCFC):** Son similares a los clorofluorocarbonos pero con átomos de hidrógeno en su molécula. La presencia de hidrógeno les confiere menos estabilidad, en consecuencia, se descompondrán en la parte inferior de la atmósfera y no llegarán a la estratosfera. Poseen un potencial reducido de destrucción de la capa de ozono.
- **Hidrofluorocarbonos (HFC):** Son fluorocarbonos que no poseen cloro con átomos de hidrógeno, sin potencial destructor del ozono dado que no contienen cloro.

En la tabla N° 3 se muestran los refrigerantes halogenados más utilizados a nivel mundial.

Tabla N° 3. Refrigerantes Halogenados Más Comunes. (Fuente: Los Autores)

N° DEL REFRIGERANTE	FÓRMULA QUÍMICA	TIPO	APLICACIONES
R-11	CCl ₂ F	CFC	Chillers centrífugos de baja presión; agente espumante.
R-12	CCl ₂ F ₂	CFC	Chillers centrífugos y reciprocantes; refrigeración doméstica; aire acondicionado de vehículos.
R-13	CCIF ₃	CFC	Refrigeración de muy baja temperatura.
R-22	CHCl ₂ F	HCFC	Aire acondicionado; bombas de calor, refrigeración comercial e industrial.
R-32	CH ₂ F ₂	HFC	Refrigeración de baja temperatura.
R-113	CCl ₂ FCCIF ₂	CFC	Refrigeración comercial e industrial
R-114	CCIF ₂ CCIF ₂	CFC	Refrigeración de muy baja temperatura.
R-123	CHCl ₂ CF ₃	HCFC	Chillers centrífugos de baja presión; agente espumante.
R-124	CHClCF ₃	HCFC	Chillers centrífugos y reciprocantes; refrigeración doméstica; aire acondicionado de vehículos.
R-125	CHF ₂ CF ₃	HFC	Refrigeración de media y baja temperatura.
R-134a	CH ₂ FCF ₃	HFC	Refrigeración doméstica y comercial; aire acondicionado de vehículos; transporte refrigerado.
R-141b	CH ₃ CCl ₂ F	HCFC	Espuma aislante.
R-142b	CH ₃ CCIF ₂	HCFC	Refrigeración de alta temperatura.

4.4.2. Refrigerantes naturales.

Estos refrigerantes están conformados por los hidrocarburos y las sustancias inorgánicas naturales. Los refrigerantes naturales se les denomina “refrigerantes ecológicos”, ya que no destruyen la capa de ozono y su potencial de calentamiento global es muy bajo o nulo.

4.4.2.1. Hidrocarburos (HC).

Los hidrocarburos constituyen un grupo de fluidos compuestos de varias proporciones de dos elementos: hidrogeno y carbono. Los que tienen importancia como refrigerantes son: metano, etano, butano, propano, etileno e isobutano. Todos

son extremadamente inflamables y explosivos. Además, puesto que actúan como anestésicos en diversos grados, se consideran ligeramente tóxicos. En comparación con los refrigerantes halogenados, los hidrocarburos poseen una menor densidad y un calor latente de vaporización mayor. Estos refrigerantes se identifican de igual forma que los refrigerantes halogenados. En la tabla N° 4 se aprecian los refrigerantes hidrocarburos con mayor uso.

Tabla N° 4. Refrigerantes Hidrocarburos Más Comunes. (Fuente: Los Autores)

N° DEL REFRIGERANTE	FÓRMULA QUÍMICA	TIPO	APLICACIONES
R170	CH ₃ CH ₃ (Etano)	HC	Sistemas de cascada de baja temperatura.
R290	CH ₃ CH ₂ CH ₃ (Propano)	HC	Aire acondicionado; bombas de calor; refrigeración comercial e industrial.
R600	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃ (Butano)	HC	Refrigeración de media y alta temperatura.
R600a	CH(CH ₃) ₂ CH ₃ (Isobutano)	HC	Refrigeración doméstica
R1270	CH ₃ CH=CH ₂ (Propeno)	HC	Aire acondicionado; bombas de calor; refrigeración comercial e industrial; chillers.
Care 30	R290/600a (50/50%)	HC	Refrigeración comercial y doméstica.
Care 50	R290/170 (94/6%)	HC	Aire acondicionado; bombas de calor; refrigeración comercial e industrial; chillers.

4.4.2.2. Sustancias inorgánicas.

Se identifican con la letra “R” seguida por un número de tres cifras que comienza por la cifra “7”; las otras dos cifras corresponden al peso molecular del compuesto. Entre estos refrigerantes se tiene:

- **Amoniaco (NH₃):** Este refrigerante es tóxico, y a ciertas concentraciones, explosivo, lo que excluye su utilización en muchas aplicaciones. También es corrosivo sobre las partes de zinc, cobre y sellos que tienen estos metales. Se

utiliza, con restricciones apropiadas, en la refrigeración de almacenes, fabricación de hielo, y en aplicaciones industriales. En comparación con otros refrigerantes, el amoníaco tiene un bajo volumen específico y un alto calor de vaporización, lo que puede resultar en la utilización de equipos de menor tamaño.

- **Bióxido de carbono (CO₂):** Este es uno de los primeros refrigerantes que se emplearon en sistemas de refrigeración. No tiene olor, no es tóxico, inflamable o explosivo, ni es corrosivo. En la actualidad se está limitando el empleo de bióxido de carbono como refrigerante a aplicaciones de temperatura extremadamente baja, en particular para la producción de CO₂ sólido (hielo seco). Unas de las principales desventajas del bióxido de carbono son las altas presiones de operación y el empleo de sistemas de tuberías y equipo muy pesado. Otra desventaja es que la potencia requerida por tonelada de refrigeración es aproximadamente el doble que la requerida para cualquiera de los refrigerantes usados comúnmente.
- **Agua (H₂O):** El uso del agua está limitado a las temperaturas de evaporación por arriba de su punto de congelación, 0° C. Sus características de disponibilidad, seguridad y costo hacen ideal su utilización en los sistemas. Sus presiones muy bajas a las temperaturas adecuadas de evaporación, dan por resultado presiones extremadamente bajas en los sistemas, dando origen al problema de las filtraciones de aire hacia el interior del sistema. El agua no resulta apropiada como refrigerante en los sistemas de compresión de vapor. Su presencia haría extremadamente difícil de impedir la corrosión. Además, su volumen específico extremadamente elevado, como vapor, obligaría a utilizar equipos de un tamaño excesivo.

4.4.3. Mezclas refrigerantes.

Se crean a partir de la combinación de dos o más refrigerantes que se seleccionan para la obtención de un refrigerante final con unas características específicas. Las mezclas se dividen en azeotrópicas y zeotrópicas y, dependiendo de los refrigerantes y de las proporciones que se utilicen para crearlas, pueden comportarse como refrigerantes clorofluorocarbonados, hidroclofluorocarbonados, hidrofurocarbonados o hidrocarburos.

4.4.3.1. Mezclas zeotrópicas.

Están formadas por dos o más refrigerantes, que al mezclarse en las cantidades preestablecidas generan un nuevo refrigerante el cual tiene temperaturas de ebullición y condensación variables. Para estas mezclas se requieren definir características como el fraccionamiento y el deslizamiento.

El fraccionamiento es el cambio en la composición de la mezcla debido a que uno o más de sus componentes se pierde o se remueve más rápido que los otros. Una diferencia muy grande de presiones de los componentes iniciales causara una gran diferencia en la composición de vapor comparada con la composición líquida. En sistemas en funcionamiento se ha encontrado que la composición circulante es la composición total de la mezcla. Para evitar cargar a un sistema la composición incorrecta, las mezclas zeotrópicas se deben desalojar del recipiente que la contenga en estado líquido.

El deslizamiento de la temperatura es el cambio de temperatura durante la evaporación debido al fraccionamiento de la mezcla. Con un refrigerante puro el serpentín del evaporador tiene una temperatura constante, en cambio con una mezcla zeotrópica el deslizamiento de temperatura causa que el sistema de tubos del

serpentín esta a diferentes temperaturas. El deslizamiento de temperatura puede causar la formación de escarcha en la parte más fría del serpentín del evaporador y puntos calientes en la parte más tibia, lo que afecta la calidad del proceso de refrigeración.

Las mezclas zeotrópicas se identifican con la letra “R” y por un número de tres cifras que comienza con la cifra “4”; las otras dos cifras se asignan en orden creciente a medida que se crea nuevas mezclas, seguido de una letra para diferenciar diversas proporciones de mezcla de las mismas sustancias químicas. Por ejemplo, si la última mezcla zeotrópica es el R417A, la próxima que se cree se denominará R418A.

4.4.3.2. Mezclas azeotrópicas:

Estas mezclas están formadas por dos o más refrigerantes que tienen la misma temperatura de evaporación a la presión de la mezcla, a valores de concentración determinados de cada uno de los componentes y que se comportan como una sustancia pura cuando cambian de fase, logrando con ellas características distintas de los refrigerantes que las componen, pero mejores. Se identifican con la letra “R” y por un número de tres cifras que comienza con la cifra “5”; las otras dos cifras son de libre escogencia por parte del creador de la mezcla, siempre y cuando no sea igual que la designación de otra mezcla azeotrópica existente.

Las mezclas refrigerantes de más uso se muestran en la tabla N° 5.

Tabla N^o 5. Mezclas Más Comunes. (Fuente: Los Autores)

Nº DEL REFRIGERANTE	FÓRMULA QUÍMICA	TIPO	APLICACIONES
R401A	R22 /152a /124 (53 /13 /34%)	HCFC	Chillers centrífugos y reciprocantes; refrigeración doméstica; aire acondicionado de vehículos.
R401B	R22 /152a /124 (61 /11 /28%)	HCFC	Refrigeración de muy baja temperatura; transporte refrigerado.
R404A	R125 /143a /134a (44 /52 /4%)	HFC	Refrigeración de media y baja temperatura; máquinas para hielo.
R407C	R32 /125 /134a (23 /25 /52%)	HFC	Aire acondicionado; bombas de calor; refrigeración comercial e industrial.
R409A	R22 /124 /142b (60 /25 /15%)	HCFC	Aire acondicionado; refrigeración de media y baja temperatura; transporte refrigerado.
R410A	R22 /125 (50 /50%)	HFC	Aire acondicionado; bombas de calor.
R417A	R125 /134a /600 (46,6 /50 /3,4%)	HFC	Aire acondicionado; refrigeración de alta temperatura.
R500	R12/152a (73,8 /26,2%)	CFC	Aire acondicionado; chillers centrífugos; deshumidificadores.
R502	R22 /115 (48,8 /51,2%)	CFC	Refrigeración de baja temperatura; máquinas de hielo.
R503	R23 /13 (40,1 /59,9%)	CFC	Refrigeración de muy baja temperatura.
R507	R125 /143a (50 /50%)	HFC	Refrigeración de media y baja temperatura.
R508B	R23 /116 (46 /54%)	HFC	Refrigeración de muy baja temperatura.

4.4. Clasificaciones de seguridad para refrigerantes .

Todos los refrigerantes usados en la industria del aire acondicionado pueden ser potencialmente peligrosos, por lo que requieren diversos procedimientos y previsiones de seguridad. El desarrollo de la pruebas para la seguridad cambian los requisitos para cada uno de los refrigerantes, por lo que es necesario tener una información clara sobre la seguridad del refrigerante. Las clasificaciones de seguridad de los refrigerantes consiste en dos caracteres alfanumericos (ej. A2 ó B1). La letra mayuscula indica la toxicidad y el número denota la inflamabilidad.

Clasificación de toxicidad: Los refrigerantes se agrupan en dos clases, A y B, de acuerdo al siguiente criterio:

- **Clase A:** el refrigerante no tiene ninguna toxicidad a concentraciones menores o iguales a 400 ppm, basado en los datos del Valor Limite Umbral-Promedio Ponderado de Tiempo (Threshold Limit Value - Time Weighted Average, TLV-TWA) o índices de concentración.
- **Clase B:** el refrigerante tiene evidencias de toxicidad a concentraciones por debajo de 400 ppm, basado en los datos del Valor Limite Umbral-Promedio Ponderado de Tiempo (Threshold Limit Value - Time Weighted Average, TLV-TWA) o índices de concentración.

Clasificación de inflamabilidad: Los refrigerantes se asignan a una de las siguientes tres clases: 1, 2 y 3, basado en la flamabilidad. Las pruebas para obtener el valor de flamabilidad se realizan mediante la norma ASTM E681-85.

- **Clase 1:** El refrigerante no tiene propagación de flama cuando se prueba en el aire a 21 °C y 101 kPa (presión atmosférica estándar).
- **Clase 2:** El refrigerante tiene una concentración del límite de baja flamabilidad por arriba de 0,10 kg/m³ en el aire a 21 °C y 101 kPa, y el calor de combustión menor que 19000 kJ/kg. El calor de combustión se calcula asumiendo que los productos de la combustion son gaseosos y en su estado más estable.
- **Clase 3:** El refrigerante tiene una alta flamabilidad, con una concentración del límite de baja flamabilidad igual o menor que 0,10 kg/m³ en el aire a 21 °C y 101 kPa, o un calor de combustión igual o mayor que 19000 kJ/kg. El calor de combustion se calcula igual que lo indicado en la clase 2.

4.5. Clasificación de seguridad de las mezclas de refrigerantes:

Las mezclas, cuya flamabilidad y/o toxicidad característica puede cambiar a medida que cambia la composición durante la fraccionización, se les debe asignar una clasificación de grupo de seguridad dual, con los dos grupos separados por una barra (/). Cada una de las dos clasificaciones se determina de acuerdo al criterio para los refrigerantes individuales. La primera clasificación es la de la composición formulada de la mezcla. La segunda clasificación es para el “peor caso de fraccionización”. Para la flamabilidad, el “peor caso de fraccionización” se define como la composición durante la fraccionización que resulta en una alta concentración de los componentes inflamables en la fase líquida o de vapor. Para la toxicidad, el “peor caso de fraccionización” se define como la composición durante la fraccionización que resulta en una alta concentración en la fase de vapor o líquido para la cual el Valor Limite Umbral-Promedio Ponderado de Tiempo es menor de 400 ppm. El Valor Limite Umbral-Promedio Ponderado de Tiempo para una mezcla se calcula igual que para un refrigerante individual. En la tabla N° 6 se muestran algunos ejemplos de la clasificación de seguridad para los refrigerantes.

**Tabla N^a 6. Clasificación de Seguridad de algunos refrigerantes más utilizados.
(Fuente: Los Autores)**

REFRIGERANTE	CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD
R-11	A1
R-12	A1
R-22	A1
R-123	B1
R-124	A1
R-134a	A1
R-141b	A1
R-142b	A2
R-170	A3
R-290	A3
R-407C	A1/A1
R-417A	A1/A2
R-600	A3
R-717	B2
R-744	A1
R-1270	A3
Care 50	A3

4.6. Efectos que causan los refrigerantes al ambiente.

4.6.1. Disminución del potencial del ozono:

Las sustancias como los CFC y los HCFC disminuyen la capa de ozono, pero no lo destruyen directamente. Primero sufren fotólisis¹, formando cloruro de hidrógeno (HCl) o nitrato de cloro (ClONO₂), moléculas que tampoco reaccionan con el ozono directamente, pero que se descomponen lentamente dando, entre otras cosas, una pequeña cantidad de átomos de cloro (Cl) y de moléculas de monóxido de cloro (ClO) que son las que catalizan la destrucción del ozono. El átomo de cloro actúa como catalizador, es decir, no es consumido en la reacción, por lo que destruye miles de moléculas de ozono antes de desaparecer.

¹ Disociación de moléculas orgánicas complejas por efecto de la luz.

El potencial de destrucción de la capa de ozono muestra la combinación del porcentaje en peso de los átomos de cloro en la sustancia y el tiempo de vida de la misma en la atmósfera, y se identifica con las siglas en inglés ODP (Ozone Depletion Potential). 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.

4.6.2. Potencial de calentamiento global:

El potencial de calentamiento global, conocido por sus siglas en inglés GWP (Global Warming Potential), mide la capacidad de una sustancia para producir efecto invernadero o de calentamiento global del planeta. Para obtener el potencial de calentamiento global de un gas 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 hidrofluorocarbonados y los hidroclorofluorocarbonados contribuyen al calentamiento de la tierra. Aunque tienen concentraciones atmosféricas pequeñas, su tiempo de vida en la atmósfera es muy largo. Como los gases 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.

4.6.3. Impacto del calentamiento equivalente total:

El impacto del calentamiento equivalente total, conocido por sus siglas en ingles TEWI (Total Equivalent Warming Impact), indica la contribución total al calentamiento global de un sistema de refrigeración durante su tiempo de vida operacional. Un sistema de refrigeración puede contribuir al calentamiento global a través de la liberación a la atmósfera tanto de refrigerante como de bióxido de carbono producto de la generación de electricidad para hacer funcionar el sistema. La contribución directa del TEWI se basa en el uso de los potenciales de calentamiento global, lo que da una medida del impacto ambiental de los gases de efecto invernadero desde la operación y servicio hasta la culminación de la vida útil del equipo.

El criterio para estimar el impacto del calentamiento equivalente total es el siguiente:

TEWI=emisiones directas + emisiones indirectas

ó

$$TEWI = (GWP \cdot L_{\text{anual}} \cdot n) + (E_{\text{anual}} \cdot \beta \cdot n) \quad (\text{Ec.5})$$

CAPITULO II MARCO TEORICO

Donde, GWP es el potencial de calentamiento global.

L_{anual} es la cantidad, en kilogramos, de refrigerante que se fuga por año.

n es el número de años.

E_{anual} es el consumo de energía, en kWh, por año.

β son las emisiones de CO₂ por kWh.

Las unidades de TEWI se expresan en Kg de CO₂.

En la tabla N° 7 se pueden apreciar los valores de ODP, GWP y tiempo de vida en años para diversos refrigerantes.

Tabla N° 7. Potencial de Destrucción de la Capa de Ozono, Potencial de Calentamiento Global y Tiempo de Vida en la Atmósfera de Diferentes Gases Refrigerantes. (Fuente: Los autores)

REFRIGERANTE	ODP	GWP	TIEMPO DE VIDA (AÑOS)
R-744 (Dióxido de carbono)	0	1	--
R-11	1	4600	45
R-12	1	10600	100
R-22	0,055	1700	11,9
R-123	0,0015	76	14
R-124	0,03	599	6,1
R-141b	0,11	700	9,3
R-142b	0,065	2400	19
R-290	0	<3	<1
R-1270	0	<3	<1
Care 50	0	<3	<1

5. PROCESOS DE RECONVERSION.

5.1. Definición

Los procesos que se realizan para la reconversión de refrigerantes en equipos de aire acondicionado son 2, que se conocen en inglés como drop-in y retrofitting. Drop-in consiste en la sustitución directa de un refrigerante por otro, sin hacer reemplazos de componentes en la unidad acondicionadora. Retrofitting consiste en sustituir el refrigerante por otro, además de reemplazar algunos componentes de la unidad acondicionadora. Estos procesos se aplican para extender la vida útil del equipo y reducir el riesgo ambiental asociado con los equipos a los que no se les aplica dichos procesos.

Los beneficios de estos procesos son:

1. **Protección ambiental:** Aplicar estos procesos con refrigerantes hidrocarburos es una solución ambiental consciente. Estos refrigerantes no contribuyen al debilitamiento de la capa de ozono y tienen un potencial de calentamiento global muy bajo.
2. **Reducción de costos:** Se obtiene una reducción en los costos, comparado con el reemplazo total del sistema. Por ejemplo, al aplicar el drop-in, solo se paga el refrigerante y la mano de obra.
3. **Solución a largo plazo:** Este procesos permiten la operación continua de los equipos con el menor costo de operación posible, ahora y en el futuro. El incremento de los impuestos para refrigerantes que perjudican al ambiente significa un aumento en los costos de operaciones para los sistemas que no se les ha aplicado la reconversión.

4. **Oportunidad de actualizar y mejorar los sistemas actuales:** La reconversión permite mejorar y reparar sistemas que han operado por debajo de sus niveles óptimos, llevándolos a mejorar su desempeño y eficiencia. En muchos casos, el costo de la reconversión puede ser compensado con un mantenimiento previo.

5.2. Justificación para realizar la reconversión.

La justificación para realizar la reconversión a un sistema puede ser, en algunos casos, un proceso complicado. Muchos factores pueden surgir en la decisión final de aplicar o no la reconversión: edad del equipo, tamaño, ubicación, aplicación y costo. De todos estos, el costo es el factor fundamental para aplicar la reconversión.

Cuando se estiman los costos asociados con un proyecto en particular varios puntos deben ser tomados en cuenta, incluyendo los siguientes:

- Costo actual y futuro del refrigerante.
- Disponibilidad del refrigerante.
- Costos de nuevos equipos.
- Dificultad para realizar la reconversión.
- Edad y localización del equipo.
- Tipo del nuevo refrigerante y del lubricante.
- Eficiencia del sistema.

5.3. Equipo necesario para realizar la reconversión.

1. **Equipo de recuperación de refrigerante:** Consiste básicamente en una unidad condensadora, equipada con un compresor, ventilador(es) de gran caudal y filtros para atrapar impurezas a la entrada de la unidad. Es conveniente que disponga de un circuito que interrumpa el funcionamiento del equipo cuando el sensor de

llenado del cilindro de recuperación indica que ha alcanzado el límite máximo de llenado seguro.

2. **Detector de fugas:** Este instrumento permite localizar en el aire ambiental la presencia de moléculas de cloro, flúor, hidrocarburos, amoniaco u otros gases. Puede ser universal o específico para cada tipo de refrigerante. Es necesario emplearlo en ambientes donde no existan otras fuentes de contaminación, aparte de la fuente de fuga, para evitar falsas advertencias.
3. **Bomba de vacío:** Se emplea para extraer el aire de las tuberías del sistema antes de cargar el nuevo refrigerante y así evitar que se contamine por la humedad y contaminantes gaseosos del aire. Debe alcanzar un vacío de al menos 15 μ y tener una capacidad volumétrica acorde con las dimensiones del equipo a evacuar.
4. **Vacuómetro:** Se emplea para medir presiones de vacío. Los preferidos son los digitales, a diferencia de los analógicos; no son afectados por presiones positivas, por lo cual son ideales para su empleo en circuitos de refrigeración.
5. **Termómetro:** Existen termómetros analógicos y digitales y de diversos rangos de temperatura. En refrigeración se emplean termómetros con rangos desde temperaturas de congelación hasta temperaturas de condensación y más, necesarios para medir temperaturas de descarga.
6. **Juego de manómetros:** Se emplean para medir la presión en el sistema. Pueden ser analógicos (tipo Bourdon) o digitales. Se debe tener la precaución de emplear los manómetros de acuerdo al gas del sistema, evitando el riesgo de que la presión del sistema para algunos gases sea más alta de lo que indica el tope de escala del instrumento.

7. **Cilindro para recuperar el refrigerante desechado:** Los cilindros de recuperación en general son de mediana presión, calibrados para soportar una presión de 300 psig. Deben tener válvulas para gas y líquido y no llenarse con más del 80% de su capacidad. Se debe identificar con una etiqueta que indique el refrigerante recuperado en él.
8. **Contenedor para el lubricante desechado:** El lubricante desechado debe ser depositado en un contenedor diseñado para tal fin. El lubricante desechado se considera como un residuo controlado, pues contiene refrigerante disuelto y debe ser tratado adecuadamente.
9. **Equipos de seguridad:** Los equipos de seguridad personal (guantes; lentes, mascarillas, etc.) deben ser empleados donde quiera que exista un riesgo, pero su uso no implica descartar la necesidad de adopción de prácticas seguras de trabajo, de tal manera que las prendas de protección personal constituyan tan solo una medida de precaución adicional, no la única defensa.
10. **Información y datos del equipo original:** Esto es importante para conocer el funcionamiento del equipo y las características de sus componentes, antes de realizar la reconversión, para saber como es su desempeño con el refrigerante que utiliza y si puede tolerar al nuevo refrigerante, y después de realizado para comparar el funcionamiento con el nuevo refrigerante.
11. **Etiquetas para identificar los cambios efectuados:** Se deben colocar etiquetas que indiquen claramente todos los cambios efectuados: refrigerante, lubricante, filtro secador y cualquier otro componente.
12. **Balanza:** Se utiliza tanto para determinar la cantidad de refrigerante que se extrae del sistema como saber cuanto del nuevo refrigerante se carga al equipo.

13. **Gas inerte:** El gas inerte, tal como el nitrógeno, se carga en el equipo después de retirar el refrigerante original del equipo. Se utiliza cuando se realizan soldaduras, ya que elimina gases como oxígeno y evita la formación de escoria en la tubería.

14. **Multímetro:** Se utiliza para medir la resistencia y la tensión eléctrica en el equipo:

15. **Amperímetro:** Se utiliza para medir la corriente que circula en el equipo.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLOGICO.

1. CONSUMO DE REFRIGERANTES HCFC EN VENEZUELA.

Para realizar el ensayo de reconversión de refrigerante HCFC a refrigerante hidrocarburo se debe saber cuales de los refrigerantes hidroclorofluorocarbonados se encuentran en el mercado venezolano y cual de estos es el de mayor consumo, para enfocar el ensayo hacia el refrigerante HCFC cuya utilización es más común.

Según datos de FONDOIN, del Ministerio del Ambiente (MINAMB) y del único productor a nivel nacional de refrigerante R-22 (PRODUVEN, Productos Halogenados de Venezuela, C.A.) los refrigerantes hidroclorofluorocarbonados de mayor consumo en Venezuela son el R-22, R-123, R-124, R-141b y R-142b. En las tablas que se muestran a continuación se observa el número de toneladas métricas de cada uno de estos refrigerantes que se consumen por año². El valor del consumo se obtiene al sumar la producción más la importación y restar la exportación.

Tabla N° 8. Cantidad en toneladas métricas de refrigerante HCFC R-22 que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)

AÑO	PRODUCCION	IMPORTACION	EXPORTACION	CONSUMO
1995	1656	273	153	1776
1996	1590	319	153	1756
1997	1607	563	200	1970
1998	1298	1480	210	2568
1999	453	758	72	1139
2000	500	1155	127	1528
2001	773	2782	91	3464
2002	493	1013	65	1441
2003	443	740	40	1143
2004	994	2552	100	3446
2005	636	3455	49	4042

² Los datos de consumo llegan hasta el año 2005 porque es el último año que abarca las estadísticas durante la realización de este trabajo.

Tabla N° 9. Cantidad en toneladas métricas de refrigerante HCFC R-123 que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)

AÑO	PRODUCCION	IMPORTACION	EXPORTACION	CONSUMO
1995	0	36	0	36
1996	0	1	0	1
1997	0	1	0	1
1998	0	1	0	1
1999	0	2	0	2
2000	0	0	0	0
2001	0	24	0	24
2002	0	55	0	55
2003	0	0	0	0
2004	0	66	0	66
2005	0	42	0	42

Tabla N° 10. Cantidad en toneladas métricas de refrigerante HCFC R-124 que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)

AÑO	PRODUCCION	IMPORTACION	EXPORTACION	CONSUMO
1995	0	0	0	0
1996	0	2	0	2
1997	0	0	0	0
1998	0	0	0	0
1999	0	0	0	0
2000	0	10	0	10
2001	0	39	0	39
2002	0	65	0	65
2003	0	68	0	68
2004	0	112	0	112
2005	0	332	0	332

Tabla N° 11. Cantidad en toneladas métricas de refrigerante HCFC R-141b que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)

AÑO	PRODUCCION	IMPORTACION	EXPORTACION	CONSUMO
1995	0	0	0	0
1996	0	2	0	2
1997	0	15	0	15
1998	0	661	0	661
1999	0	61	0	61
2000	0	88	0	88
2001	0	459	0	459
2002	0	134	0	134
2003	0	126	0	126
2004	0	286	0	286
2005	0	569	0	569

Tabla N° 12. Cantidad en toneladas métricas de refrigerante HCFC R-142b que se consume en Venezuela por año. (Fuente: FONDOIN)

AÑO	PRODUCCION	IMPORTACION	EXPORTACION	CONSUMO
1995	0	0	0	0
1996	0	0	0	0
1997	0	0	0	0
1998	0	0	0	0
1999	0	0	0	0
2000	0	0	0	0
2001	0	2	0	2
2002	0	30	0	30
2003	0	0	0	0
2004	0	3	0	3
2005	0	217	0	217

El consumo por año de cada refrigerante se suma para obtener el consumo total nacional de refrigerantes HCFC, el cual se muestra en la tabla N° 13.

Tabla N° 13. Consumo total en toneladas métricas de refrigerantes HCFC en Venezuela. (Fuente: Los autores)

AÑO	R-22	R-123	R-124	R-141b	R-142b	TOTAL
1995	1776	36	0	0	0	1812
1996	1756	1	2	2	0	1761
1997	1970	1	0	15	0	1986
1998	2568	1	0	661	0	3230
1999	1139	2	0	61	0	1202
2000	1528	0	10	88	0	1626
2001	3464	24	39	459	2	3988
2002	1441	55	65	134	30	1725
2003	1143	0	68	126	0	1337
2004	3446	66	112	286	3	3913
2005	4042	42	332	569	217	5202

Para tener una mejor visión del consumo de cada uno de estos refrigerantes por año, se expresa en porcentaje la cantidad de consumo por año de cada uno de estos de estos refrigerantes con respecto a la totalidad de refrigerantes HCFC consumidos en Venezuela. Estos porcentajes se muestran en la tabla N° 14.

Tabla N° 14. Porcentaje de cada uno de los refrigerantes HCFC consumidos por año. (Fuente: Los autores)

AÑO	% R-22	% R-123	% R-124	% R-141b	% R-142b
1995	98,01	1,99	0	0	0
1996	99,72	0,06	0,11	0,11	0
1997	99,19	0,05	0	0,76	0
1998	79,50	0,03	0	20,46	0
1999	94,76	0,17	0	5,07	0
2000	93,97	0	0,62	5,41	0
2001	86,86	0,60	0,98	11,51	0,05
2002	83,54	3,19	3,77	7,77	1,74
2003	85,49	0	5,09	9,42	0
2004	88,07	1,69	2,86	7,31	0,08
2005	77,70	0,81	6,38	10,94	4,17

En la tabla anterior puede apreciarse fácilmente que el refrigerante HCFC de mayor consumo en Venezuela es el R-22. Además es prácticamente el único refrigerante HCFC que se utiliza en aires acondicionados domésticos y comerciales,

ya que, según FONDOIN, el R-123 se utiliza en chillers y extinguidores de fuego, el R-124 para refrigeración industrial y como base para mezclas azeotrópicas y zeotrópicas, el R-141b como propelente para aerosoles, para la fabricación de espuma aislante en refrigeración y para la limpieza de equipos electrónicos, y el R-142b como base para mezclas azeotrópicas y zeotrópicas. Por lo tanto el ensayo de reconversión de refrigerante se enfocara en la sustitución del R-22.

El nombre taxonómico del R-22 es clorodifluorometano y su fórmula química es CHClF_2 . Se comenzó a fabricar en el año 1936 con la finalidad de sustituir al amoníaco. Actualmente su uso esta limitado por los reglamentos del Protocolo de Montreal, ya que es una de las sustancias que son altamente perjudiciales para la capa de ozono; su potencial de destrucción del ozono es 0,055 y el de calentamiento global es 1700 (ver tabla N° 7). Según esto, el R-22 y las demás sustancias hidroclorofluorocarbonadas serán fabricadas hasta el año 2014 y comercializadas hasta el año 2030 en los países desarrollados y el año 2040 en los países en vías de desarrollo, aunque algunos países ya están trabajando para poder adelantar estas fechas.

2. SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE ECOLÓGICO.

2.1. Refrigerantes sustitutos del R-22.

Los refrigerantes ecológicos que podrían ser utilizados en la reconversión industrial de aire acondicionado son los refrigerantes naturales, tanto hidrocarburos como las sustancias inorgánicas (ver MARCO TEÓRICO, REFRIGERANTES, TIPOS DE REFRIGERANTES). De todos estos, los hidrocarburos que pueden ser sustitutos del refrigerante R-22 en sistemas de aire acondicionado, según AIRAH,

ACRIB, BOC, NORTHCUTT³ y otros fabricantes de refrigerantes e investigadores, son el propano (R-290), el propeno (R-1270) y la mezcla zeotrópica entre propano y etano (denominada comercialmente CARE 50). Para poder establecer si un refrigerante puede ser utilizado como sustituto de otro se comparan sus propiedades termodinámicas, y se analiza como se comportaría en el sistema donde se aplicaría la reconversión.

Estos refrigerantes ecológicos, además de no dañar la capa de ozono y tener un bajo potencial de calentamiento global, son compatibles tanto con los materiales que se encuentran en los sistemas de aire acondicionado como los lubricantes que se utilizan en el mismo. Como no contienen átomos de cloro ni fluor no pueden reaccionar con el agua, por lo que no forman ácidos fuertes que puedan causar fallas en el sistema.

Es muy importante cuando se utiliza refrigerantes hidrocarburos que estos sean de alta pureza, ya que cualquier proporción con otras impurezas (como sulfuros, agua, etc.) pueden contribuir a la degradación del lubricante del equipo, rotura de compresores, etc. También puede ocurrir que si el refrigerante hidrocarburo no es de alta pureza, pueden ir mezclados con él otros hidrocarburos, pudiendo variar las propiedades físicas y termodinámicas del hidrocarburo original.

³ BOC (British Oxygen Corporation) y NORTHCUTT son empresas fabricantes de refrigerantes. ACRIB (Air Conditioning and Refrigeration Industry Board) es una organización británica que reúne a industrias relacionadas con la refrigeración y el aire acondicionado. AIRAH (Australian Institute of Refrigeration Air Conditioning and Heating Inc.) es el instituto australiano de la refrigeración y calefacción.

2.2. Evaluación de los sustitutos del R-22.

Una vez conocidos cuales son los refrigerantes sustitutos del R-22 se estudiarán las características de cada uno, para que por medio de una matriz de selección se escoja al refrigerante que sea la mejor alternativa para la reconversión del R-22 en equipos de aire acondicionado.

En la tabla N° 15 se muestran las propiedades de los refrigerantes sustitutos en comparación con el R-22.

Tabla N° 15. Propiedades Físicas y Químicas del refrigerante R-22 y sus sustitutos. (Fuente: Los autores)

Propiedades	R-22	R-290	R-1270	CARE-50
Masa molar (kg/kmol)	86,5	44,1	42,1	46,8
Punto de ebullición @ 1 atm (°C)	-40,8	-42,1	-47,7	-49,1
Temperatura crítica (°C)	96,1	96,7	91,8	79,3
Presión crítica (kPa)	499	424,71	466,46	338,6
Densidad crítica (kg/m ³)	523,84	218,5	223,39	371,45
Temperatura de deslizamiento (°C)	0	0	0	3,9
Temperatura de auto-ignición (°C)	--	470	455	475
Límite de baja inflamabilidad (% vol/vol)	--	2,1	2,5	2,15
Límite de baja inflamabilidad (kg/m ³)	--	0,038	0,043	0,0379
Límite de alta inflamabilidad (% vol/vol)	--	9,5	10,10	9,86
Límite de alta inflamabilidad (kg/m ³)	--	0,171	0,174	0,172

Para establecer mejor como se comportaría el posible refrigerante sustituto en el equipo de aire acondicionado se comparan sus presiones y temperaturas con las del R-22. En las gráficas siguientes se aprecia estas comparaciones.

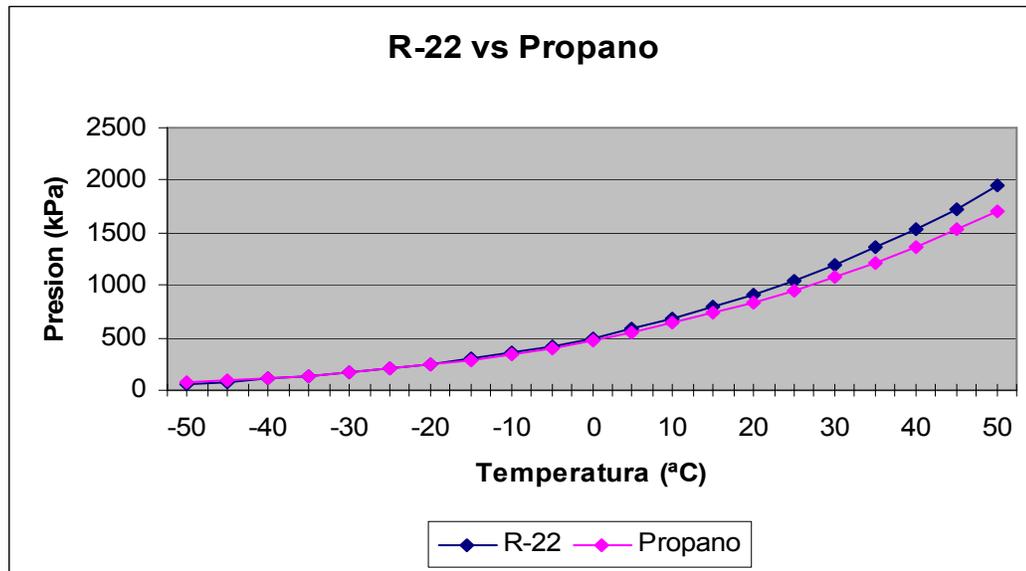


Figura N° 15. Gráfica Temperatura – Presión del R-22 y el Propano. (Fuente: Los Autores)

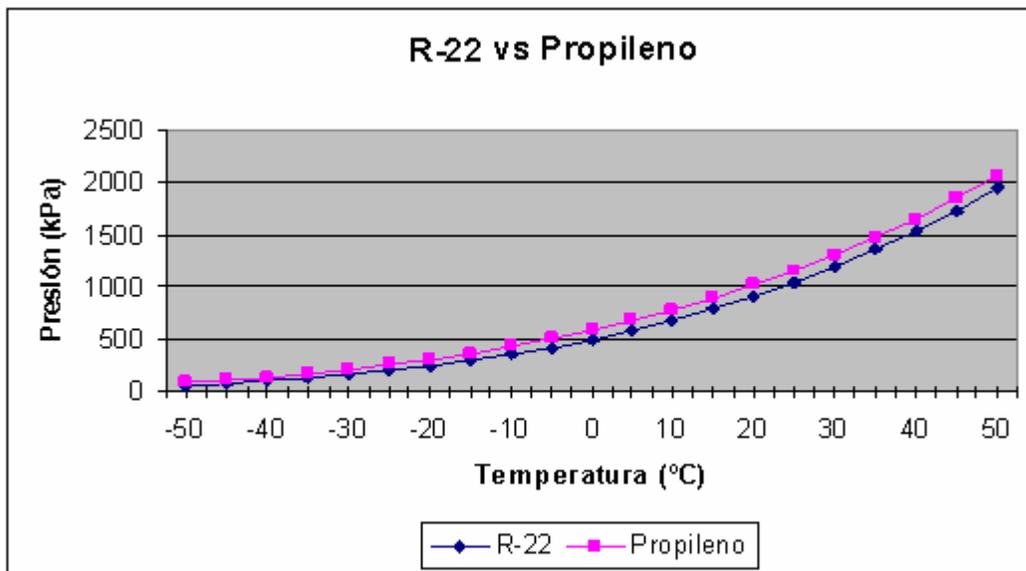


Figura N° 16. Gráfica Temperatura – Presión del R-22 y el Propileno. (Fuente: Los Autores)

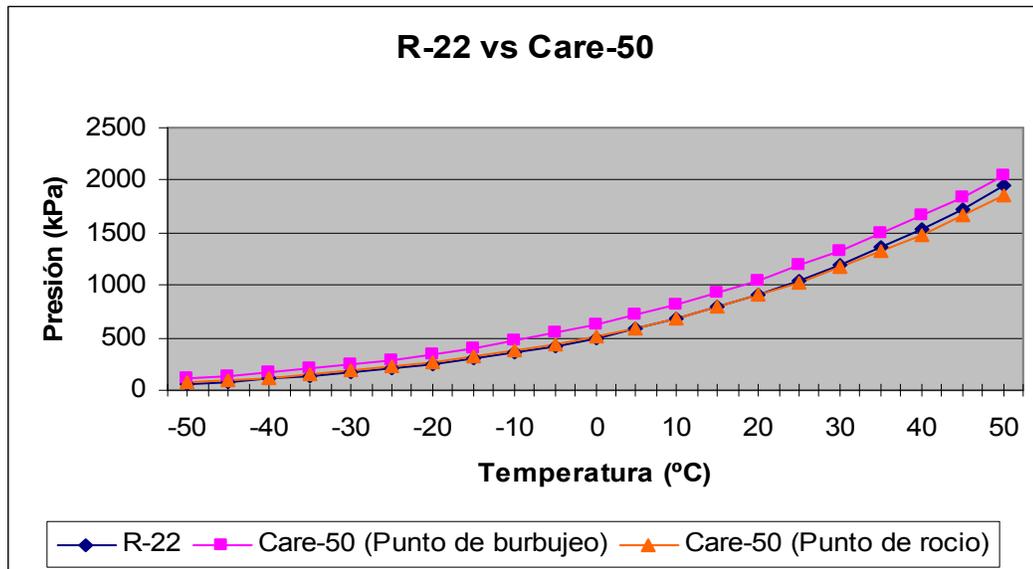


Figura N° 17. Gráfica Temperatura – Presión del R-22 y el Care-50. (Fuente: Los Autores)

Se puede apreciar en las gráficas anteriores que el refrigerante que más se acerca al comportamiento del R-22 es el propano, lo que lo haría el más propenso para sustituir al R-22. Pero también ahí que tomar en cuenta las ventajas y desventajas del propano y de los otros refrigerantes sustitutos para establecer cual es el que debe ser el reemplazo del R-22.

- **Propano (R-290).**

Es un gas hidrocarburo incoloro que se obtiene del gas natural o de los gases producidos en los procesos de craqueo en las instalaciones petroquímicas. Pertenece a la familia de los hidrocarburos alcanos y su fórmula química es C_3H_8 . Es inerte con la mayor parte de los reactivos y en grandes concentraciones tiene efectos soporíferos.

El propano se usa principalmente como combustible, aunque también se le utiliza en la industria química (para la sintetización del propeno), como refrigerante y como propulsor en aerosoles.

Ventajas:

- Precio más bajo.
- Se produce en el país.
- Se puede utilizar en sustitución directa (drop-in).
- Límites de inflamabilidad menores en comparación con los otros refrigerantes sustitutos.
- Mayor comercialización a nivel nacional.

Desventajas:

- Sustancia inflamable.
- En caso de fuga se acumularía a nivel del suelo, al ser más denso que el aire (a 20 °C, $\rho_{\text{aire}} = 1,204 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{\text{propano}} = 1,806 \text{ kg/m}^3$).

▪ **Propeno (R-1270).**

El propeno o propileno es un gas hidrocarburo incoloro e inodoro que pertenece a la familia de los alquenos y que se obtiene en la refinación del petróleo. Se utiliza principalmente para la elaboración de acetona y plásticos industriales, y como refrigerante. Su fórmula química es C_3H_6

Ventajas:

- Se puede utilizar en sustitución directa (drop-in).
- La temperatura de ignición es menor en comparación con los otros refrigerantes sustitutos.
- Se produce en el país.

Desventajas:

- Sustancia inflamable.
- Menor comercialización.

▪ *Care 50.*

Es una mezcla zeotrópica de etano y propano producida por la empresa BOC. Las proporciones de la mezcla son 6 % de etano y 94 % de propano. Se ha desarrollado como refrigerante sustituto del R-22 y del R-407C.

Ventajas:

- Se puede utilizar en sustitución directa (drop-in).

Desventajas:

- Difícil de obtener, ya que al ser un producto inflamable su importación esta restringida por la *Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos*. Gaceta Oficial N° 5554, 13 de noviembre de 2001.
- Por ser una mezcla zeotrópica, cualquier fuga antes, durante o después de su carga al sistema conllevaría a desechar todo el refrigerante, ya que variaría su composición inicial.
- Sustancia inflamable.

2.3. Matriz de selección del refrigerante a utilizar.

En esta parte se realiza la matriz de selección, la cual define los factores más importantes que se deben tomar en cuenta para escoger el refrigerante hidrocarburo con el que se realizara la reconversión de R-22, asignándole un valor porcentual a cada uno de los factores según su importancia. Estos factores son los siguientes:

- **Compatibilidad con el sistema:** Este factor involucra si el refrigerante es compatible con el sistema y como se realizaría la reconversión, por sustitución directa o retrofit.
- **Seguridad:** Incluye clasificaciones de seguridad, toxicidad, límites de inflamabilidad y temperaturas de auto-ignición. También incluye la rigurosidad de las medidas para evitar accidentes.
- **Costo-beneficio:** Esto incluye tanto el precio de cada refrigerante hidrocarburo así como los costos de hacer modificaciones al sistema.
- **Disponibilidad:** Facilidad para adquirir el refrigerante tanto dentro como fuera del país.
- **Inalterabilidad:** Capacidad del refrigerante para mantener sus propiedades originales.

Para evaluar cada uno de los sustitutos se utilizó la siguiente escala de puntuación:

- 1 = Deficiente.
- 2 = Regular.
- 3 = Bueno.
- 4 = Muy bueno.
- 5 = Excelente.

Para determinar el valor final se le asigna un porcentaje de acuerdo a su importancia a cada factor para posteriormente multiplicarlo por la escala de puntuación asignada a cada refrigerante, Luego se suman todos los resultados y los valores que se obtienen se comparan. La evaluación se muestra en la tabla N° 16.

Tabla N° 16. Matriz de selección del refrigerante sustituto. (Fuente: Los autores)

FACTORES	VALOR (%)	Care 50	R-290	R-1270
Compatibilidad	25	4	4	4
Seguridad	20	1	1	1
Costo-beneficio	18	2	4	3
Disponibilidad	15	1	3	2
Inalterabilidad	22	2	5	5
TOTAL	100	2,15	3,47	3,14

Como se puede observar en la matriz de selección, el refrigerante más adecuado para sustituir el R-22 es el propano.

Este refrigerante ofrece la facilidad de realizar reconversión directa (drop-in) de R-22 en el sistema de aire acondicionado, lo que implica un ahorro en lo referente al cambio de dispositivos en el mismo.

El propano se produce en el país, y no necesita que se le añadan otras sustancias para su utilización, lo que hace que tenga un costo bajo y no sea difícil adquirirlo.

Aunque es una sustancia inflamable, las medidas para evitar cualquier accidente son simples y fáciles de cumplir, lo cual facilita su utilización como refrigerante en sistemas de aire acondicionado.

3. MEDIDAS PREVENTIVAS AL UTILIZAR REFRIGERANTES HIDROCARBUROS.

El punto más importante en cuanto al uso de refrigerantes hidrocarburos es su inflamabilidad, lo que hace que muchas personas se limiten a la hora de utilizarlos. Pero debe tenerse en cuenta que a nivel mundial miles de toneladas de otros hidrocarburos son utilizados anualmente con seguridad en otras áreas de uso común

por todas las personas, como combustible para vehículos, para calefacción, cocina, propelente de aerosoles, encendedores, etc. En todos estos casos se han adoptado normas y fijado métodos para permitir su uso seguro, y lo mismo puede ser hecho por la industria del aire acondicionado y la refrigeración.

3.1. Condiciones para que ocurra la combustión.

Los hidrocarburos no arden espontáneamente al entrar en contacto con el aire. La combustión ocurre cuando una sustancia inflamable se mezcla en las proporciones adecuadas con el oxígeno del aire y entra en contacto con una fuente de ignición. Para que la mezcla de hidrocarburo y aire sea inflamable deben darse las siguientes condiciones:

- Haber una fuga o escape de hidrocarburo al ambiente: Para que se de la combustión el refrigerante hidrocarburo debe estar mezclado en las proporciones adecuadas con el aire. Dentro del equipo, si se le practica un vacío adecuado, solo debe haber refrigerante hidrocarburo. Una posible fuente de ignición, como una chispa eléctrica, no sería suficiente para producir la combustión ya que no hay oxígeno del aire.
- La concentración de hidrocarburo en el aire debe estar dentro de los límites de inflamabilidad: Para la mayoría de los refrigerantes hidrocarburos estos límites están entre 1 y 10% $^{vol}/_{vol}$. Fuera de estos límites no ocurrirá la combustión. En el caso del propano sus límites de inflamabilidad son 2,1 y 9,5% $^{vol}/_{vol}$ ó 0,038 y 0,171 kg/m^3 . Si la concentración en el aire es menor de 0,038 kg/m^3 no hay suficiente combustible para la combustión. Si la concentración es mayor de 0,171 kg/m^3 no hay suficiente oxígeno para la combustión.

Una manera de determinar si el refrigerante hidrocarburo esta dentro de los límites de inflamabilidad es conociendo la cantidad de refrigerante que tiene el equipo y calculando el volumen de aire con las dimensiones del cuarto o recinto donde esta ubicado. Se calcula la cantidad de hidrocarburo en el aire mediante la siguiente ecuación:

$$C_{\text{hid}} = \frac{M_{\text{hid}}}{V_c} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde, C_{hid} es la concentración de hidrocarburo por unidad de volumen.

M_{hid} es la masa de hidrocarburo.

V_c es el volumen del cuarto.

- Alcanzar la temperatura de auto-ignición: Es la temperatura a la cual la mezcla ardería espontáneamente. Esto puede ocurrir al entrar en contacto con un dispositivo o superficie caliente del equipo. En el caso del propano la temperatura de auto-ignición es 470 °C. Por eso la temperatura de cualquier elemento del equipo debe ser siempre menor a la temperatura de auto-ignición de la mezcla.

3.2. Medidas de prevención.

Para evitar que el refrigerante hidrocarburo llegue a mezclarse con el aire o en el caso que ocurriese no se produzca la combustión se deben aplicar las siguientes medidas preventivas.

- Reparar los lugares donde se presenten fugas para prevenir que el refrigerante se mezcle con el aire.

- Antes de cargar el refrigerante hidrocarburo al equipo se debe aplicar un buen vacío para eliminar la presencia de aire dentro del sistema.
- Reemplazar los componentes electrónicos del equipo que produzcan chispas o encerrarlos en un aislante para que no entre en contacto con la mezcla aire-hidrocarburo.
- Los componentes del equipo que puedan alcanzar la temperatura de auto-ignición del refrigerante hidrocarburo deben estar bien aislados para evitar el contacto con el mismo. De igual forma debe hacerse con los dispositivos o superficies dentro del lugar donde se encuentre el equipo.
- Mantener el cuarto donde este el equipo bien ventilado para evitar que la concentración de refrigerante hidrocarburo en el aire alcance el límite inferior de inflamabilidad.

CAPITULO IV. PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSIÓN DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO.

La reconversión de refrigerantes en equipos de aire acondicionado exige cumplir una serie de pasos que permiten la realización adecuada del mismo y el buen funcionamiento del equipo con el nuevo refrigerante. Estos pasos pueden variar según el tipo de la misma (sustitución directa y retrofit) y del tipo de refrigerante, pero en general son prácticamente los mismos.

1.1. Medidas antes de realizar la reconversión.

Antes de realizar la reconversión se deben tener en cuenta una serie de medidas para facilitar su realización y garantizar tanto la integridad del equipo como la seguridad personal de quienes la realizan. Estas medidas son las siguientes:

1. Tener todos los equipos necesarios para realizar la reconversión: Antes de realizar la reconversión se debe garantizar que se tengan a la mano todos los equipos necesarios (ver CAPITULO II. MARCO TEÓRICO. PROCESOS DE RECONVERSIÓN). Aunque con estos equipos se garantiza la buena realización de la reconversión no esta de más incluir otros adicionales que puedan servir de ayuda.
2. Realizar la reconversión en un sitio bien iluminado y ventilado: Una buena iluminación ayuda a desempeñar el trabajo con mayor efectividad y disminuir las posibilidades de cometer algún error. Si el lugar de trabajo se mantiene bien ventilado se minimizan las posibilidades de accidente con el refrigerante, tanto al ser inflamable disminuyendo los riesgos de ignición como si es tóxico disminuyendo la probabilidad de intoxicación, además de

CAPITULO IV PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSION DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

evitar también la sofocación cuando la cantidad de refrigerante pueda desplazar la cantidad de aire en el lugar de trabajo.

3. Disponer de implementos en caso de accidentes: Aunque al cumplir todos los pasos para la reconversión se evita la posibilidad de accidentes siempre la posibilidad que estos ocurran esta presente, por lo que disponer de implementos para atenderlos siempre es importante. Estos implementos van desde tener una caja con elementos de primeros auxilios hasta contar con un extinguidor en caso de incendios.

1.2. Pasos para realizar la reconversión.

Los pasos para realizar la reconversión se dividen según el tipo de la misma, si es sustitución directa o retrofit. Generalmente esta información la suministra el fabricante del refrigerante.

1.2.1. Pasos para la reconversión directa.

1. Poner el equipo en funcionamiento y tomar datos de las condiciones de operación del equipo (temperatura de salida y humedad del aire, presión y temperatura a la entrada y descarga del compresor, el evaporador y el condensador; consumo de energía, etc.)
2. Recuperar el refrigerante original del equipo: Se realiza con la unidad recuperadora de refrigerante y el cilindro de recuperación. Se conecta la manguera de succión de la unidad recuperadora a la válvula de gas del equipo y la manguera de descarga a la conexión de gas del cilindro de recuperación. El refrigerante es aspirado por la unidad de recuperadora y cuando se condensa en la misma se envía al cilindro de recuperación.

CAPITULO IV PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSION DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

3. Eliminar la presencia de humedad en el sistema: Este paso se realiza utilizando un juego de manómetros y la bomba de vacío. Se conecta la bomba por la válvula de gas del equipo y se pone a funcionar por al menos 15 minutos. Se debe alcanzar una presión de vacío de al menos 15 μ (medida con un vacuómetro). Se puede utilizar nitrógeno para eliminar la humedad dentro del sistema; cuando se termina de realizar el vacío se inyecta nitrógeno en el equipo hasta que se obtiene una lectura de 0 in Hg en el manómetro de baja. Se deja descansar el nitrógeno en el equipo por unos minutos y se vuelve a practicar el vacío.
4. Verificar la presencia de fugas: Cuando se termina de realizar el vacío en el sistema se apaga la bomba y se chequea el manómetro de baja o el vacuómetro: si la presión de vacío se mantiene no hay fugas, si aumenta la presión hay alguna fuga en el equipo.
5. Cargar el nuevo refrigerante en el equipo: Para cargar el nuevo refrigerante en el equipo se conecta la manguera con la que se realizara la carga a la válvula de líquido del equipo. Si el cilindro que contiene el refrigerante tiene válvulas para gas y líquido, lo más recomendable es utilizar esta última.

Para determinar cuanta cantidad del nuevo refrigerante se debe introducir al equipo se puede aplicar uno de estos métodos:

- Por volumen: El volumen (en fase líquida) del nuevo refrigerante debe ser igual al volumen (en fase líquida) del refrigerante original en el equipo.
- Por peso: La relación entre los pesos del refrigerante nuevo y original es igual a la relación entre sus densidades. Conociendo las densidades de ambos refrigerantes y el peso del refrigerante original en el equipo

CAPITULO IV PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSION DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

se puede determinar cuanto debe pesar la cantidad del nuevo refrigerante que se cargue al equipo.

- 5.1. Si el refrigerante que se va a cargar al equipo es una mezcla zeotrópica y esta almacenada en un cilindro con válvulas para líquido y gas, la carga siempre se debe hacer a través de la válvula de líquido. En caso de alguna fuga o pérdida de este tipo de refrigerante antes, durante o después de la carga se debe desechar la cantidad restante de refrigerante. Esto se debe que por ser una mezcla zeotrópica al haber una fuga se alteraría las proporciones originales del refrigerante y se comportaría de manera diferente a lo esperado.
6. Verificar si hay fugas en el equipo, utilizando un detector electrónico o solución de agua y jabón.
7. Poner en funcionamiento el equipo y tomar los datos de las condiciones de operación. Si los datos que se obtienen son iguales o mejoran en relación con el refrigerante original se da por concluida la reconversión. Si se necesita hacer los ajustes necesarios.
 - 7.1. En caso que no se obtenga los resultados esperados se deben revisarlas posibles causas (exceso o falta de refrigerante, falla de algún componente, mal funcionamiento del compresor, etc.), corregirlas y volver a repetir los pasos anteriores.
8. Identificar en el equipo el nuevo refrigerante que utiliza.

CAPITULO IV PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSION DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

1.2.2. Pasos para la reconversión por retrofit.

1. Poner el equipo en funcionamiento y tomar datos de las condiciones de operación del equipo (temperatura de salida y humedad del aire, presión y temperatura a la entrada y descarga del compresor, el evaporador y el condensador; consumo de energía, etc.)
2. Recuperar el refrigerante original del equipo: Se realiza con la unidad recuperadora de refrigerante y el cilindro de recuperación. Se conecta la manguera de succión de la unidad recuperadora a la válvula de gas del equipo y la manguera de descarga a la conexión de gas del cilindro de recuperación. El refrigerante es aspirado por la unidad de recuperadora y cuando se condensa en la misma se envía al cilindro de recuperación.
3. Cambiar el lubricante del compresor en caso que el nuevo refrigerante lo necesite. También se deben cambiar los separadores y los sistemas de alimentación del lubricante.
 - 3.1. Cuando se cambia el aceite se debe recargar el refrigerante original en el equipo y dejarlo funcionando por 24 horas para hacer circular el aceite en el sistema. Luego se vuelve a recuperar el refrigerante como se indico anteriormente.
4. Reemplazar los componentes que sean necesarios, como por ejemplo los filtros secadores y el compresor. Los cambios que se deban hacer son indicados por el fabricante del refrigerante.

CAPITULO IV PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSION DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

- 4.1. Si se va a realizar alguna soldadura se recomienda inyectar en el sistema un gas inerte, como el nitrógeno, para evitar la formación de escoria en el interior de los tubos.

5. Eliminar la presencia de humedad en el sistema: Este paso se realiza utilizando un juego de manómetros y la bomba de vacío. Se conecta la bomba por la válvula de gas del equipo y se pone a funcionar por al menos 15 minutos. Se debe alcanzar una presión de vacío de al menos 15 μ (medida con un vacuómetro) ó 29,40 in Hg (medido con el manómetro de baja). Se puede utilizar nitrógeno u otro gas inerte para eliminar la humedad dentro del sistema; cuando se termina de realizar el vacío se inyecta nitrógeno en el equipo hasta que se obtiene una lectura de 0 in Hg en el manómetro de baja. Se deja descansar el nitrógeno en el equipo por unos minutos y se vuelve a practicar el vacío.

6. Verificar la presencia de fugas: Cuando se termina de realizar el vacío en el sistema se apaga la bomba y se chequea el manómetro de baja o el vacuómetro: si la presión de vacío se mantiene no hay fugas, si disminuye la presión hay alguna fuga en el equipo.

7. Cargar el nuevo refrigerante en el equipo: Para cargar el nuevo refrigerante en el equipo se conecta la manguera con la que se realizara la carga a la válvula de líquido del equipo. Si el cilindro que contiene el refrigerante tiene válvulas para gas y líquido, lo más recomendable es utilizar esta última.

Para determinar cuanta cantidad del nuevo refrigerante se debe introducir al equipo se puede aplicar uno de estos métodos:

CAPITULO IV PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSION DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

- Por volumen: El volumen (en fase líquida) del nuevo refrigerante debe ser igual al volumen (en fase líquida) del refrigerante original en el equipo.
- Por peso: La relación entre los pesos del refrigerante nuevo y original es igual a la relación entre sus densidades. Conociendo las densidades de ambos refrigerantes y el peso del refrigerante original en el equipo se puede determinar cuanto debe pesar la cantidad del nuevo refrigerante que se cargue al equipo.

7.1. Si el refrigerante que se va a cargar al equipo es una mezcla zeotrópica y esta almacenada en un cilindro con válvulas para líquido y gas, la carga siempre se debe hacer a través de la válvula de líquido. En caso de alguna fuga o pérdida de este tipo de refrigerante antes, durante o después de la carga se debe desechar la cantidad restante de refrigerante. Esto se debe que por ser una mezcla zeotrópica al haber una fuga se alteraría las proporciones originales del refrigerante y se comportaría de manera diferente a lo esperado.

8. Verificar si hay fugas en el equipo, utilizando un detector electrónico o solución de agua y jabón.

9. Poner en funcionamiento el equipo y tomar los datos de las condiciones de operación. Si los datos que se obtienen son iguales o mejoran en relación con el refrigerante original se da por concluida la reconversión. Si se necesita hacer los ajustes necesarios.

9.1. En caso que no se obtenga los resultados esperados se deben revisarlas posibles causas (exceso o falta de refrigerante, falla de algún componente,

CAPITULO IV PASOS PARA REALIZAR LA RECONVERSION DE REFRIGERANTE EN EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

mal funcionamiento del compresor, etc.), corregirlas y volver a repetir los pasos anteriores.

10. Identificar en el equipo el nuevo refrigerante que utiliza. Si se realizó un cambio de lubricante también se indica.

CAPÍTULO V. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

1. MATERIALES UTILIZADOS.

En esta parte se describirán los materiales y equipos utilizados para la realización tanto de la reconversión como de los ensayos de prueba del equipo. Estos materiales y equipos son los siguientes:

- Equipo de aire acondicionado, tipo ventana, marca LG, modelo W122 CA TSC4, el cual tiene las siguientes especificaciones de fábrica:
 - Capacidad de refrigeración: 12000 Btu/h ($3508,8 \text{ J/s}$).
 - Consumo: 1220 W.
 - Corriente: 5,5 A.
 - Fase: 1 ϕ .
 - Voltaje: 220 V.
 - Frecuencia: 60 Hz.
 - Refrigerante: R-22 (0,42 kg).
- Recuperadora de gas refrigerante, marca FLUOROMIZER, modelo 3600.
- Bomba de vacío de 2 etapas, marca YELLOW JACKET, modelo Superevac.
- Vacuómetro digital, marca SUPCO, modelo VG64. Rango de medición de presión:
 - 0 a $12000 \mu \pm 10 \%$.
 - 0 a $1600 \text{ Pa} \pm 10 \%$.
- Termómetro análogo de bolsillo, marca APPLI PARTS. Rango de medición de temperatura: $-40 \text{ a } 70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Juego de manómetros con 7 mangueras de alta presión para refrigerantes. Rango de medición de presión:

- a) *Manómetro de baja presión:*
 - 0 a 120 psi ± 1 psi.
 - 0 a 9 $\text{kg}/\text{cm}^2 \pm 0,1 \text{ kg}/\text{cm}^2$.
- b) *Manómetro de alta presión:*
 - 0 a 500 psi ± 5 psi.
 - 0 a 35 $\text{kg}/\text{cm}^2 \pm 0,2 \text{ kg}/\text{cm}^2$.
- Multímetro, marca TST STAG, modelo AC610. Se pueden obtener mediciones de voltaje, corriente, resistencia y frecuencia. Sus rangos de medición son los siguientes:
 - a) *Corriente:*
 - 0 a 600 A ± 1 A.
 - 0 a 200 A ± 100 mA.
 - 0 a 20 A ± 10 mA.
 - b) *Voltaje:*
 - 0 a 1000 V ± 1 V (para corriente continua).
 - 0 a 750 V ± 1 V (para corriente alterna).
 - 0 a 200 V ± 100 mV (para corriente alterna).
 - c) *Resistencia:*
 - 0 a 20000 $\Omega \pm 10 \Omega$.
 - 0 a 200 $\Omega \pm 100 \text{ m}\Omega$.
 - d) *Frecuencia:*
 - 0 a 20000 Hz ± 1 Hz.
- Bombona de recuperación de refrigerante, de 11,9 l de capacidad.
- Equipo de soldadura de acetileno y oxígeno.
- Bombona de nitrógeno.
- Alicates de presión con perforador de tubería de cobre.
- Bombona de propano.
- Balanza electrónica, marca FJC, modelo FJC2850. Rango de medición de peso: 0 a 80 kg $\pm 0,001$ kg.

2. ENSAYOS DEL EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO.

Para observar el comportamiento del equipo de aire acondicionado con ambos refrigerantes es necesario realizar ensayos para obtener datos tales como capacidad de refrigeración, temperatura de enfriamiento de aire, consumo eléctrico, etc. En este trabajo se efectuaron dos ensayos: uno con el equipo cargado con refrigerante R-22 y el otro con el equipo cargado con propano. Estos ensayos se realizaron según las siguientes normas:

- Norma COVENIN 3537:1999. Acondicionadores de aire tipo ventana. Métodos de ensayo.
- Norma COVENIN 3538:1999. Acondicionadores de aire. Métodos de ensayo de capacidad de enfriamiento, consumo de energía y eficiencia energética.
- Norma COVENIN 1299:2000. Acondicionadores de aire tipo ventana. Requisitos.
- Norma ANSI/ASHRAE 16-1983. Método de prueba para clasificar acondicionadores de aire para habitaciones y acondicionadores de terminales unitarios.
- International Standard ISO 5151. Non-ducted air conditioners and heat pumps. Testing and rating for performance.

Los ensayos se llevaron a cabo en un cuarto calorimétrico propiedad de la empresa INDARTELCA, ubicada en el sector Telares de Palo Grande, Caricuao, Caracas.

2.1. Descripción del cuarto calorimétrico.

El cuarto calorimétrico de la empresa INDARTELCA es del tipo balanceado, diseñado según las normas ANSI/ASHRAE 16-1983, ISO 5151, COVENIN

3537:1999 y COVENIN 3538:1999. En él se pueden hacer ensayos de equipos de aire acondicionado de hasta 2 toneladas de refrigeración (24000 Btu/h). Este cuarto calorimétrico esta formado por paredes de concreto de 20 cm de espesor aisladas internamente por una capa de anime de 2,5 cm de espesor, excepto en el piso que tiene una capa de madera de 2 cm de espesor.

El cuarto esta dividido en dos compartimientos: el compartimiento interno y el compartimiento externo. El compartimiento interno tiene una dimensión de 2,34 x 2,45 x 2,2 m. En el se encuentran el calentador, el humidificador, ventilador, una lámpara de dos bombillas de $40 \text{ W } ^{\text{C}}/\text{U}$ y los instrumentales de medición (temperatura, presión, consumo eléctrico, etc.). En una de las paredes de este compartimiento esta la entrada con puerta de madera de 83 x 198 x 4,6 cm y una ventana de cristal con un area de 48 x 38 cm, que se encuentra a 1,6 m del piso. El compartimiento externo tiene una dimensión de 3,26 x 2,45 x 2,2 m. Aquí están instalados el enfriador, calentador, ventilador, una lámpara de dos bombillas de $40 \text{ W } ^{\text{C}}/\text{U}$ y los instrumentales de medición. En una de sus paredes esta la puerta de acceso de madera de 1,41 x 1,98 x 4,6 cm. En el centro de la pared que separa ambos compartimientos hay una abertura de 79 x 57 cm donde se sitúa el equipo de aire acondicionado.

El control de los ensayos efectuados en el cuarto calorimétrico y la toma de datos de los valores que se obtienen en los mismos se realizan mediante un programa computarizado diseñado por el ingeniero Ángel De Zordo para la empresa INDARTELCA. Este programa muestra los valores de temperaturas, consumo eléctrico, humedad, eficiencia energética, agua evaporada, agua condensada, etc., dentro del colorímetro y la temperatura ambiente fuera de él. Además muestra un grafico que permite apreciar en que momento el equipo llega al equilibrio.

2.2. Ensayo del equipo de aire acondicionado con refrigerante R-22.

Para comparar el funcionamiento del equipo de aire acondicionado con ambos refrigerantes se realizan ensayos para obtener la capacidad de enfriamiento, el consumo de energía y la eficiencia energética. Los ensayos se realizan según lo indicado en las normas ANSI/ASHRAE 16-1983 y COVENIN 3538:1999.

El primer ensayo que se realiza es con el equipo de aire acondicionado cargado con R-22. Según la norma COVENIN 3538:1999 el equipo se instala en el cuarto calorimétrico y se hace funcionar hasta que alcance un estado de equilibrio, luego se hacen mediciones cada 10 minutos durante una hora, para un total de 7 mediciones.

Los datos que se obtuvieron en este ensayo se muestran, con las unidades con que se midieron, en la siguiente tabla.

Tabla N° 17. Datos del Ensayo del Equipo de Aire Acondicionado Cargado con R-22. (Fuente: Los Autores)

Tiempo de medición	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Temperatura ambiente (°F)	88,2	88,8	87,3	87,8	88,3	88	88,2
Temperatura de bulbo seco del compartimiento interno (°F)	88,2	89,3	88,7	87,5	87,4	88,6	87,8
Temperatura de bulbo húmedo del compartimiento interno (°F)	67	67,8	66,8	67,1	67,6	66,8	67,1
Temperatura de bulbo seco del compartimiento externo (°F)	97	93,8	96,2	95,4	97,5	95,5	97,2
Humedad relativa (%)	32,8	32,8	31,4	34,3	35,8	31,6	33,8
Capacidad total de enfriamiento (Btu/h)	11843	11795	11880	11874	11902	11833	11871
Potencia eléctrica (W)	1133	1135	1141	1140	1136	1130	1139
Tensión eléctrica (V)	227	227,7	227,5	227,5	228	227,3	227
Corriente eléctrica (A)	5,5	5,4	5,5	5,5	5,4	5,5	5,5
Relación de eficiencia energética	10,45	10,39	10,41	10,42	10,47	10,47	10,42

Los datos a continuación son los que se obtuvieron antes o después de finalizado el ensayo:

- Presión barométrica: 100,91 kPa.
- Velocidad del ventilador en el evaporador: 0,189 m³/s
- Velocidad del ventilador en el condensador: 0,378 m³/s
- Frecuencia: 60 Hz.

- Cantidad de agua evaporada en el humidificador: 1,21 L/h
- Agua condensada en el compartimiento externo: 0,98 L/h
- Temperatura del agua que entra al humidificador en el compartimiento interno: 31,44 °C
- Temperatura del agua condensada en el compartimiento externo: 5,5 °C
- Presión en el lado de baja del equipo: 482,63 kPa.
- Presión en el lado de alta del equipo: 1654,74 kPa.

2.3. Recuperación del R-22.

Después de realizados los ensayos con el equipo cargado con R-22, se procedió a realizar la extracción del R-22 del equipo de aire acondicionado. Esto se realizó en la planta de la empresa CLIMAR, ubicada en Guarenas, Estado Miranda.

Los pasos realizados para efectuar la recuperación fueron los siguientes:

1. Realizar un vacío a la bombona donde se almacenara el R-22: La bombona que se utilizó para almacenar el R-22 venía precargada con nitrógeno. Para asegurar que no quedaran residuos de nitrógeno dentro de la bombona se le aplicó un vacío con la bomba para tal fin hasta que se alcanzó una presión de 1750 μ . Esto además facilitaba la carga del R-22 a la bombona, ya que la presión menor dentro de la misma crea un efecto de succión del refrigerante. El peso de la bombona vacía es 7,955 kg.
2. Recuperar el R-22: En esta parte se utilizó la máquina recuperadora, el juego de manómetros y un alicate de pinchar, ya que el equipo de aire acondicionado no poseía válvulas de servicio. Lo primero que se hizo fue conectar el alicate de pinchar al tubo después de la salida del compresor (lado de alta presión). Luego se conectaron el alicate de pinchar, el juego de manómetros, la máquina

recuperadora, la bombona y la balanza, tal como se muestra en la siguiente imagen.

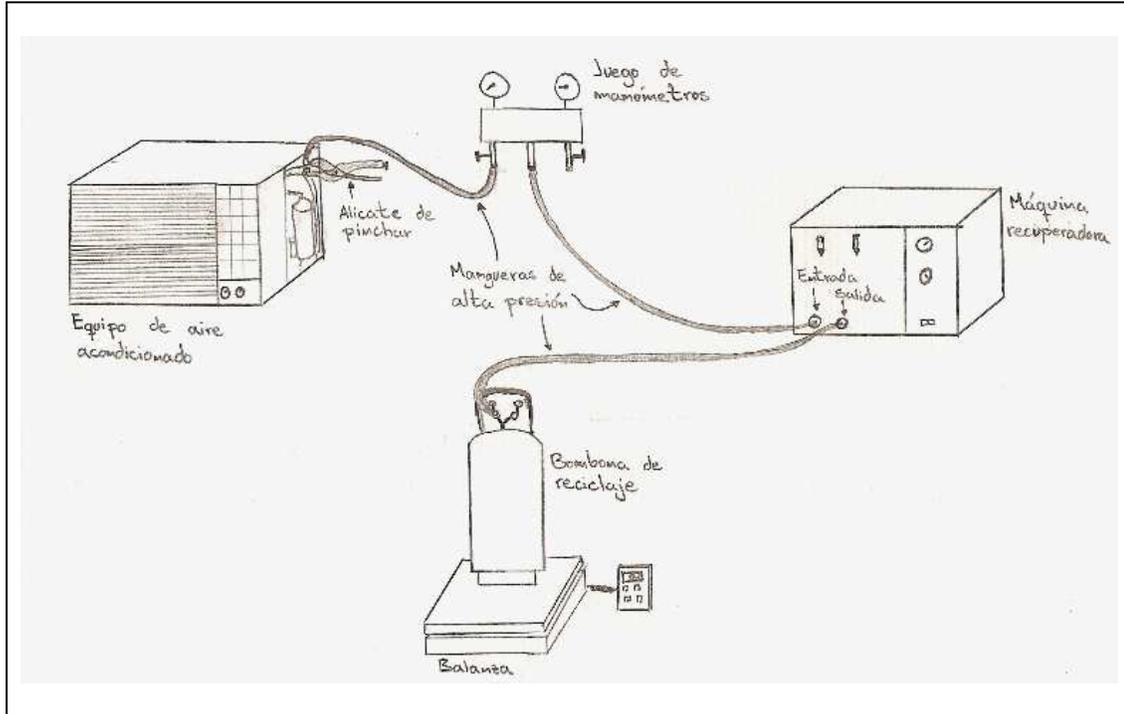


Figura N° 18. Conexión de los instrumentos para recuperar el R-.22. (Fuente: Los Autores)

La conexión a la bombona se hizo por el lado de carga de gas para que la entrada del refrigerante dentro de la bombona se encontrara por encima del nivel de líquido del mismo y así facilitar su carga a la bombona. Una vez hechas las conexiones, se ajustó la máquina al tipo de servicio que se va a realizar, se encendió y se abrió la válvula de entrada a la bombona. Se dejó funcionando por un tiempo de aproximadamente 20 minutos, hasta que la lectura en la balanza ya no varió. Después se cerró la válvula de entrada a la bombona y se apagó la máquina. El peso total de la bombona fue 8,351kg.

Cantidad de R-22 extraído del equipo:

$$M_{R-22} = P_{Bc} - P_{Bv} = 8,351\text{kg} - 7,955\text{kg} = 0,396\text{kg} \quad (\text{Ec. 7})$$

3. Instalación de las válvulas de servicio: Para poder cargar el propano al equipo se necesito instalar dos válvulas de servicio. Las válvulas que se utilizaron son de cobre, y se instaló una en el lado de alta presión del equipo (donde se conecto el alicate de pinchar) y la otra en el lado de baja del equipo, donde estaba ubicado un tubo de cobre sellado, y por el cual se cargó el R-22 durante la fabricación del equipo. Para la soldadura se utilizó un equipo de soldadura de oxígeno y acetileno, utilizando como material de aporte varillas de cobre.
4. Aplicación de nitrógeno: Después de instaladas las válvulas de servicio se aplicó nitrógeno dentro del equipo. Esto se realizo con la finalidad de evitar la oxidación de la soldadura y remover los restos de aire y humedad dentro del equipo. Esto también se hizo para verificar que no hubieran fugas donde se realizo la soldadura de las válvulas; cuando la presión del nitrógeno dentro del equipo alcanzó una presión de 100 psi se cerraron las válvulas, tanto del equipo como de la bombona, y se espero una hora para ver si la presión disminuía. La presión no disminuyo, lo que significa que no había fugas, pero para una mejor verificación se aplicó una solución de agua y jabón en las soldaduras y se observo para ver si se producían burbujas producto de una fuga. Estas no se produjeron, lo que aseguraba que no había riesgos de fugas en las soldaduras.
5. Realizar un vacío al equipo de aire acondicionado: Una vez verificada la no presencia de fugas se le realizó un vacío al equipo para remover tanto el nitrógeno previamente añadido como el aire y la humedad que pudieran mezclarse con el

propano y crear una mezcla inflamable. Se utilizó la bomba de vacío durante un tiempo aproximado de 20 minutos donde se alcanzó una presión de 1900 μ .

2.4. Reconversión del equipo de aire acondicionado con propano.

2.4.1. Cálculo de la cantidad de propano a utilizar.

Finalizada la recuperación del R-22 del equipo de aire acondicionado se procedió a realizar la carga de propano al equipo. Antes de esto era necesario saber cual era la cantidad de propano que se introduciría al equipo. Para esto existen dos métodos:

1. Conociendo el volumen de R-22 en el equipo: Un equipo de aire acondicionado contiene un volumen predeterminado de refrigerante, el cual no se puede variar. Para conocer el volumen de propano que se debe cargar al equipo hay que aplicar la siguiente relación:

$$V_{R-22} = V_{\text{propano}} \quad (\text{Ec. 8})$$

El volumen de propano siempre debe ser igual al volumen de R-22 dentro del equipo. Como no se contaba con una herramienta que permitiera conocer el volumen de R-22 dentro del equipo, se optó por el otro método.

2. Conociendo la masa de R-22 en el equipo: Mediante este método es mucho más fácil determinar la cantidad de propano a cargar en el equipo. Conociendo las densidades de ambos refrigerantes y la masa de R-22 en el equipo se puede saber la masa de propano a utilizar. Se sabe que la densidad de ambos refrigerantes es la cantidad de masa por unidad de volumen.

$$\rho_{R-22} = \frac{M_{R-22}}{V_{R-22}} \quad ; \quad \rho_{\text{propano}} = \frac{M_{\text{propano}}}{V_{\text{propano}}} \quad (\text{Ec. 9 y 10})$$

Conociendo que los volúmenes de ambos refrigerantes en el equipo deben ser iguales se sustituye las ecuaciones 9 y 10 en la ecuación 8:

$$V_{R-22} = V_{\text{propano}} \Rightarrow \frac{M_{R-22}}{\rho_{R-22}} = \frac{M_{\text{propano}}}{\rho_{\text{propano}}} \quad (\text{Ec. 11})$$

Se despeja la ecuación 11 para obtener la masa de propano:

$$M_{\text{propano}} = \frac{\rho_{\text{propano}}}{\rho_{R-22}} \cdot M_{R-22} \quad (\text{Ec. 12})$$

Con esta formula se obtiene cuanta es la masa de propano a cargar al equipo. Antes de iniciar la carga se debe conocer las densidades de ambos refrigerantes y la temperatura ambiental. Estas se muestran en la tabla N° 18

Tabla N° 18. Densidades del R-22 y del Propano. (Fuente: Los autores)

Temperatura ambiental	25 °C
Densidad del R-22 a temperatura ambiental ^a	1190 Kg/m ³
Densidad del propano a temperatura ambiental ^b	495 Kg/m ³

^a Dato obtenido de Cengel 1998.

^b Dato obtenido de NIST (Nacional Institute of Standards and Technology)

La temperatura ambiental fue tomada antes de realizar la carga, a las 9:00 de la mañana en el interior de la planta de la empresa CLIMAR. En cuanto a la masa de R-22 que se obtuvo en la descarga hubo que tomar en cuenta que era diferente del valor dado por el fabricante del equipo. Considerando la diferencia entre ambas cifras y el porcentaje que esto representa:

$$\Delta_{R-22} = M_{f_{R-22}} - M_{R-22} = 0,420 \text{ kg} - 0,396 \text{ kg} = 0,024 \text{ kg} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\%P_{R-22} = \frac{\Delta_{R-22}}{M_{f_{R-22}}} \cdot 100 \% = \frac{0,024 \text{ kg}}{0,420 \text{ kg}} \cdot 100 \% = 5,71 \% \quad (\text{Ec. 14})$$

Se puede apreciar que la diferencia entre la cantidad dada por el fabricante y lo que se obtuvo en la descarga no es muy grande. Hay que mencionar que cuando se conectó el alicate de pinchar y cuando se retiraron las mangueras después de finalizada la descarga hubo unas pequeñas fugas. Por lo tanto, se utilizó la cantidad de R-22 dada por el fabricante para realizar el cálculo de la masa de propano.

La masa de propano que se obtuvo, utilizando la ecuación 12, para cargar en el equipo fue la siguiente:

$$M_{\text{propano}} = \frac{495 \text{ kg/m}^3}{1190 \text{ kg/m}^3} \cdot 0,420 \text{ kg} = 0,175 \text{ kg}$$

Tomando en cuenta que cuando se hizo la descarga de R-22 quedo una pequeña cantidad en las mangueras, se calculó cuanta cantidad de propano podría quedar en la manguera de carga. Para esto se conecto las mangueras (y el juego de manómetros) entre las dos válvulas de la bombona con propano y luego se coloco solo la manguera encima de la balanza, graduada a cero. Se abrió una de las válvulas de la bombona y se observo cuanto aumentaba el peso de la manguera, el cual fue 0,012 kg. Con esto, la cantidad total de propano que debe utilizarse de la bombona es la siguiente:

$$MT_{\text{propano}} = M_{\text{propano}} + M_{\text{manguera}} = 0,175 \text{ kg} + 0,012 \text{ kg} = 0,187 \text{ kg} \quad (\text{Ec. 15})$$

2.4.2. Carga del equipo con propano.

La carga del propano se realizó en un área despejada y con buena ventilación dentro de la planta de la empresa CLIMAR, con el fin de evitar cualquier accidente al manipular el gas. Se calculó la cantidad de propano que pudiera escapar al ambiente mediante la ecuación 6.

$$C_{hid} = \frac{13,600 \text{ kg}}{(70 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 3,5 \text{ m})} = 0,0022 \text{ kg/m}^3$$

Este valor que se obtuvo está muy por debajo del límite inferior de inflamabilidad para el propano ($0,038 \text{ kg/m}^3$), por lo que no existía riesgo de combustión dentro de la planta.

Los materiales que se utilizaron para realizar la carga fueron: bombona con propano, balanza, mangueras de alta presión y juego de manómetros.

Los pasos seguidos para la carga del propano fueron los siguientes:

1. Conexión de los materiales para la carga: La conexión se hizo de la siguiente forma: se conectó una de las puntas de las mangueras a la válvula de gas de la bombona y la otra a la entrada de servicio del manómetro; otra se conectó de la entrada de baja presión del manómetro a la válvula de baja presión del equipo y la otra de la entrada de alta presión del manómetro a la válvula de alta presión del equipo. Luego se colocó la bombona encima de la balanza, siendo su peso inicial $13,690 \text{ kg}$.

2. Cálculo del peso final de la bombona: Para saber en que momento se debería parar la carga de propano, se determinó cual sería la medición final de la balanza. Esto se hizo restando el peso inicial de la bombona y la cantidad de propano a utilizar.

$$P_{f_{bombona}} = P_{O_{bombona}} - MT_{propano} = 13,690 \text{ kg} - 0,187 \text{ kg} = 13,503 \text{ kg} \quad (\text{Ec. 16})$$

3. Carga del propano: Para traspasar el propano al equipo de aire acondicionado primero se abrió la válvula de la bombona. Después que la balanza se estabilizó se fue abriendo poco a poco la válvula del lado de alta del manómetro. Se dejó fluir el propano hasta que la balanza indicó el peso esperado (13,503 kg). En este momento se cerró la válvula del manómetro y se desconectó solo la bombona.
4. Prueba del equipo: Para verificar que el equipo funcionara según lo esperado utilizando propano, se trasladó a la parte externa de la planta para ponerlo en funcionamiento. Hecho esto, el equipo funcionó sin ninguna anomalía, salvo que se tuvo que esperar aproximadamente dos minutos a que empezara el enfriamiento del aire. Como se mantuvo el juego de manómetros conectado al equipo mientras funcionaba, se tomaron los datos de la presión de baja y de alta. En la tabla siguiente se observan los valores de las presiones de trabajo del equipo funcionando con propano.

Tabla N° 19. Presiones de Trabajo del Equipo de Aire Acondicionado Con Propano. (Fuente: Los Autores)

Presión de baja (kPa)	399,90
Presión de alta (kPa)	1378,96

2.5. Ensayo del equipo de aire acondicionado con propano.

El ensayo con el equipo de aire acondicionado cargado de propano se realiza, de la misma forma que se hizo en el ensayo con R-22, siguiendo lo estipulado por las normas ANSI/ASHRAE 16-1983 y COVENIN 3538:1999.

Los datos que se obtuvieron en este ensayo se muestran a continuación y en la tabla N° 20.

- Presión barométrica: 100,91 mbar.
- Velocidad del ventilador en el evaporador: 0,189 m³/s
- Velocidad del ventilador en el condensador: 0,378 m³/s
- Frecuencia: 60 Hz.
- Cantidad de agua evaporada en el humidificador: 0,86 L/h
- Agua condensada en el compartimiento externo: 0,93 L/h
- Temperatura del agua que entra al humidificador en el compartimiento interno: 27,11 °C.
- Temperatura de el residuo de agua condensada en el compartimiento externo: 5,22 °C
- Presión en el lado de baja del equipo: 399,90 kPa.
- Presión en el lado de alta del equipo: 1378,96 kPa.

Tabla N° 20. Datos del Ensayo del Equipo de Aire Acondicionado Cargado con Propano. (Fuente: Los Autores)

Tiempo de medición	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Temperatura ambiente (°F)	85,6	86,2	85,6	85,8	86,1	87,1	86,2
Temperatura de bulbo seco del compartimiento interno (°F)	80,2	80,6	81	79,7	81	80,8	79,9
Temperatura de bulbo húmedo del compartimiento interno (°F)	67,2	65,4	66,9	65	67,2	67	66,1
Temperatura de bulbo seco del compartimiento externo (°F)	91,4	92,2	93,7	92,6	91,8	93,1	92,3
Humedad relativa (%)	51,3	44,5	48,2	52,6	49,2	49	48,5
Capacidad total de enfriamiento (Btu/h)	10653	10711	10636	10702	10678	10652	10671
Potencia eléctrica (W)	983	992	985	994	982	984	984
Tensión eléctrica (V)	229,7	229,1	229,3	228,5	229	229,3	227,9
Corriente eléctrica (A)	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2	4,2	4,2
Relación de eficiencia energética	10,84	10,79	10,80	10,77	10,87	10,83	10,84

CAPÍTULO VI. CÁLCULOS.

En esta parte se calculan los valores promedios de las variables que se midieron en el cuarto calorimétrico y el valor de la relación de eficiencia energética. Los valores promedios se calculan sumando cada uno de los datos obtenidos durante los ensayos y dividiéndolos entre el número de mediciones.

1. Cálculos para el R-22.

1.1. Temperatura ambiente promedio.

$$\bar{T}_{amb} = \frac{\sum T_{amb}}{N^{\circ}_{med}} = \frac{(88,2 + 88,8 + 87,3 + 87,8 + 88,3 + 88 + 88,2)^{\circ}F}{7} = 88,09^{\circ}F$$

(Ec. 17)

Conversión a grados Celsius:

$$\bar{T}_{amb} [^{\circ}C] = \frac{5}{9}(\bar{T}_{amb} [^{\circ}F] - 32^{\circ}F) = \frac{5}{9} \cdot (88,09^{\circ}F - 32^{\circ}F) = 31,16^{\circ}C$$

(Ec. 18)

1.2. Temperatura de bulbo seco promedio (compartimiento interno).

$$\bar{T}_{bsi} = \frac{\sum T_{bsi}}{N^{\circ}_{med}} = \frac{(88,2 + 89,3 + 88,7 + 87,5 + 87,4 + 88,6 + 87,8)^{\circ}F}{7} = 88,21^{\circ}F$$

(Ec. 19)

Conversión a grados Celsius (utilizando la ecuación 18):

$$\bar{T}_{bsi} [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \cdot (88,21^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}) = 31,23^{\circ}\text{C}$$

1.3. Temperatura de bulbo húmedo promedio (compartimiento interno).

$$\bar{T}_{bhi} = \frac{\sum T_{bhi}}{N^{\circ}_{med}} = \frac{(67 + 67,8 + 66,8 + 67,1 + 67,6 + 66,8 + 67,1)^{\circ}\text{F}}{7} = 67,17^{\circ}\text{F}$$

(Ec. 20)

Conversión a grados Celsius (utilizando la ecuación 18):

$$\bar{T}_{bhi} [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \cdot (67,17^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}) = 19,54^{\circ}\text{C}$$

1.4. Temperatura promedio del compartimiento externo.

$$\bar{T}_{ce} = \frac{\sum T_{ce}}{N^{\circ}_{med}} = \frac{(97 + 93,8 + 96,2 + 95,4 + 97,5 + 95,5 + 97,2)^{\circ}\text{F}}{7} = 96,02^{\circ}\text{F}$$

(Ec. 21)

Conversión a grados Celsius (utilizando la ecuación 18):

$$\bar{T}_{ce} [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \cdot (96,02^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}) = 35,57^{\circ}\text{C}$$

1.5. Humedad relativa promedio.

$$\bar{\phi} = \frac{\sum \phi}{N^{\circ}_{\text{med}}} = \frac{(32,8 + 32,8 + 31,4 + 34,3 + 35,8 + 31,6 + 33,8)\%}{7} = 33,21\%$$

(Ec 22)

1.6. Capacidad total de enfriamiento promedio.

$$\overline{\text{CTE}} = \frac{\sum \text{CTE}}{N^{\circ}_{\text{med}}} \quad (\text{Ec 23})$$

$$\overline{\text{CTE}} = \frac{(11843 + 11795 + 11880 + 11874 + 11902 + 11833 + 11871) \text{ Btu/h}}{7} = 11856,86 \text{ Btu/h}$$

1.7. Potencia eléctrica promedio.

$$\overline{\text{PE}} = \frac{\sum \text{PE}}{N^{\circ}_{\text{med}}} \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\overline{\text{PE}} = \frac{(1133 + 1135 + 1141 + 1140 + 1136 + 1130 + 1139) \text{ W}}{7} = 1136,29 \text{ W}$$

1.8. Tensión eléctrica promedio.

$$\overline{\text{TE}} = \frac{\sum \text{TE}}{N^{\circ}_{\text{med}}} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\overline{TE} = \frac{(227 + 227,7 + 227,5 + 227,5 + 228 + 227,3 + 227)V}{7} = 227,43 \text{ V}$$

1.9. Corriente eléctrica promedio.

$$\overline{CE} = \frac{\sum CE}{N^{\circ}_{med}} = \frac{(5,5 + 5,4 + 5,5 + 5,5 + 5,4 + 5,5 + 5,5)A}{7} = 5,47 \text{ A} \quad (\text{Ec. 26})$$

1.10. Relación de eficiencia energética.

La relación de eficiencia energética se calcula según lo indicado por la norma COVENIN 3537:1999; la capacidad total de enfriamiento (en Btu/h) entre el valor promedio de la potencia eléctrica (en watts).

$$EER = \frac{\overline{CE}}{\overline{PE}} = \frac{11856,86 \text{ Btu/h}}{1136,29 \text{ W}} = 10,43 \text{ Btu/h/W} \quad (\text{Ec. 27})$$

1.11. Relación de eficiencia energética respecto del compresor.

La relación de eficiencia energética con respecto del compresor se calcula dividiendo la capacidad total de enfriamiento entre la potencia de entrada al compresor⁴.

$$EER_c = \frac{\overline{CE}}{PE_c} = \frac{11856,86 \text{ Btu/h}}{1037 \text{ W}} = 11,43 \text{ Btu/h/W} \quad (\text{Ec. 28})$$

⁴ Este dato fue proporcionado por el fabricante del equipo.

2. Cálculos para el propano.

2.1. Temperatura ambiente promedio.

Utilizando la ecuación 17:

$$\bar{T}_{\text{amb}} = \frac{(85,6 + 86,2 + 85,6 + 85,8 + 86,1 + 87,1 + 86,2)^{\circ}\text{F}}{7} = 86,09^{\circ}\text{F}$$

Conversión a grados Celsius (utilizando la ecuación 18):

$$\bar{T}_{\text{amb}} [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \cdot (86,09^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}) = 30,05^{\circ}\text{C}$$

2.2. Temperatura de bulbo seco promedio (compartimiento interno).

Utilizando la ecuación 19:

$$\bar{T}_{\text{bsi}} = \frac{(80,2 + 80,6 + 81 + 79,7 + 81 + 80,8 + 79,9)^{\circ}\text{F}}{7} = 80,46^{\circ}\text{F}$$

Conversión a grados Celsius (utilizando la ecuación 18):

$$\bar{T}_{\text{bsi}} [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \cdot (80,46^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}) = 26,92^{\circ}\text{C}$$

2.3. Temperatura de bulbo húmedo promedio (compartimiento interno).

Utilizando la ecuación 20:

$$\bar{T}_{bhi} = \frac{(67,2 + 65,4 + 66,9 + 65 + 67,2 + 67 + 66,1)^{\circ}\text{F}}{7} = 66,40^{\circ}\text{F}$$

Conversión a grados Celsius (utilizando la ecuación 18):

$$\bar{T}_{bhi} [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \cdot (66,4^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}) = 19,11^{\circ}\text{C}$$

2.4. Temperatura promedio del compartimiento externo.

Utilizando la ecuación 21:

$$\bar{T}_{ce} = \frac{(91,4 + 92,2 + 93,7 + 92,6 + 91,8 + 93,1 + 92,3)^{\circ}\text{F}}{7} = 92,44^{\circ}\text{F}$$

Conversión a grados Celsius (utilizando la ecuación 18):

$$\bar{T}_{ce} [^{\circ}\text{C}] = \frac{5}{9} \cdot (92,44^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}) = 33,58^{\circ}\text{C}$$

2.5. Humedad relativa promedio.

Utilizando la ecuación 22:

$$\bar{\phi} = \frac{(51,3 + 44,5 + 48,2 + 52,6 + 49,2 + 49 + 48,5)\%}{7} = 49,04\%$$

2.6. Capacidad total de enfriamiento promedio.

Utilizando la ecuación 23:

$$\overline{\text{CTE}} = \frac{(10653 + 10711 + 10636 + 10702 + 10678 + 10652 + 10671) \text{ Btu/h}}{7} = 10671,86 \text{ Btu/h}$$

2.7. Potencia eléctrica promedio.

Utilizando la ecuación 24:

$$\overline{\text{PE}} = \frac{(983 + 992 + 985 + 994 + 982 + 984 + 984) \text{ W}}{7} = 986,29 \text{ W}$$

2.8. Tensión eléctrica promedio.

Utilizando la ecuación 25:

$$\overline{\text{TE}} = \frac{(229,7 + 229,1 + 229,3 + 228,5 + 229 + 229,3 + 227,9) \text{ V}}{7} = 228,97 \text{ V}$$

2.9. Corriente eléctrica promedio.

Utilizando la ecuación 26:

$$\overline{\text{CE}} = \frac{(4,2 + 4,2 + 4,4 + 4,2 + 4,2 + 4,3 + 4,2) \text{ A}}{7} = 4,24 \text{ A}$$

2.10. Relación de eficiencia energética.

La relación de eficiencia energética se calcula de igual forma como se hizo para el R-22, utilizando la ecuación 27.

$$EER = \frac{10671,86 \text{ Btu/h}}{986,29 \text{ W}} = 10,82 \text{ Btu/h/W}$$

2.11. Relación de eficiencia energética respecto del compresor.

La relación de eficiencia energética se calcula utilizando la ecuación 28, con la potencia de entrada al compresor utilizando propano⁵.

$$EER_c = \frac{10671,86 \text{ Btu/h}}{874 \text{ W}} = 12,21 \text{ Btu/h/W}$$

3. Diferencias porcentuales entre los resultados de ambos refrigerantes.

Para obtener cual es la diferencia entre los resultados de ambos refrigerantes se calcula la diferencia porcentual de los resultados que se obtuvieron con cada uno de ellos.

⁵ Este dato fue proporcionado por el fabricante del equipo.

3.1. Diferencia porcentual de la temperatura de bulbo seco (compartimiento interno).

$$\Delta \% \bar{T}_{bsi} = 100\% - \frac{\bar{T}_{bsi \text{ PROPANO}}}{\bar{T}_{bsi \text{ R-22}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{80,46 \text{ }^\circ\text{F}}{88,21 \text{ }^\circ\text{F}} \cdot 100\% = 8,79\%$$

(Ec. 29)

3.2. Diferencia porcentual de la temperatura de bulbo húmedo (compartimiento interno).

$$\Delta \% \bar{T}_{bhi} = 100\% - \frac{\bar{T}_{bhi \text{ PROPANO}}}{\bar{T}_{bhi \text{ R-22}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{66,40 \text{ }^\circ\text{F}}{67,17 \text{ }^\circ\text{F}} \cdot 100\% = 1,15\%$$

(Ec. 30)

3.3. Diferencia porcentual de la temperatura de bulbo en el compartimiento externo.

$$\Delta \% \bar{T}_{ce} = 100\% - \frac{\bar{T}_{ce \text{ PROPANO}}}{\bar{T}_{ce \text{ R-22}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{92,44 \text{ }^\circ\text{F}}{96,02 \text{ }^\circ\text{F}} \cdot 100\% = 3,73\%$$

(Ec. 31)

3.4. Diferencia porcentual de la capacidad total de enfriamiento.

$$\Delta \% \overline{\text{CTE}} = 100\% - \frac{\overline{\text{CTE}}_{\text{PROPANO}}}{\overline{\text{CTE}}_{\text{R-22}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{10671,86 \text{ Btu/h}}{11856,86 \text{ Btu/h}} \cdot 100\% = 9,99\%$$

(Ec. 32)

3.5. Diferencia porcentual de la potencia eléctrica.

$$\Delta \% \overline{PE} = 100\% - \frac{\overline{PE}_{\text{PROPANO}}}{\overline{PE}_{\text{R-22}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{986,29 \text{ W}}{1136,29 \text{ W}} \cdot 100\% = 13,20\%$$

(Ec. 33)

3.6. Diferencia porcentual de la corriente eléctrica.

$$\Delta \% \overline{CE} = 100\% - \frac{\overline{CE}_{\text{PROPANO}}}{\overline{CE}_{\text{R-22}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{4,24 \text{ A}}{5,47 \text{ A}} \cdot 100\% = 22,49\%$$

(Ec. 34)

3.7. Diferencia porcentual de la relación de eficiencia energética.

$$\Delta \% \overline{EER} = 100\% - \frac{\overline{EER}_{\text{R-22}}}{\overline{EER}_{\text{PROPANO}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{10,43 \text{ Btu/h/W}}{10,82 \text{ Btu/h/W}} \cdot 100\% = 3,60\%$$

(Ec. 35)

3.8. Diferencia porcentual de la relación de eficiencia energética respecto del compresor.

$$\Delta \% \overline{EER}_C = 100\% - \frac{\overline{EER}_C_{\text{R-22}}}{\overline{EER}_C_{\text{PROPANO}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{11,43 \text{ Btu/h/W}}{12,21 \text{ Btu/h/W}} \cdot 100\% = 6,39\%$$

(Ec. 36)

CAPITULO VII. COSTOS DE LA RECONVERSIÓN.

1. Costos de los materiales para la reconversión.

En la determinación del costo de la reconversión se toman en cuenta el precio del nuevo refrigerante, el de los componentes (Ejemplo: filtros, lubricantes) que se sustituyen y el consumo de energía. En el caso en el que se utiliza refrigerantes hidrocarburos la sustitución de componentes no es necesaria, reduciéndose aun más los costos.

Para obtener el gas propano y el refrigerante R-22 se consultaron con varios distribuidores a fin de saber cual ofrecía el menor precio y la mejor posibilidad de obtención. Igualmente se hizo con el gas nitrógeno que se utilizó para eliminar la humedad en el sistema.

Una vez hecha la investigación de los comercios y las industrias que venden los insumos que se necesitarían comprar para realizar la reconversión, se seleccionaron aquellos donde los precios eran más accesibles. Dichos precios que se obtuvieron se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla N° 21. Precios de los refrigerantes. (Fuente: Los Autores)

Refrigerante	Costo Bs/kg.
R-22 ⁶	11.712
Propano ⁷	7.875

En este trabajo se utilizó un equipo de aire acondicionado totalmente nuevo cargado con R-22, el cual tiene un valor de Bs. 850000. Por otro lado, para la

⁶ Precio según Guía de Referencia de Partidas de Construcción (www.grc.com.ve)

⁷ Precio según UNIGAS, C.A.

realización de la reconversión con refrigerante hidrocarburo es necesario un equipo de aire acondicionado nuevo o usado, propano, nitrógeno y la mano de obra de un técnico calificado que cuente con todos los equipos necesarios antes mencionados para la misma.

2. Costos operativos para la reconversión.

A continuación se muestran los costos operativos que implican esta reconversión a fin de determinar su factibilidad económica.

Tabla N° 22. Costos operativos de la reconversión del equipo de aire acondicionado. (Fuente: Los Autores)

Insumos	Costo en Bs.
Propano (0,187 kg)	1.473
Nitrógeno (1 kg.) ⁸	3.333
Mano de obra ⁹	250.000
TOTAL	254.806

Se puede observar que el costo operativo para la reconversión a hidrocarburo es aproximadamente Bs. 254.806 y se puede aplicar a cualquier equipo de aire acondicionado de uso comercial.

Cabe destacar que este estudio se realizó enfocado a solventar la problemática que causaría a largo plazo la suspensión de la producción de refrigerante R-22 del mercado y además pensando en utilizar un gas que no produzca daño a nuestra capa de ozono y genere calentamiento global.

⁸ Precio según Guía de Referencia de Partidas de Construcción (www.grc.com.ve)

⁹ Precio según CLIMAR, C.A.

CAPITULO VII COSTOS DE LA RECONVERSIÓN.

Debido a que Venezuela es un país productor de petróleo y sus derivados, el costo del propano Vs. R-22 es muy significativo y a largo plazo esto se convierte en ahorro efectivo para el consumidor, y por otro lado, su disponibilidad en el mercado.

También se debe tomar en cuenta otra problemática que causaría la eliminación de la producción de refrigerante R-22, y se refiere a lo que ocurriría con toda la gama de equipos de aire acondicionado que existe en nuestro país, ya que sería muy difícil conseguir dicho refrigerante para su carga y servicio técnico, lo que implicaría un elevado costo del mismo en el mercado negro.

Por otro lado, el valor del consumo de energía es más bajo con propano (986 W). La tarifa aplicada al uso residencial general es 9790,43 Bs/kwh según Gaceta Oficial N° 37.415 de fecha 3 de abril de 2002, artículo 14, Elecar y sus filiales. Con esto se puede comparar el consumo de energía entre los dos refrigerantes usados, el cual se muestra en la tabla N° 23.

Tabla N° 23. Costo estimado del consumo de energía. (Fuente: Los Autores)

Refrigerante	Potencia promedio con cada refrigerante (Kw)	Costo de la potencia eléctrica (Bs./Kwh)	Costo del consumo de energía (Bs./h)
Propano	0.986	9790.43	9656.20
R-22	1.136	9790.43	11124.77

Podemos apreciar claramente que utilizando propano en equipos de aire acondicionado se obtiene un ahorro en consumo de energía, y esto a su vez se traduce en ahorro efectivo para el consumidor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En este trabajo especial de grado se logró realizar la reconversión de un equipo de aire acondicionado de refrigerante R-22 a propano, aplicando los conocimientos adquiridos en el área de termodinámica.

En general se puede especificar que:

De todos los refrigerantes HCFC que se producen o se importan a Venezuela, el R-22 es el que tiene mayor demanda y el que más se utiliza en equipos de aire acondicionado, dirigiéndose la actividad de reconversión hacia la sustitución de este refrigerante.

Se identificaron los distintos tipos de refrigerantes hidrocarburos que son factibles de sustituir al R-22, estos son: propano, propileno y CARE 50.

Se puede concluir que el propano representa la mejor opción para la reconversión y además es de fácil obtención, debido a ser nuestro país productor de petróleo y sus derivados.

Se especificaron cada una de las medidas de prevención para evitar accidentes en la realización de la reconversión utilizando propano o cualquier otro refrigerante hidrocarburo.

Se estudiaron las diferentes normas relacionadas con la realización de ensayos de equipos de aire acondicionado en cuartos calorimétricos, siendo las más adecuadas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

para esto la norma COVENIN 3537:1999. **Acondicionadores de aire tipo ventana. Métodos de ensayo** y la norma COVENIN 3538:1999. **Acondicionadores de aire. Métodos de ensayo de capacidad de enfriamiento, consumo de energía y eficiencia energética.**

Se utilizó un cuarto calorimétrico para realizar el ensayo de la capacidad de enfriamiento, consumo de energía y eficiencia energética.

Se investigó y determinó que el número de cuartos calorimétricos para la realización de ensayos de equipos de aire acondicionado es muy escaso en Venezuela.

Se comprobó que el mejor método para calcular cuanto refrigerante ha de cargarse a un equipo de aire acondicionado cuando se realiza sustitución directa es conociendo la masa del refrigerante inicial.

Se determinó que la cantidad de propano que se debe cargar a un equipo de aire acondicionado debe ser aproximadamente 40 % de la masa de R-22 dentro del mismo.

Se demostró en los ensayos que las temperaturas que se obtienen con el equipo de aire acondicionado funcionando tanto con R-22 como con propano no tienen mucha diferencia entre sí.

Se demostró que la capacidad total de enfriamiento del equipo de aire acondicionado funcionando con propano es aproximadamente 10 % menor que la capacidad total de enfriamiento del equipo funcionando con R-22.

Se demostró que la potencia eléctrica que utiliza el equipo es menor con propano que con R-22, siendo la diferencia entre uno y otro de 13,30 %.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvo que la corriente eléctrica utilizada por el equipo cargado con propano es 22,49 % menor que cargado con R-22.

Se determinó que la relación de eficiencia energética se incrementa con la utilización de propano como refrigerante, siendo la diferencia con la utilización de R-22 de 3,60 %. Con respecto al compresor la eficiencia también se incrementa utilizando propano, siendo la diferencia entre ambos refrigerantes de 6,39 %.

Se estableció cada uno de los pasos para la efectuar la reconversión de refrigerante en un equipo de aire acondicionado utilizando propano como refrigerante sustituto, y así lograr su correcta puesta en funcionamiento.

Se realizó el estudio de factibilidad económica del costo de la reconversión y la puesta en marcha del equipo utilizando propano.

RECOMENDACIONES

Seguir los pasos establecidos para lograr una correcta reconversión de refrigerante y el buen funcionamiento del equipo.

Hacer propagación de la manipulación adecuada de los refrigerantes hidrocarburos, ya que pueden ser tan seguros en su utilización en equipos de aire acondicionado como cualquier otro refrigerante.

Se recomienda diseñar e instalar un detector de fuga audiovisual en el equipo de aire acondicionado que pueda prevenir cualquier accidente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se recomienda instalar protectores internos y sistemas de arranque PTC o relés especiales, para asegurar que no se puedan producir chispas cerca del compresor.

Se recomienda realizar también pruebas de seguridad eléctrica siguiendo las normas IEC/EN 60335-2-24 y la norma IEC TS 95006.

Se recomienda realizar un pequeño ajuste en el tubo capilar para incrementar el rendimiento del sistema.

Se recomienda realizar el cambio de lubricante del compresor del equipo en caso que este sea del tipo mineral, por un lubricante de mayor viscosidad, para así compensar el exceso de solubilidad entre el lubricante mineral y el propano

Se recomienda la construcción de un cuarto calorimétrico en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV ya que este instrumento es de suma importancia dentro del área de la termodinámica y del acondicionamiento de aire para el ensayo de equipos de aire acondicionados.

Fomentar la fabricación y el uso de equipos de aire acondicionado cargados directamente con refrigerantes naturales.

Facilitar a las personas que trabajan en la fabricación y/o reparación de equipos de aire acondicionado la obtención de todas las herramientas para realizar el proceso de reconversión.

Realizar el proceso de reconversión de refrigerante de R-22 a propano, porque de esta manera estaríamos contribuyendo a aminorar la destrucción de la capa de ozono y el calentamiento global.

BIBLIOGRAFIA Y FUENTES ELECTRONICAS

BIBLIOGRAFÍA

- **ACRIB: Guidelines for the use of Hydrocarbon Refrigerants in Static Refrigeration and Air Conditioning Systems.** England. 2001.
- **AIRAH: Air Conditioning and Refrigeration Industry Refrigerant Selection Guide – 2003.** Australia. 2003.
- **ALARCÓN C., José: Tratado Práctico de Refrigeración Automática.** Editorial Marcombo, S.A. Barcelona, España. 1998.
- **ARI: R-22 Alternative Refrigerants Evaluation Program.** United States. 1994.
- **ASAMBLEA NACIONAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA: Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos.** Gaceta Oficial N° 5554. Caracas. 2001.
- **BALESTRINI, Mirian: Como se Elabora el Proyecto de Investigación.** 6ª Edición. Editorial BL Consultores Asociados. Caracas. 2002.
- **BAXTER, Van; Fischer, Steven; Sand, James: Energy and Global Warming Impacts of HFC Refrigerants and Emerging Technologies.** Oak Ridge National Laboratory. United States. 1997.
- **CALM, James; Hourahan, Glenn: Physical, Safety and Environmental Data for Refrigerants. HPAC Engineering.** United States. 1999.

- CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY: **Manual de Aire Acondicionado**. Editorial Marcombo, S.A. Barcelona, España. 1996.
- CENGEL, Yunus; BOLES, M.: **Termodinámica**. Editorial McGraw-Hill. 2ª Edición. Nueva York, Estados Unidos. 1998.
- COHEN, Miguel. **Apuntes de Aire Acondicionado**. 10ª Edición. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 1999.
- COMAKLI, O.; Karagoz, S.; Ozyrut, O.; Yilmaz, M.: **R134a and Various Mixtures of R22/R134a as an Alternative to R22 in Vapour Compression Heat Pumps**. Atatürk Üniversitesi. Turkey. 2003.
- DIDION, David; Morrison, G.; Mulray, W.; Soo Kim, M.: **A Study to Determine the Existence of an Azeotropic R-22 Drop-in Substitute**. Department of Commerce. United States of America. 1996.
- DIDION, David: **Recent Development in the Design of New Refrigerant Mixtures for Existing and Future Systems**. National Institute of Standards and Technology. 1994.
- DIDION, David: **The Application of HFCS as Refrigerants**. National Institute of Standards and Technology. 1999.
- DIDION, David: **The Impact of Ozono-Safe Refrigerants on Refrigeration Machinery Performance and Operation**. National Institute of Standards and Technology. 1994.

- DIDION, David: **The Influence of the Thermophysical Fluid Properties of the New Ozone-Safe Refrigerants on Performance.** National Institute of Standards and Technology. 1999.
- DIDION, David: **The Role of Refrigerant Mixtures.** National Institute of Standards and Technology. 1999.
- DOSSAT, Roy: **Principios de Refrigeración.** Compañía Editorial Continental, S.A. México, 1979.
- ELF ATOCHEM: **FORANE para la Refrigeración y el Aire Acondicionado.** Paris, Francia. 1994.
- ELF ATOCHEM NORTH AMERICA, INC.: **Retrofitting with FORANE. Training Guide.** United States. 2000.
- FAUSTINELLI O., María M.; HERNÁNDEZ N., Carlos A.: **Diseño y Construcción de un Laboratorio para el Análisis de la Capacidad de Equipos Acondicionadores de Aire de Expansión Directa.** Trabajo Especial de Grado presentado ante la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Metropolitana para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Metropolitana. Caracas. 1994.
- FONDOIN: **Survey of HCFCs in Venezuela. Final Draft Report.** Caracas. 2006.
- GONZÁLEZ, Alberto: **Impacto Ambiental y Protección del Medio Ambiente. La Gestión de los Residuos.** Gas Server S.A. España. 2004.

- JOHANSSON, Anders; Lundqvist, Per: **Replacement of R22 in Existing Installations: Experiences from the Swedish Phase Out**. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. 2003.
- JUNG, Dongsoo; Park, Ki-Jung: **Thermodynamic Performance of HCF22 Alternative Refrigerants for Residential Air-conditioning applications**. Inha University. Republic of Korea. 2006.
- MADÉ, José; Poyó, Miledys: **Manual de Instrucción. Reconversión de Refrigeradores Domésticos Basados en CFC-12 (R-12) a Hidrocarburos (HC)**. Asociación Dominicana de Técnicos en Refrigeración y Acondicionamiento de Aire, Inc. República Dominicana. 2002.
- MARKS, Lionel: **Manual del Ingeniero Mecánico**. 2ª Edición en español. Volúmenes I, II y III. Editorial McGraw-Hill de México, S.A. de C.V. México. 1984.
- NATIONAL REFRIGERANTS, INC: **Refrigerant Referente Guide**. 4th Edition. 2004.
- NORTHCUTT, INC: **Manual de Capacitación sobre Productos Refrigerantes de Hidrocarburo**. Estados unidos. 2005.
- ONU: **Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**. 1998.
- PILATOWSKY, Isaac: **Psicrometría, Métodos de Humidificación y Dehumidificación y sus Aplicaciones en el Diseño Arquitectónico**. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 2002.

- PNUMA: **Acción Ozono**. Número 18. Paris, Francia. Abril de 1996.

- PNUMA: **Demostración y Entrenamiento en el Uso de Hidrocarburos como Refrigerantes**. Uruguay. 2003.

- PROKLIMA: **Hydrocarbon Technology II. GTZ Yearbook 1996**. Germany. 1996.

- PUEBLA, Jorge A.: **Manual de Buenas Prácticas en Refrigeración**. Fondo de Reconversión Industrial FONDOIN. Caracas. 2006.

- RAISS, Wilhem: **Tratados de Calefacción, Ventilación y Acondicionamiento de Aire**. Editorial LABOR S.A. España.

- SABINO, Carlos: **Cómo Hacer una Tesis y Elaborar Todo Tipo de Escritos**. Editorial PANAPO. Caracas. 1994.

- U.S. Environmental Protection Agency: **Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values**. United States. 2002.

- VAN WYLEN, Gordon: **Fundamentos de Termodinámica**. 2ª Edición. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México. 2003.

- WARK, Keneth. **Termodinámica**. 5ª Edición. Editorial McGraw-Hill de México, S.A. de C.V. México. 1991.

FUENTES ELECTRONICAS

www.suva.com.mx (16/11/2006, 3 p.m.)
www.greenpeace.org (22/11/2006, 12 p.m.)
www.solvay-fluor.com (27/11/2006, 2 p.m.)
www.fire.nist.gov (27/11/2006, 4 p.m.)
www.ari.org (29/11/2006, 10 a.m.)
www.carrier.com (01/12/2006, 11 a.m.)
www.es.lge.com (04/12/2006, 4 p.m.)
www.ashrae.org (08/01/2007, 5 p.m.)
www.sciencedirect.com (12/01/2007, 7 p.m.)
www.honeywell.com (15/ 01/2007, 2 p.m.)
www.arkemagroup.com (24/01/2007, 3 p.m.)
www.cec.uchile.cl (08/02/2007, 6 p.m.)
www.grc.com.ve (21/02/2007, 2 p.m.)
www.fondoin.org (21/02/2007, 5 p.m.)
www.venezuelagas.net (09/03/2007, 2 p.m.)
www.energy.kth.se (18/04/2007, 10 a.m.)
www.fluorocarbons.org (23/04/2007, 6 p.m.)
www.ecoportat.net (27/04/2007, 1 p.m.)
www.achrnews.com (03/05/2007, 2 p.m.)
www.cordelim.net (10/05/2007, 2 p.m.)
www.aventurini.com.ar (25/05/2007, 4 p.m.)
www.climacluos.com (06/06/2007, 6 p.m.)
www.mundogar.com (15/06/2007, 11 a.m.)
www.articulo.mercadolibre.com.ve (10/07/2007, 10 a.m.)
www.audiotronics.es (25/07/2007, 1 p.m.)
www.infofred.com (02/08/2007, 4 p.m.)

ANEXOS

INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE RECONVERSION



Vacuómetro



Recuperadora de gas refrigerante



Alicate de presión con perforador de tubería de cobre



Balanza electrónica

EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO SIN CARCAZA



CUARTO CALORIMETRICO



Humidificador y calentador



Calentador

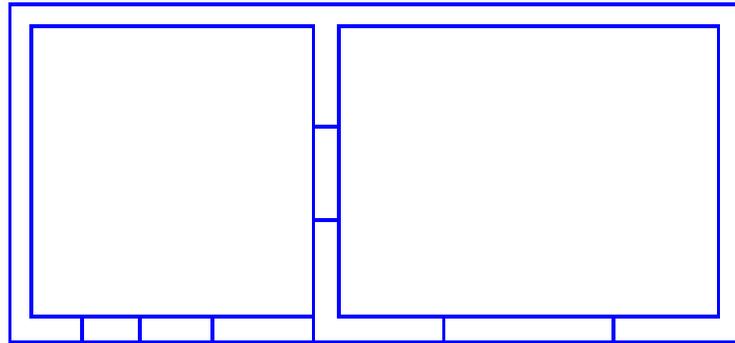


Instalación del equipo de aire acondicionado en el cuarto interno

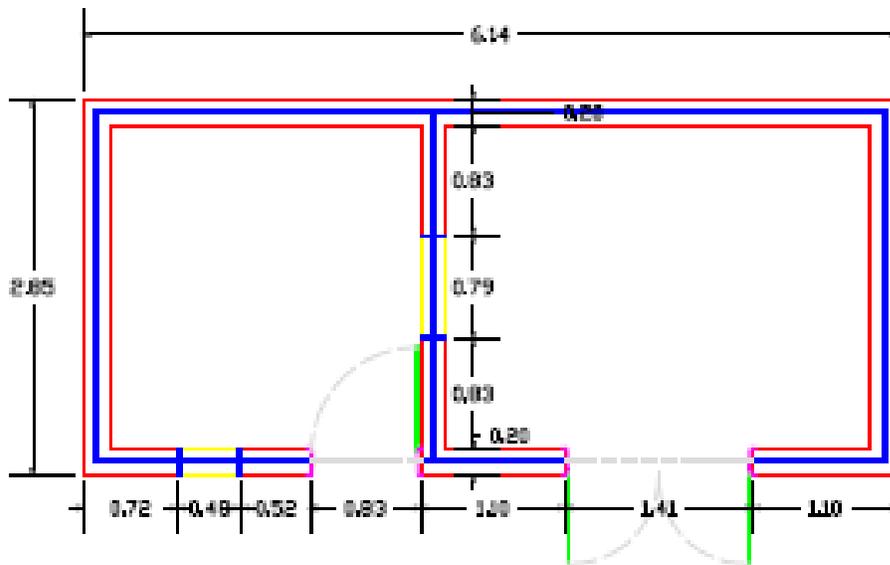


Instalación del equipo de aire acondicionado en el cuarto externo

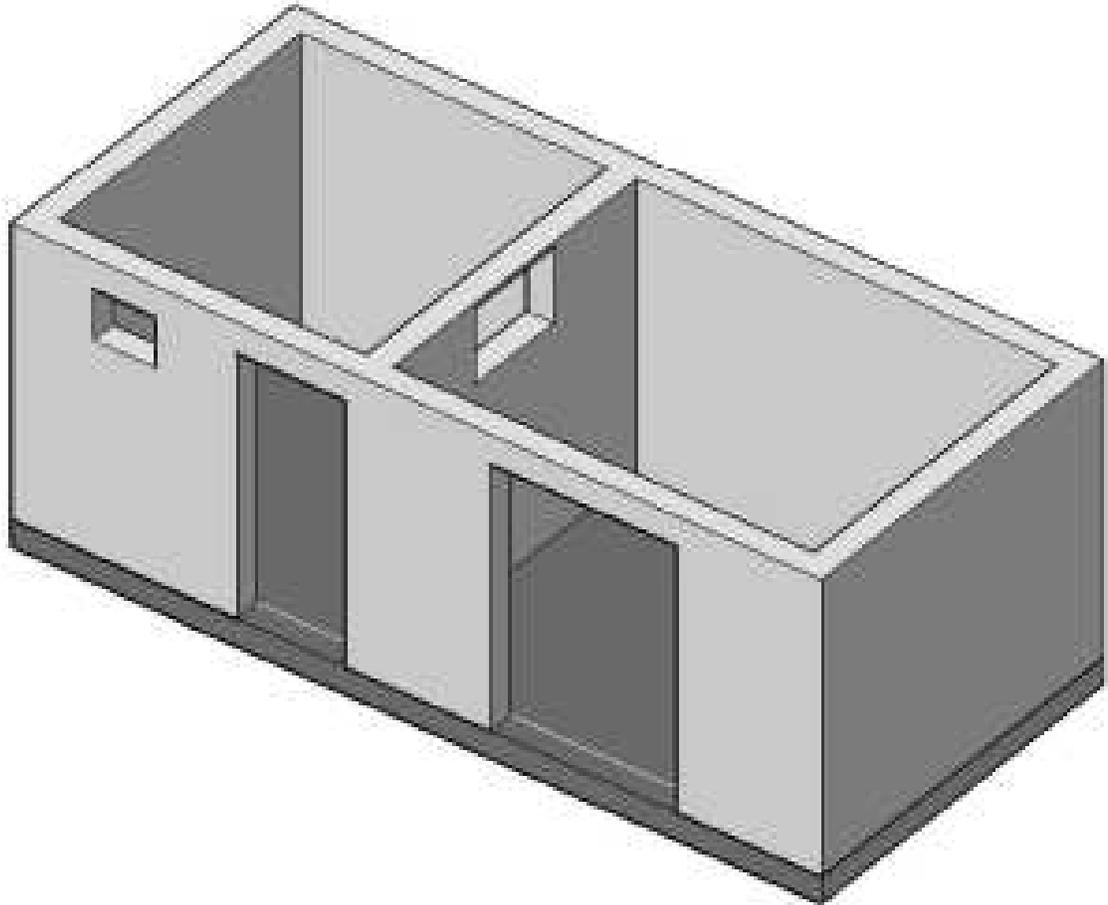
PLANOS DEL CUARTO CALORIMETRICO



Vista superior del cuarto calorimétrico



Dimensiones del cuarto calorimétrico



Cuarto calorimétrico en tres dimensiones

ELEMENTOS QUE COMPONEN EL PROPANO Y SUS PORCENTAJES



PDVSA
GAS

GERENCIA TECNICA
CONTROL DE CALIDAD ORIENTE
REPORTE DE CALIDAD DE PRODUCTO



FECHA: 11/07/2007

RCC-001
66

PRODUCTO: PROPANO

		METODOS DE PRUEBA
GRAVEDAD ESPECIFICA @ 60/60°F	0.5052	ASTM D-2598
PRESION DE VAPOR; psig @ 100 °F:	178	ASTM D-2598
COS ; ppm-p:	4.910	ASTM D-5504
H2S ; ppm-p:	0.000	ASTM D-5504
MERCAPTANOS ; ppm-p:	0.000	ASTM D-5504

ANALISIS CROMATOGRÁFICOS:

COMPONENTES	% MOL	% VOL
C ₁	0.007	0.004
CO ₂	0.000	0.000
C ₂	0.924	0.895
C ₃	98.206	98.078
IC ₄	0.848	1.005
NC ₄	0.016	0.018
IC ₅	0.000	0.000
NC ₅	0.000	0.000
C ₆₊	0.000	0.000

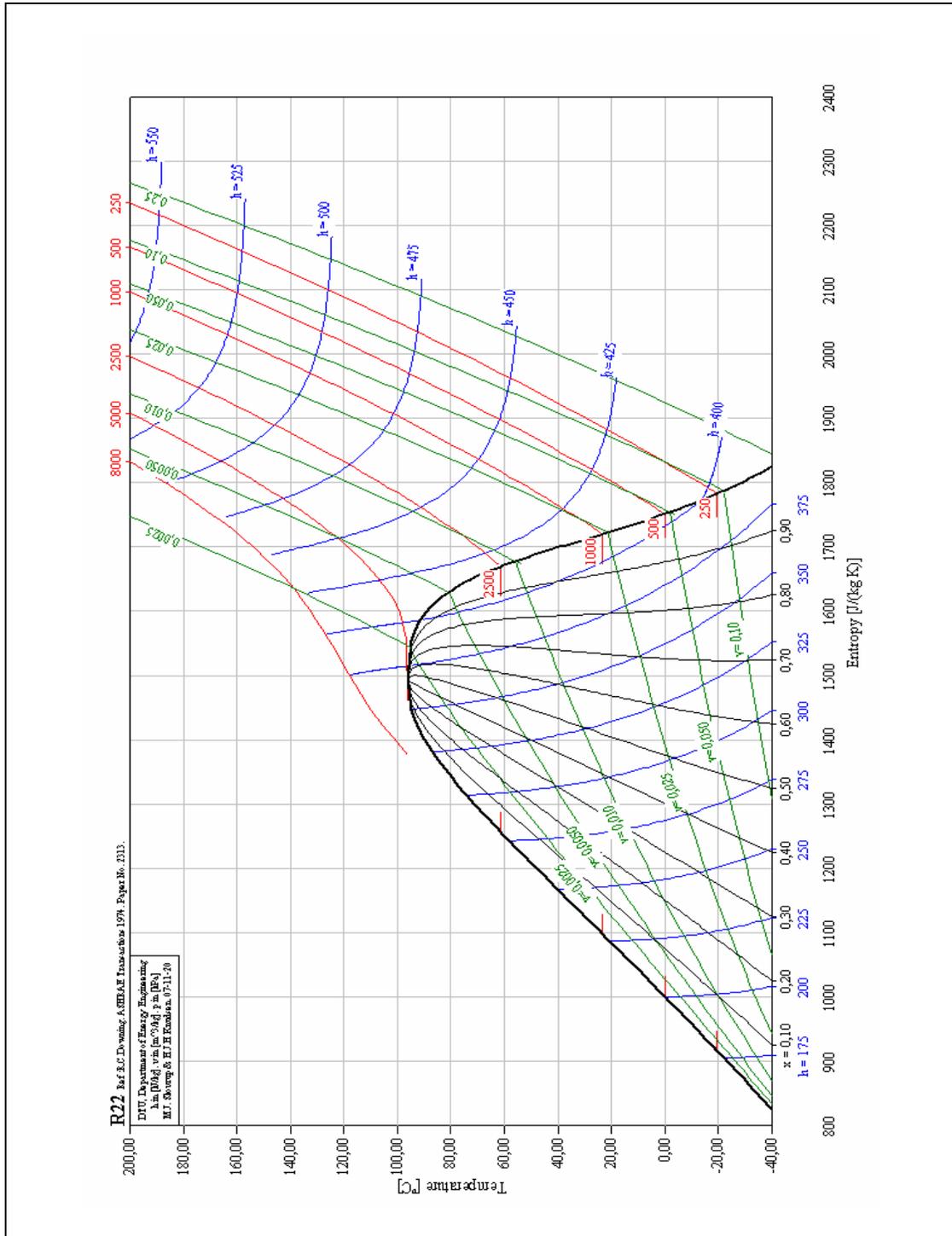
PRODUCTO DE : PLANTA
DESTINO : UNIGAS





ALEXANDER RAMOS

Diagrama T-S del refrigerante R-22



Propiedades del líquido y vapor saturados para el R-22

R-22, CHClF ₂ , Clorodifluorometano							
t (°C)	P (kPa)	v _l (dm ³ /kg)	v _g (m ³ /kg)	h _l (kJ/kg)	h _g (kJ/kg)	s _l (kJ/kg·K)	s _g (kJ/kg·K)
-50	64.39	0.6952	0.32461	144.94	383.93	0.7791	1.8501
-48	71.28	0.698	0.29526	147.01	384.88	0.7883	1.8448
-46	78.75	0.7008	0.26907	149.09	385.82	0.7975	1.8397
-44	86.82	0.7036	0.24564	151.19	386.76	0.8066	1.8347
-42	95.55	0.7064	0.22464	153.29	387.69	0.8157	1.8298
-40	104.95	0.7093	0.20578	155.4	388.62	0.8248	1.8251
-38	115.07	0.7123	0.18881	157.52	389.54	0.8339	1.8205
-36	125.94	0.7153	0.17351	159.66	390.45	0.8429	1.8161
-34	137.61	0.7183	0.15969	161.8	391.36	0.8518	1.8117
-32	150.11	0.7214	0.14719	163.96	392.26	0.8608	1.8075
-30	163.48	0.7245	0.13586	166.13	393.15	0.8697	1.8034
-28	177.76	0.7277	0.12558	168.31	394.03	0.8786	1.7993
-26	192.99	0.7309	0.11623	170.5	394.91	0.8874	1.7954
-24	209.22	0.7342	0.10772	172.7	395.77	0.8963	1.7916
-22	226.48	0.7375	0.09995	174.91	396.63	0.905	1.7879
-20	244.83	0.7409	0.09286	177.13	397.48	0.9138	1.7842
-18	264.29	0.7443	0.08637	179.37	398.31	0.9226	1.7807
-16	284.93	0.7478	0.08042	181.61	399.14	0.9313	1.7772
-14	306.78	0.7514	0.07497	183.87	399.96	0.9399	1.7738
-12	329.89	0.755	0.06996	186.14	400.77	0.9486	1.7705
-10	354.3	0.7587	0.06535	188.42	401.56	0.9572	1.7672
-8	380.06	0.7625	0.0611	190.71	402.35	0.9658	1.764
-6	407.23	0.7663	0.05719	193.02	403.12	0.9744	1.7609
-4	435.84	0.7703	0.05357	195.33	403.88	0.983	1.7578
-2	465.94	0.7742	0.05023	197.66	404.63	0.9915	1.7548
0	497.59	0.7783	0.04714	200	405.37	1	1.7519
2	530.83	0.7825	0.04427	202.35	406.09	1.0085	1.749
4	565.71	0.7867	0.04162	204.72	406.8	1.0169	1.7461
6	602.28	0.791	0.03915	207.09	407.5	1.0254	1.7433
8	640.59	0.7955	0.03685	209.48	408.18	1.0338	1.7405
10	680.7	0.8	0.03472	211.88	408.84	1.0422	1.7378
12	722.65	0.8046	0.03273	214.3	409.49	1.0506	1.7351
14	766.5	0.8094	0.03087	216.7	410.13	1.0589	1.7325
16	812.29	0.8142	0.02914	219.15	410.75	1.0672	1.7299
18	860.08	0.8192	0.02752	221.6	411.35	1.0756	1.7273
20	909.93	0.8243	0.02601	224.07	411.93	1.0839	1.7247
22	961.89	0.8295	0.02459	226.56	412.49	1.0922	1.7221
24	1016.01	0.8349	0.02326	229.05	413.03	1.1005	1.7196
26	1072.34	0.8404	0.02201	231.57	413.56	1.1087	1.7171
28	1130.95	0.8461	0.02084	234.1	414.06	1.117	1.7146
30	1191.88	0.8519	0.01974	236.65	414.54	1.1253	1.7121
32	1255.2	0.8579	0.01871	239.22	415	1.1335	1.7096
34	1320.97	0.8641	0.01774	241.8	415.43	1.1418	1.7071
36	1389.24	0.8705	0.01682	244.41	415.84	1.15	1.7046
38	1460.06	0.8771	0.01595	247.03	416.22	1.1583	1.7021
40	1533.52	0.8839	0.01514	249.67	416.57	1.1666	1.6995
42	1609.65	0.8909	0.01437	252.34	416.89	1.1748	1.697
44	1688.53	0.8983	0.01364	255.03	417.18	1.1831	1.6944
46	1770.23	0.9058	0.01295	257.74	417.44	1.1914	1.6918
48	1854.8	0.9137	0.01229	260.49	417.66	1.1998	1.6892
50	1942.31	0.9219	0.01167	263.25	417.85	1.2081	1.6865
52	2032.84	0.9304	0.01108	266.05	417.99	1.2165	1.6838
54	2126.46	0.9394	0.01052	268.88	418.09	1.2249	1.681
56	2223.23	0.9487	0.00999	271.74	418.15	1.2333	1.6781
58	2323.24	0.9585	0.00948	274.64	418.15	1.2418	1.6752
60	2426.57	0.9687	0.009	277.58	418.1	1.2504	1.6722
62	2533.29	0.9796	0.00854	280.57	417.99	1.259	1.669
64	2643.49	0.991	0.0081	283.6	417.81	1.2677	1.6658
66	2757.26	1.0031	0.00768	286.68	417.56	1.2765	1.6624
68	2874.7	1.0161	0.00728	289.82	417.24	1.2854	1.6588
70	2995.9	1.0298	0.00689	293.03	416.82	1.2944	1.6551

Fuente: R.C.Downing, ASHRAE Transactions 1974, Paper No. 2313.