



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica

*“EVALUACION TERMODINAMICA DEL HFC-134a Y
CFC-12 COMO FLUIDO DE TRABAJO EN UN
CICLO DE REFRIGERACION IDEAL SIMPLE”*

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

JOSE JAVIER OLEAS CHAVEZ

Guayaquil - Ecuador

1995

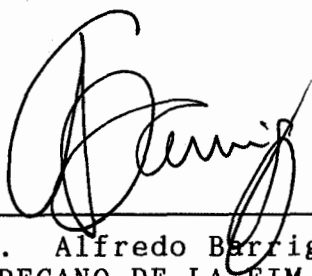


AGRADECIMIENTO

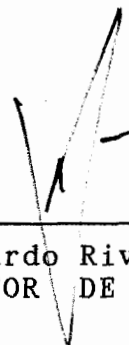
Al Sr. Ing. Eduardo Rivadeneira,
Director de Tesis, por su ayuda
y colaboración para la realización
de este trabajo.

Al Dr. Francisco Romay, y a cada
una de las personas que de
alguna manera contribuyeron a
desarrollar esta tesis.

A la ESPOL por la formación brindada.



Dr. Alfredo Barriga
DECANO DE LA FIM



Ing. Eduardo Rivadeneira
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Freddy Cevallos
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Ing. Francisco Andrade
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA



" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, me corresponden exclusiva - mente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECINA DEL LITORAL ".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)

JOSE JAVIER OLEAS CHAVEZ

DEDICATORIA

A DIOS, por haberme dado la oportuna de terminar mis estudios de Ingeniería Mecánica con esta tesis de grado;

A la Memoria de mi hermano Julio, quien me acompañó desde el principio de mi carrera, y ahora me acompaña desde la eternidad;

A mis Padres, que han sido para mi una motivación para seguir adelante, que han sido ejemplo de trabajo y responsabilidad;

RESUMEN



BIBLIOTECA

Durante muchos años, se han utilizado con éxito los clorofluorocarbonos (CFCs) efectivamente como refrigerantes.

Los CFCs aparentemente eran la opción ideal debido a su combinación de propiedades única, sin embargo, la excepcional estabilidad de estos compuestos, conjuntamente con su contenido de cloro, los ha relacionado con el agotamiento de la capa protectora de ozono de la Tierra. Como resultado, muchas compañías, incluyendo a Du Pont, están desarrollando refrigerantes alternativos para sustituir los CFCs. La serie de alternativas Du Pont en base a compuestos de hidroclorofluorocarbono (HCFC) e hidrofluorocarbono (HFC), se denominan refrigerantes SUVA.

En esta tesis demostraremos analíticamente que el HFC-134a en comparación con el CFC-12 exhibe propiedades y características de rendimientos similares pero con un impacto ambiental enormemente reducido (los cuales serán demostrados con la ayuda de un programa de computadora en lenguaje TURBO BASIC). Además esta tesis responde preguntas comunes relacionadas con seguridad, usos, manejo, almacenamiento, etc. de los refrigerantes SUVA.

En síntesis todos los resultados disponibles muestran que el HFC-134a será cuando menos tan seguro en uso como el CFC-12.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE TABLAS	XII
INDICE DE FIGURAS	XIV
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS	XV
INTRODUCCION	18

INDICE GENERAL

1. Propiedades, usos, almacenamiento y manejo de los refrigerantes HFC-134a y CFC-12.	
1.1. Usos	20
1.2. Propiedades térmicas esperadas de los refrigerantes	23
1.3. Propiedades físicas del HFC-134a y CFC-12 ...	24
1.4. Estabilidad química/térmica	
1.4.1. Descomposición térmica	26
1.4.2. Estabilidad del HFC-134a con metales lubricantes	26
1.4.3. Aspectos de compatibilidad si se mezcla HFC-134a y CFC-12	31
1.5. Compatibilidad de materiales con HFC-134a	
1.5.1. Elastómero/plástico	32

1.5.2. Desecantes	35
1.5.3. Lubricantes de refrigeración	38
1.6. Consideraciones de seguridad con HFC-134a	
1.6.1. Inhalación tóxica	39
1.6.2. Pérdidas o fugas	40
1.6.3. Contacto con piel y ojos	40
1.6.4. Combustibilidad del HFC-134a	41
1.7. Almacenamiento y manejo del HFC-134a	
1.7.1. Grandes sistemas de almacenamiento ...	42
1.7.2. Precauciones de manejo del HFC-134a en contenedores de embarque	44
2. CFCs y sus alternativas	
2.1. La familia CFC	45
2.2. Agotamiento de la capa de ozono en la estrato- tósfera	48
2.3. Contribuciones de los CFCs al efecto inver- nadero	53
2.4. El Protocolo de Montreal	55
2.5. Alternativas para los CFCs	
2.5.1. Requerimientos para sustituir el CFC	58
2.5.2. Aceptabilidad del Medio Ambiente	59
2.5.3. Alternativas para CFC-12	60
3. Termodinámica y ciclos de refrigeración	
3.1. Termodinámica	

3.1.1.	Primera Ley de la Termodinámica	62
3.1.2.	Segunda Ley de la Termodinámica	66
3.1.3.	Análisis de la Primera y Segunda ley en ciclos de refrigeración	68
3.1.4.	Ecuación de estado	70
3.1.5.	Cálculo de las tablas de propiedades termodinámicas	75
3.2.	Ciclos de refrigeración por compresión	
3.2.1.	Ciclo de refrigeración por compresión ideal de vapor	76
4.	Programa de computadora (TURBO BASIC) para la eva- luación termodinámica de un ciclo de refrigeración Ideal Simple con HFC-134a y CFC-12	
4.1.	Ecuaciones y métodos computacionales	
4.1.1.	Planteamiento general	84
4.1.2.	Arreglo de la información	88
4.1.3.	Datos de saturación	90
4.1.4.	Resumen: las cuatro ecuaciones básicas	91
4.1.5.	Programas computacionales básicos	93
4.1.6.	Tratamiento especial en la región líquida	96
4.1.7.	Estados de referencia	97
4.2.	Diagrama de flujo	104
4.3.	Algoritmo	138

5. Conclusiones	
5.1. Conclusiones y Recomendaciones	153
5.2. Tablas y Figuras	160

APENDICE Y ANEXOS

Apéndice I. Constantes en las ecuaciones	
computacionales	167
Anexo I. Factores de Conversión	169

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	178
---	------------

INDICE DE TABLAS

	Pág.
1.1. Comparación de un ciclo teórico entre CFC-12 y HFC-134a	22
1.2. Propiedades físicas del HFC-134a y CFC-12	25
1.3. Estabilidad del HFC-134a con metales y aceites lubricantes	30
1.4. Compatibilidad del desecante para HFC-134a/PAG	37
2.1. Principales usos de CFCs y Halogenados	47
2.2. Programa de suspensión de la producción de CFCs	57
4.1. Ecuación P-v-T	98
4.2. Ecuación para Presión de saturación (P_{sat})	99
4.3. Ecuación para dP_{sat}/dT_{sat}	100
4.4. Ecuación para densidad de líquido saturado (ρ_f)	101
4.5. Ecuación para Energía Interna (u)	102
4.6. Ecuación para Entropía (s)	103
5.1. Comparación de COP entre R-12 y R-134a en SI de unidades	160
5.2. Comparación de COP entre R-12 y R-134a en unidades Inglesas (E)	160
5.3. Evaluación de los refrigerantes, a varias temperaturas de evaporación y condensación	161

A.1. Propiedades termodinámicas de R-12 en (SI) de unidades 170

A.2. Propiedades termodinámicas de R-134a en (SI) de unidades 171

A.3. Propiedades termodinámicas de R-12 en sistema inglés (E) de unidades 172

A.4. Propiedades termodinámicas de R-134a en (E) de unidades 173



BIBLIOTECA

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
1.1. Típico sistema de gran almacenamiento de refrigerante	43
3.1. Flujo de energía general en un sistema termodinámico	63
3.2. Diagrama de un equipo por compresión simple de vapor	78
3.3. Diagrama P-h, de un sistema por compresión simple	79
3.4. Diagrama T-s, de un sistema por compresión simple	80
4.1. Recorrido de integración , T- ϕ	86
5.1. Viscosidad de líquido	162
5.2. Viscosidad del vapor a presión atmosférica	163
5.3. Conductividad térmica del líquido	164
5.4. Conductividad térmica del vapor a presión atmosférica	165
5.5. Capacidad calorífica de líquido saturado	166
A.1. Diagrama P-h para R-12 en (SI) de unidades	174
A.2. Diagrama P-h para R-12 en sistema inglés (E) de unidades	175
A.3. Diagrama P-h para R-134a en (SI) de unidades ...	176
A.4. Diagrama P-h para R-134a en (E) de unidades	177

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

Abreviaturas

- AEL** Límite de Exposición Aceptable
(Determinado por Du Pont, para sustancias que aún no tienen un TLV establecido).
- AFEAS** Estudio de Aceptabilidad del Fluorocarbono en el Medio Ambiente
- CFCs** Clorofluorocarbonos
- EPA** Agencia de Protección Ambiental
- GWP** Potencial de Calentamiento del Globo
- HCFC** Hidroclorofluorocarbono
- HFC** Hidrofluorocarbono
- ODP** Potencial de Agotamiento del Ozono
- OTP** Grupo de protectores de la capa de ozono
- ppb** Partes por billón
- ppm** Partes por millón
- TLV** Valor límite de Umbral
(Establecido por la Conferencia Americana Gubernamental de Higiene Industrial).
- UNEP** Programa Ambiental de las Naciones Unidas

Símbolos

- C_v** Calor específico a volumen constante ($J/Kg^{\circ}K$)

C_v	Calor específico a bajas densidades ($J/Kg \cdot ^\circ K$)
E	Energía (KJ)
\dot{E}	Flujo de Energía (KJ/s)
g	Función de Gibbs específica; gravedad local (m/s^2)
H	Entalpía (KJ)
h	Entalpía específica (KJ/Kg)
$h\nu$	Representa la radiación solar, ó flujo necesario de fotones para iniciar una reacción química. ($E=h \cdot \nu$)
k	Razón de calores específicos
M	Masa Molar ($Kg/Kmol$)
m	Masa (Kg)
\dot{m}	Flujo másico (Kg/s)
p	Presión (Pa)
Q	Calor (KJ)
\dot{Q}	Flujo de calor (KW)
R	Constante del Gas ($J/Kg \cdot ^\circ K$)
S	Entropía ($KJ/^\circ K$)
s	Entropía específica ($KJ/Kg \cdot ^\circ K$)
s_o	Valor de referencia para entropía ($J/Kg \cdot ^\circ K$)
T_o	Temperatura de referencia ($^\circ K$)
T_o	Temperatura de los alrededores ($^\circ C, ^\circ F$)
T_{tp}	Temperatura del punto Triple ($^\circ R$)
t	Temperatura ($^\circ K, ^\circ F$) ; tiempo (s)
u	Energía interna específica (KJ/Kg)
u_o	Valor de referencia para energía interna (J/Kg)
V	Velocidad (m/s)
v	Volumen específico (m^3/Kg)

W	Trabajo (KJ)
\dot{W}	Potencia (KW)
x	Calidad (masa de vapor/masa de mezcla)
Z	Factor de Compresibilidad
z	Elevación (m)
ρ	Densidad específica (Kg/m ³)

Subíndices

av	valor disponible
c	estado crítico
e	punto final
f	estado final; líquido saturado
fg	diferencia entre propiedades de líquido saturado y vapor saturado a la misma presión y temperatura
g	vapor saturado
i	punto de entrada
ini	estado inicial
irr	proceso irreversible
o	punto de salida
rev	proceso reversible
sat	estado de saturación
Sist	sistema
unav	valor no disponible



BIBLIOTECA

INTRODUCCION

La ciencia ha encontrado evidencias de que los productos CFC's (incluyendo el CFC-12) son la principal causa de agotamiento de la capa protectora de ozono de la Tierra.

El HFC-134a es el refrigerante a elegir para sustituir al CFC-12 en algunos sistemas de refrigeración. Y aunque no son sustitutos directos, los equipos a base de CFC requieren cambios mínimos para operar con HFC-134a, permitiendo que los equipos existentes continúen operando con seguridad y eficiencia aún después de que el CFC-12 no se encuentre disponible.

Con la perfomancia del HFC-134a, comparable al del CFC-12 se espera que opere en sistemas donde la temperatura del refrigerante en el evaporador sea de -7°C (20°F) y por encima de éste, haciéndolo útil en aplicaciones tales como:

- Refrigeración comercial
- Equipos de refrigeracion para granjas
- Aire acondicionado
- Aplicaciones en sistemas de media temperatura
- Chillers



LIBRARY

Esta información intenta además proveer al estudiante de ingeniería, ecuaciones ó programas de computadora útiles para desarrollar tablas de propiedades termodinámicas de estos dos fluidos de trabajo y que además ayuden de alguna manera a investigar y desarrollar nuevas tecnologías en los equipos de refrigeración, necesarias para lograr que tales equipos funcionen eficientemente utilizando al HFC-134a como fluido de trabajo.

CAPITULO I



1. PROPIEDADES, USOS, ALMACENAMIENTO Y MANEJO DE LOS REFRIGERANTES HFC-134a Y CFC-12.

1.1. USOS

El HFC-134a puede ser usado en muchas aplicaciones que actualmente usan diclorodifluorometano (CFC-12). Estos incluyen productos de refrigeración, aerosoles y agentes espumantes para polímeros. Sin embargo, se tienen que efectuar ciertas modificaciones de diseño a los equipos para optimizar el rendimiento y durabilidad cuando se utiliza HFC-134a.

Las propiedades termodinámicas y físicas del HFC-134a, junto con su baja toxicidad, hacen de éste un refrigerante muy eficiente y seguro para reemplazar al CFC-12 en muchas partes de la industria de refrigeración, más notablemente en aire acondicionado de automotores, en equipos estacionarios pequeños, en compartimentos de supermercados de media-temperatura, y en chillers comercia-

les e industriales. La Tabla 1.1 provee una comparación del desempeño teórico entre CFC-12 y HFC-134a en condiciones de media-temperatura.

El HFC-134a demuestra propiedades que son ventajosas para productos de uso frecuente y además cumple con las necesidades de seguridad y cuidado del medio ambiente. El HFC-134a no es inflamable, tiene reactividad fotoquímica despreciable y baja conductividad térmica de vapor.

Además el HFC-134a está siendo desarrollado para el uso en inhaladores farmacéuticos debido a su baja toxicidad e inflamabilidad.

**Tabla 1.1 : Comparación de un ciclo teórico entre
CFC-12 y HFC-134a***

	CFC-12	HFC-134a
Capacidad(en % CFC-12)	100	99.7
COP	3.55	3.43
<i>Compresor</i>		
Temperatura de salida, °C	86.8	83.1
Presión de salida, KPa	1349	1473
Razón de compresión	4.1	4.7

* Temperaturas de operación: Condensador, 54.4°C (130.0°F); Evaporador, 1.7°C (35.0°F); Succión del compresor, 26.7°C (80.0°F); Dispositivo de expansión, 51.7°C (125°F).

1.2. PROPIEDADES TERMICAS ESPERADAS DE LOS REFRIGERANTES.

Las propiedades térmicas esperadas de los refrigerantes son las siguientes:

- 1) Presiones convenientes de vaporización y condensación.
- 2) Alta temperatura crítica y baja temperatura de congelamiento.
- 3) Alto calor latente de vaporización y alto calor específico del vapor.
- 4) Baja viscosidad y alta conductividad térmica de la película.

Las propiedades prácticas deseables incluyen:

- 1) Bajo costo
- 2) Inactividad física y química en las condiciones de operación.
- 3) No corrosivo con los materiales comunes de construcción.
- 4) Poco riesgo de explosión, tanto solo como mezclado con aire. El refrigerante no debe ser tóxico ni irritante, tampoco debe causar deterioro del lubricante empleado, las fugas deben ser detectadas por pruebas sencillas, fáciles

de realizar.

1.3. PROPIEDADES FISICAS DEL HFC-134a Y CFC-12

La Tabla 1.2 compara algunas de las propiedades del HFC-134a y del CFC-12, ya que el diseño del equipo de refrigeración depende fuertemente de las propiedades del refrigerante seleccionado.



BIBLIOTECA

Tabla 1.2: Propiedades Físicas del HFC-134a y CFC-12

Propiedades físicas	HFC-134a	CFC-12
Nombre químico	Tetrafluoroetano	Diclorodifluorometano
Fórmula química	CH_2FCF_2	CCl_2F_2
Peso Molecular	102.03	120.93
Temperatura de Ebullición a 1 atm ($^{\circ}F$)	-14.9	-21.6
Punto de congelamiento ($^{\circ}F$)	-153.9	-252
Temperatura crítica ($^{\circ}F$)	213.9	233.6
Presión crítica (psia)	588.9	597.0
Densidad crítica (lb/ft ³)	32.17	34.84
Densidad (líquido) a 77 $^{\circ}F$ (lb/ft ³)	75.28	81.83
Densidad (vapor saturado) en el punto de ebullición (lb/ft ³)	0.328	0.395
Capacidad calorífica (líquido) a 80 $^{\circ}F$ (BTU/lb $^{\circ}F$)	0.345	0.235
Calor de vaporización en el punto de ebullición (BTU/lb)	93.4	71.04
Conductividad térmica del líquido a 80 $^{\circ}F$ (BTU/hrft $^{\circ}F$)	0.046	0.039
vapor a 1 atm y 80 $^{\circ}F$ (BTU/hrft $^{\circ}F$)	0.0085	0.0057
Viscosidad del líquido a 80 $^{\circ}F$ (cP)	0.195	0.210
vapor a 1 atm y 80 $^{\circ}F$ (cP)	0.0122	0.0126
Potencial de agotamiento del ozono (ODP) (para CFC-11 = 1)	0	1
Potencial de calentamiento del Globo con Halocarburos (HGWP). (para CFC-11 = 1)	0.26	3.0
Inflamabilidad	No inflamable	No inflamable
Toxicidad (ppm)	1000 (ABL)	1000 (TLV)
Solubilidad en agua a 77 $^{\circ}F$ y 1 atm (% en peso)	0.15	0.028

1.4. ESTABILIDAD QUIMICA/TERMICA

1.4.1. DESCOMPOSICION TERMICA

Los vapores de los refrigerantes SUVA (HFC-134a, CFC-12, etc) se descompondran al exponerse a altas temperaturas provenientes de flamas o calentadores de resistencia eléctrica. La descomposición puede producir compuestos tóxicos e irritantes, tales como ácido fluorhídrico y clorhídrico. Los fuertes olores liberados provocará irritación de nariz y garganta obligando a las personas a evacuar el área afectada.

1.4.2. ESTABILIDAD DEL HFC-134a CON METALES/LUBRICANTES.

El CFC-12 y los aceites minerales existentes han demostrado una estabilidad aceptable cuando están en contacto con metales típicos encontrados en los sistemas de refrigeración tales como cobre, acero y aluminio. Ciertos tipos de Polialquilenglicol (PAG) y Polioli ester (POE) han sido seleccionados como lubricantes para ser usados

con HFC-134a. Se han realizado pruebas de estabilidad en tubos sellados para determinar la estabilidad relativa a largo plazo de la solución refrigerante/lubricante en presencia de metales.

El método seguido generalmente es el mismo que en ASHRAE 97, con diversas modificaciones menores. Un volumen de 3 ml. de solución refrigerante/lubricante se calentó en presencia de tiras de cobre, acero y aluminio en un horno durante 14 días a 175°C. Se llevaron a cabo pruebas tanto en el lubricante solo como en una mezcla de lubricante y refrigerante (proporción 50/50). Se obtuvieron las evaluaciones visuales tanto en soluciones líquidas como en residuos de metal después del tiempo de exposición designado. Las evaluaciones visuales variaron dentro de un rango de 0 a 5, siendo 0 equivalente a lo mejor y 5 equivalente a lo peor.

Después de que se obtuvieron las evaluaciones visuales, los tubos de prueba se abren y se analiza el lubricante y refrigerante (en caso de estar presentes). El lu-



bricante típicamente es analizado para determinar el contenido de haluro y la viscosidad, mientras que el refrigerante se examina para determinar la presencia de productos de descomposición. La Tabla 1.3 resume los datos para ambos, HFC-134a y CFC-12.

Las evaluaciones visuales se listan para: el lubricante solo, la solución lubricante/refrigerante y los tres metales, que estaban presentes en la solución lubricante/refrigerante. La viscosidad se determina en tres lubricantes diferentes: el lubricante sin utilizar, el lubricante probado solo y el lubricante probado en presencia del refrigerante. Se calcula un porcentaje de cambio para los dos lubricantes probados; los valores típicos obtenidos a la fecha son aproximadamente más 2% a -4% de cambio para el lubricante solo y aproximadamente -5% a -20% de cambio para el lubricante probado con el refrigerante. Los productos de descomposición listados son HFC-143a (el producto predominante de la descomposición del HFC-134a) y el ión flúor. Ambas especies se miden típicamente

en un rango bajo de partes por millón (ppm).

Ya que las combinaciones CFC-12/aceite mineral han sido probadas en el servicio actual, esto indica que las soluciones HFC-134a/PAG y HFC-134a/POE tienen una estabilidad química aceptable. En algunas otras pruebas, los resultados han confirmado que la molécula HFC-134a cuando menos es tan estable químicamente como el CFC-12.

Tabla 1.3: Estabilidad del HFC-134a con Metales y aceites lubricantes

Aceite	Aceite Mineral	UCON RO-W-6602 ^(a)	Castrol Icematic SW 100 ^(b)
Viscosidad del aceite, cSt a 40°C	125	134	108.8
Refrigerante	R-12	HFC-134a	HFC-134a
Prueba de Estabilidad			
Evaluaciones			
Lubricante solo	-	0	0
Lubricante/Refrigerante	4	0	0
Cobre (Cu)	2	0	0
Hierro (Fe)	3	0	0
Aluminio (Al)	2	0	0
Cambio en la Viscosidad			
% de cambio solo	ND	<1	4.3
% de cambio con Refrigerante	ND	-12.7	-27.1
Análisis de descomposición			
HFC-143a, ppm	ND	<7	<0.3
Flúor, ppm	420	<0.7	<7

^(a)Lubricante Polialcaline glicol

Valores de Estabilidad: 0 a 5

0 = lo mejor

^(b)Lubricante Poliol ester

5 = lo peor

ND = No se determinó

1.4.3. ASPECTOS DE COMPATIBILIDAD SI SE MEZCLA HFC-134a Y CFC-12.

Cuando los dos materiales se mezclan, forman lo que se conoce como un "azeótropo". Un azeótropo es una mezcla de dos componentes que actúan igual que un solo compuesto, pero tiene propiedades físicas y químicas diferentes a cualquiera de los dos componentes. Un ejemplo de esto es el FREON 502, que es un azeótropo del HCFC-22 y CFC-115. Tiene distinta presión de vapor, eficiencia de energía, etc., que cualquiera de los dos. Cuando CFC-12 y HFC-134a se mezclan en ciertas concentraciones, forman un "azeótropo de alta presión". Esto significa que la presión de vapor del azeótropo es mayor que la de cualquiera de los dos componentes.

Otra característica de un azeótropo es que es muy difícil separar los componentes una vez que se han mezclado. Una máquina de reciclado o recuperación de refrigerante no será capaz de separar mezclas de HFC-134a y CFC-12.

1.5. COMPATIBILIDAD DE MATERIALES CON HFC-134a

1.5.1. ELASTOMERO/PLASTICO

Los elastómeros y plásticos se utilizan en todos los sistemas de aire acondicionado móviles, como en sellos, empaques, O-rings y para la construcción de mangueras. Se han realizado pruebas de diversos elastómeros y plásticos usados comúnmente con CFC-12/aceite mineral y HFC-134a/PAG para determinar la compatibilidad relativa. Se probaron los siguientes materiales

Elastómeros:

VITON A

Epiclorohidrina

HIPALON 48

NEOPRENE W

Plásticos:

Nylon

Relleno de Grafito

TEFLON (15%)

Lubricantes:

Aceite mineral

*Parafínico**PAG*

Refrigerantes:

CFC-12 y HFC-134a

Cada material se expuso a CFC-12/aceite mineral y HFC-134a/PAG a dos temperaturas, 80°C y 131°C (176°F y 268°F) durante un período de 14 días en tubos de compatibilidad Pyrex sellado. Al final de los 14 días, las muestras fueron removidas del tubo y verificadas inmediatamente para determinar cambios en la longitud y peso (cambios temporales). Posteriormente los materiales fueron almacenados a temperatura ambiente durante 14 días adicionales para eliminar todo el refrigerante de la muestra. Entonces, se determinaron los cambios finales de longitud y peso. Aunque se deben efectuar pruebas adicionales para requerimientos en aplicaciones específicas, estas pruebas proporcionan un entendimiento general de la compatibilidad relativa con HFC-134a/PAG comparada con CFC-12/aceite mineral. Se pueden hacer algunas conclusiones básicas

de éste trabajo:

- * *VITON A* presenta un cambio temporal excesivo en el peso y longitud tanto para CFC-12 como HFC-134a, y es probablemente inaceptable en ésta aplicación con CFC-12 ó HFC-134a.

- * Los cambios de longitud temporales y finales para los otros 3 materiales se encuentran dentro de más o menos 5% del original y con similares para CFC-12 y el HFC-134a.

- * Los cambios de pesos temporales y finales para el *nylon* y el *TEFLON*, rellenos de *grafito* son muy similares para CFC-12 y HFC-134a. Estos materiales deben ser apropiados para utilizarse con cualquiera de las mezclas refrigerante/lubricante.

- * Los cambios de peso temporales y finales para *HYPALON 48* y *NEOPRENE W* se encuentran dentro de más o menos 10% del original. Actualmente el *NEOPRENE W* está siendo utilizado en muchos sistemas de prueba HFC-134a y es aceptable para

utilizarse con HFC-134a/PAG. El *HYPALON 48* también debe ser considerado para utilizarse.

- * El cambio temporal de peso para la *epiclorohidrina* y el HFC-134a fue mayor que para los otros materiales (excepto *VITON A*), especialmente a 131°C. Se requieren pruebas adicionales para aplicaciones específicas para determinar si esto es válido.

1.5.2. DESECANTES

UOP (anteriormente Tamiz Molecular de Unión Carbide) es uno de los principales proveedores de desecantes de tamiz molecular a nivel mundial. UOP llevó a cabo pruebas de HFC-134a/PAG con dos desecantes comercialmente disponibles en la actualidad, 4A-XH-5 y 4A-XH-6, y dos nuevos tamices moleculares (XH-7 y XH-9). También se proporciona la compatibilidad de CFC-12/Suniso 3GS con 4A-XH-5 para una comparación. Se midió la cantidad de flúor generado, así como la capacidad de retención de agua, la

resistencia al aplastamiento y la proporción de fricción. La Tabla 1.4 resume los resultados de las pruebas.

El tipo 4A-XH-5 no es compatible con HFC-134a y no debe ser utilizado con este refrigerante, el 4A-XH-6, XH-7 y XH-9 son apropiados para evaluaciones en sistemas de refrigeración con HFC-134a; el XH-7 y XH-9 también son compatibles con el CFC-12.

**TABLA 1.4 : Compatibilidad del Desecante para
HFC-134a/PAG**

Propiedad	4A-XH-5	4A-XH-6	XH-7	XH-9	4A-XH-5** (CPG-12/3GS)
Flúor (% en peso)					
fresco	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
después de la exposición	5.3*	0.02	0.04	0.05	N/A
Capacidad de Retención de Agua (% en peso)					
fresco	19.5	18.0	17.7	17.5	19.5
después de la exposición	10.5*	17.1	17.4	17.1	19.5
Fricción de Secado (% en peso)					
fresco	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2
después de la exposición	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2
Compresión (lbs)					
fresco	19.0	13.0	18.0	17.0	19.0
después de la exposición	15.0	11.0	16.0	17.0	14.0

Nota: Las pruebas de compatibilidad fueron realizadas con lubricantes PAG, a 82°C durante 14 días.

* Exposición de 90 días a 82°C.

** Pruebas corridas a 93°C.



BIBLIOTECA



1.5.3. LUBRICANTES DE REFRIGERACION

Muchos compresores necesitan de un lubricante para proteger sus partes móviles internas. Los fabricantes de compresores normalmente recomiendan el tipo y la viscosidad del lubricante para asegurar una operación apropiada del equipo. Estas recomendaciones se basan en algunos criterios tales como, compatibilidad con los materiales de construcción, estabilidad térmica y la miscibilidad refrigerante/aceite.

Aunque el HFC-134a y CFC-12 son químicamente compatibles entre sí, no es el caso con el CFC-12 (y otros compuestos clorados) y el lubricante PAG. Específicamente, el cloro contenido en el CFC-12, puede reaccionar con el PAG y ocasionar degradación del lubricante. A niveles de contaminantes de 1% de CFC-11 ó 2% a 10% de aceite mineral residual, la estabilidad del sistema ha sido afectada lo suficiente para ocasionar preocupación sobre la operabilidad a largo plazo del sistema. A un nivel de contaminación del 5% de CFC-11, es evidente una corrosión severa, aunada a un 80% de

reducción en el peso molecular promedio de PAG, lo que indica una fuerte degradación del lubricante. El grado de degradación del PAG depende de una serie de factores, principalmente: el tipo de contaminante clorado, la concentración del contaminante, la temperatura y el tiempo de exposición. Se puede presentar degradación de lubricante en una lubricación deficiente del compresor y una posible falla prematura.

1.6. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD CON HFC-134a

1.6.1. INHALACION TOXICA

La inhalación de altas concentraciones de vapores refrigerantes SUVA (HFC-134a, CFC-12, etc) primero afectan el sistema nervioso central, crean efectos narcóticos o anestésicos. Los síntomas pueden incluir mareos, una sensación de intoxicación y una pérdida de la coordinación. La inhalación continua de grandes concentraciones de vapores SUVA puede producir irregularidades cardíacas, pérdida de la conciencia y finalmente la muerte.

Los refrigerantes SUVA no poseen peligro relativo de toxicidad general al nivel AEL (Límite de exposición aceptable) y TLV (Valor límite de Umbral) o menor.

1.6.2. PERDIDAS O FUGAS

Si se presenta una liberación grande de vapores, como durante una fuga o derrame grande, los vapores se pueden concentrar y desplazar el oxígeno disponible; esto se debe a que los vapores de refrigerantes SUVA son de 3 a 5 veces más pesados que el aire; por consiguiente, los vapores que se escapan (como se mencionó anteriormente) tienden a juntarse y concentrarse cerca del piso o en las partes bajas, desplazando el aire y por ende existe el problema potencial de sofocación.

1.6.3. CONTACTO CON PIEL Y OJOS

A temperatura ambiente, los vapores de los refrigerantes SUVA tienen muy poco efecto o ninguno con la piel u ojos. Sin

embargo, los refrigerantes SUVA que son líquidos a temperatura ambiente tienden a disolver la grasa protectora de la piel, ocasionando resequedad e irritación, particularmente después de contacto prolongado o repetido. Se aconseja siempre utilizar ropa protectora cuando exista riesgo de exposición con refrigerantes SUVA líquidos.

1.6.4. COMBUSTIBILIDAD DEL HFC-134a

Los refrigerantes SUVA no son inflamables y no son explosivos; sin embargo, las mezclas con gases inflamables o líquidos pueden ser inflamables y deberán manejarse con precaución. El HFC-134a no es inflamable a temperatura ambiente y presión atmosférica. Sin embargo, el HFC-134a ha mostrado en pruebas que es combustible a presiones tan bajas como 5.5 psig (a 177°C) cuando se mezclan con aire a concentraciones generalmente mayores a 60% en volumen de aire. A bajas temperaturas se requieren, mayores presiones para la combustibilidad.

Los refrigerantes SUVA no deben ser mezclados con el aire para pruebas de fugas.

En general, no se deben o no se debe permitir que estén presentes con altas concentraciones de aire arriba de la presión atmosférica.

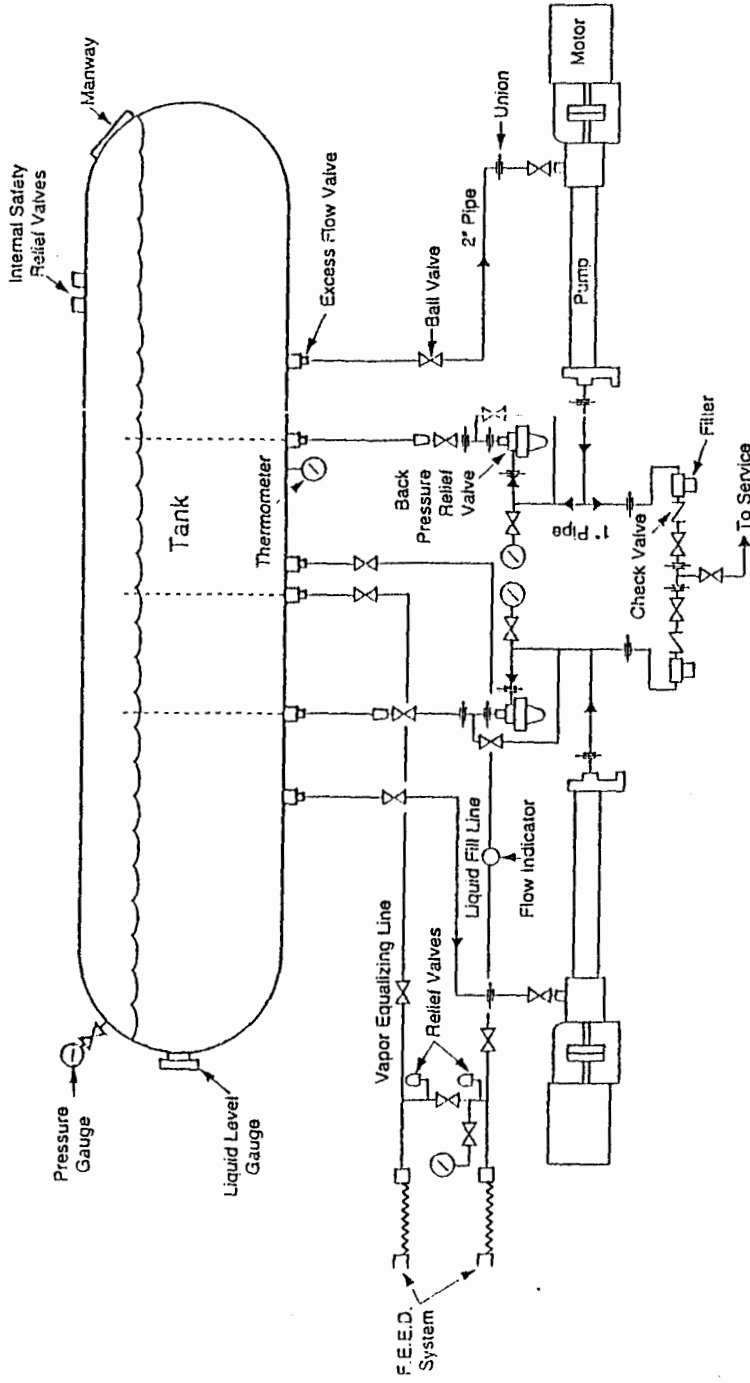
1.7. ALMACENAMIENTO Y MANEJO DEL HFC-134a

1.7.1. GRANDES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

La Du Pont provee a sus clientes sistemas de almacenamiento de HFC-134a al costo. Los sistemas son prefabricados, probados y listos para instalarlos en su sitio. Las unidades están diseñadas para optimizar: economía, eficiencia y seguridad en el almacenamiento y distribución del HFC-134a. Los sistemas de reparto (como unidad integrada) incluyen todos los componentes, tales como: tanques de almacenamiento, bombas, válvulas, motores y manómetros. Todos los sistemas están equipados con el sistema DuPont F.E.E.D. (Eliminación de Emisiones Fluoroquímicas en el Despacho) para prevenir emisiones durante el reparto y con una bomba adicional que funcionaría en caso de emergencia.

Figura 1.1 : Típico sistema de gran almacenamiento de refrigerante.

(Fuente: Boletín Du Pont, P134a)



1.7.2. PRECAUCIONES DE MANEJO DEL HFC-134a EN CONTENEDORES DE EMBARQUE.

Las siguientes reglas son recomendadas para el manejo de HFC-134a en contenedores:

- Cuando maneje contenedores de HFC-134a use equipo para protección personal, tales como gafas, guantes y zapatos de seguridad.
- Evite el contacto del HFC-134a líquido con la piel, ya que este puede causar una quemadura por frío.
- Nunca caliente un contenedor a temperaturas superiores a 52°C (125°F).
- Nunca use los contenedores como rodillos, soportes o para cualquier otra cosa que no sea llevar HFC-134a.
- Nunca rellenar cilindros desechables con producto alguno. Los cilindros desechables no deben utilizarse como tanques de aire comprimido, ya que existe la posibilidad de corrosión y subsecuente debilitamiento de las paredes del recipiente.
- No manipular indebidamente los dispositivos de alivio de presión.

CAPITULO II

2. CFCs Y SUS ALTERNATIVAS



BIBLIOTECA

2.1. LA FAMILIA CFC

En 1940 Du Pont desarrolló una serie de compuestos de fluorocarbono para satisfacer las nuevas demandas de la industria y la sociedad. Estos CFCs, así conocidos, eran baratos, eficientes y fáciles de usar. Estos incrementaron el mercado de la refrigeración y el aire acondicionado.

En la siguiente década, Los CFCs comenzaron a ser usados por ejemplo como agentes espumantes para plásticos, en aerosoles, y como solventes, especialmente por la industria productora de agentes limpiadores.

Otra gran variedad de aplicaciones se encontraron para los CFCs, por ejemplo en el esterilización de instrumentos quirúrgicos, en productos médicos de inhalación oral, en desengrasantes y limpiadores de componentes electrónicos.

En 1970 cerca de un millón de toneladas de CFCs

comenzaron a producirse cada año, de los cuales 600.000 Toneladas por año correspondían a la producción de CFC-11 y CFC-12. Para 1988 la producción mundial fue superior al 1,1 millones de toneladas por año.

El uso de los CFCs varía alrededor del mundo. Por ejemplo en el Reino Unido el principal mercado de CFCs lo comprenden los aerosoles (62% del mercado). las dos terceras partes de 600 millones de envases de spray usados cada año contenían CFCs. Los agentes espumantes (Foam blowing) cuentan con el 18% del mercado, los solventes 12% y los refrigerantes 8%. En los EE.UU, el aire acondicionado y refrigeración ocupa el 35% del mercado, los agentes espumantes también ocupan el 35%, seguido por solventes (18%) y esterilizantes (6-5%).

La Tabla 2.1, muestra los cinco mayores CFCs comercializados y sus principales usos. El factor más importante en la selección de un CFC para una aplicación particular es el punto de ebullición.

Los CFCs-11 y 12 son compuestos basados en metano mientras que otros están basados en etano. La tabla además incluye tres compuestos conocidos

como halogenados. Estos compuestos metano y etano halogenados contienen bromo, y son principalmente usados en extinguidores de incendio.

Tabla 2.1: Principales usos de CFCs, y Halogenados

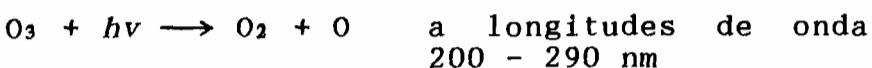
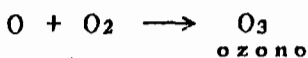
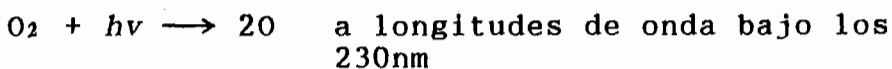
Compuesto	Fórmula	Usos
<i>CFCs basados en Metano:</i>		
CFC-11	CCl_3F	Aerosoles, refrigeración, aire acondicionado, limpiadores, espumas
CFC-12	CCl_2F_2	Aerosoles, espumas, refrigeración, aire acondicionado, esterilización.
<i>CFCs basados en Etano:</i>		
CFC-113	CCl_2FCClF_2	Refrigeración, limpiadores, espumas
CFC-114	$CClF_2CClF_2$	Aerosoles, refrigeración espumas
CFC-115	$CClF_2CF_3$	Refrigeración, aire acondicionado, espumas
<i>Halogenados:</i>		
Halon-1211	CF_2BrCl	Extinguidores portátiles
Halon-1301	CF_3Br	Sistemas de extinción grandes.
Halon-2402	$C_2F_4Br_2$	Extinguidores

El sistema de numeración usado para etiquetar los CFCs fue concebido por científicos de la Du Pont en los días cercanos de desarrollo y pro-

ducción de CFC. El primer dígito desde la derecha es el número de átomos de flúor en la molécula. El segundo dígito desde la derecha es el número de átomos de hidrogeno más uno. El tercer dígito desde la derecha es el número de átomos de carbono menos uno (si es cero éste es omitido). Por ejemplo, CFC-115 tiene cinco átomos de flúor; ningún átomo de hidrogeno ($0+1=1$); y dos átomos de carbono ($2-1=1$). Las letras "a" o "b", usadas en algunas alternativas CFC, designan una forma isométrica en un compuesto.

2.2. AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO EN LA ESTRATOSFERA

El Ozono fue descubierto en la estratósfera en 1881. Este es formado por la interacción del oxígeno en la tropósfera con los rayos solares. En 1930, Sidney Chapman explicó el mecanismo de la formación fotoquímica en términos de la siguiente reacción:



Estas reacciones son más pronunciadas por encima de la línea ecuatorial y los trópicos debido a la fuerte radiación solar en estas regiones. Y posteriormente los vientos en la estratósfera llevan el ozono que se encuentra alrededor de la Tierra hacia las regiones polares.

Las dudas sobre el agotamiento de la capa de ozono fueron hechas por primera vez en la década de los 70. En 1971, se decía que los óxidos de nitrógeno emitidos en los gases de escape como productos de combustión de los motores de aviones supersónicos volaban en la estratósfera causando variaciones en los niveles de ozono.

En 1974, dos científicos Americanos, Rowland y Molina, relacionaron la destrucción de la capa de ozono en la estratósfera con el uso de CFCs. Estos afirmaban que el radical Cloro descompone catalíticamente el ozono estratósferico y que la principal fuente antropogénica de cloro en la estratósfera podrían ser los CFCs. Además estimaron que si la tasa de producción de CFCs continuaba, medio millón de toneladas de cloro se acumularían en la estratósfera cada año, esto doblaría la tasa natural de descomposición del ozono y como resultado el ozono se reduciría del 7 al 13%.

En 1985, J.C. Farman del British Antarctic Survey reportó una reducción temporal de la capa de ozono sobre la Bahía Halley. Las mediciones realizadas en 1987 mostraron que el 95% del ozono que se encontraba entre altitudes de 14 y 23 Km. fueron destruidas en menos de dos meses. La columna total de ozono fue reducida a un 40% de su original en 1979. Estos descubrimientos fueron confirmados por la OTP (Ozone Trends Panel) organizado en Octubre de 1986 por la NASA y otras agencias.

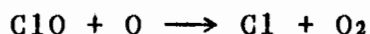
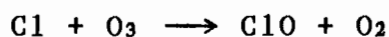
En 1987, la OTP reportó que los niveles de ozono atmosférico a medias y bajas latitudes se redujo un 2.5% entre 1978 y 1985. Hacia latitudes nortes más altas, entre 50° y 60°, las concentraciones de ozono cayeron un 60% en comparación con el nivel registrado en 1970. OTP atribuyó parte de éste agotamiento a los CFCs. Por otra parte, la caída de la concentración total de ozono sobre la Bahía Halley entre Octubre de 1957 y Octubre de 1985 se igualaba al crecimiento de CFCs en el hemisferio sur.

Los radicales Cloro (Cl) son producidos por disociación fotolítica de CFCs en la baja estratosfera. La siguiente es una reacción típica para

CFC-12 :



Estos radicales entonces se vuelven útiles para catalíticamente destruir el ozono a todas las altitudes en la estratósfera en una serie de procesos complejos que incluyen el siguiente (el cual involucra monóxido de cloro, ClO):



Científicos estiman que un solo radical de cloro puede destruir cerca de 100.000 moléculas de ozono antes de que él mismo sea destruido en otras reacciones. Además, ellos predicen que los CFCs, por su estabilidad pueden sobrevivir en la estratósfera hasta 100 años.

Los compuestos halogenados son aún más destructivos. Estos liberan radicales bromo (Br), los cuales forman monóxido de bromo (BrO) en reacciones similares a las que se mostraron anteriormente. La concentración de Halon 1301 en la estra -

tósfera se ha estado incrementando a razón de 5% por año.

La concentración estratosférica total de cloro hasta la fecha es casi 3 partes por billón (ppb, partes por 10^9 moléculas de aire). Esto se compara con 0.6 ppb desde hace un siglo y 2 ppb a finales de 1970. El cloro se presenta en forma de CFCs y sus residuos fotoquímicos como ClO. El Bromo, en forma de halons y monóxido de bromo, está presente también en cerca del 0.02 ppb.

El agotamiento de la capa de ozono de la Tierra debido a los CFCs y otros compuestos halogenados producen un incremento de la radiación ultravioleta en la superficie terrestre. Esta es una amenaza directa para la vida. El incremento de radiación ultravioleta reduce la eficiencia del sistema inmunológico del cuerpo humano, hará que más gente sea susceptible a varias enfermedades (incluyendo ataques parasitarios), también podría causar daños en la piel y ojos; se ha estimado que un agotamiento de la capa de ozono del 1% causará 70.000 casos extras de cáncer a la piel alrededor del mundo. Este incremento de radiación ultravioleta además puede afectar adversamente las fuentes alimenticias y vida silvestre.

2.3. CONTRIBUCIONES DE LOS CFGs AL EFECTO INVERNADERO

El dióxido de Carbono (CO_2), vapor de agua y otros gases que se encuentran en la atmósfera permiten que la radiación ultravioleta penetre y caliente la superficie terrestre. Sin embargo, estos gases también absorben la radiación infraroja emitida por la superficie caliente de la Tierra. El CO_2 absorbe la radiación entre longitudes de onda 13-19 μm y el vapor de agua entre 4-8 μm .

El calor atrapado en la "manta térmica" que se encuentra alrededor de la Tierra mantiene a ésta caliente y es conocida como el efecto invernadero. Además, casi el 70% de la radiación de la Tierra escapa hacia el espacio a través de una "ventana" de longitud de onda entre 8 y 12 μm . Por esto la temperatura de la Tierra permanece razonablemente constante.

En el último siglo, sin embargo, la combustión de combustibles fósiles y la actividad industrial ha perturbado este equilibrio. Los niveles de CO_2 en la atmósfera se han incrementado de 280 partes por millón (ppm) en 1860 a casi 350 ppm en 1980. El incremento de CO_2 ha absorbido más y más radiación infraroja y ésta ha causado que la tem-

peratura de la Tierra aumente $0.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ desde el siglo XIX. Con las temperaturas aumentando, y por lo tanto con veranos más calientes e inviernos más templados, los glaciares comenzarían a derretirse y a subir el nivel del mar.



Los CFCs absorben la radiación infraroja en longitudes de onda desde 8 a 12 μm , de esta forma bloquean la ventana que usa la radiación infraroja para escapar, perturbando una vez más el balance natural. Los CFCs son gases de efecto invernadero muy eficientes; el efecto del calentamiento de una molécula de CFC-12 (producto del efecto invernadero) es equivalente a 10.000 moléculas de CO_2 . Los cálculos muestran que los CFCs causan alrededor del 15 al 20% de efecto invernadero.

Paradójicamente, los gases del invernadero tienen un impacto ventajoso sobre el agotamiento de ozono en la estratósfera, ya que la estratósfera se está volviendo más fría debido a que más y más calor está siendo atrapado en el manto térmico. Consecuentemente la tasa de agotamiento de ozono se ha desacelerado, porque la tasa se reduce a temperaturas más bajas.

2.4. EL PROTOCOLO DE MONTREAL

En décadas pasadas las sociedades de todas partes del mundo han tomado conciencia de algunas de las formas de contaminación mundial que tendría un impacto desastroso para la vida en la Tierra, tales como: agotamiento de ozono, el efecto invernadero, la lluvia ácida y el esmog químico.

A mediados de los años 70, siguiendo los trabajos de Rowland y Molina, agencias nacionales e internacionales comenzaron a reconocer que los CFCs serían los principales culpables de la contaminación mundial. En 1976 La Agencia de Protección Ambiental (EPA) en los EE.UU. anunciaba su intención de prohibir el uso no necesario de los CFCs en aerosoles. A pesar de esto en 1985 la producción de CFCs alrededor del mundo pasó su límite preestablecido en un millón de toneladas por año.

El 16 de Septiembre de 1987, 24 Naciones firmaron el Protocolo de Montreal bajo el auspicio del Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP). Las tres principales necesidades del Protocolo fueron las siguientes:

* Los niveles de consumo de CFC-11, 12, 113,

114 y 115 para 1986 no deberían aumentar hasta pasado la mitad del año 1989.

* Los niveles de producción deben ser reducidos un 20% desde el 1 de Julio de 1993 y un adicional del 30% a partir del 1 de Julio de 1998. y,

* Un congelamiento de los niveles de consumo de halons-1211, 1301 y 2402 a partir de 1994.

Más Naciones (cerca de 123) se sumaron al Protocolo para las conferencias internacionales de ozono mantenidas en Londres en Marzo del 89 y en Helsinki en Mayo de 1989.

Posteriormente, el Protocolo fue revisado en Junio de 1990. Este conducirá a una suspensión gradual completa de la producción de CFCs para el año 2000. En los EE.UU., la EPA y el Congreso de ese país, ha establecido reglamentos de cumplimiento como parte del Acta de Aire Limpio. El Acta de Aire Limpio fue promulgada como ley por su Presidente en Diciembre de 1990. La Tabla 2.2 compara el Protocolo de Montreal revisado con el Protocolo original y el Acta de Aire Limpio. Se encuentra en progreso la reevaluación del Protoco-

lo de Montreal, y se tiene la certeza de que este proceso de reevaluación conducirá a una aceleración de la suspensión de CFC; posiblemente para 1997.

Tabla 2.2: Programa de Suspensión de la Producción de CFCs.*

Año	Protocolo Original de Montreal	Protocolo Revisado	Acta de Aire Limpio de E.U
1989	100 %	100 %	100 %
1990	100 %	100 %	100 %
1991	100 %	100 %	85 %
1992	100 %	100 %	80 %
1993	80 %	80 %	75 %
1994	80 %	80 %	65 %
1995	80 %	50 %	50 %
1996	80 %	50 %	40 %
1997	80 %	15 %	15 %
1998	50 %	15 %	15 %
1999	50 %	15 %	15 %
2000	50 %	0 %	0 %

* (% de 1986; Efectivo al 1 de Enero de cada año)

2.5. ALTERNATIVAS PARA LOS CFCs

2.5.1. REQUERIMIENTOS PARA SUSTITUIR EL CFC

Las posibles alternativas para CFCs necesitan llenar algunos requerimientos:

- Deberían tener aproximadamente las mismas propiedades físicas básicas de los CFCs, por ejemplo un punto de ebullición similar.
- Deberían tener las características de seguridad lo más cerca posible a los CFCs, por ejemplo no inflamabilidad y baja toxicidad.
- La producción eventual a escala comercial debería ser técnica y económicamente viable.
- Deberían tener una estabilidad química adecuada pero al mismo tiempo deben ser menos estables que los CFCs en la atmósfera para que de esta forma llegue poco o nada a la estratósfera. De esta manera, estos deberían tener una vida mucho más

corta en la estratósfera y un muy bajo o cero de ODP y GWP.

Es quizás una ironía que la estabilidad, que era el factor que hacía a los CFC muy importantes, los hace ahora una amenaza para el medio ambiente. Una estabilidad atmosférica reducida puede ser alcanzada por la presencia de hidrogeno en la molécula. Esto permite que las moléculas sean degradadas por el radical hidroxilo (OH).

2.5.2. ACEPTABILIDAD DEL MEDIO AMBIENTE

La capacidad de un compuesto para destruir el ozono depende de la cantidad de cloro que contenga y su tiempo de vida en la atmósfera. Los ODPs miden la contribución de varios CFCs y su posible sustituto relativo con CFC-11(GWP=1). Los GWPs fueron calculados usando modelos en computadoras y son también relativos con CFC-11 con un valor de 1.

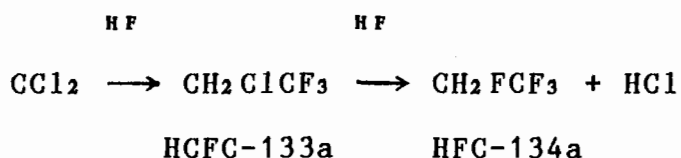
El reporte final de la AFEAS (Estudio de Aceptabilidad del Fluorocabono Al-

ternativo en el Medio Ambiente) publicado en 1989, concluyó que solamente los HCFCs con períodos de vida largos en la atmósfera tienen alguna posibilidad de afectar el ozono de la estratósfera y que el tiempo de vida está determinado por su rapidez de descomposición en la tropósfera. Por ejemplo, la AFEAS encontró que el HFC-134a tiene un tiempo de vida en la atmósfera de 15.5 años y su ODP es cero. El HFC-134a tiene un pequeño GWP de casi 0.27. Cabe indicar que en la misma escala el CFC-12 tiene un GWP de 3.1. Por lo tanto el cambio de CFC-12 por HFC-134a reducirá el GWP (Potencial de calentamiento del Globo) cerca del 91%.

2.5.3. ALTERNATIVAS PARA CFC-12

Ya que las propiedades del HFC-134a son similares al del CFC-12 este viene a ser un reemplazo efectivo, pero su principal problema representa su fabricación. Muchas de las rutas para procesar HFC-134a, involucran procesamientos de tres o cuatro pasos y por lo tanto costosos.

El ICI (Industria Química Imperial), tiene algunas patentes para los procesos de fabricación del HFC-134a. Uno de estos usa el Tricloroetano como base y produce el tóxico HCFC-133a como intermedio:



El segundo paso, da poca cantidad del HFC-134a, y por esto el reciclaje es necesario.

El HCFC-133a puede además ser convertido a HFC-134a usando antimonio (V) flúor como un catalizador. Otra posible ruta usa óxido de cromo como catalizador y tetracloroetano como base.

CAPITULO III

TERMODINAMICA Y CICLOS DE REFRIGERACION

3.1. TERMODINAMICA

3.1.1. PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA

La Primera ley de la Termodinámica es también llamada Ley de la conservación de la energía. La siguiente forma de la ecuación de la primera ley es válida solamente en ausencia de reacción química o nuclear.

El balance de energía, para un sistema abierto o cerrado, basado en la primera ley de la Termodinámica será:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Cantidad Neta de} \\ \text{Energía Añadida} \\ \text{al Sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Incremento Neto} \\ \text{de la Energía} \\ \text{Almacenada en el} \\ \text{Sistema} \end{array} \right]$$

6

$$\left[\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{que entra} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Energía} \\ \text{que sale} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Incremento de} \\ \text{Energía en el} \\ \text{sistema} \end{array} \right]$$

De acuerdo a la Fig. 3.1, δm_1 es la masa que entra al sistema, y δm_2 es la masa que sale del sistema. Entonces, La primera Ley en forma diferencial será:

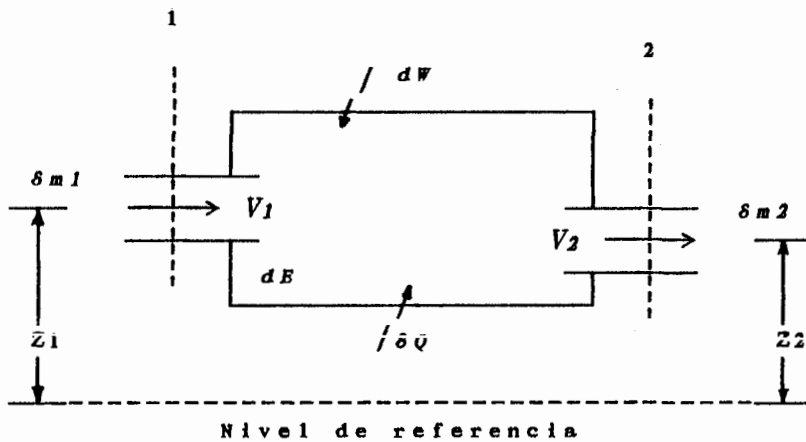


Fig. 3.1 Flujo de Energía general en un Sistema Termodinámico

$$\left[\frac{dm_1}{dt} \right] \left[h_1 + \frac{V_1^2}{2} + z_1 g \right] - \left[\frac{dm_2}{dt} \right] * \left[h_2 + \frac{V_2^2}{2} + z_2 g \right] + \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt}$$



[1]

cuando $dt \rightarrow 0$

$$\frac{dQ}{dt} \rightarrow \dot{Q}, \quad \frac{dW}{dt} \rightarrow \dot{W}, \quad \frac{dm_1}{dt} \rightarrow \dot{m}_1$$

$$\frac{dm_2}{dt} \rightarrow \dot{m}_2, \quad \frac{dE}{dt} \rightarrow \dot{E}$$

donde:

$dQ/dt = \dot{Q}$ = tasa de transferencia de calor al sistema.

$dW/dt = \dot{W}$ = tasa con la cual el trabajo es hecho por el sistema.

$dm/dt = \dot{m}$ = flujo másico cruzando la frontera del sistema.

$dE/dt = \dot{E}$ = tasa de la energía almacenada por el sistema.

V = velocidad del flujo de fluido cruzando la frontera del sistema,

g = gravedad local,

z = elevación sobre el plano de referencia horizontal,

u = energía interna específica del fluido,

v = volumen específico del fluido.

En forma integrada tenemos:

$$\begin{aligned} & \Sigma m_i \left[u + pv + \frac{v^2}{2} + gz \right]_i - \\ & - \Sigma m_o \left[u + pv + \frac{v^2}{2} + gz \right]_o + Q - W = \\ & = (E_f - E_{i n i})_{s i s t} \quad [2] \end{aligned}$$

El proceso de flujo estable es importante en las aplicaciones ingenieriles. Flujo estable significa que todas las cantidades asociadas con el sistema no cambian con el tiempo. Consecuentemente,

$$\begin{aligned} & \Sigma m_o (h + \frac{1}{2} V^2 + gz) - \Sigma m_i (h + \frac{1}{2} V^2 + gz) + \\ & + Q - W = 0 \quad [3] \end{aligned}$$

donde la Entalpía h , está definida como:

$$h \equiv u + pv$$

3.1.2. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA

En un sistema abierto, la segunda ley de la termodinámica puede ser escrita en términos de la entropía :

$$dS_{sist} = (dQ/T) + dm_i s_i - dm_e s_e + dS_{irr} \quad [4]$$

donde,

dS_{sist} = cambio total dentro del sistema en un tiempo dt durante el proceso,

$dm_i s_i$ = incremento de entropía causado por el ingreso de masa,

$dm_e s_e$ = decremento de entropía causado por la salida de masa,

(dQ/T) = cambio de entropía causado por la transferencia de calor reversible entre el sistema y los alrededores

dS_{irr} = entropía creada ó producida, causada por las irreversibilidades.

La Ec.[4] responde para todos los cambios de entropía en el sistema. Reordenando la ecuación tenemos:

$$dQ = T[(dm_e s_e - dm_i s_i) + dS_{sist} - dS_{irr}] \quad [5]$$

En forma integrada, si las propiedades de entrada y salida, rapidez de flujo másico, y las interacciones con los alrededores no varían con el tiempo, entonces la ecuación general para la segunda ley es:

$$(S_f - S_{ini})_{sist} = \int_{rev} dQ/T + \Sigma(ms)_i - \\ - \Sigma(ms)_o + S_{producido} \quad [6]$$

La energía disponible es energía en forma de trabajo de eje o en una forma completamente convertible a trabajo de eje por un proceso ideal. La energía que es en parte convertible y en parte no convertible está hecha de una parte disponible y una parte no disponible.

En termodinámica, la disponibilidad de energía está restringida por la disponibilidad de energía para desarrollar un trabajo (mecánico o eléctrico). La segunda ley de la termodinámica limita la transformación de calor en trabajo, porque solamente una parte del calor disponible puede desarro -

llar trabajo. Por lo tanto, la disponibilidad de la energía es menor que la cantidad de calor en consideración.

3.1.3. ANALISIS DE LA PRIMERA Y SEGUNDA LEY EN CICLOS DE REFRIGERACION

Los ciclos de refrigeración continuamente transfieren energía térmica de una región de baja temperatura a una de alta temperatura. El sumidero de calor de la temperatura alta usualmente la da el medio ambiente o agua enfriándose. Esta temperatura, llamada T_0 , es la temperatura de los alrededores.

El balance de energía de la primera ley permite el análisis y diseño de componentes para sistemas individuales. El parámetro de evaluación para la primera ley en un sistema de refrigeración, se conoce como coeficiente de performance (COP), definido como:

$$COP = \frac{\text{Efecto Refrigerante}}{\text{Trabajo realizado}} =$$

$$COP = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|} \quad [7]$$

donde $|Q_1|$ es el valor absoluto del calor transferido al sumidero de alta temperatura y $|Q_2|$ es el valor absoluto del calor transferido desde la fuente de baja temperatura.

Un análisis de la segunda ley puede demostrar que: (1) El Ciclo de Carnot reversible es un estandar ideal y es el criterio para encontrar el trabajo de entrada mínimo requerido para un ciclo de refrigeración por compresión; (2) Los productos que están fuera de éste estandar ideal, tales como fricción del fluido o transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura finita, degrada la energía disponible; y (3) tal separación requiere que el trabajo de entrada para el ciclo de refrigeración sea mayor que el mínimo ideal.

La transferencia de calor de cualquier proceso reversible está dado por:

$$Q_{rev} = \int T dS \quad [8]$$

La parte disponible (Q_{av}) del calor añadido ó tomado de un sistema es aquella parte que podría ser convertida a trabajo. La parte del calor que no podría ser convertida a trabajo es llamada la parte no disponible (Q_{unav}), entonces

$$Q = Q_{av} + Q_{unav} \quad [9]$$

ésta puede demostrar que para cualquier proceso reversible la parte no disponible del calor transferido es

$$Q_{unav} = T_0 \cdot \Delta S \quad [10]$$

donde T_0 es la temperatura más baja de los alrededores y ΔS es el cambio de entropía de un sistema.

3.1.4. ECUACION DE ESTADO

La ecuación de estado de una substancia pura es la relación matemática entre presión, volumen específico, y temperatura, cuando el sistema está en equilibrio termodinámico:



$$f(p, v, T) = 0$$

Los principios de la mecánica estadística son usados para: (1) explorar las propiedades fundamentales de la materia; (2) Predecir una ecuación de estado basada en la naturaleza estadística de un sistema en particular; ó (3) Proponer una forma funcional de la ecuación de estado con parámetros desconocidos que son determinados por medición de las propiedades termodinámicas de la substancia. La ecuación fundamental con ésta base, es la *ecuación virial* .

La ecuación virial es expresada como un desarrollo de presión p ó de valores correspondientes al volumen por unidad de masa v :

$$pv/RT = 1 + B'p + C'p^2 + D'p^3 + \dots \quad [11]$$

$$pv/RT = 1 + (B/v) + (C/v^2) + (D/v^3) + \dots \quad [11a]$$

donde los coeficientes constantes: B' , C' , D' , etc., y B , C , D , etc., son los coeficientes viriales. B' y B son los segundos

coeficientes viriales; C' y C son los terceros coeficientes viriales, etc. Los coeficientes viriales son función sólo de Temperatura, y los valores respectivos de los coeficientes en las ecuaciones [11] y [11a] están relacionados. Por ejemplo, $B' = B/RT$ y $C' = (C - B^2)/(RT)^2$.

La cantidad R es la constante del gas ideal definida como:

$$R = \lim_{p \rightarrow 0} (pv)_T / T_{tp} \quad [12]$$

donde $(pv)_T$ es el producto de la presión y volumen a lo largo de una isoterma, y T_{tp} está definida como la temperatura del punto triple del agua $T_{tp} = 491.69^\circ R$.

$$(R = 1545.32 \text{ ft}\cdot\text{lb}/\text{lbmol}\cdot^\circ R)$$

La cantidad pv/RT también se la conoce como factor de compresibilidad $Z = pv/RT$ ó:

$$Z = 1 + (B/v) + (C/v^2) + (D/v^3) + \dots \quad [13]$$

Una expansión virial incompleta de cuatro términos es válida para densidades menores

a la mitad del valor del punto crítico. Para densidades mayores, términos adicionales pueden ser usados y determinados empíricamente.

Las computadoras permiten el uso de ecuaciones de estado más complejas para calcular los valores $p-v-T$, aún para altas densidades. La ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin ($B-W-R$) y la ecuación de Martin-Hou (1955) fueron muy útiles, pero por lo general tuvieron que ser limitados para densidades menores al valor crítico. Stobridge (1962), mostró la relación Benedict-Webb-Rubin modificada ($MBWR$) que dio excelentes resultados para altas densidades y puede ser usada para la superficie $p-v-T$ que se extiende dentro de la fase líquida.

La ecuación de $B-W-R$ sería usada extensamente para hidrocarburos. Esta es:

$$\begin{aligned}
 P = & (RT/v) + (B_0 RT - A_0 - C_0/T^2)/v^2 + \\
 & + (bRT - a)/v^3 + aa/v^6 + \\
 & + [c(1 + \tau/v^2)e^{(-\tau/v^2)}]/v^3 T^2 \quad [14]
 \end{aligned}$$

donde los coeficientes constantes son: A_0 , B_0 , C_0 , a , b , c , α , τ .

La ecuación de Martin-Hou es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 P = & \frac{RT}{v - b} + \frac{A_2 + B_2 T + C_2 e^{-kT/Tc}}{(v - b)^2} + \\
 & + \frac{A_3 + B_3 T + C_3 e^{-kT/Tc}}{(v - b)^3} + \frac{A_4 + B_4 T}{(v - b)^4} + \\
 & + \frac{A_5 + B_5 T + C_5 e^{-kT/Tc}}{(v - b)^5} + (A_6 + B_6 T)e^{\alpha v}
 \end{aligned}$$

[14a]

donde los coeficientes constantes son: A_i , B_i , C_i , k , b , y α

Los datos calculados usando la ecuación de estado de Martin-Hou serían suficientes para la mayoría de cálculos ingenieriles, aunque no tendría la exactitud de los datos calculados a partir de la ecuación de estado MBWR.

3.1.5. CALCULO DE LAS TABLAS DE PROPIEDADES TERMO- DINAMICAS

La información elemental usada para estos cálculos son: (1) Los valores $p-v-T$ sobre todo el rango de aplicación; (2) Los valores de calores específicos (C_p ó C_v) a lo largo de una línea a presión o volumen constante para el rango de temperatura requerida; (3) Los valores de la presión de vapor, donde el rango de aplicación incluye cambios de fase; y (4) datos del punto crítico y punto triple apropiados.

Los siguientes son métodos para calcular las tablas de propiedades termodinámicas dentro del rango válido de la ecuación de estado. Muchas tablas de Hidrocarburos Fluorados usan la ecuación [14a], la cual no es válida para la fase líquida. Sin embargo, la ecuación [27] puede ser usada para calcular las propiedades de líquido saturado. Las ecuaciones de estado usados para la mayoría de fluidos criogénicos son válidos para la fase líquida y gaseosa.

Las ecuaciones y métodos para el cálculo

de Energía interna, Entropía, Entalpía, y otras propiedades termodinámicas se muestran en el capítulo IV de la presente tesis.

2. CICLOS DE REFRIGERACION POR COMPRESION

3.2.1. CICLO DE REFRIGERACION POR COMPRESION IDEAL DE VAPOR.

La Fig 3.2 muestra el diagrama del equipo para un sistema de compresión de vapor simple. Las Fig. 3.3 y 3.4 muestran el diagrama $P-h$ y $T-S$ respectivamente. Los componentes básicos para este ciclo son: compresor, condensador, válvula de expansión, y evaporador. El ciclo ideal considera la transferencia de calor en el condensador y evaporador sin caída de presión, un compresor adiabático reversible (isentrópico), y una válvula de expansión adiabática, unidos por tuberías donde se considera que no hay ni caídas de presión ni transferencia de calor con los alrededores. El refrigerante abandona el evaporador en el punto 1 como un vapor saturado a baja presión, baja temperatura y luego entra al compresor,

donde es comprimido reversible y adiabáticamente (isentrópico). En el punto 2, éste abandona el compresor como un vapor supercalentado de alta temperatura, alta presión para luego entrar al condensador, donde éste primero se desupercalienta y luego condensa a presión constante. En el punto 3, el refrigerante abandona el condensador como un líquido saturado de alta presión, media-temperatura, y luego pasa a la válvula de expansión, donde éste se expande irreversible y adiabáticamente (entalpía constante). En el punto 4, el refrigerante deja la válvula de expansión como vapor húmedo a baja presión, baja temperatura para luego entrar al evaporador, donde éste es evaporado reversiblemente a presión constante hasta llegar al estado saturado en el punto 1. La transferencia de calor hacia el evaporador y desde el condensador ocurre sin una diferencia de temperatura finita entre el fluido que entrega calor y el fluido que absorbe calor, excepto durante el proceso de desupercalentamiento en el condensador.

Figura 3.2 : Diagrama de un equipo por compresión simple de vapor.

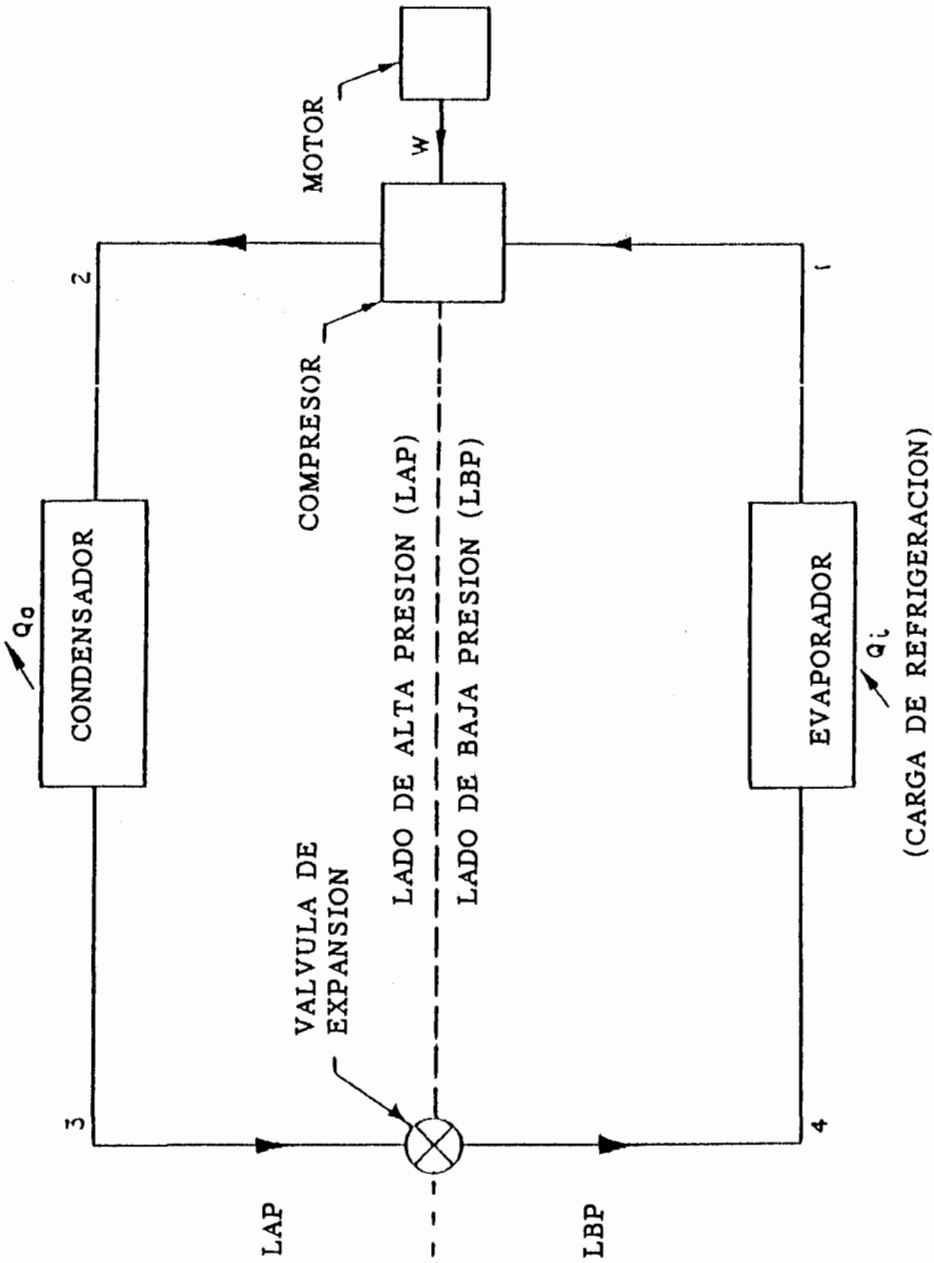


Figura 3.3 : Diagrama P-h, de un sistema por compresión simple.

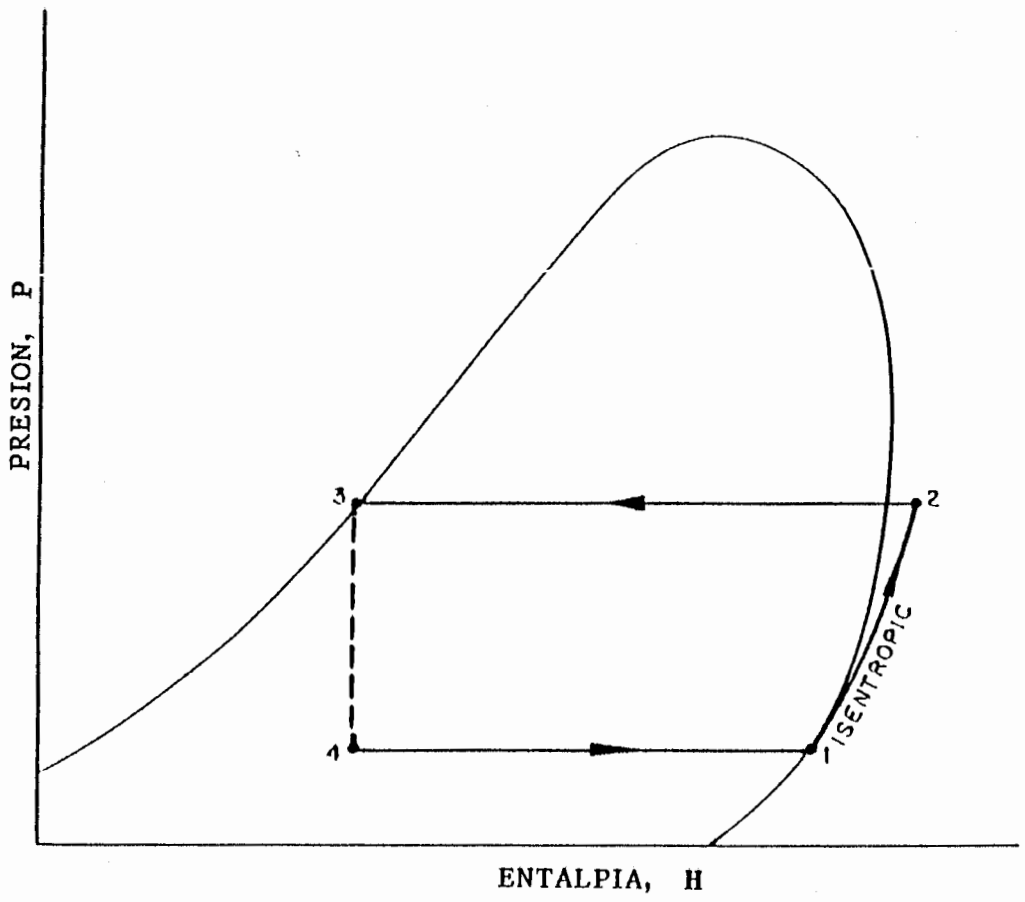
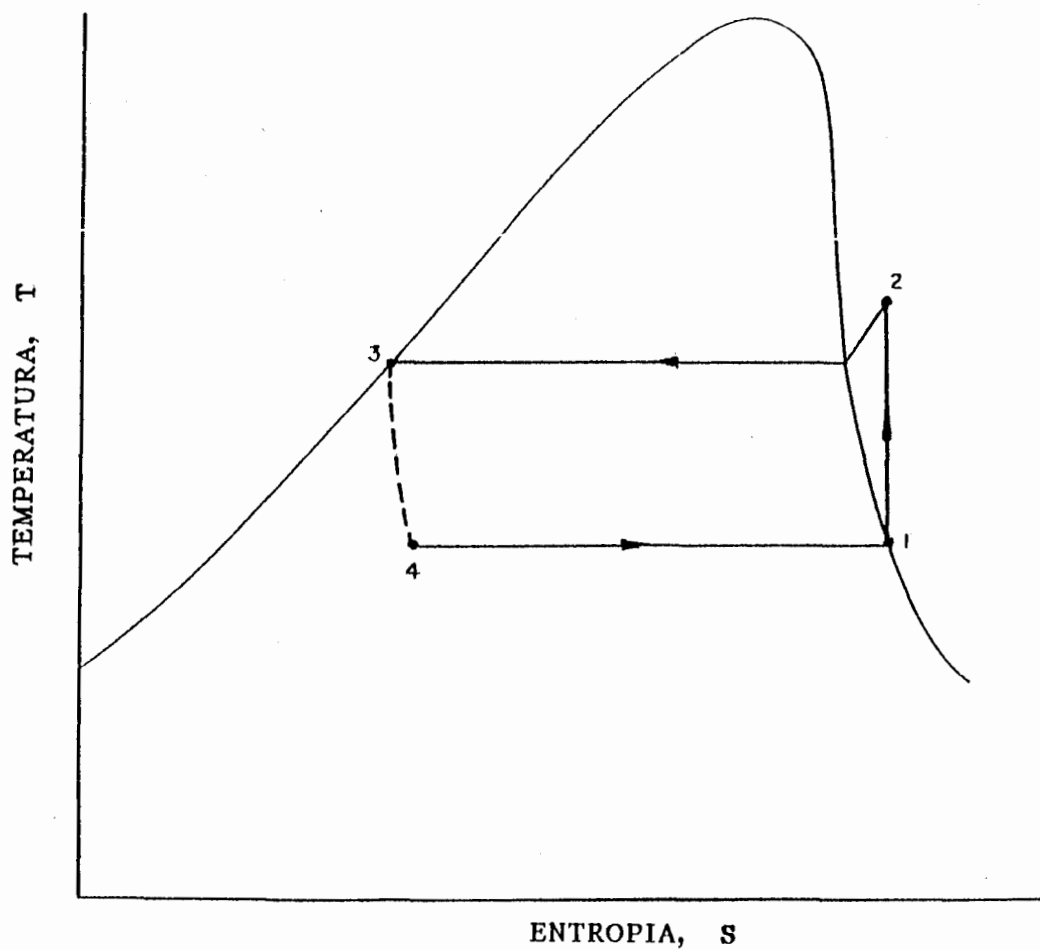


Figura 3.4 : Diagrama T-s, de un sistema por compresión simple.



Balance de energía y análisis de la Primera ley.

Un balance de energía y los parámetros de perfomancia seguros pueden ser obtenidos de la primera ley de la termodinámica. Aplicando la ecuación de flujo estable a la primera ley Ec.[3] para cada uno de los componentes del ciclo de compresión de vapor básico, encontramos las siguientes relaciones:

1-2 Compresión

$$\dot{W}_{1.2} = - (h_2 - h_1) \dot{m} \quad [15]$$

(Esta cantidad es negativa, indicando que el trabajo lo hace el compresor sobre el refrigerante)

2-3 Condensación

$$\dot{Q}_{2.3} = - (h_2 - h_3) \dot{m} \quad [16]$$

3-4 Expansión (válvula de expansión)

$$h_3 = h_4$$



BIBLIOTECA

4-1 Evaporación

$$\dot{Q}_{4.1} = (h_1 - h_4) \dot{m} \quad [16a]$$

Al aplicar la ecuación de flujo estable, los términos de energía cinética y de energía potencial fueron omitidos; porque las velocidades del flujo son bajas y evitan caídas de presión no deseables, y la variación de altura dentro de un sistema de refrigeración es usualmente pequeño, estos términos son numéricamente insignificantes. Ya que el sistema es cíclico. El calor rechazado en el condensador será igual a la suma del calor absorbido en el evaporador y el trabajo de compresión.

El coeficiente de desempeño (*COP*) indica el desempeño de un sistema de refrigeración. El *COP* fue introducido en la Ec.[7]. De la ecuación [15] y [16a], el *COP* para un ciclo de compresión de vapor simple es:

$$COP = \frac{Q_{4.1}}{W_{1.2}}$$

donde,

$Q_{4.1}$ = Calor añadido ó efecto refrigerante

$W_{1.2}$ = Trabajo neto ó Trabajo realizado

entonces,

$$COP = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1)$$



BIBLIOTECA

CAPITULO IV

PROGRAMA DE COMPUTADORA (TBASIC) PARA LA EVALUACION
TERMODINAMICA DE UN CICLO DE REFRIGERACION IDEAL SIMPLE
CON HFC-134a Y CFC-12

4.1. ECUACIONES Y METODOS COMPUTACIONALES

4.1.1. PLANTEAMIENTO GENERAL

Los cálculos termodinámicos de una substancia compresible simple requieren expresiones de dos tipos: (1) Una ecuación $P-v-T$, y (2) Una ecuación para C_v a bajas densidades (gas ideal), generalmente denotado por $C_v^o(T)$. La forma en la cual ésta información es usada será descrita a continuación.

La energía interna de una substancia compresible simple generalmente se expresa como:

$$u = u(T, v) \quad [17]$$

Diferenciando y usando la defini-

ción $C_v = (\delta u / \delta T)_v$

$$du = C_v dT + (\delta u / \delta v)_T dv \quad [18]$$

Una relación termodinámica importante, deducida en la mayoría de los textos termodinámicos, es:

$$(\delta u / \delta v)_T = T(\delta P / \delta T)_v - P \quad [19]$$

Substituyendo la Ec.19 en la Ec.18, e integrando sobre el recorrido mostrado en la Fig.4.1, y usando $dv = -d\phi / \phi^2$, encontramos

$$u = \int_{T_0}^T C_{v^0}(T) dT + \int_0^\phi 1/\phi^2 [P - T(\delta P / \delta T)_\phi] d\phi + u_0 \quad [20]$$

donde ϕ es la densidad de la substancia.

Note que la primera integración es obtenida a densidad cero, permitiendo que C_v sea reemplazada por C_{v^0} , y que la segunda integración es obtenida a temperatura constante. T_0 es escogida como una tempera-

tura de referencia. La constante u_0 es simplemente un término usado para poner la referencia de u como se desee.

Los datos de $P-\phi-T$ son usualmente arreglados en una ecuación apropiada, o quizás conectando regiones por medio de un grupo de ecuaciones. En general, éstas son de la forma

$$P = \phi RT + F(\phi, T) \quad [21]$$

donde $F = O(\phi^2)$ cuando $\phi \rightarrow 0$, ya que el comportamiento de gas ideal es obtenido a bajas densidades. Si $F = O(\phi^2)$, entonces la segunda integral en la Ec.[20] desaparece cuando $\phi \rightarrow 0$, dado el comportamiento de gas ideal en u .

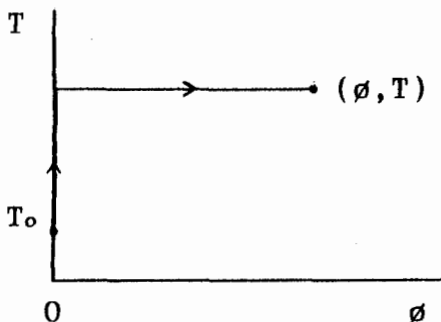


Fig. 4.1

Note que la primera integración es a $\phi = 0$ y la segunda integración a $T = \text{cte}$.

La entropía es determinada de la ecuación de Gibbs,

$$ds = (1/T)du + (P/T)dv \quad [22]$$

Usando Las Ec. [18] y [19],

$$ds = (C_v/T)dT - 1/\rho^2(\delta P/\delta T)_\rho d\rho \quad [23]$$

Es útil sumar y restar el término $-Rd\rho/\rho$ en la Ec.[23]. Entonces, integrando sobre el recorrido de la Fig.4.1,

$$s = \int_{T_0}^T C_v^\circ(T)/T dT - R \ln \rho + \int_0^\rho 1/\rho^2 [\rho R - (\delta P/\delta T)_\rho] d\rho + s_0 \quad [24]$$

Aquí s_0 es una constante que puede ser escogida para dar una referencia a s como se desee. Ya que $F = O(\rho^2)$, la segunda integral en la Ec.[24] desaparecerá a densidad



cero, ya que el comportamiento de gas ideal en s es obtenido cuando $\phi \rightarrow 0$.

Dadas las expresiones analíticas para $P(\phi, T)$ y $C_v^\circ(T)$, los valores de P, u, s , y h pueden ser calculados para valores específicos de T y v . Las ecuaciones usadas están dadas en las Tablas 4.1 a 4.6 y las constantes para esas sustancias, están dadas en la Apéndice I.

4.1.2. ARREGLO DE LA INFORMACION.

Varios investigadores usan diferentes expresiones de $P-\phi-T$ y obtienen sus arreglos en diferentes formas. Las ecuaciones involucran siempre un número de constantes que son determinadas por un arreglo de mínimos cuadrados de los datos de $P-\phi-T$.

Note que, de la Ec.[20], $h_{fg} = u_{fg} + Pv_{fg}$ involucra solamente la función $P-\phi-T$ y no depende del calor específico. Por lo tanto, además del uso obvio de los datos $P-\phi-T$, muchos investigadores además incluyen datos de h_{fg} en el arreglo de la curva $P-\phi-T$.

El arreglo de los mínimos cuadrados para P - ϕ - T son usualmente sujetos a algunas restricciones. Los valores del segundo coeficiente virial

$$B = (\delta[P/(\phi RT)]/\delta\phi)_T \Big|_{\phi=0} \quad [25]$$

a ciertas temperaturas son generalmente usadas como restricciones en el arreglo. Muchos investigadores además usan restricciones en el punto crítico,

$$\left. \begin{array}{l} P = P_c \\ (\delta P/\delta\phi)_T = 0 \\ (\delta^2 P/\delta\phi^2)_T = 0 \end{array} \right\} \text{ a } T = T_c, \quad \phi = \phi_c \quad \begin{array}{l} [26a] \\ [26b] \\ [26c] \end{array}$$

Cuando estas restricciones no son impuestas, la superficie P - ϕ - T resultante tiene un estado crítico ligeramente diferente del punto experimental.

4.1.3. DATOS DE SATURACION.

Los puntos en fase de equilibrio (Líquido/vapor saturado) pueden ser determinados de la superficie $P-\phi-T$ encontrando aquellos puntos los cuales a la misma T y P , tienen el mismo valor de la función de Gibbs $g = h - T \cdot s$. De las Ec.[20] y [22], se puede ver que la diferencia en la función de Gibbs entre dos estados cualesquiera a la misma T y P dependen solamente de la superficie $P-\phi-T$, y es independiente de C_v^o . Un investigador escribió un programa para hacer estos cálculos, y de ésta manera desarrolló información para presiones y temperaturas de saturación para varias sustancias. Sin embargo, ésta es más conveniente para cálculos ingenieriles, para tener ecuaciones separadas para presión de saturación y para la densidad de líquido saturado. En los casos donde el autor original no dio estas expresiones, el investigador las desarrolló usando el programa de fase de equilibrio descrito anteriormente para generar los datos, los cuales fueron usados en un arreglo de mínimos cuadrados para dar una ecuación adecuada.

La entalpía de vaporización, h_{fg} , es calculada de la ecuación de Clapeyron,

$$h_{fg} = T \cdot v_{fg} \cdot (dP_{sat}/dT_{sat}) \quad [27]$$

La entropía de vaporización está dada por

$$s_{fg} = h_{fg}/T \quad [28]$$

4.1.4. RESUMEN: LAS CUATRO ECUACIONES BASICAS.

Cuatro ecuaciones están dadas para cada substancia. Estas son:

(1) *Presión-densidad-temperatura*

$$P = P(\phi, T)$$

$$P = RT/(v-b) +$$

$$+ \sum_{i=2}^5 (A_i + B_i T + C_i e^{-kT/T_c}) / (v-b)^i$$

donde: $\phi = 1/(v-b)$

(2) *Calor específico del gas ideal*

$$C_{v^{\circ}} = C_{v^{\circ}}(T)$$

$$C_{v^{\circ}} = a + bT + cT^2 + dT^3 + f/T^2$$

(3) *Presión de Saturación*

$$P_{sat} = P(T_{sat})$$

* Para CFC-12

$$\ln P_{sat} = A + B/T + C \ln T + D T$$

* Para HFC-134a

$$\begin{aligned} \log_{10} P_{sat} = & A + B/T + C \log_{10} T + D T + \\ & + E ([F-T]/T) \log_{10} (F - T) \end{aligned}$$

(4) *Densidad de líquido saturado*

$$\rho_f = \rho_f(T_{sat})$$

$$\begin{aligned} \rho_f = & A_f + B_f (1-T_r)^{(1/3)} + C_f (1-T_r)^{(2/3)} + \\ & + D_f (1-T_r) + E_f (1-T_r)^{(4/3)} + \\ & + F_f (1-T_r)^{(1/2)} + G_f (1-T_r)^2 \end{aligned}$$

donde: $T_r = T/T_c$

Todas las constantes de las expresiones matemáticas mencionadas, están dadas en el Apéndice I en el Sistema Internacional de unidades. Sin embargo, el programa de computadora desarrollado en Turbo Basic, incluye una opción que nos permite trabajar bien sea en el Sistema Internacional ó en el Sistema Inglés de unidades, dependiendo de la información disponible.

4.1.5. PROGRAMAS COMPUTACIONALES BASICOS.

Dadas las ecuaciones y los valores para las constantes, se pueden preparar programas computacionales que darán P , u , s , y h en función de T y v . Es útil el tener tres programas para cada substancia, aquí se usaron los siguientes (reemplazar xxx por el código de identificación de la substancia; CFC-12 \equiv R12 y HFC-134a \equiv R134):

(1) Pxxx(T,P,V,U,H,S) Cuando se llame para ingresar T , v , calcúla P , u , h , y s .

- (2) $D_{xxx}(T, DF)$ Cuando se llame para ingresar T , calcúla la densidad de líquido saturado $\rho_f = DF$.
- (3) $S_{xxx}(T, P, DPDT)$ Cuando se llame para ingresar T , calcúla la presión de saturación y la derivada $dP_{sat}/dT_{sat} = DPDT$.

Además tenemos una rutina utilitaria, $PROP(T, P, V, U, H, S, NOP, PXXX)$, la cual podría ser llamada con dos propiedades específicas cualesquiera y con los valores de prueba T y v , como está indicado en el parámetro de opción NOP y de ésta forma calcular las propiedades restantes. Un segundo programa utilitario $SAT(T, P, DPDT, NOP, SXXX)$, puede ser utilizado para calcular $P_{sat}(T)$ ó $T_{sat}(P)$ y dP_{sat}/dT_{sat} .

El Programa en conjunto, desarrollado en Turbo Basic, además de encontrar las propiedades termodinámicas del HFC-134a y CFC-12, cuenta con una opción que le permite calcular el COP de un ciclo de refrigeración ideal simple, ingresando la Temperatura

tura en el evaporador y la Temperatura en el condensador.

Al preparar el Programa Pxxx, es conveniente escribir la ecuación $P-\phi-T$ como:

$$P = \phi RT + \sum_{i=1}^N C_i(T) \cdot H_i(\phi) \quad [29]$$

designando

$$C_i' = dC_i/dT \quad [30a]$$

$$I_i = \int_0^{\phi} 1/\phi^2 H_i(\phi) d\phi \quad [30b]$$

La Ec.[20] se transformará en

$$u = \int_{T_0}^T C_{v^0}(T) dT + \sum_{i=1}^N [C_i - TC_i'] I_i + u_0 \quad [31]$$

y la Ec.[24] es

$$s = \int_{T_0}^T C_{v^0}(T)/T dT - R \ln \phi - \sum_{i=1}^N C_i' I_i + s_0$$

4.1.6. TRATAMIENTO ESPECIAL EN LA REGION LIQUIDA

A manera de lograr que las tablas de saturación satisfaga exactamente la condición de fase de equilibrio $g_r = g_g$, el siguiente procedimiento fue usado:

- (1) La Presión de saturación y dp_{sat}/dT_{sat} fueron calculadas a un T dado usando Sxxx.
- (2) Las propiedades de vapor saturado v_g , u_g , h_g , y s_g fueron calculados usando PROP para un T y P específico.
- (3) La densidad del líquido fue calculada usando Dxxx.
- (4) h_{rf} y s_{rf} fueron calculados usando las Ec.[27] y [28], entonces las propiedades de líquido saturado (h_r y s_r) fueron calculadas restando h_g y s_g .



En los casos donde la ecuación $P-\rho-T$ es válida en el régimen líquido, un llamado de PROP con v_r y T así determinado no daría

precisamente los mismos valores para P , h_r , y s_r como el calculado por el proceso anterior. En particular, P estaría considerablemente fuera ya que P depende fuertemente de ϕ en la región líquida. Sin embargo, un llamado de PROP para T y P de saturación y el valor de prueba de densidad líquida dará un valor de ϕ_r no muy diferente (quizás en el tercer o cuarto dígito) del determinado por Dxxx, y los valores de u , h , y s dado por el llamado de PROP estará muy cerca de los valores calculados en los pasos del 1 - 4 anteriores para líquido saturado.

4.1.7. ESTADOS DE REFERENCIA

Para cada sustancia, las constantes u_0 y s_0 fueron escogidas para hacer que la entalpía y la entropía del líquido saturado sean cero a una temperatura de referencia conveniente T_0 . Los valores de T_0 , u_0 , y s_0 están listados con las constantes de cada sustancia en el Apéndice I.

Tabla 4.1
ECUACION P-V-T*

$$P = RT/(v - b) + \sum_{i=2}^5 (A_i + B_iT + C_i e^{-k_iT/T_c}) / (v - b)^i$$

ó en términos de densidad (ϕ), donde $\phi = 1/(v - b)$

$$P = \phi RT + \sum_{i=2}^5 \phi^i (A_i + B_iT + C_i e^{-k_iT/T_c})$$

$$P = \phi RT + \phi^2(A_2 + B_2T + C_2e^{-k_2T/T_c}) + \phi^3(A_3 + B_3T + C_3e^{-k_3T/T_c}) + \phi^4(A_4 + B_4T + C_4e^{-k_4T/T_c}) + \phi^5(A_5 + B_5T + C_5e^{-k_5T/T_c})$$

$$P = \phi RT + \phi^2T (B_2 + \phi B_3 + \phi^2B_4 + \phi^3B_5) + \phi^2e^{-k_1T/T_c} (C_2 + \phi C_3 + \phi^2C_4 + \phi^3C_5) + \phi^2(A_2 + \phi A_3 + \phi^2A_4 + \phi^3A_5)$$

* Ecuación obtenida por Du Pont y National Institute of Standards and Technology (NIST).

Tabla 4.2
ECUACION PARA PRESION DE SATURACION (P_{sat})*

Las constantes que no están dadas en el Apéndice I, son cero para esa substancia.

* Para el Refrigerante CFC-12

$$\ln P_{sat} = A + B/T + C \ln T + D T$$

$$P_{sat} = e^{A + B/T + C \ln T + D T}$$

* Para el Refrigerante HFC-134a

$$\log P_{sat} = A + B/T + C \log T + D T + E([F - T]/T) \log (F - T)$$

$$P_{sat} = 10^{A + B/T + C \log T + D T + E([F - T]/T) \log (F - T)}$$

* Ecuación obtenida por Du Pont, NIST y La Universidad de Standford.

Tabla 4.3
 ECUACION PARA $dP_{\text{sat}}/dT_{\text{sat}}$ *

Las constantes que no están dadas en el Apéndice I, son cero para esa substancia.

* Para el Refrigerante CFC-12

$$dP_{\text{sat}}/dT_{\text{sat}} = (-B/T^2 + C/T + D) * e^{(A + B/T + C \ln T + D T)}$$

* Para el Refrigerante HFC-134a

$$\text{Log } P_{\text{sat}} = A + B/T + C \log T + D T + E((F - T)/T) \log (F - T)$$

$$dP_{\text{sat}}/dT_{\text{sat}} = \ln 10 * \{-B/T^2 + (C \log e)/T + D - (E \log e)/T \cdot (1 + ((F \ln(F - T))/T))\} *$$

$$* 10^{(A + B/T + C \log T + D T + E((F - T)/T) \log (F - T))}$$

* Ecuaciones obtenidas por Du Pont, NIST y La Universidad de Standford.

Tabla 4.4
ECUACION PARA DENSIDAD DE LIQUIDO SATURADO (ϕ_r)*

Las constantes que no están dadas en el Apéndice I, son cero para esa substancia.

* Para el Refrigerante CFC-12

$$\phi_r = A_r + B_r(1 - T_r)^{(1/3)} + C_r(1 - T_r)^{(2/3)} + D_r(1 - T_r) + E_r(1 - T_r)^{(4/3)} + F_r(1 - T_r)^3 + G_r(1 - T_r)^2$$

* Para el Refrigerante HFC-134a

$$\phi_r = A_r + B_r(1 - T_r)^{(1/3)} + C_r(1 - T_r)^{(2/3)} + D_r(1 - T_r) + E_r(1 - T_r)^{(4/3)}$$

donde $T_r = T/T_c$

* Ecuaciones obtenidas por Du Pont, NIST y La Universidad de Standford.

Tabla 4.5
ECUACION PARA ENERGIA INTERNA (u)

De la ecuación (6):

$$P = \phi RT + \sum_{i=2}^5 C_i(T) \cdot H_i(\phi)$$

donde $\phi = 1/(v - b)$

y, utilizando las ecuaciones (30a) y (30b), la ecuación (20) se transformará en:

$$u = \int_{T_0}^T C_v^0(T) dT + \sum_{i=2}^5 [C_i - TC_i'] H_i + u_0$$

$$\begin{aligned} u = & aT + bT^2/2 + cT^3/3 + dT^4/4 - f/T - aT_0 - bT_0^2/2 - cT_0^3/3 - dT_0^4/4 + f/T_0 + \phi A_2 + \phi^2 A_3/2 + \phi^3 A_4/3 + \\ & + \phi^4 A_5/4 + \phi C_2 e^{-kT/T_c} \cdot (1 + kT/T_c) + \frac{1}{2} \phi^2 C_3 e^{-kT/T_c} \cdot (1 + kT/T_c) + (1/3) \phi^3 C_4 e^{-kT/T_c} \cdot (1 + kT/T_c) + \\ & + \frac{1}{4} \phi^4 C_5 e^{-kT/T_c} \cdot (1 + kT/T_c) + u_0 \end{aligned}$$

donde, los valores de las constantes que no se encuentran en el Apéndice I, son cero para esa substancia.

Tabla 4.6
ECUACION PARA LA ENTROPIA (s)

De la ecuación (32):

$$s = \int_{T_0}^T C_v(T)/T \, dT - R \ln \phi - \sum_{i=2}^s C_i' \cdot h_i + s_0$$

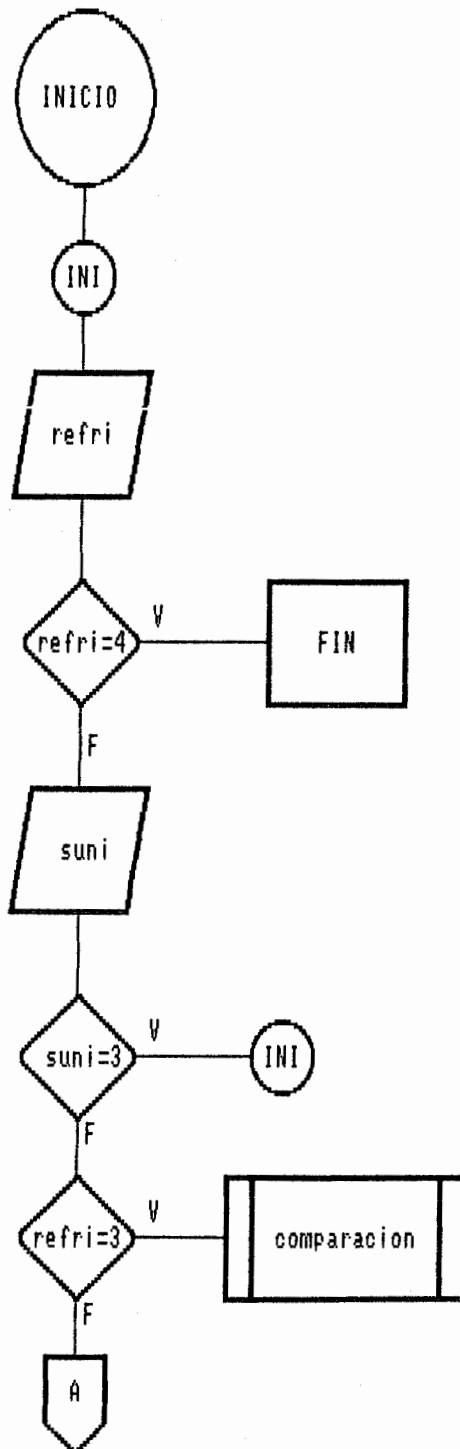
donde $\phi = 1/(v - b)$

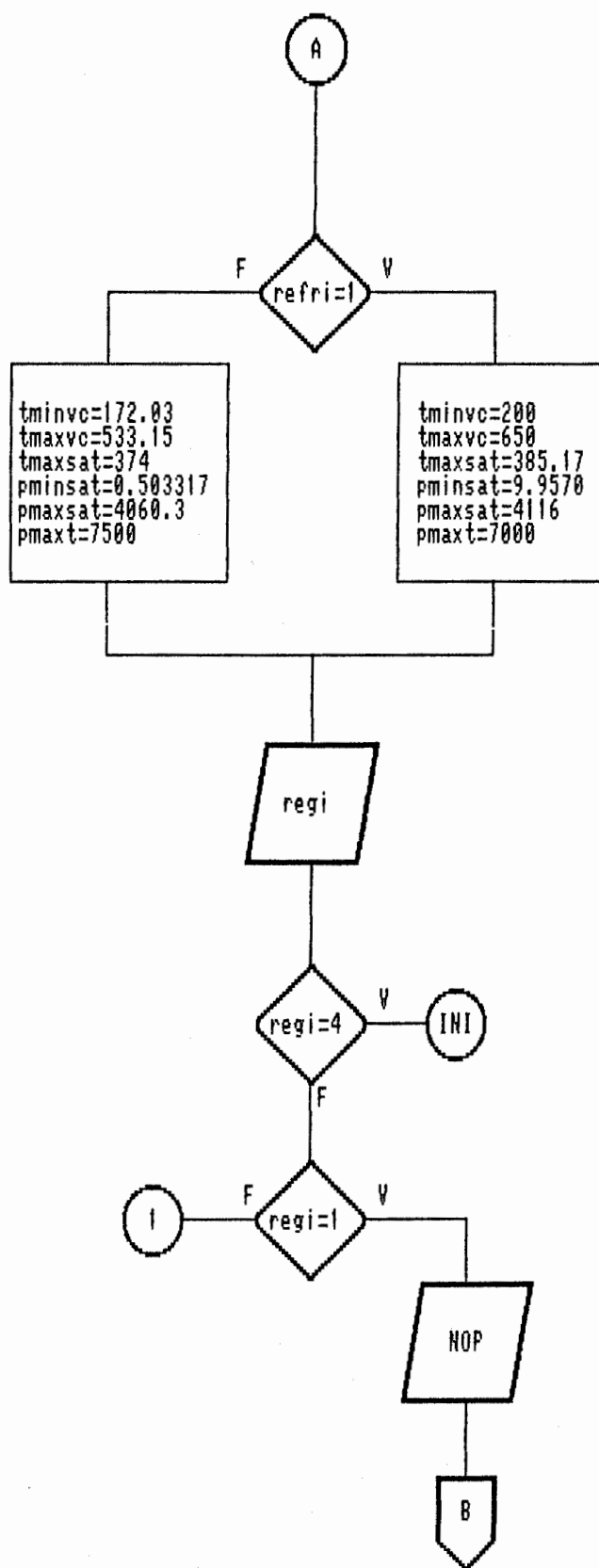
y, utilizando las ecuaciones (30a) y (30b), tendremos:

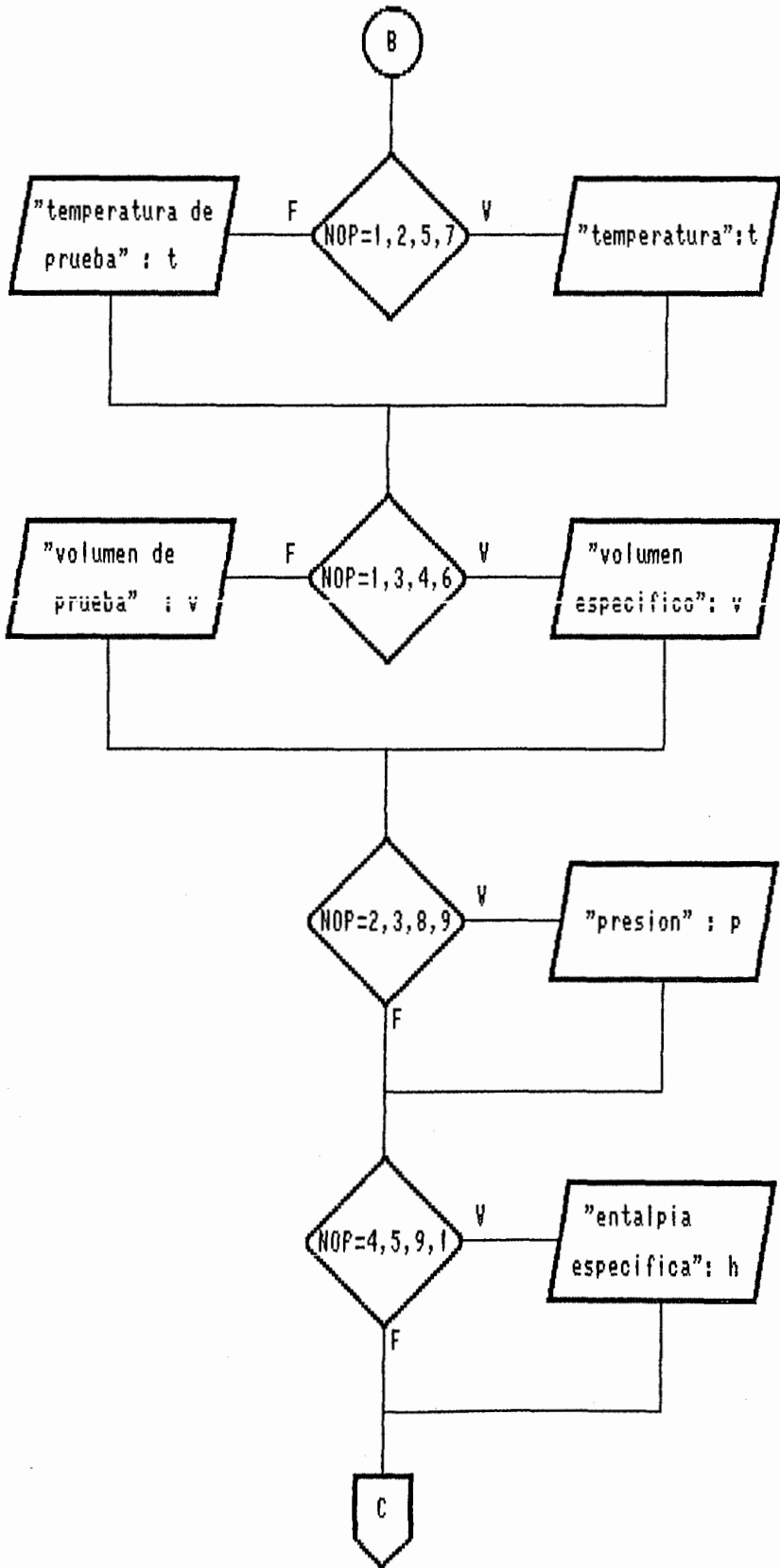
$$s = a \ln|T| + bT + cT^2/2 + dT^3/3 - fT^{-2}/2 - a \ln T_0 - bT_0 - cT_0^2/2 - dT_0^3/3 + fT_0^{-2}/2 + R \ln(v - b) - \phi(B_2 + B_3\phi/2 + B_4\phi^2/3 + B_5\phi^3/4) + [(k\phi e^{-k/\phi})/T_0] \cdot (C_2 + C_3\phi/2 + C_4\phi^2/3 + C_5\phi^3/4) + s_0$$

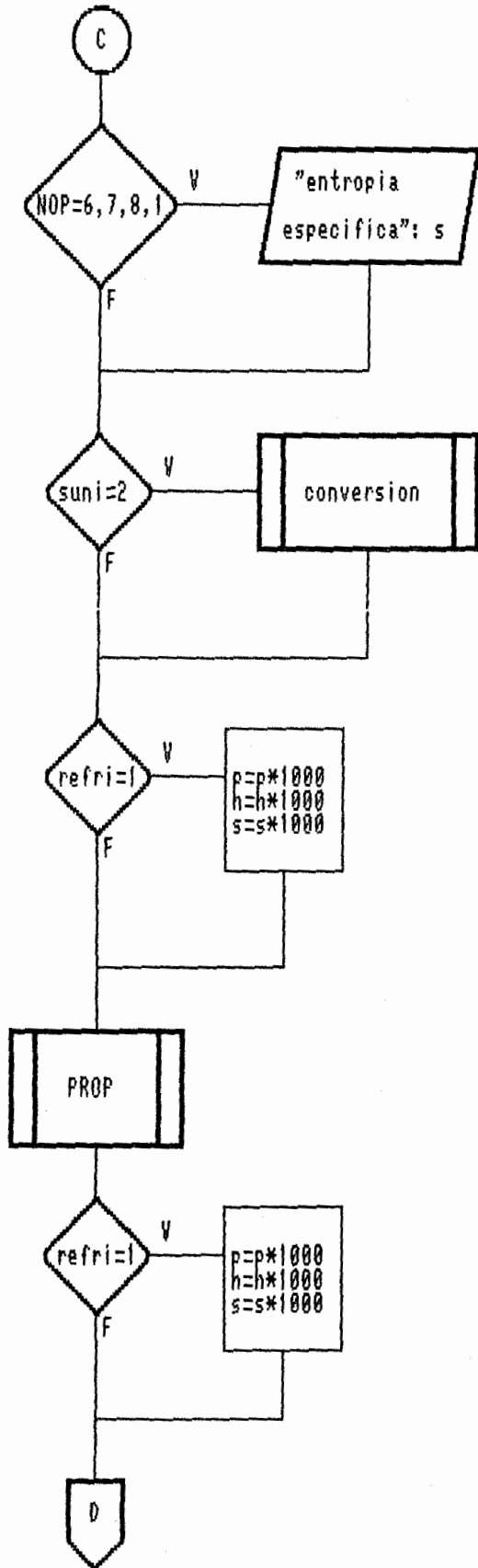
donde, los valores de las constantes que no se encuentran en el Apéndice I, son cero para esa substancia.

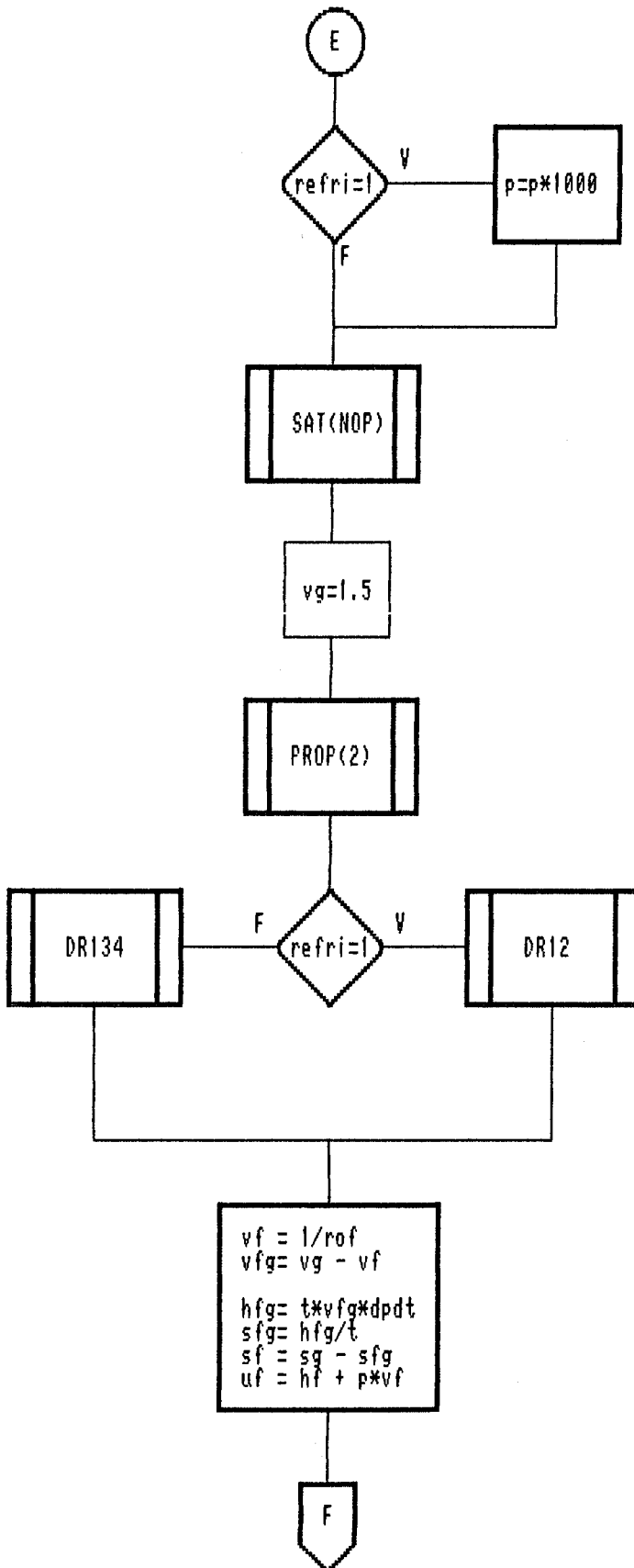
4.2. DIAGRAMA DE FLUJO

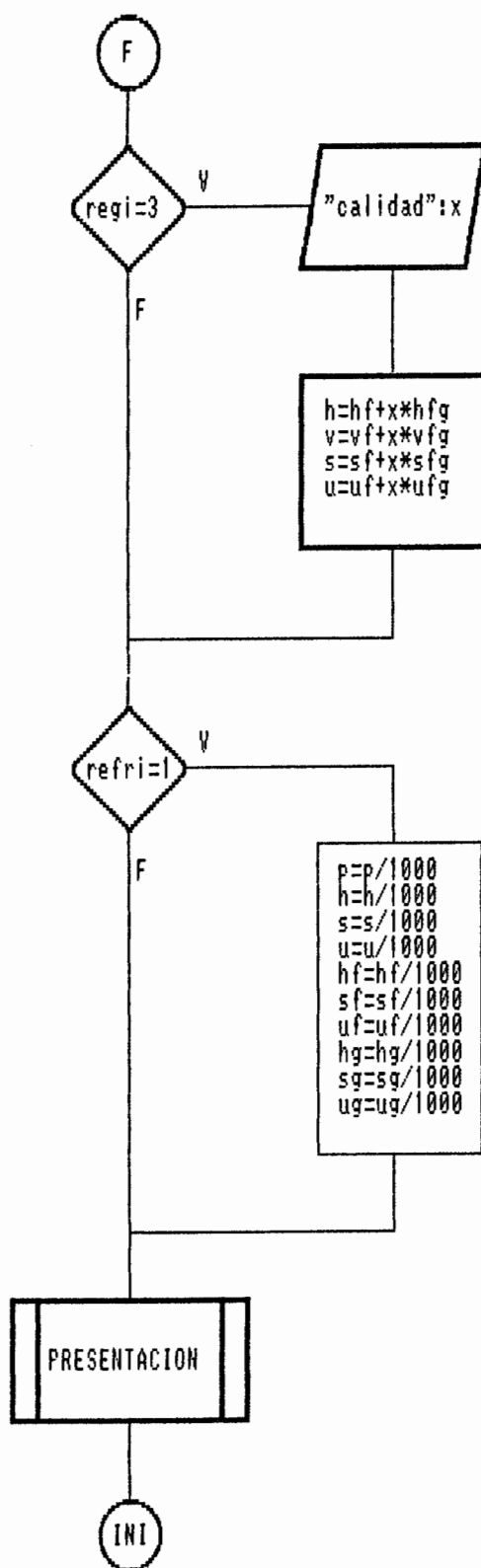


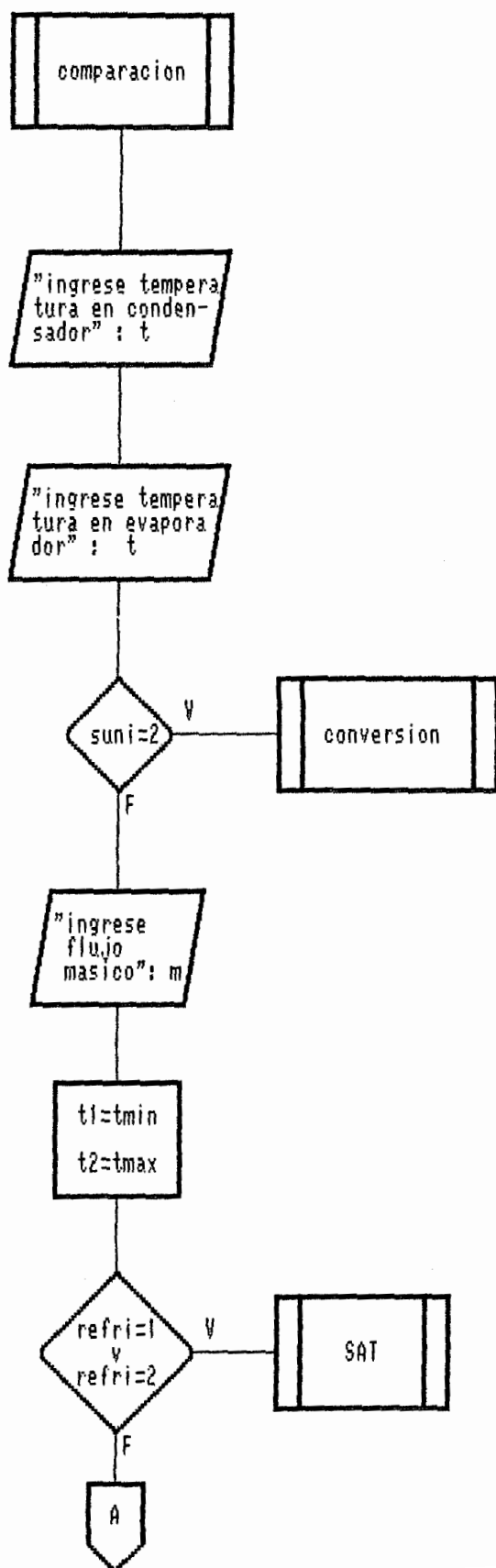


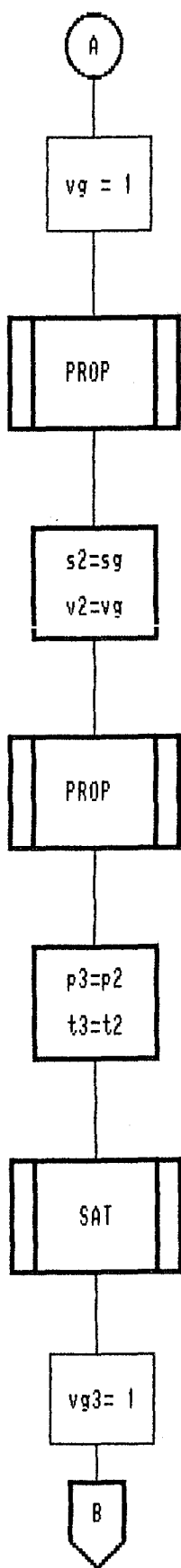


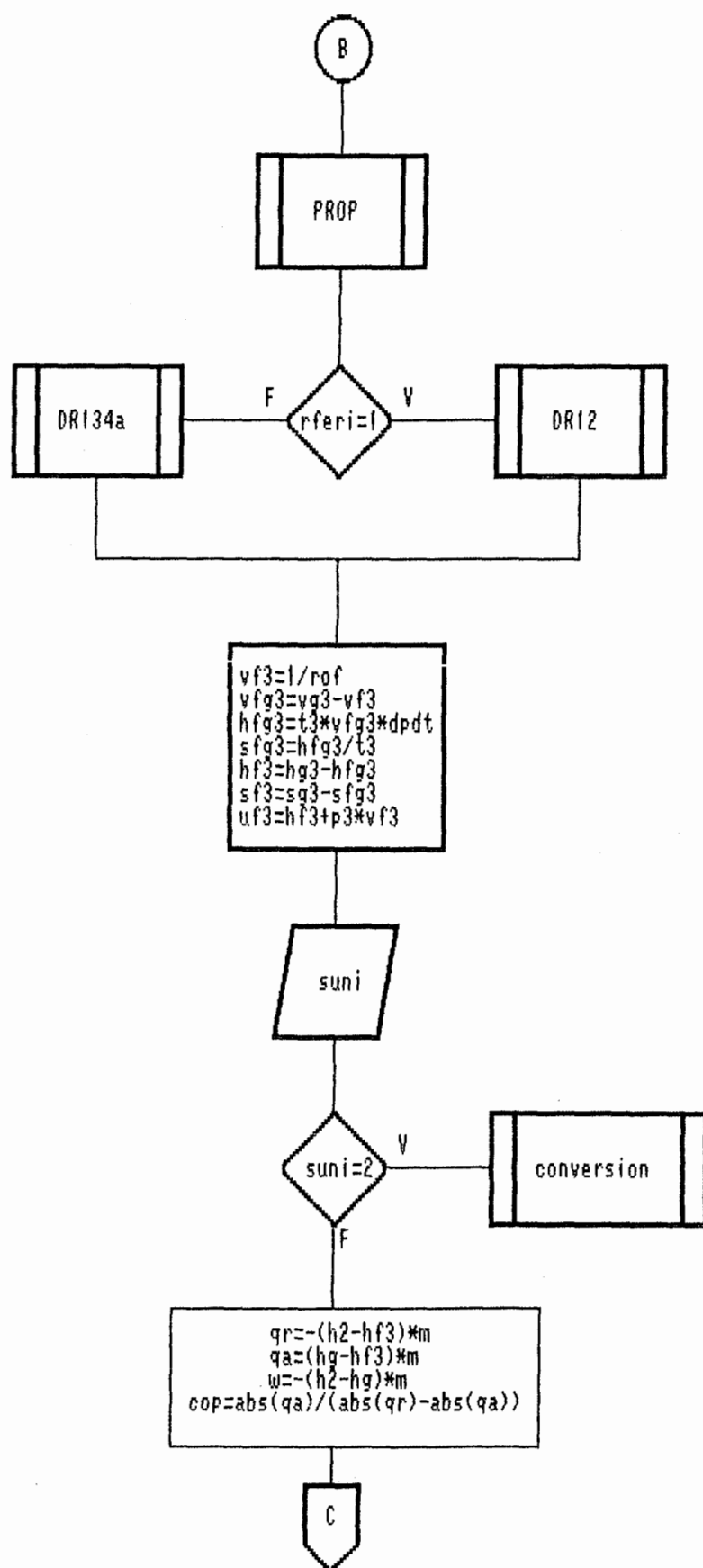


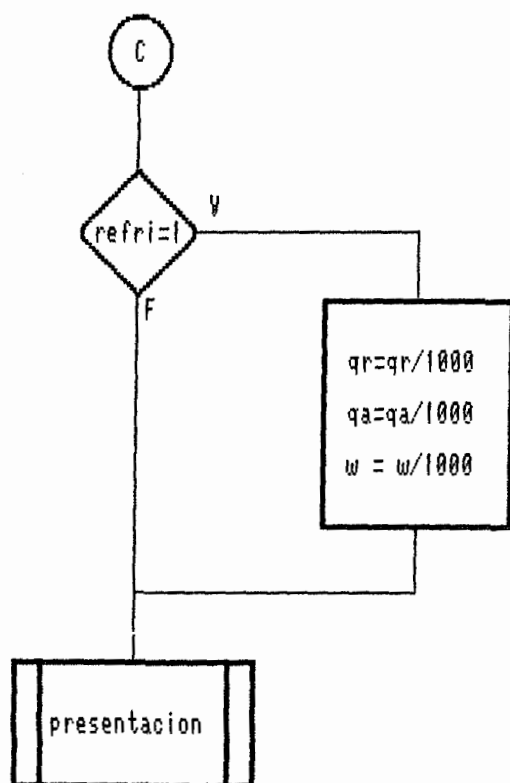


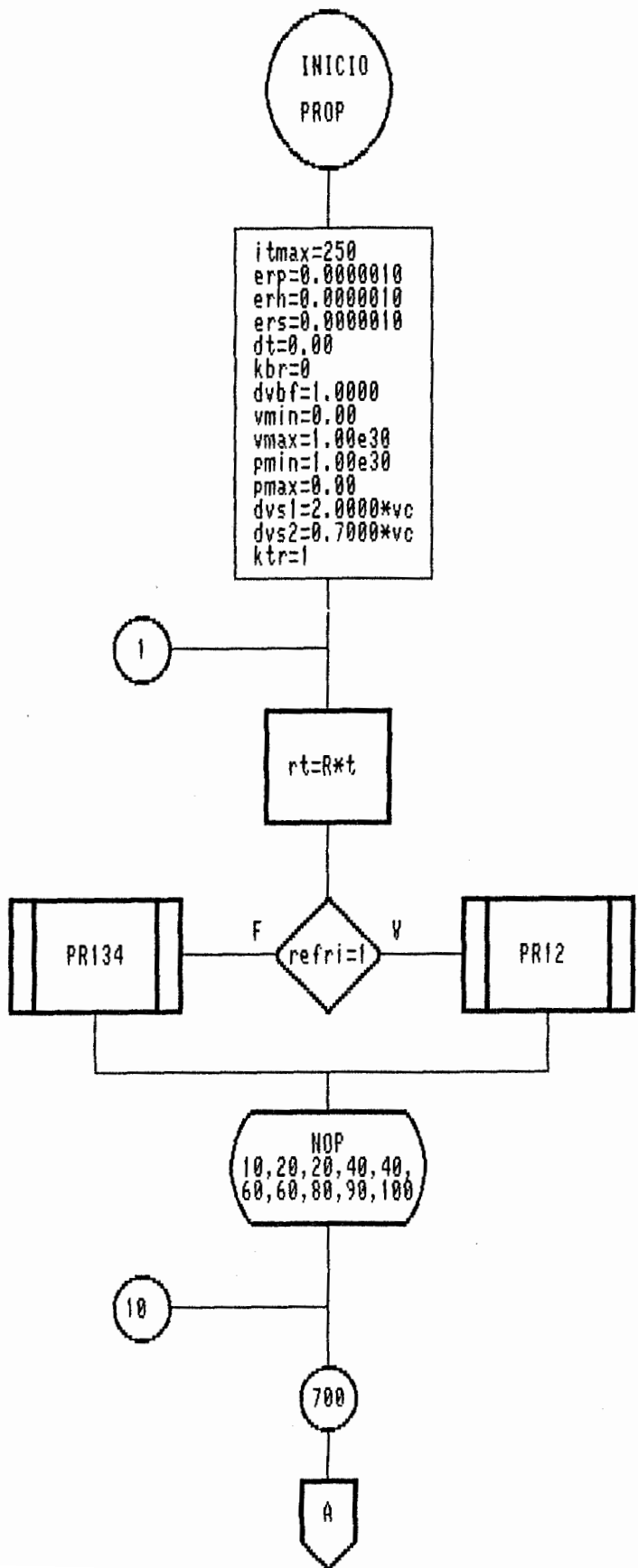


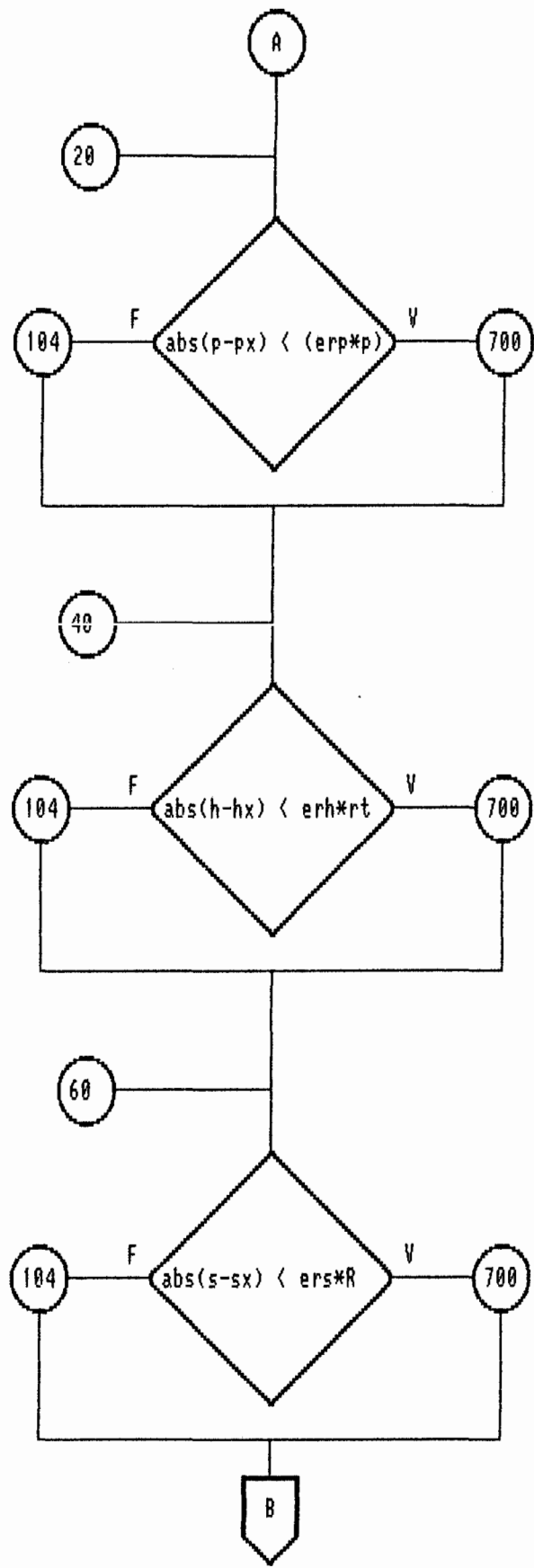


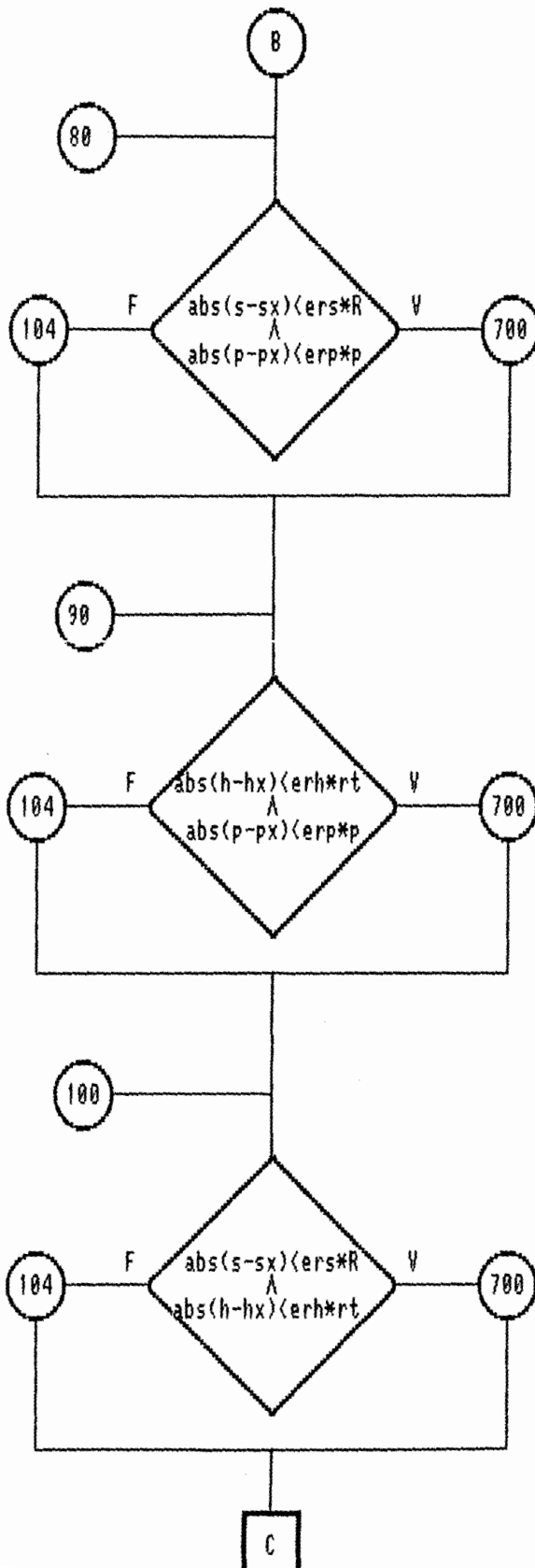


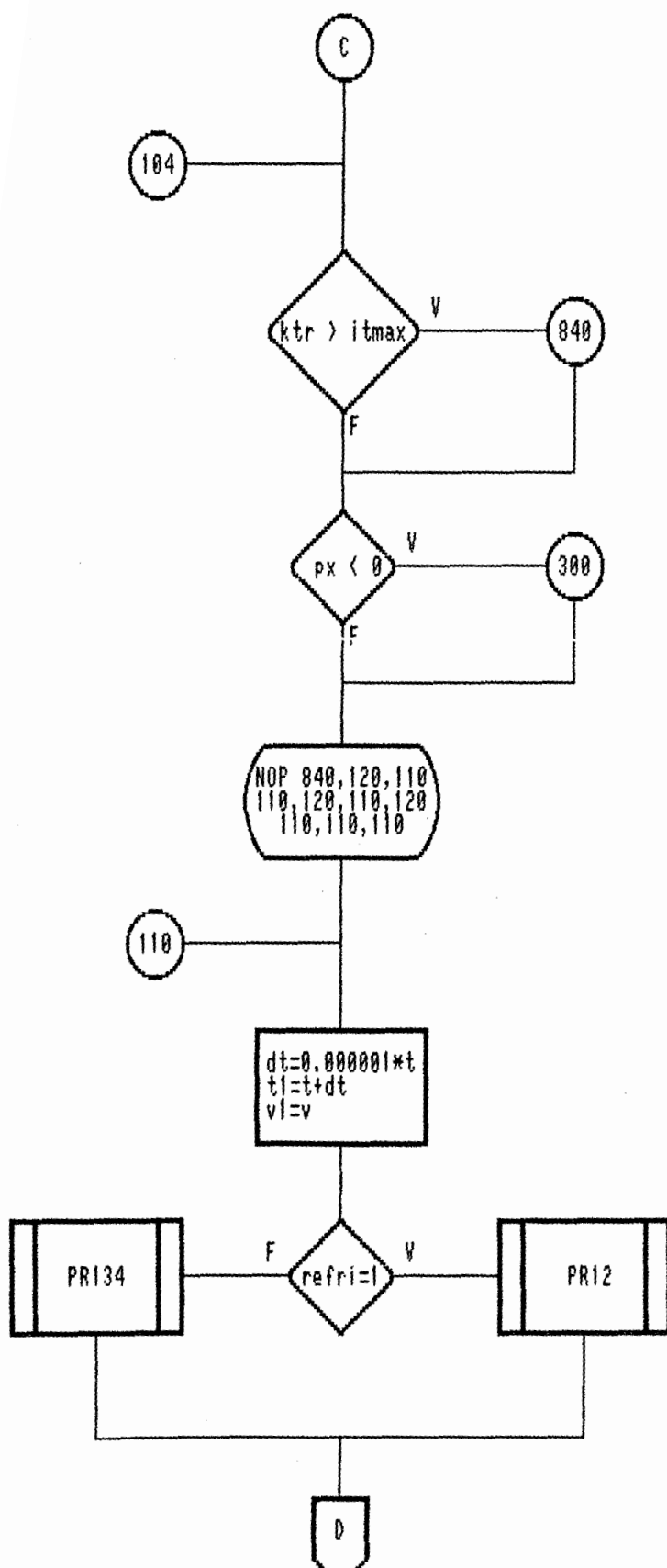


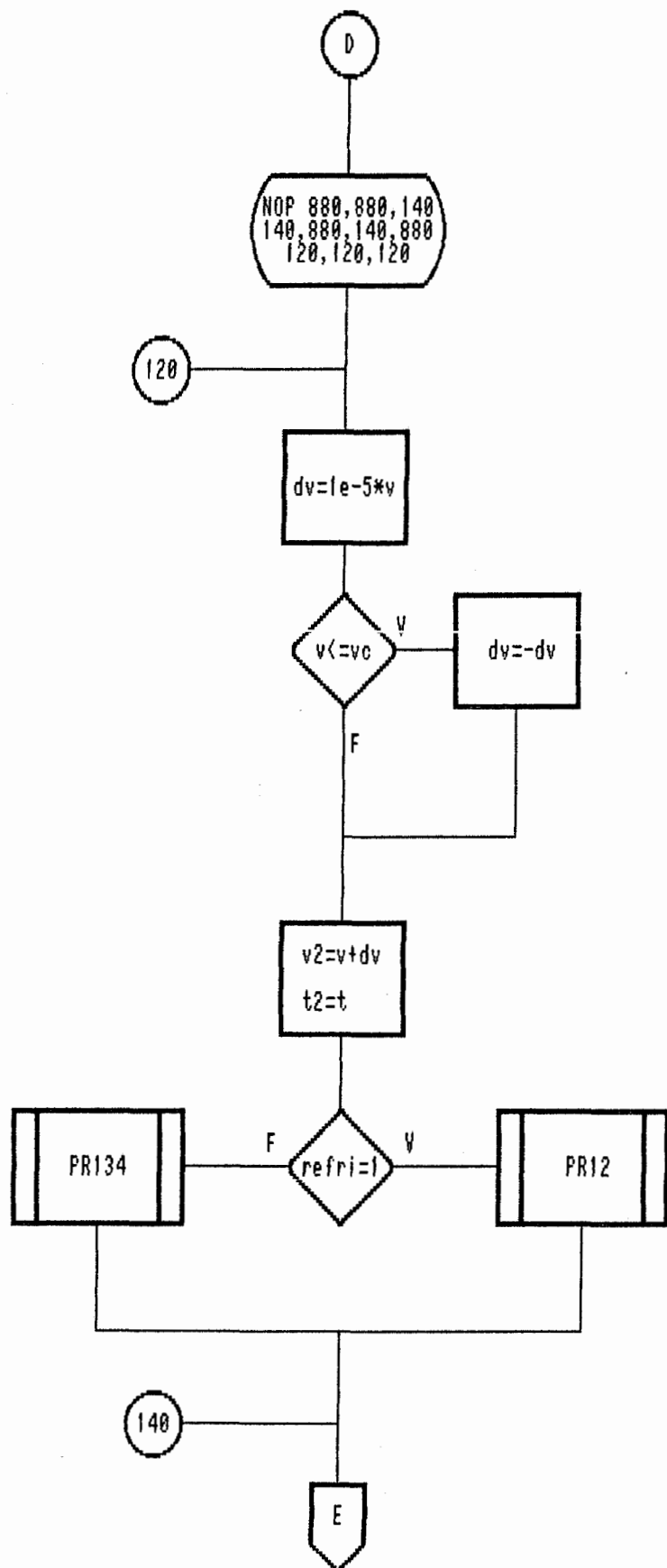


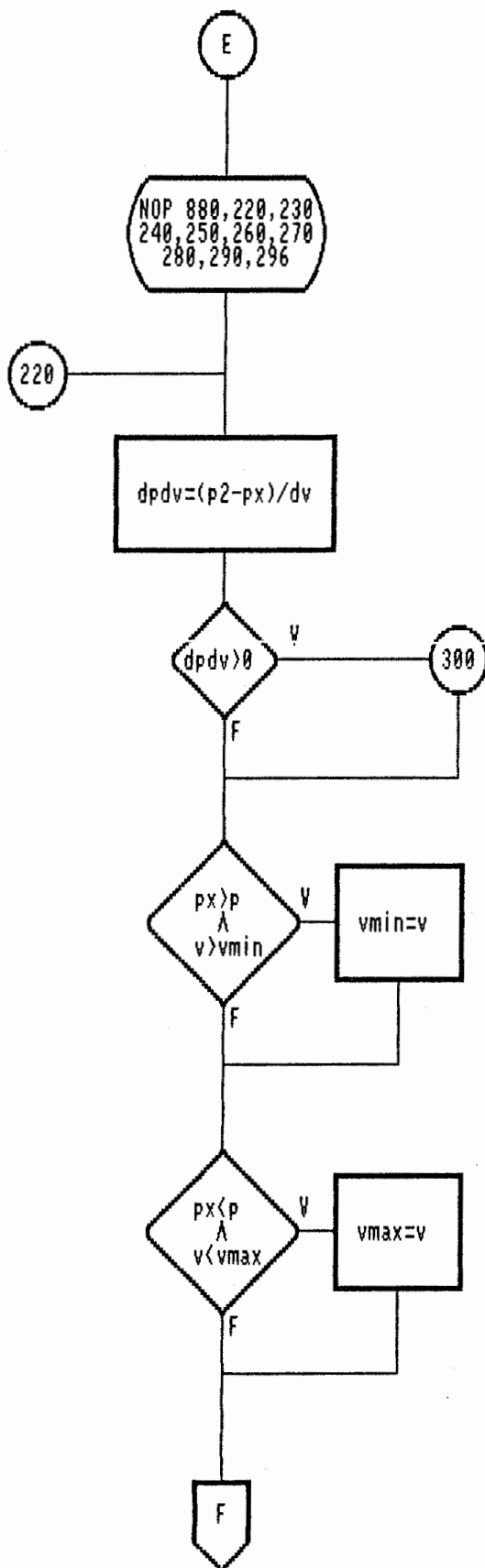


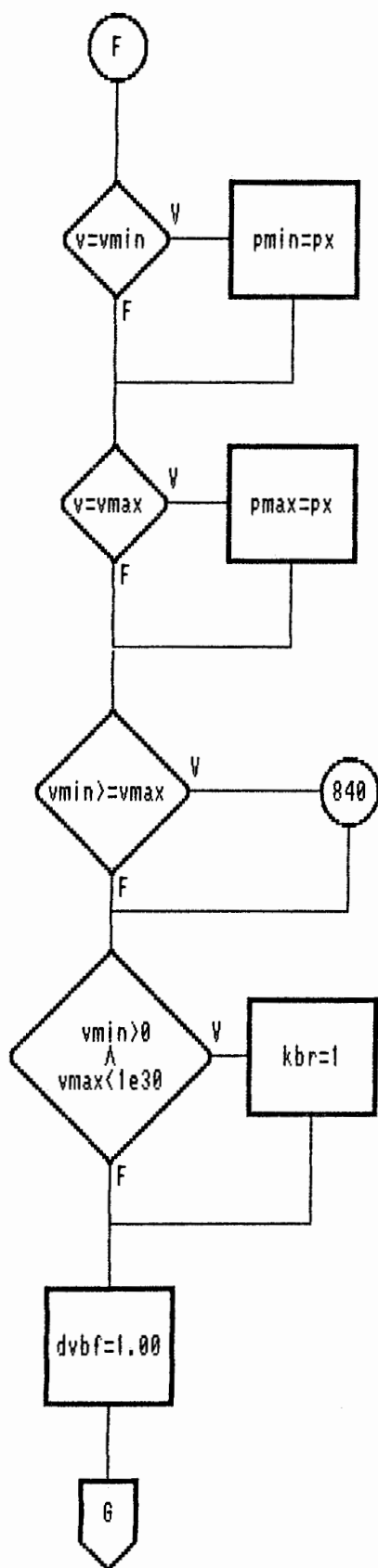


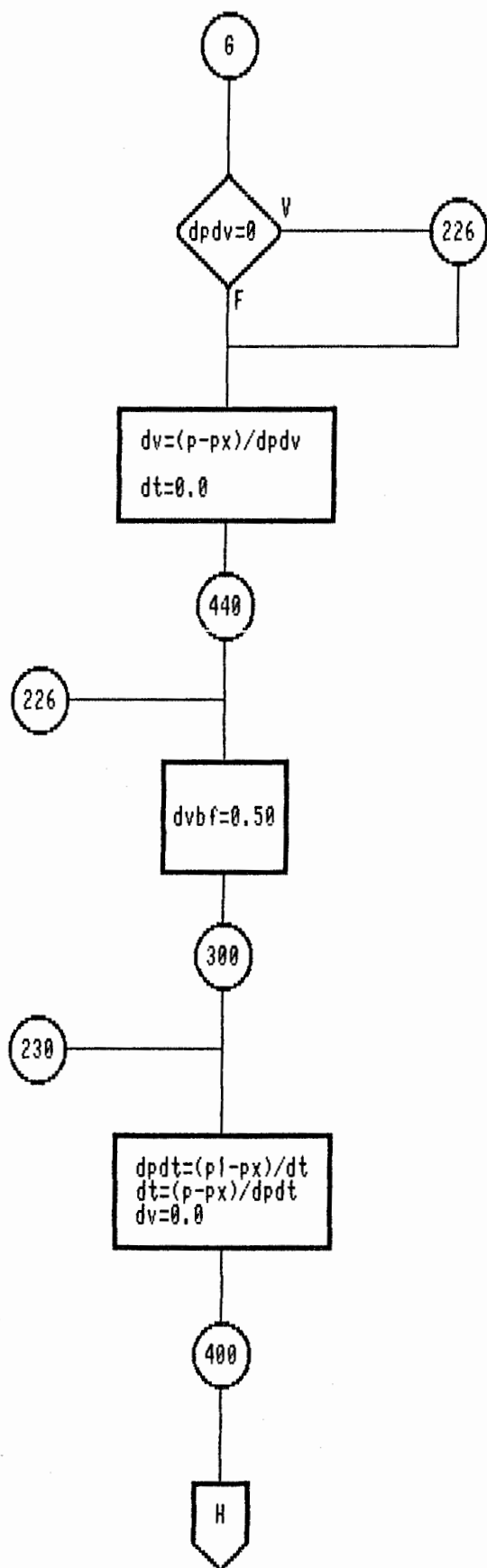


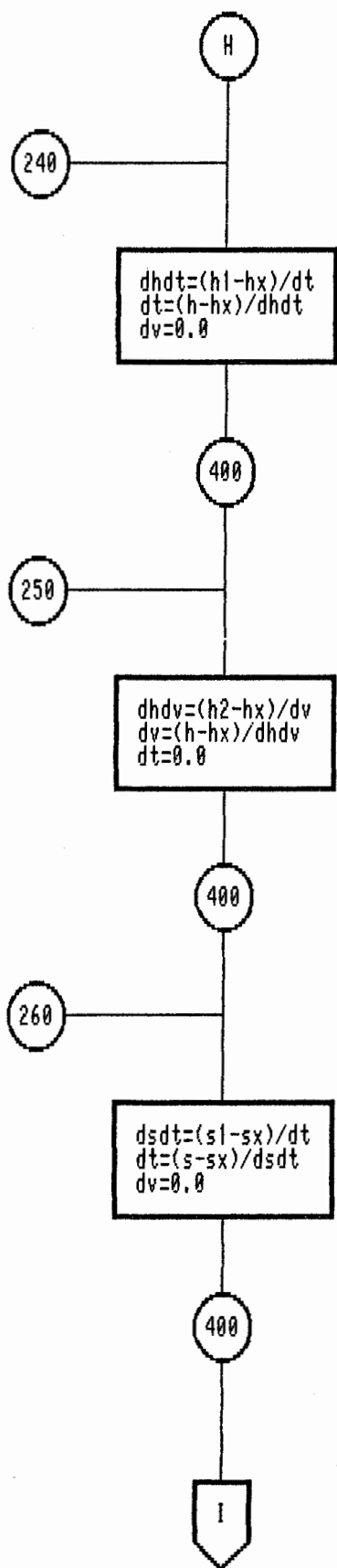


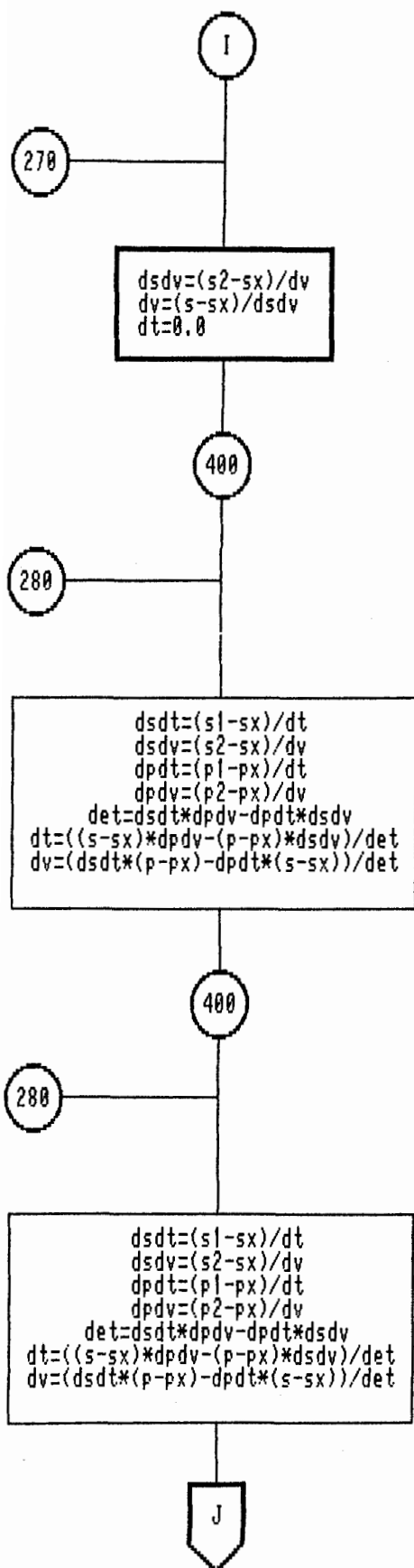


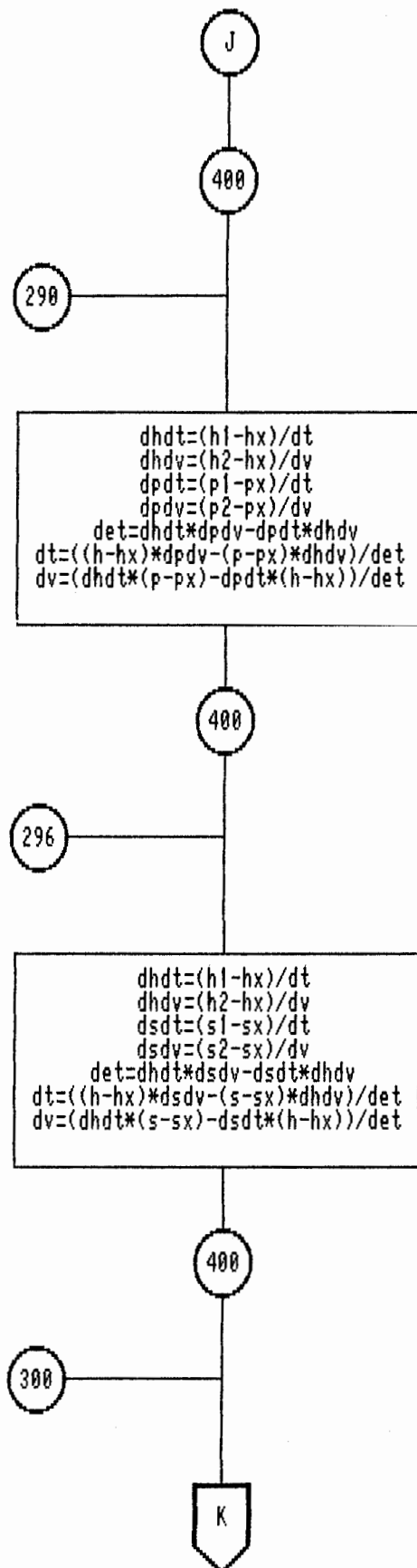


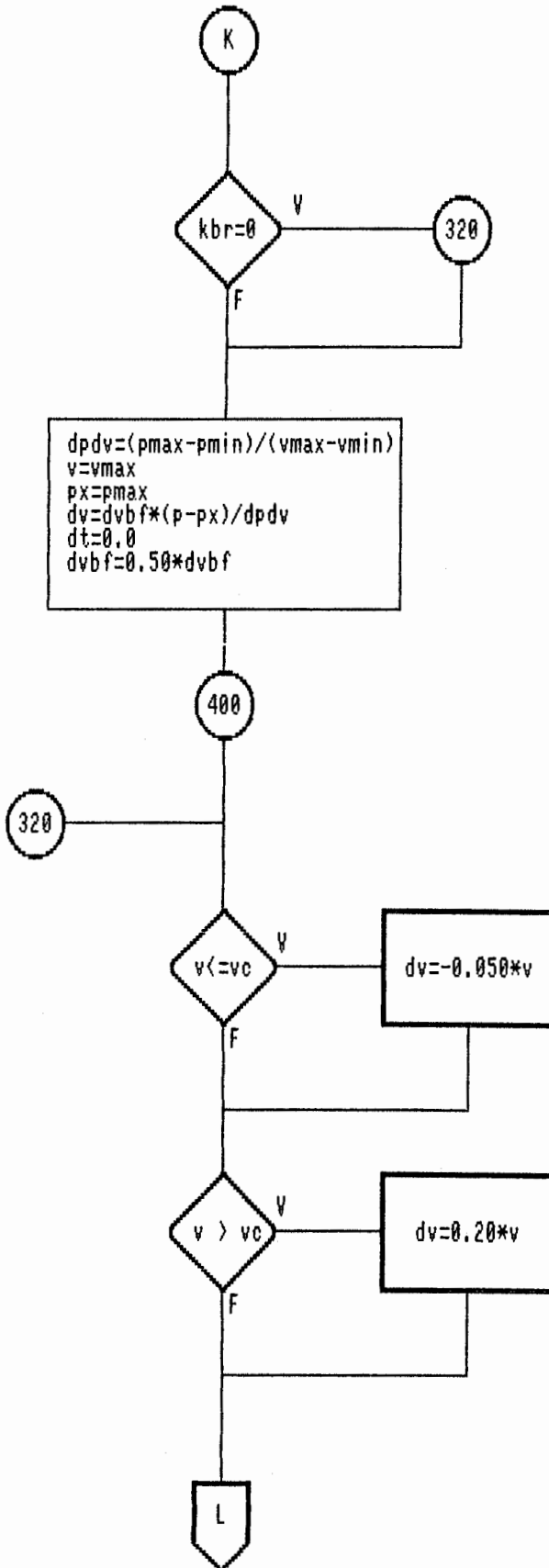


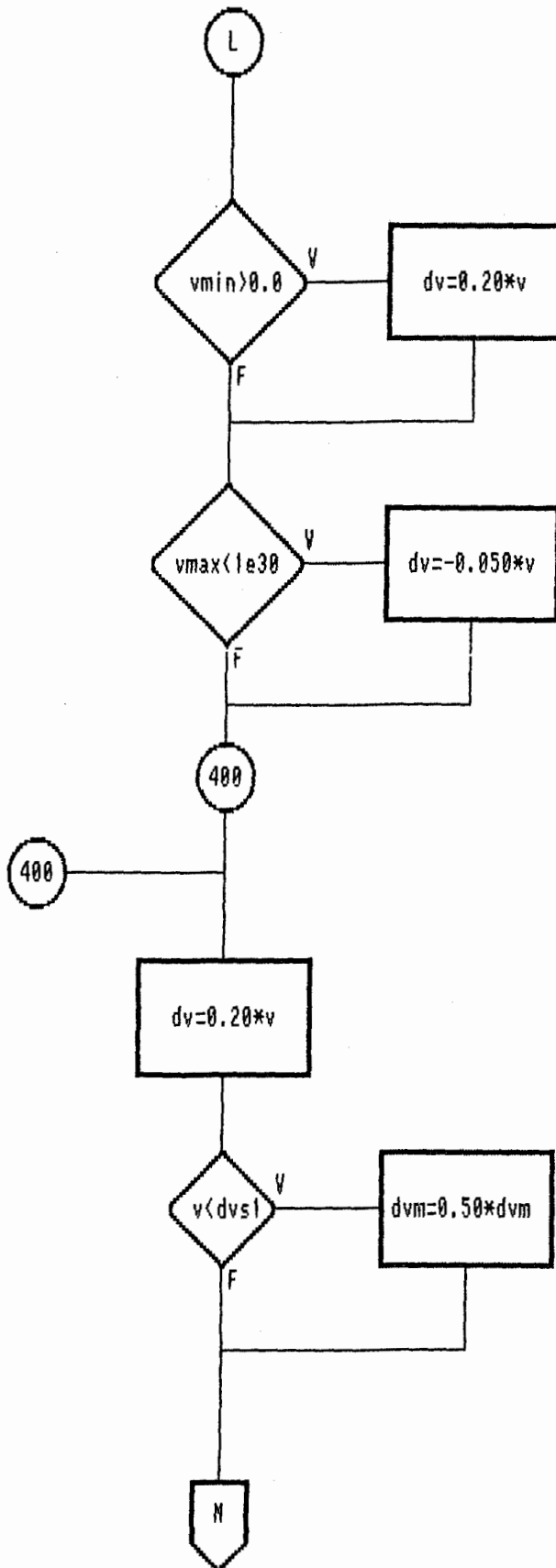


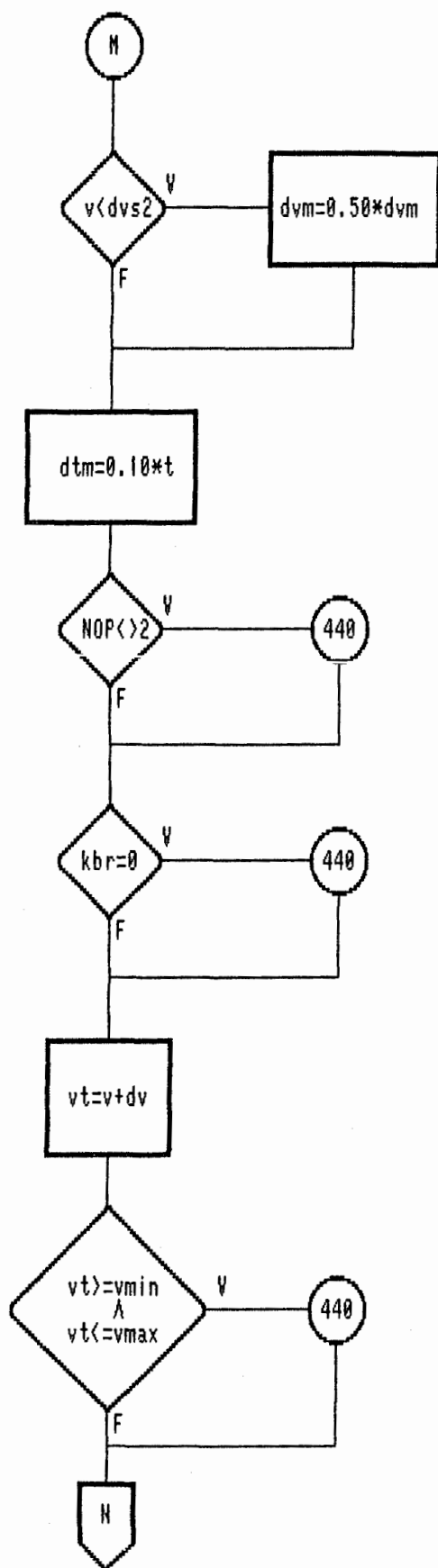


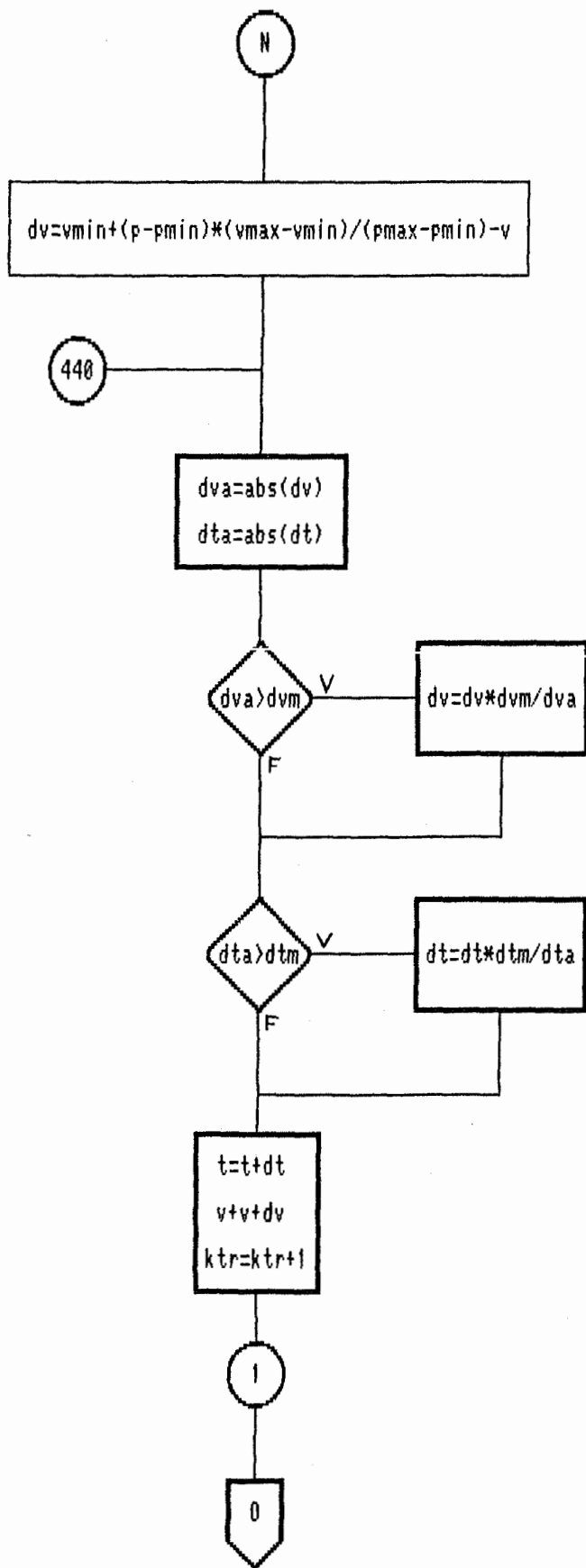


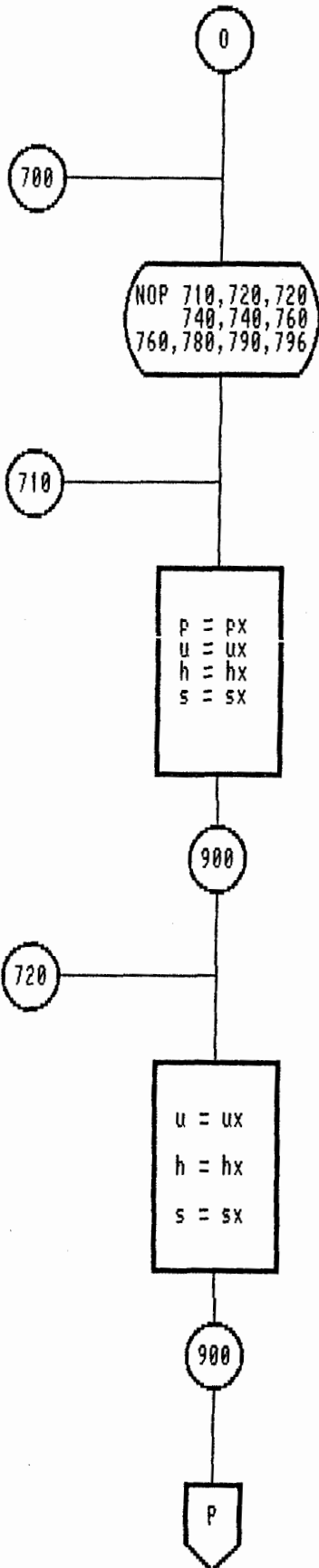


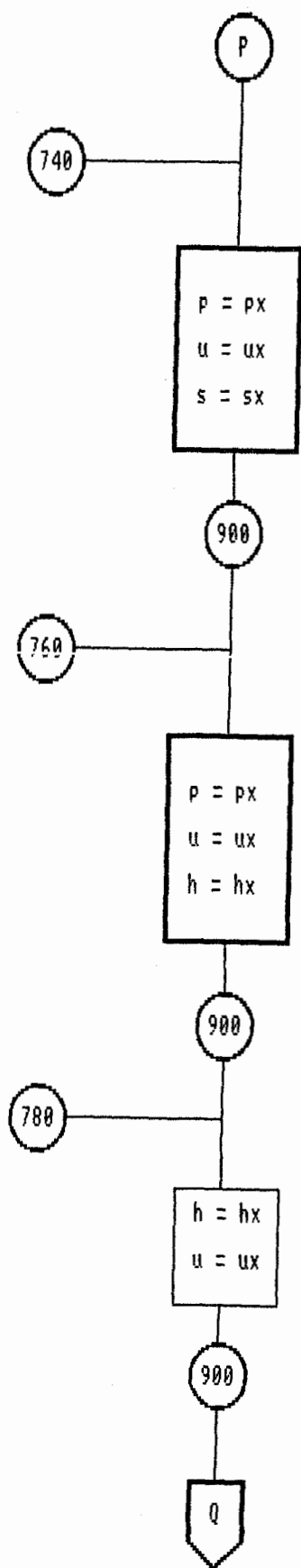


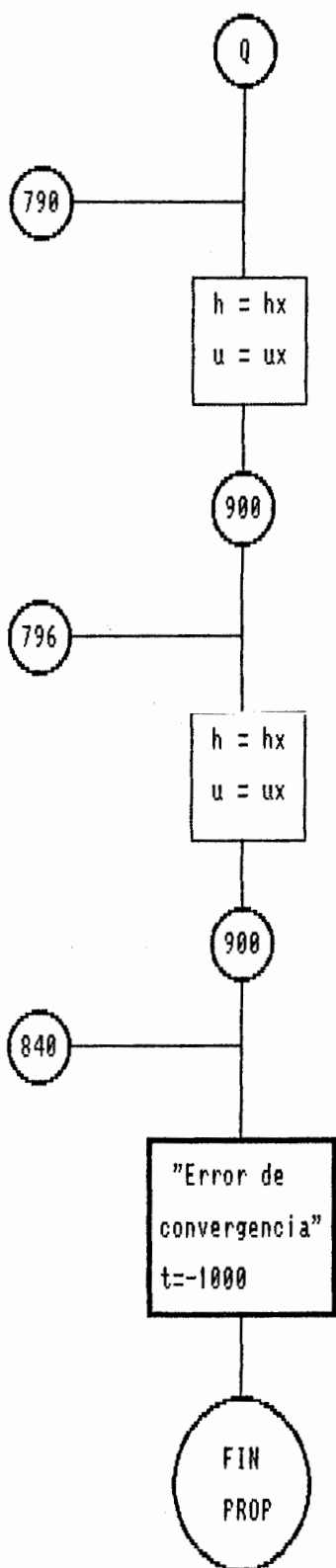


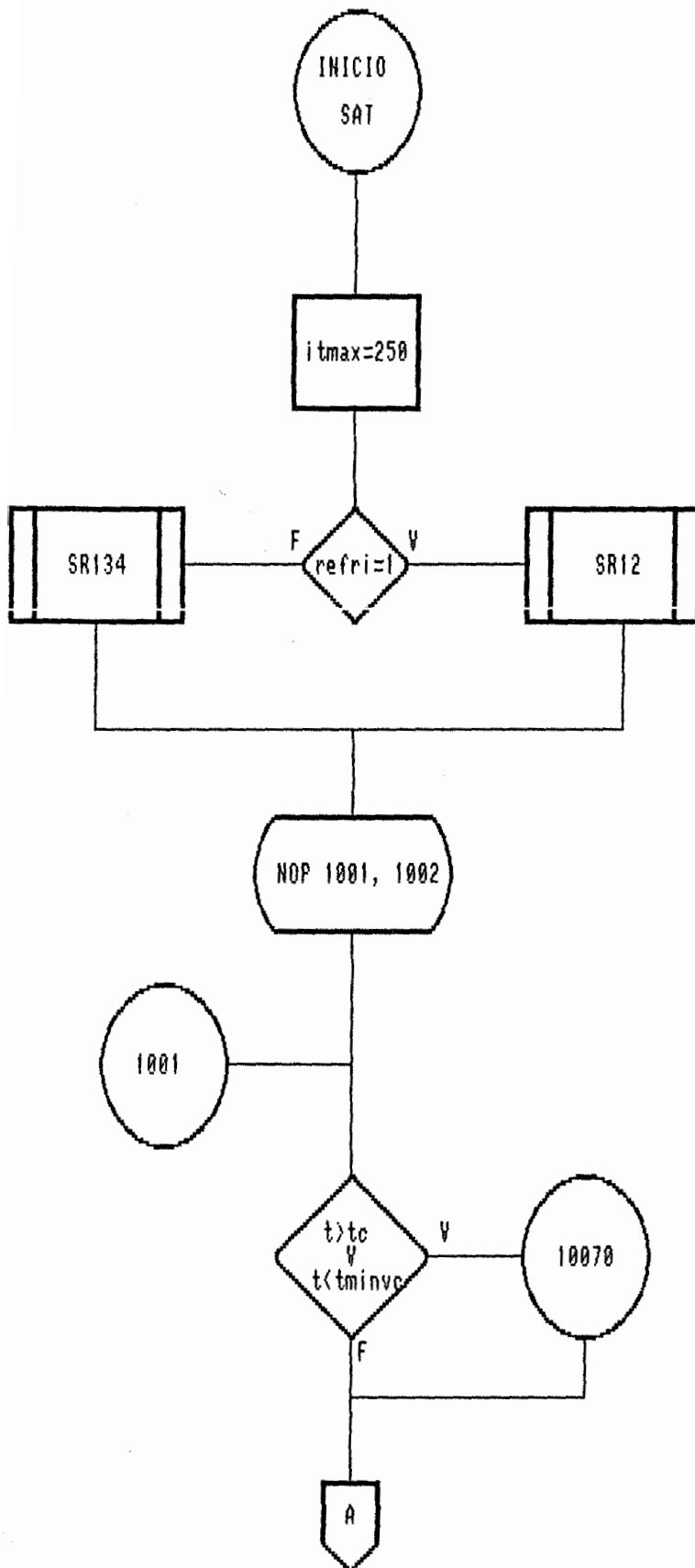


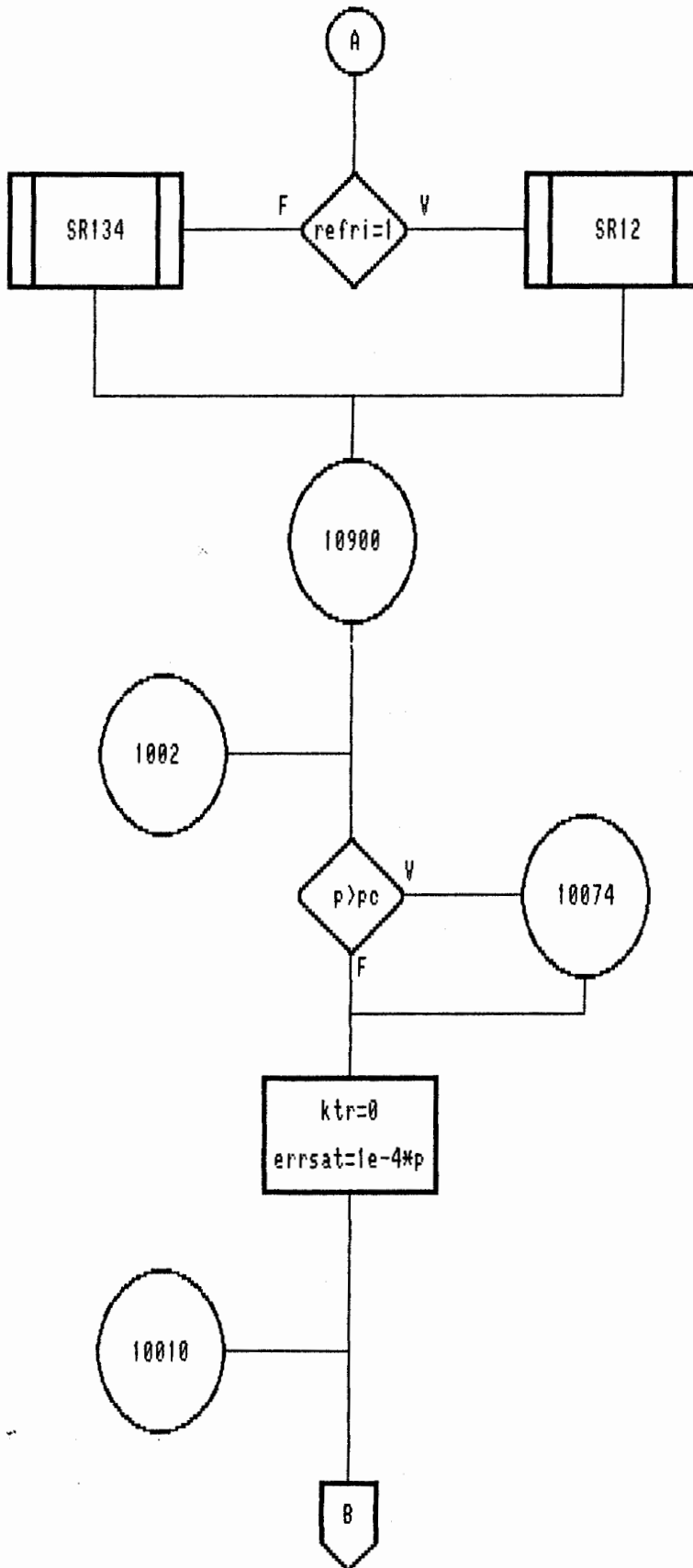


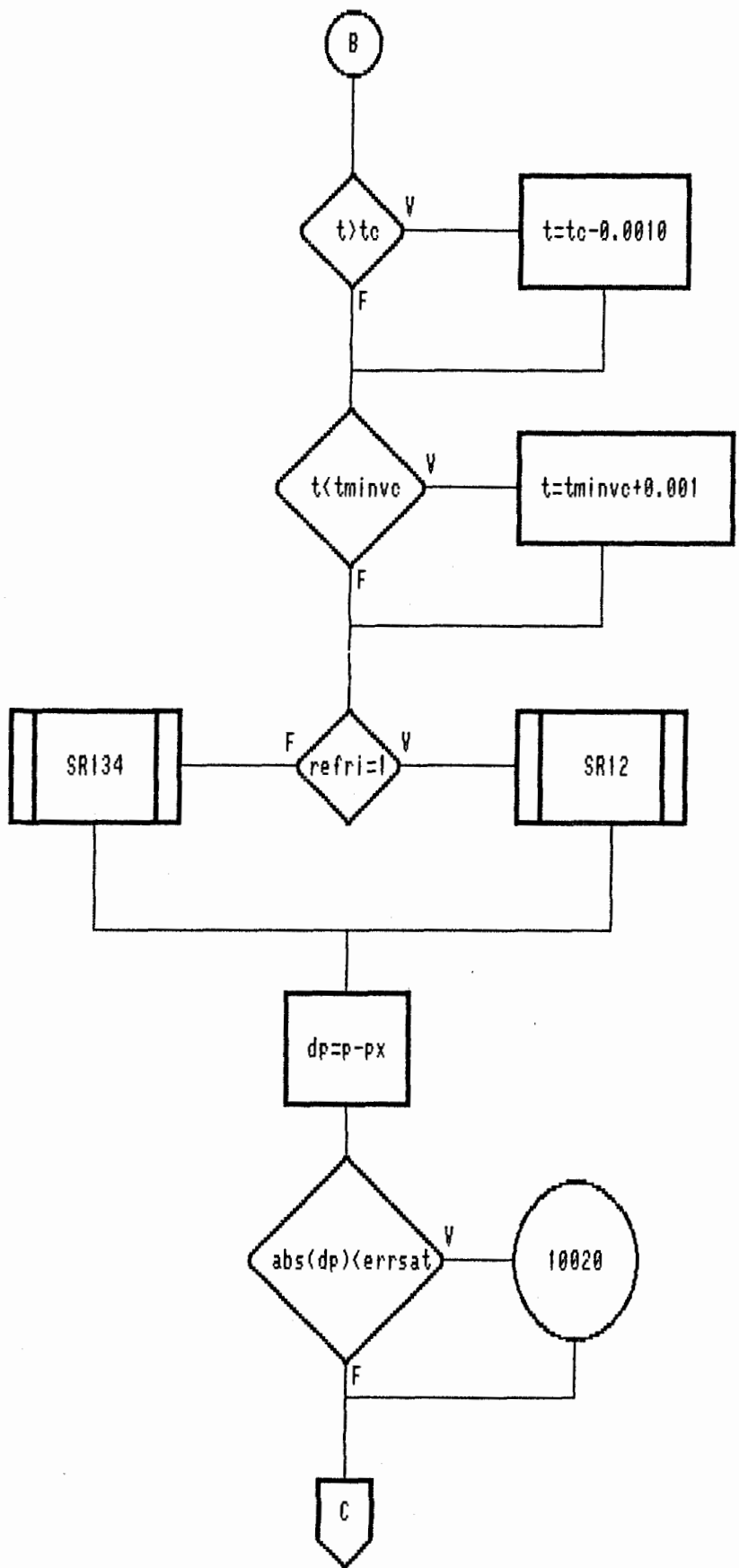


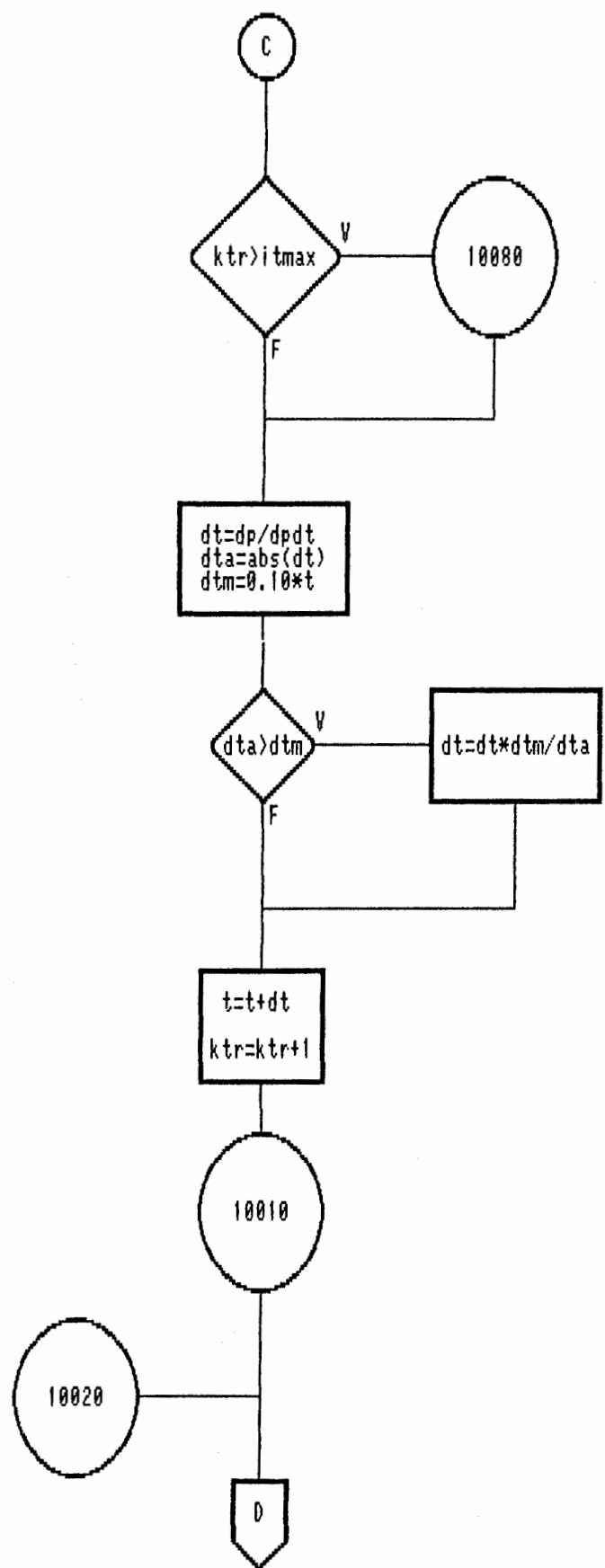


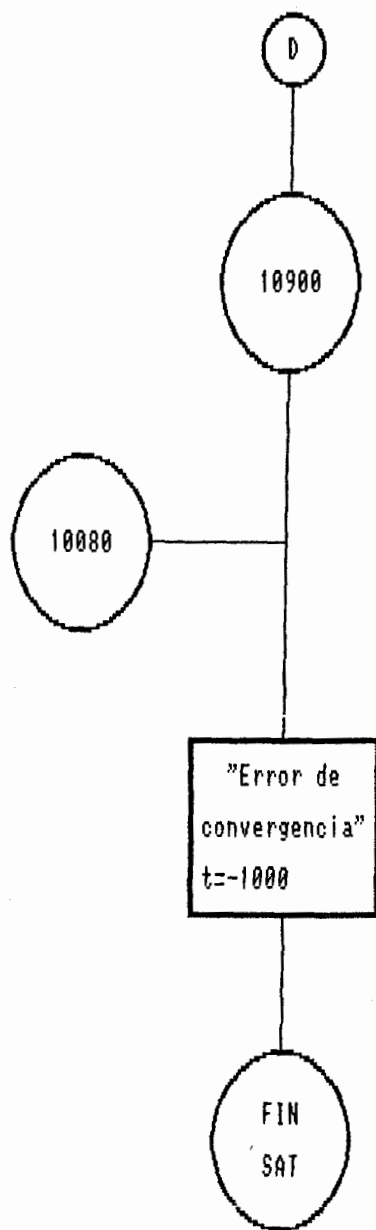












4.3. ALGORITMO

```

REM ***** PRINCIPAL *****

cls
on error goto errores
defdbl a-y
defstr z
inicio:
  compar=0
  refri=fnmenu(1,4,20,10,50,17)
  if refri = 4 then cls : end
  suni=fnmenu(2,3,20,10,50,16)
  if suni = 3 then inicio
  if refri = 3 then goto comparacion
  if refri=1 then
    tminvc=200.0
    tmaxvc=650.0
    tmaxsat=385.170
    pminsat=9.9570
    pmaxsat=4116.0
    pmart=7000.00
  else
    tminvc=172.030
    tmaxvc=533.150
    tmaxsat=374.00
    pminsat=0.5033170
    pmaxsat=4060.300
    pmart=7500.000
  end if
  regi=fnmenu(3,4,20,10,50,19)
  if regi=4 then inicio
  select case regi
  case 1
    nop=fnmenu(4,11,20,5,40,20)
    if nop=11 then inicio
    call presunit(suni)
    f=5
    if nop= 1 or nop =2 or nop =5 or nop =7 then
      f=f+1
    do
      locate f,5 : input " temperatura          : ",t
      if suni = 2 then call conversion(t,1,1,1,1,1,suni)
      loop until t > tminvc and t < tmaxvc
    else
      f=f+1
    do
      locate f,5 : input " temperatura de prueba : ",t
      if suni = 2 then call conversion(t,1,1,1,1,1,suni)

```

```

loop until t > tminvc and t < tmarvc
end if
if nop= 1 or nop =3 or nop=4 or nop =6 then
  f=f+1
  do
    locate f,5 : input " volumen especifico      : ",v
    loop until v > 0
  else
    f=f+1
    do
      locate f,5 : input " volumen de prueba      : ",v
      loop until v > 0
    end if
    if nop=2 or nop =3 or nop=8 or nop =9 then
      f=f+1
      do
        locate f,5 : input " presion              : ",p
        if suni = 2 then call conversion(1,p,1,1,1,1,suni)
        loop until p > pminsat and p < pmaxt
      end if
    if nop=4 or nop =5 or nop=9 or nop =10 then
      f=f+1
      locate f,5 : input " entalpia especifica    : ",h
    end if
    if nop=6 or nop =7 or nop=8 or nop =10 then
      f=f+1
      locate f,5 : input " entropia especifica    : ",s
    end if
    if suni = 2 then call conversion(1,1,v,u,h,s,suni)
    if refri=1 then
      p=p*1000
      h=h*1000
      s=s*1000
    end if
    call prop(t,p,v,u,h,s,nop,refri)
    if refri=1 then
      p=p/1000
      h=h/1000
      s=s/1000
      u=u/1000
    end if
    call presentacion(suni,regi)

```

case 2,3:

```

nop=fnmenus(5,3,20,5,40,12)
if nop = 3 then inicio
call presunit(suni)
f=5
if nop=1 then
  f=f+1
  do
    locate f,5 : input " temperatura de saturacion: ",t
    if suni = 2 then call conversion(t,p,v,u,h,s,suni)

```



BIBLIOTEC.



BIBLIOTEC.

```

loop until t > tminvc and t < tmaxvc
else
  f=f+1
  do
    locate f,5 :input " presion de saturacion : ",p
    if suni = 2 then call conversion(t,p,v,u,h,s,suni)
    loop until p > pminsat and p < pmaxsat
  end if
  if refri=1 then p=p*1000
  call sat(t,p,dpdt,nop,refri)
  if t=-1000 then call pausa: goto inicio
  vg=1.5
  call prop(t,p,vg,ug,hg,sg,2,refri)
  if t=-1000 then call pausa: goto inicio
  if refri=1 then call dr12(t,rof) else call dr134(t,rof)
  vf=1/rof
  vfg=vg-vf
  hfg=t*vfg*dpdt
  sfg=hfg/t
  hf=hg-hfg
  sf=sg-sfg
  uf=hf+p*vf
  if regi=3 then
    locate 7,5 :input " calidad ( x ) : ",x
    h=hf+x*hfg
    v=vf+x*vfg
    s=sf+x*sfg
    u=uf+x*ufg
  end if
  if refri=1 then
    p=p/1000: h=h/1000: s=s/1000: u=u/1000
    hf=hf/1000: sf=sf/1000: uf=uf/1000
    hg=hg/1000: sg=sg/1000: ug=ug/1000
  end if
  call presentacion (suni,regi)
end select
goto inicio

comparacion:
compar=1
call presunit(suni)
do
  locate 5,5 :print "
  locate 5,5 :input " ingrese temperatura en condensador: ",tmax
  locate 6,5 :print "
  locate 6,5 :input " ingrese temperatura en evaporador : ",tmin
  if suni = 2 then call conversion(tmax,1,v,u,h,s,suni)
  if suni = 2 then call conversion(tmin,1,v,u,h,s,suni)
loop until tmin >= 200 and tmax <= 500 and tmax > tmin
do
  locate 7,5 :print "
  locate 7,5 :input " ingrese flujo masico : ",m
loop until m >= 0
t1=tmin

```

```

t2=tmax
for refri = 1 to 2
  call sat(t1,p1,dpdt,1,refri)
  if t1=-1000 then call pausa: goto inicio
  vg=1
  call prop(t1,p1,vg,ug,hg,sg,2,refri)
  if t1=-1000 then call pausa: goto inicio
  s2=sg      :      v2=vg
  call prop(t2,p2,v2,u2,h2,s2,7,refri)
  p3=p2      :      t3=t2
  call sat(t3,p3,dpdt3,2,refri)
  if t3=-1000 then call pausa: goto inicio
  vg3=1
  call prop(t3,p3,vg3,ug3,hg3,sg3,2,refri)
  if t3=-1000 then call pausa: goto inicio
  if refri=1 then call dr12(t3,rof) else call dr134(t3,rof)
  vf3=1/rof
  vfg3=vg3-vf3
  hfg3=t3*vfg3*dpdt3
  sfg3=hfg3/t3
  hf3=hg3-hfg3
  sf3=sg3-sfg3
  uf3=hf3+p3*vf3
  if suni=2 then
    call conversion(1,1,1,1,h2,1,1)
    call conversion(1,1,1,1,hf3,1,1)
    call conversion(1,1,1,1,hg,1,1)
  end if
  qr=-(h2-hf3)*m
  qa=(hg-hf3)*m
  w=-(h2-hg)*m
  cop=abs(qa)/(abs(qr)-abs(qa))
  if refri=1 then
    qr=qr/1000
    qa=qa/1000
    w=w/1000
  end if
  call presentacion(suni,regi)
next
call pausa
call presunit(suni)
goto inicio
end

REM ***** PRESENTACION *****

sub presentacion(suni,regi)
shared t,p,v,u,h,s,vf,uf,hf,sf,vg,ug,hg,sg,qr,qa,w,cop,refri,compar,t1,t2
if compar=0 then
  if regi=1 then
    if suni = 2 then call conversion(t,p,v,u,h,s,1)
    if suni = 1 then "???" " SISTEMA INTERNACIONAL " else "???" " SISTEMA INGLES "
    print using "\ \ ####.### ";t = ";t
    print using "\ \ ####.#### ";p = ";p

```

```

    print using "\ \ ###.###" ;"v = ";v,"h = ";h,"s = ";s
else
if suni = 2 then call conversion(t,p,v,u,h,s,l)
if suni = 1 then ??? " SISTEMA INTERNACIONAL " else ??? " SISTEMA INGLES "
    if suni = 2 then call conversion(l,l,vf,uf,hf,sf,l)
    if suni = 2 then call conversion(l,l,vg,ug,hg,sg,l)
    print using "\ \ ###.###" ;"Tsat = ";t
    print using "\ \ #####.####" ;"Psat = ";p
    print using "\ \ ###.###" ;"vf = ";vf,"hf = ";hf,"sf = ";sf
    print using "\ \ ###.###" ;"vg = ";vg,"hg = ";hg,"sg = ";sg
    if regi = 3 then print using "\ \ ###.###" ;"vx = ";v,"hx = ";h,"sx = ";s
end if
call pausa
else
    tcon=t2:teva=t1
    if suni = 2 then call conversion(tcon,l,l,l,l,l)
    if suni = 2 then call conversion(teva,l,l,l,l,l)
    if refr=1 then print using "\ \ ###.###" ;"Temperatura de evaporador ";teva
        "Temperatura de condensador ";tcon
    if refr=1 then print "REFRIGERANTE R12 " else print "REFRIGERANTE R134a "
    print using "\ \ ###,###.###" ;" Q1 = ";qa
    print using "\ \ ###,###.###" ;" Q2 = ";qr
    print using "\ \ ###,###.###" ;" W = ";w
    print using "\ \ ###.###" ;" COP = ";cop
end if
end sub

```

```
REM ***** PRESUNIT *****
```

```

sub presunit(suni)
cls
shared refri
if suni=1 then
locate 2,2 : print "t [°K] ,";
if refri=3 then
    print " Q1 [KW] , Q2 [KW] , W [KW] , m [Kg/sg] "
    print " t_eva.min [200°K] , t_cond.max [500°K]"
else
    print " p [KPa] , v [m^3/Kg] , h [KJ/Kg] , s [KJ/(Kg.*K)]"
end if
else
locate 2,2 : print "t [°F] ,";
if refri =3 then
    print " Q1 [BTU/sg] , Q2 [BTU/sg] , W [BTU/sg] , m [lb/sg] "
    print " t_evap.min [-99.5°F] , t_cond.max [440.3°F]"
else
    print " p [psia] , v [ft^3/lb] , h [BTU/lb] , s [BTU/(lb.*R)]"
end if
end if
end sub

```

REM ***** CONVERSION *****

```

sub conversion(t,p,v,u,h,s,ie)
shared refri
  if refri=1 then
    href=28.81074
    sref=0.13318
  else
    href=148.4
    sref=0.7967
  end if
  if ie=1 then
    t=(t-273.15)*(9/5)+32
    p=p/6.8947570000
    v=v*16.018000000
    h=(h-href)*0.43021
    s=(s-sref)*0.23901
  else
    t=273.15+(5/9)*(t-32)
    v=v/16.018000000
    p=p*6.8947570000
    h=h/0.43021+href
    s=s/0.23901+sref
  end if
end sub

```

REM ***** PR134 *****

```

sub pr134(t,px,v,ux,hx,sx)
  shared R,tc,vc,pc
  vc=0.00194
  pc=4.0603e+3
  tc=374.230005
  R=0.0815
  bv=3.755677e-4
  a2=-8.909485e-2
  a3=-1.016882e-3
  a4=1.778071e-5
  a5=-7.481440e-8
  b2=4.408654e-5
  b3=2.574527e-6
  b4=-4.016976e-8
  b5=1.670285e-10
  c2=-2.074834
  c3=2.142829e-2
  c4=-2.977911e-4
  c5=1.255922e-6
  k=4.599967
  t0=273.15
  a=3.154856
  b=-1.656054e-2
  c=4.353378e-5
  d=-3.754497e-8
  f=-3.023189e+4

```

```

J=1
rc=1/(v-bv)
px1=t*ro^2*(b2+b3*ro+b4*ro^2+b5*ro^3)
px2=ro^2*exp(-k*t/tc)*(c2+ro*c3+ro^2*c4+ro^3*c5)
px3=ro^2*(a2+ro*a3+ro^2*a4+ro^3*a5)
px=ro*t*R+px1+px2+px3
ux0=384.1765733
ux11=a*t+b*t^2/2+c*t^3/3+d*t^4/4-f/t
ux12=a*t0+b*t0^2/2+c*t0^3/3+d*t0^4/4-f/t0
ux1=ux11-ux12
ux21=ro*a2+ro^2*a3/2+ro^3*a4/3+ro^4*a5/4
ux22=exp(-k*t/tc)*(1+k*t/tc)*(ro*c2+ro^2*c3/2+ro^3*c4/3+ro^4*c5/4)
ux2=ux21+ux22
ux=ux1+ux2+ux0
hx=ux+(px+v*t)
sx1=a*log(t)+b*t+c*t^2/2+d*t^3/3-f/(t^2*2)
sx2=-a*log(t0)-b*t0-c*t0^2/2-d*t0^3/3+f/(t0^2*2)
sx3=R*log(v-bv)
sx4=(k/tc)*exp(-k*t/tc)*ro*(c2+ro*c3/2+ro^2*c4/3+ro^3*c5/4)
sx5=-ro*(b2+ro*b3/2+ro^2*b4/3+ro^3*b5/4)
sx0=1.9584825
sx=sx1+sx2+sx3+sx4+sx5+sx0

```

end sub

REM ***** DR134 *****

```

sub dr134(t,rof)
vc=0.00194
pc=4.0603e+3
tc=374.230005
R=0.0815
x=1-t/tc
af=5.281464e+2
bf=7.551834e+2
cf=1.028676e+3
df=-9.491172e+2
ef=5.935660e+2
rof=af+bf*x^(1/3)+cf*x^(2/3)+df*x+ef*x^(4/3)

```

end sub

REM ***** SR134 *****

```

sub sr134(t,psat,dpdt)
shared R,tc,vc,pc
vc=0.00194
pc=4.0603e+3
tc=374.230005
R=0.0815
aa=4.069889e+1
bb=-2.362540e+3
cc=-1.306883e+1
dd=7.616005e-3
ee=2.342564e-1
ff=3.761111e+2

```



```

eex=2.718281828
psat=10*(aa+bb/t+cc*log10(t)+dd*t+(ee*((ff-t)/t)*log10(ff-t)))
tr=t/tc
pso=((eex*log10(eex))/t)*(1+((ff*log(ff-t))/t))
ps1=dd-bb/t^2+(cc*log10(eex))/t-pso
ps2=10*(aa+bb/t+cc*log10(t)+dd*t+(ee*((ff-t)/t)*log10(ff-t)))
dpdt=log(10)*ps1+ps2
end sub

```

```
REM ***** PR12 *****
```

```

sub pr12(t,px,v,ux,hx,sx)
shared R,tc,vc,pc
tc=385.170005
R=68.7480
vc=0.001700448919
pc=4.116e6
bv=4.06366926e-4
a2=-9.16210126e+1
a3=1.01049598e-1
a4=-5.74640225e-5
a5=0.0
b2=7.71136428e-2
b3=-5.67539138e-5
b4=0.0
b5=4.08193371e-11
c2=-1.52524293e+3
c3=2.19982681
c4=0.0
c5=-1.66307226e-7
k=5.475
t0=200
a=33.89005260
b=2.507020671
c=-3.274505926e-3
d=1.641736815e-6
J=1
ro=1/(v-bv)
px1=ro^2*t*(b2+b3*ro+b4*ro^2+b5*ro^3)
px2=ro^2*exp(-k*t/tc)*(c2+ro*c3+ro^2*c4+ro^3*c5)
px3=ro^2*(a2+ro*a3+ro^2*a4+ro^3*a5)
px=ro*t*R+px1+px2+px3
ux0=1.6970187e+5
ux1=a*t+b*t^2/2+c*t^3/3+d*t^4/4-(a*t0+b*t0^2/2+c*t0^3/3+d*t0^4/4)
uxa1=48843.10286
uxm=exp(-k*t/tc)*(1+k*t/tc)*(ro*c2+ro^2*c3/2+ro^3*c4/3+ro^4*c5/4)
ux2=ro*a2+ro^2*a3/2+ro^3*a4/3+ro^4*a5/4+uxm
ux=ux1+ux2+ux0
hx=ux+(px*v*J)
sx1=a*log(t)+b*t+c*t^2/2+d*t^3/3
sx2=-a*log(t0)-b*t0-c*t0^2/2-d*t0^3/3
sx3=R*log(v-bv)
sx4=(k/tc)*exp(-k*t/tc)*ro*(c2+ro*c3/2+ro^2*c4/3+ro^3*c5/4)

```

```

      sx5=-ro*(b2+ro*b3/2+ro^2*b4/3+ro^3*b5/4)
      s0=8.9448764e+2
      sx=sx1+sx2+sx3+sx4+sx5+s0
end sub

```

```

REM ***** DR12 *****

```

```

sub dr12(t,rof)
  tc=385.170005
  R=68.7480
  vc=0.001700448919
  pc=4.116e6
  x=1-t/tc
  Af=5.580845400e+2
  Bf=8.544458040e+2
  Cf=0.0
  Df=2.994077103e+2
  Ef=0.0
  Ff=3.521500633e+2
  Gf=-5.047419739e+1
  rof=Af+Bf*x^(1/3)+Cf*x^(2/3)+Df*x+Ef*x^(4/3)+Ff*x^(1/2)+Gf*x^2
end sub

```

```

REM ***** SR12 *****

```

```

sub sr12 (t,psat,dpdt)
shared R,tc,vc,pc
  tc=385.170005
  R=68.7480
  vc=0.001700448919
  pc=4.116e6
  aa=93.3438056
  bb=-4.39618785e+3
  cc=-12.4715223
  dd=1.96060432e-2
  psat=exp(aa+bb/t+cc*log(t)+dd*t)
  dpdt=(-bb/t^2+cc/t+dd)*exp(aa+bb/t+cc*log(t)+dd*t)
end sub

```

```

REM ***** P R O P *****

```

```

sub prop(t,p,v,u,h,s,nop,refri)
shared R,tc,vc,pc
  if refri=1 then call pr12(1,1,1,1,1,1) else call pr134(1,1,1,1,1,1)
  itmax=250
  erp=0.0000010000
  erh=0.0000010000
  ers=0.0000010000
  dt=0.0000
  kbr=0
  dvbf=1.00000
  vmin=0.0000

```

```

vmax=1.00e30
pmin=1.00e30
pmax=0.0000
dvs1=2.000000*vc
dvs2=0.700000*vc
ktr=1
1   rt=R*t
    if refr=1 then call pr12(t,px,v,ux,hx,sx) else call pr134(t,px,v,ux,hx,sx)
    on nop goto 10,20,20,40,40,60,60,80,90,100
10  goto 700
20  if (abs(p-px) < (erp*p)) goto 700
    goto 104
40  if (abs(h-hx) < (erh*rt)) goto 700
    goto 104
60  if (abs(s-sx) < (ers*R)) goto 700
    goto 104
80  if ((abs(s-sx) < (ers*R)) and (abs(p-px) < (erp*p))) goto 700
    goto 104
90  if ((abs(h-hx) < (erh*rt)) and (abs(p-px) < (erp*p))) goto 700
    goto 104
100 if ((abs(s-sx) < (ers*R)) and (abs(h-hx) < (erh*rt))) goto 700
    goto 104
104 if (ktr > itmax) goto 840
    if (px < 0.000) goto 300
    on nop goto 840,120,110,110,120,110,120,110,110
110 dt=0.000001000*t
    t1=t+dt
    v1=v
    if refr=1 then call pr12(t1,p1,v1,u1,h1,s1) else call pr134(t1,p1,v1,u1,h1,s1)
    on nop goto 880,880,140,140,880,140,880,120,120,120
120 dv=0.00001000*v
    if (v <= vc) then dv=-dv
    v2=v+dv
    t2=t
    if refr=1 then call pr12(t2,p2,v2,u2,h2,s2) else call pr134(t2,p2,v2,u2,h2,s2)
140 on nop goto 880,220,230,240,250,260,270,280,290,296
220 dpdv=(p2-px)/dv
    if (dpdv > 0.000) goto 300
    if ((px > p) and (v > vmin)) then vmin=v
    if ((px < p) and (v < vmax)) then vmax=v
    if (v = vmin) then pmin=px
    if (v = vmax) then pmax=px
    if (vmin >= vmax) goto 840
    if ((vmin > 0.000) and (vmax < 1.00e30)) then kbr=1
    dvbf = 1.0000
    if (dpdv = 0.00000) goto 226
    dv = (p-px)/dpdv
    dt = 0.0000000
    goto 400
226 dvbf = 0.5000000
    goto 300
230 dpdt=(p1-px)/dt
    dt=(p-px)/dpdt
    dv=0.000000

```

```

      goto 400
240  dhdt=(h1-hx)/dt
      dt=(h-hx)/dhdt
      dv=0.00000
      goto 400
250  dhdv=(h2-hx)/dv
      dv=(h-hx)/dhdv
      dt=0.00000
      goto 400
260  dsdt=(s1-sx)/dt
      dt=(s-sx)/dsdt
      dv=0.00000
      goto 400
270  dsdv=(s2-sx)/dv
      dv=(s-sx)/dsdv
      dt=0.00000
      goto 400
280  dsdt=(s1-sx)/dt
      dsdv=(s2-sx)/dv
      dpdt=(p1-px)/dt
      dpdv=(p2-px)/dv
      det=dsdt*dpdv-dpdt*dsdv
      dt=((s-sx)*dpdv-(p-px)*dsdv)/det
      dv=(dsdt*(p-px)-dpdt*(s-sx))/det
      goto 400
290  dhdt=(h1-hx)/dt
      dhdv=(h2-hx)/dv
      dpdt=(p1-px)/dt
      dpdv=(p2-px)/dv
      det=dhdt*dpdv-dpdt*dhdv
      dt=((h-hx)*dpdv-(p-px)*dhdv)/det
      dv=(dhdt*(p-px)-dpdt*(h-hx))/det
      goto 400
296  dhdt=(h1-hx)/dt
      dhdv=(h2-hx)/dv
      dsdt=(s1-sx)/dt
      dsdv=(s2-sx)/dv
      det=dhdt*dsdv-dsdt*dhdv
      dt=((h-hx)*dsdv-(s-sx)*dhdv)/det
      dv=(dhdt*(s-sx)-dsdt*(h-hx))/det
      goto 400
300  if (kbr = 0) goto 320
      dpdv=(pmax-pmin)/(vmax-vmin)
      v=vmax
      px=pmax
      dv=dvbf*(p-px)/dpdv
      dt=0.0000
      dvbf=0.5000*dvbf
      goto 400
320  if (v <= vc) then dv=-0.05000*v
      if (v > vc) then dv=0.2000*v
      if (vmin > 0.000) then dv=0.200*v
      if (vmax < 1.00e30) then dv=-0.0500*v
      goto 400

```

```

400  dvm=0.2000*v
      if(v < dvs1) then dvm=0.500000*dvm
      if(v < dvs2) then dvm=0.500000*dvm
      dtm=0.100000*t
      if(nop <> 2) goto 440
      if(kbr = 0) goto 440
      vt=v+dv
      if((vt >= vmin) and (vt <= vmax)) goto 440
      dv=vmin+(p-pmin)*(vmax-vmin)/(pmax-pmin)-v
440  dva=abs(dv)
      dta=abs(dt)
      if(dva > dvm) then dv=dv+dvm/dva
      if(dta > dtm) then dt=dt+dtm/dta
      t=t + dt
      v=v + dv
      ktr=ktr+1
      goto 1
700  on nop goto 710,720,720,740,740,760,760,780,790,796
710  p=px
      u=ux
      h=hx
      s=sx
      goto 900
720  u=ux
      h=hx
      s=sx
      goto 900
740  p=px
      u=ux
      s=sx
      goto 900
760  p=px
      u=ux
      h=hx
      goto 900
780  h=hx
      u=ux
      goto 900
790  s=sx
      u=ux
      goto 900
796  p=px
      u=ux
      goto 900
880
840  print "Error de Convergencia .... "
      t=-1000
900
end sub

```

REM ***** S A T *****

```

sub sat(t,p,dpdt,nop,refri)
  shared R,tc,pc,tminvc
  itmax=250
  if refri=1 then call sr12(300,1,1) else call sr134(300,1,1)
  on nop goto 1001,1002
1001 if (t > tc or t < tminvc) goto 10070
  if refri=1 then call sr12(t,p,dpdt) else call sr134(t,p,dpdt)
  goto 10900
1002 if(p > pc) goto 10074
  ktr=0
  errsat=0.0001*p
10010 if (t > tc) then t=tc-0.00100000
  if (t < tminvc) then t=tminvc+0.001000
  if refri=1 then call sr12(t,px,dpdt) else call sr134(t,px,dpdt)
  dp=p-px
  if (abs(dp) < errsat) goto 10020
  if(ktr > itmax) goto 10080
  dt=dp/dpdt
  dta=abs(dt)
  dtm=0.10000*t
  if (dta > dtm) then dt=dt*dtm/dta
  t=t+dt
  ktr=ktr+1
  goto 10010
10020 goto 10900
10070
10074
10080 print "error de convergencia"
t=-1000
10900
end sub

```

REM ***** FUNCION DE MENUS DE BARRAS *****

```

def fnmenus(op,nb,sx,sy,ix,iy)
color 5,7,6
dim zmen(15)
select case op
case 1 :
  zmen(0) = "### MENU PRINCIPAL ###"
  zmen(1) = " REFRIGERANTE R12 "
  zmen(2) = " REFREGERANTE R134a "
  zmen(3) = " COMPARACION "
  zmen(4) = " FIN "
case 2 :
  zmen(0) = "# SISTEMA DE UNIDADES #"
  zmen(1) = " INTERNACIONAL "
  zmen(2) = " INGLES "
  zmen(3) = " SALIR "
case 3 :
  zmen(0) = "### REGIONES ###"
  zmen(1) = " VAPOR SECO "

```

```

zmen(2) = " LIQUIDO SATURADO "
zmen(3) = " HUMEDA "
zmen(4) = " SALIR "

```

case 4:

```

zmen(0) = "+++ N O P +++"
zmen(1) = " T, V "
zmen(2) = " T, P - V "
zmen(3) = " P, V - T "
zmen(4) = " V, H - T "
zmen(5) = " T, H - V "
zmen(6) = " S, V - T "
zmen(7) = " S, T - V "
zmen(8) = " S, P - T, V "
zmen(9) = " H, P - T, V "
zmen(10) = " S, H - T, V "
zmen(11) = " SALIR "

```

case 5:

```

zmen(0) = "+++ INGRESO +++"
zmen(1) = " POR TEMPERATURA "
zmen(2) = " POR PRESION "
zmen(3) = " SALIR "

```

end select

cls

call recuadro(sy,sx,ix)

sr=sr+1 :sy=sy+1 :ix=ix-1

locate sy,sx,0 :print zmen(0)

for f=1 to nb

call bor.barra(f+sy+1,sx,ix,zmen(f))

next f

f=1 :a=1

do

call bor.barra(a+sy+1,sx,ix,zmen(a))

call pin.barra(f+sy+1,sx,ix,zmen(f))

a=f

do

zq=inkey\$

loop until zq<>"

tec=asc(zq) :sound 2500,0.25

if tec < 20 then

if len(zq)=1 then tec=500+asc(mid\$(zq,1)) else tec=500+asc(mid\$(zq,2))

end if

select case tec

case 572,577 :if f=1 then f=nb else f=f-1

case 580,575 :if f=nb then f=1 else f=f+1

case 513

fnmenus=f

color 4,7,1

exit def

case else

if tec < 500 then

zq=ucase\$(zq)

for q=1 to nb

```

' locate 20,1:print zq ,mid$(zmen(q),3,1):delay 2
  if mid$(zmen(q),3,1)=zq then
    fnmenus=q
    color 6,7,1
    exit def
  end if
next q
end if
end select
loop
end def

'***** SUB PINTA BARRA *****
sub pin.barra(f,c1,c2,zm)
  color 1,3,6
  locate f,c1
  print zm
end sub

'***** SUB BORRA BARRA *****
sub bor.barra(f,c1,c2,zm)
  color 6,7,6
  locate f,c1
  print zm
  color 8,7
  locate f,c1+2 :print mid$(zm,3,1);
end sub

'***** SUB RECUADRO *****
sub recuadro(f1,c1,f2,c2)
  zr="┌":zt="┐"
  for c=1 to (c2-c1-1)
    zr=zr+" " :zt=zt+" "
  next c
  zr=zr+"└":zt=zt+"┘"
  locate f1,c1:print zr;
  for f=f1+1 to f2-1
    locate f,c1:print "│" :locate f,c2:print "│";
  next f
  locate f2,c1 :print zt;
end sub

REM ***** SUB ***** PAUSA *****
sub pausa
  locate 22,10 :print "PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR " :zp=input$(1)
  locate 22,10 :print " "
end sub

REM ***** ERRORES *****

errores:
? "Error en ejecucion o division para cero"
END

```


CAPITULO V

5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- El HFC-134a es el refrigerante ambientalmente aceptable y seguro a elegir para sustituir al CFC-12 en los nuevos sistemas de refrigeración, tales como: A/C móviles, Refrigeradores, congeladores, etc.
- Los CFCs, con su contenido de cloro (Cl) destruyen el ozono a todas las altitudes en la estratósfera, se ha comprobado que cada átomo de cloro destruye alrededor de 100.000 moléculas de ozono y por su estabilidad puede sobrevivir hasta 100 años en la estratósfera.
- Los CFCs y otros compuestos halogenados incrementan la radiación ultravioleta en la superficie terrestre, éste incremento afectaría adversamente las fuentes alimenticias y vida silvestre del Planeta.
- El cambio de CFC-12 por el HFC-134a especifica-



IBLI

mente, reduce el GWP (Potencial de calentamiento del Globo) cerca del 91%.

- Es importante encontrar refrigerantes sustitutos que tengan propiedades termodinámicas similares a los refrigerantes que van a ser reemplazados. Es además deseable que iguale la entalpía de vaporización, si es así, el rediseño del sistema sería mínimo. (*ref-7*)
- Aunque las propiedades del HFC-134a son similares al CFC-12, no es un sustituto "directo" para los sistemas de refrigeración mencionados anteriormente. Es necesario efectuar modificaciones de diseño en tales sistemas para asegurar un rendimiento aceptable de enfriamiento y una durabilidad del sistema a largo plazo.
- Las pruebas de compatibilidad de diversos materiales plásticos y elastómeros utilizados comúnmente han demostrado que los materiales apropiados están disponibles o se pueden desarrollar para sellos, empaques, O-rings, mangueras, entre otros.
- Existen desecantes (o agentes secantes) apropiados disponibles para usarse con HFC-134a, tal

como el XH-7; donde el tamiz molecular (partícula sólida con poros pequeños a nivel molecular) dependiendo del fabricante puede ser Zeolita, gel de Silice, Perclorato de magnesio, etc.

- Ciertos tipos de polialquilenglicoles (PAGs) son considerados como los mejores lubricantes sintéticos disponibles para utilizarse con HFC-134a, éste tiene miscibilidad aceptable y muy buena estabilidad térmica.
- El HFC-134a y CFC-12 forman un azeótropo de alta presión cuando se mezclan en ciertas proporciones; lo cual incrementa significativamente la presión de descarga del compresor.
- El HFC-134a/PAG es muy estable por sí mismo, pero es significativamente inestable cuando se introducen compuestos clorados (como CFC-12 ó CFC-11) o cuando se agrega aceite mineral residual.
- La característica más importante de los refrigerantes, no se relacionan directamente con la capacidad de transferir calor, sino con la estabilidad química bajo condiciones de uso.

- Otros aspectos importantes a considerar de los refrigerantes son: el costo, disponibilidad, compatibilidad con el aceite lubricante del compresor y la compatibilidad con los materiales de construcción del equipo.

- Los sistemas de refrigeración deben tener una presión de vaporización tan alta como sea posible, y al mismo tiempo, una presión de condensación tan baja como sea posible. Ya que la alta presión de vaporización implica altas densidades de vapor, y por ende una mayor capacidad del sistema para un compresor dado. Sin embargo, la eficiencia a alta presión es menor, especialmente cuando la presión de condensación se aproxima a la presión crítica.

- La máxima eficiencia teórica de un ciclo de compresión de vapor, es alcanzada por fluidos con baja capacidad calorífica, ésta propiedad está asociada con fluidos que por lo general tienen un peso molecular bajo.

(Tabla 1.2)

- La conductividad térmica y viscosidad del refrigerante afectan la eficiencia de los intercambiadores de calor, por esto una alta conductividad

térmica y baja viscosidad son deseables; teniendo presente lo anterior, podemos afirmar que el HFC-134a tendrá mayor capacidad de transferir calor a similares condiciones de operación.

(Tabla 1.2)

- Los resultados obtenidos analíticamente muestran que los sistemas necesitan cerca de un 20% menos refrigerante (por masa) con HFC-134a como fluido de trabajo en comparación con el CFC-12 para capacidades similares de refrigeración.
- Se encontró también que el efecto refrigerante del sistema, utilizando HFC-134a es mayor que el CFC-12 a las mismas condiciones de operación, esto significaría que el sistema que utiliza HFC-134a le tomará menos tiempo en retirar el mismo calor de un espacio dado que si se usará CFC-12 como fluido de trabajo.
- El HFC-134a opera a presiones de descarga del compresor más elevadas que el CFC-12; por consiguiente, la capacidad de condensación se debe incrementar. Esto se lograría aumentando la capacidad del propio condensador o mejorando el flujo de aire a través del condensador incrementando la capacidad del ventilador.

- Aunque las características del HFC-134a y CFC-12 son similares, el coeficiente de performance encontrado del CFC-12 es mayor hasta en un 8% en comparación con el HFC-134a.
- Cuando la aplicación del sistema de aire acondicionado sea de tipo comercial (pequeño) ó residencial, se recomienda el uso de compresores tipo espiral ya que es aproximadamente un 10% más eficiente que el compresor reciprocante.
- Para aumentar la transferencia de calor en los equipos de refrigeración, El uso de microaletas dentro del tubo de refrigerante reduce de un 15 a 20% los materiales empleados en la fabricación de intercambiadores de calor, manteniendo la misma transferencia de calor total de los viejos diseños.
- Otra mejora que se puede añadir al sistema de refrigeración, es el empleo de microprocesadores los cuales son capaces de controlar las velocidades de los motores del condensador y evaporador, las condiciones de humedad y temperatura, incluso el uso de microprocesadores pueden ser usados en válvulas de expansión electrónicas para regular mejor el flujo de refrigerante.



- En la ausencia de un refrigerante sustituto perfecto del CFC, la investigación y desarrollo de tecnologías alternativas para un mejor enfriamiento con los nuevos refrigerantes se hace necesaria.

. TABLAS Y FIGURAS

Refrigerante	Presión de Evaporador (KPa)	Presión de Condensador (KPa)	Efecto Refrigerante Neto (KJ/Kg)	Volumen específico de succión (m ³ /Kg)	COP	Temperatura de descarga del compresor (°K)
CFC-12	181.4649	741.6404	123.584	0.09155	5.86	311.27
HFC-134a	162.8827	767.6894	156.790	0.12132	5.55	309.65

Tabla 5.2 : Comparación del COP entre R-12 y R-134a en sistema inglés (E) de unidades

Refrigerante	Presión de Evaporador (psia)	Presión de Condensador (psia)	Efecto Refrigerante Neto (Btu/lb)	Volumen específico de succión (ft ³ /lb)	COP	Temperatura de descarga del compresor (°F)
CFC-12	26.467	107.991	53.17	1.4588	5.86	101
HFC-134a	23.771	111.825	67.46	1.9318	5.55	98

* Condiciones basadas en 5°F (-15°C) de evaporación y 86°F (30°C) de condensación (intervalo estándar de temperatura)

Tabla 5.3: Evaluación de los refrigerantes, a varias temperaturas de evaporación y condensación

Refrigerante	Presión de Evaporador (KPa)	Presión de Condensador (KPa)	Efecto Refrigerante Neto (KJ/Kg)	Volumen específico de succión (m ³ /Kg)	COP
Temp. evap: 218.15°K , Temp. cond: 258.15°K					
CFC-12	29.9505	182.4827	152.579	0.49142	7.58
HFC-134a	21.8055	163.8962	201.812	0.80315	7.44
Temp. evap: 233.15°K , Temp. cond: 294.15°K					
CFC-12	64.1231	583.1941	127.596	0.24209	4.21
HFC-134a	51.1420	590.1803	163.590	0.36137	3.99
Temp. evap: 250.15°K , Temp. cond: 308.15°K					
CFC-12	133.9935	847.3584	117.847	0.12170	4.27
HFC-134a	116.3069	887.8997	148.158	0.16686	4.00
Temp. evap: 269.15°K , Temp. cond: 303.15°K					
CFC-12	269.8580	744.5738	126.300	0.06293	8.13
HFC-134a	252.7445	771.0073	160.297	0.07980	7.74
Temp. evap: 278.15°K , Temp. cond: 311.15°K					
CFC-12	362.3622	913.8477	121.186	0.04751	8.36
HFC-134a	349.8794	964.1269	152.833	0.05832	7.96

Figura 5.1 : Viscosidad de líquido

(Fuente: Boletín Du Pont, ART-1)

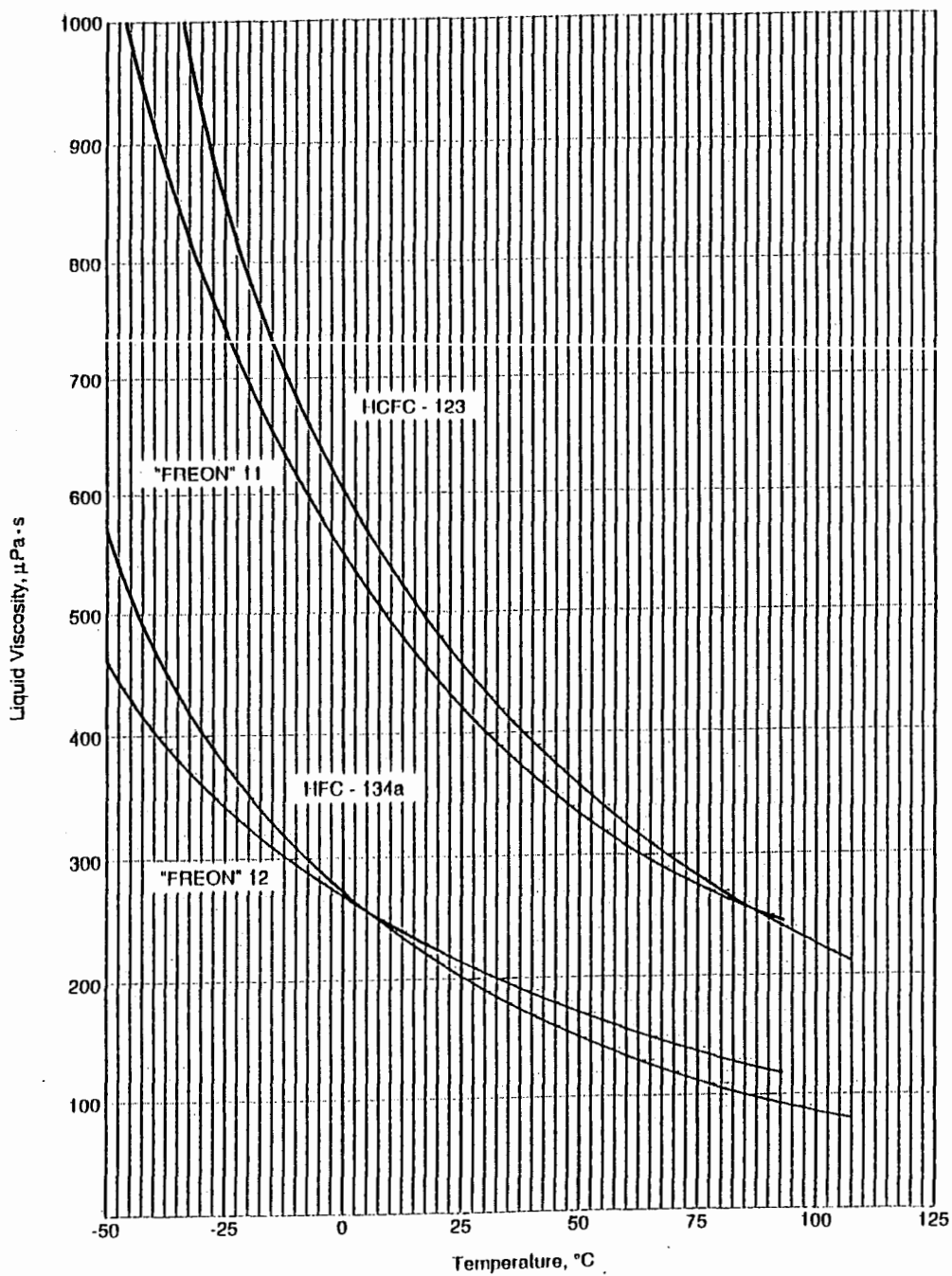
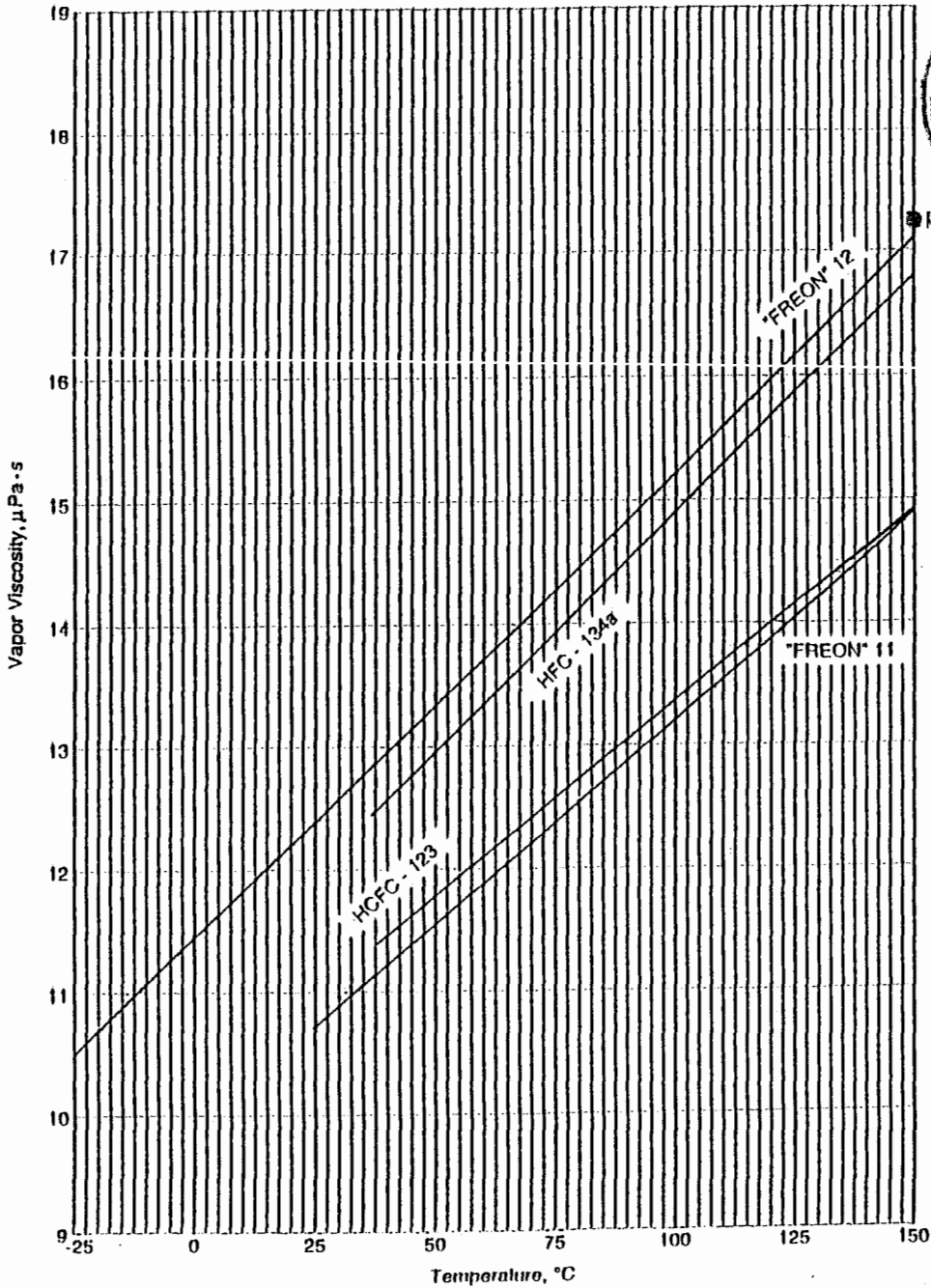


Figura 5.2 : Viscosidad del vapor a presión atmosférica*.

(Fuente: Boletín Du Pont, ART-1)



BIBLIOTECA

Figura 5.3 : Conductividad térmica del líquido

(Fuente: Boletín Du Pont, ART-1)

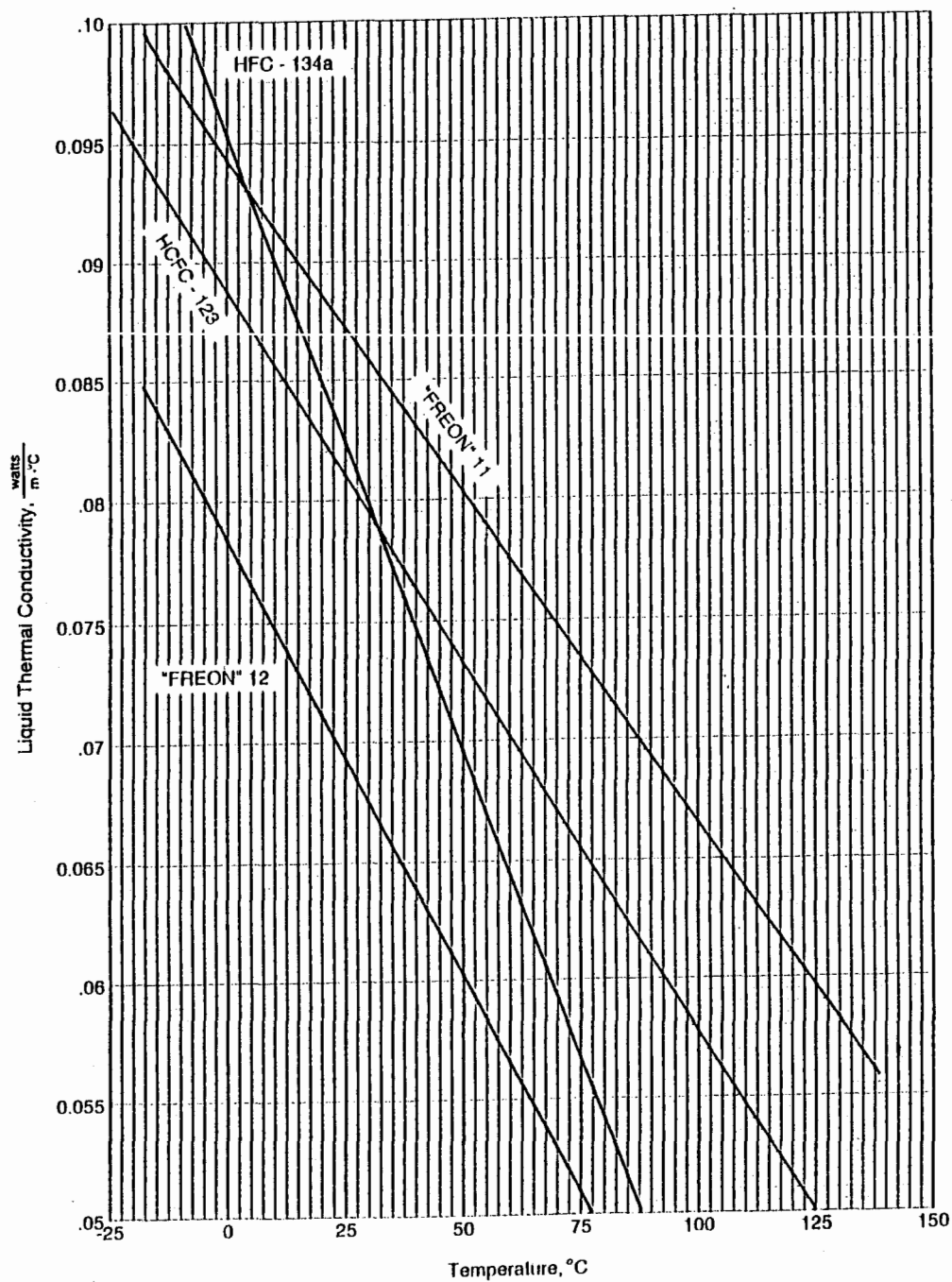
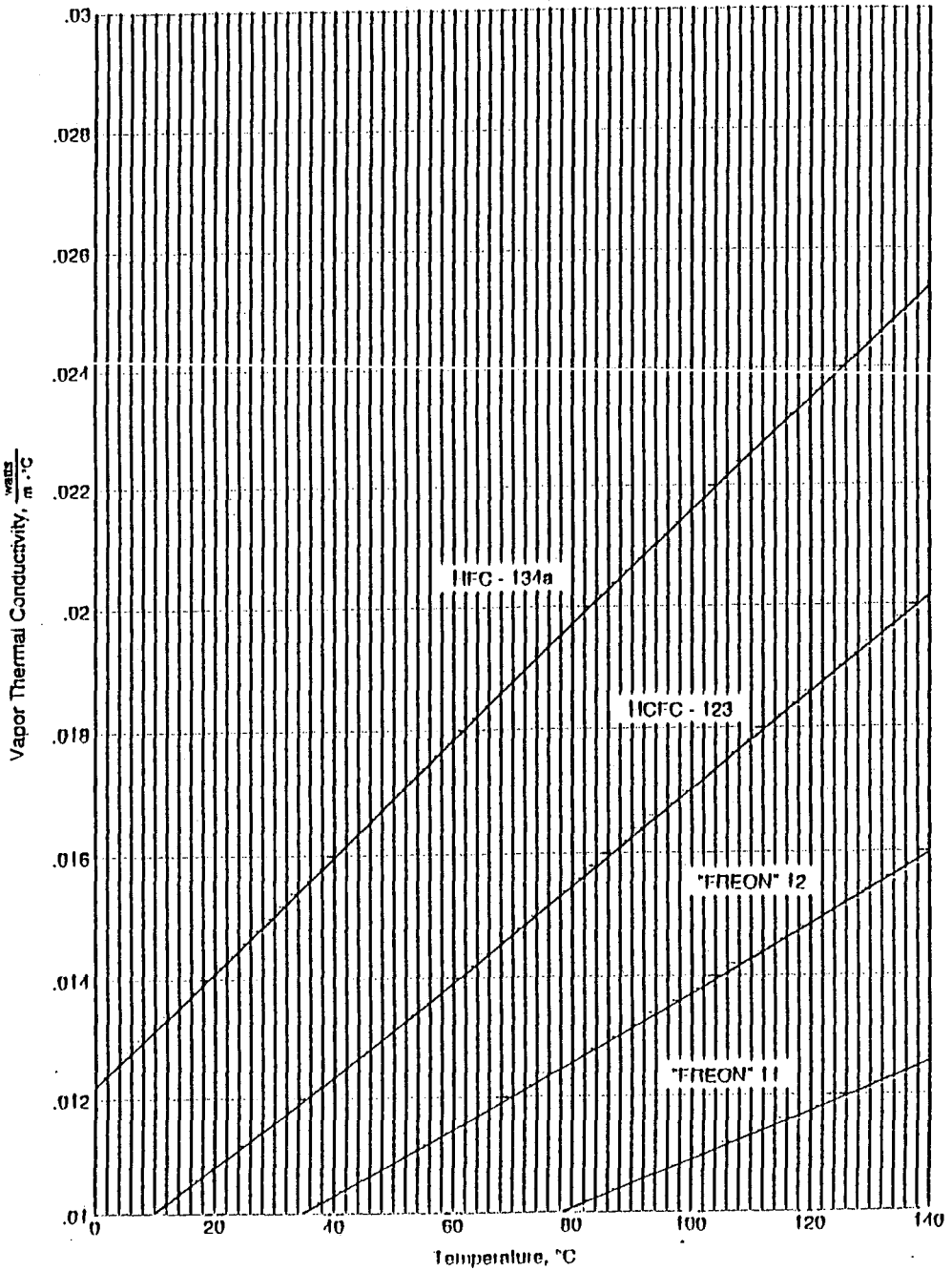


Figura 5.4 : Conductividad térmica del vapor a presión atmosférica*

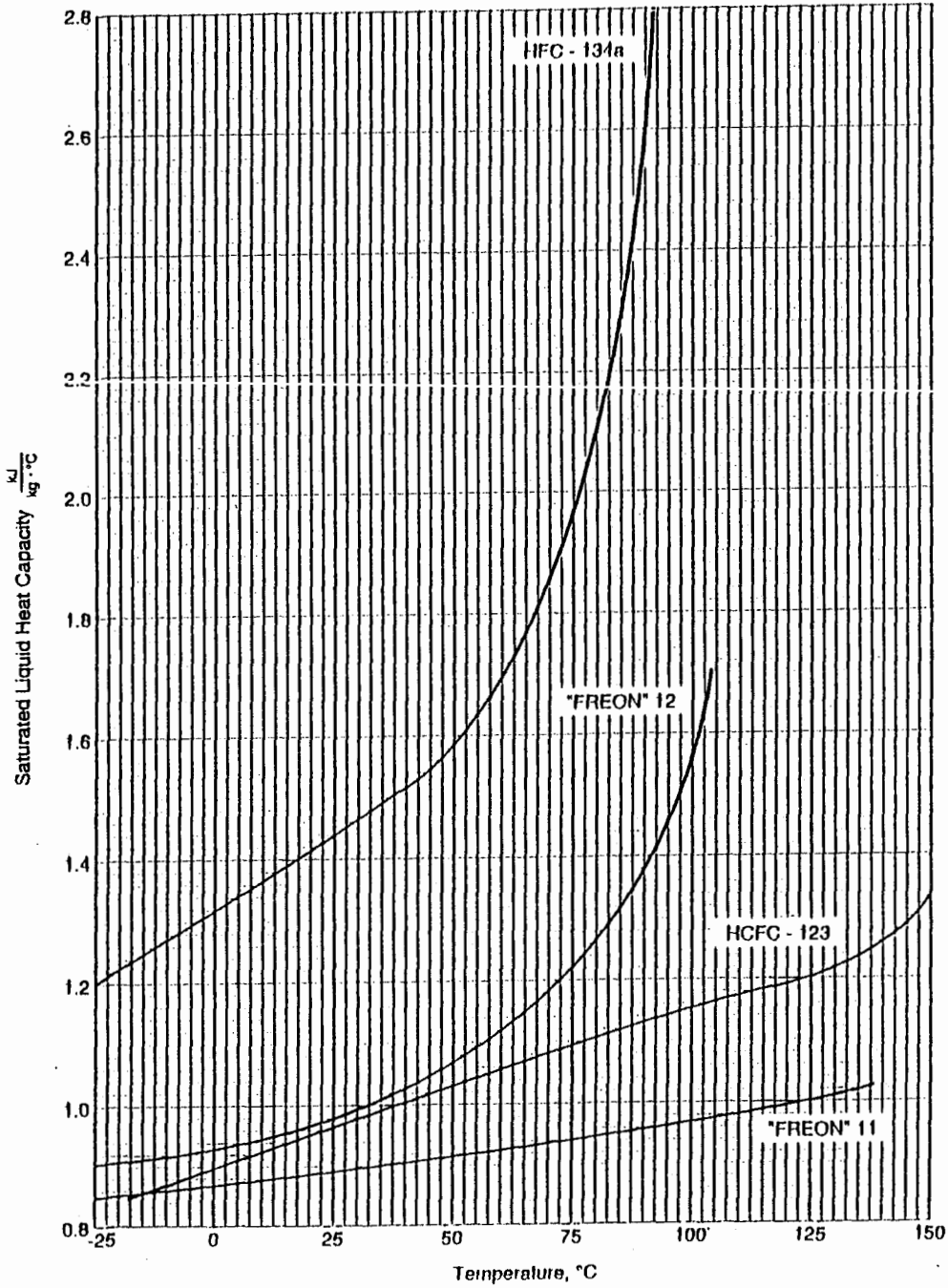
(Fuente: Boletín Du Pont, ART-1)



* (Po = 1.033 Kg/cm²)

Figura 5.5 : Capacidad calorífica de líquido saturado

Fuente: Boletín Du Pont, ART-1)



APENDICE I

Constantes en las ecuaciones computacionales

Las ecuaciones computacionales se deben utilizar con cuidado más allá de los rangos de los gráficos mostradas. En ningún caso se deberían utilizar las ecuaciones para densidades mayores que las cubiertas por los gráficos de cada substancia. A bajas densidades las ecuaciones pueden ser usadas con mucha confianza con temperaturas que se encuentren bajo las cubiertas por los gráficos, es decir con tal que las temperaturas estén dentro del rango del arreglo de C_v° (para R-12 entre 200 - 650 °K y para R-134a entre 172 - 520 °K).

REFRIGERANTE 12

$M = 120.93$
 $T_c = 385.17 \text{ }^\circ\text{K}$
 $P_c = 4.1159 \text{ MPa}$
 $\rho_c = 588.08 \text{ Kg/m}^3$
 $T_o = 200 \text{ }^\circ\text{K}$

Para SI de unidades,
 T en $^\circ\text{K}$, ρ en Kg/m^3 , P en Pa, C_v en $\text{J/Kg}^\circ\text{K}$ y R en $\text{J/Kg}^\circ\text{K}$

(1) P - ρ - T

$R = 68.7480$
 $b = 4.06366926 \text{ E } -4$
 $A_2 = -9.16210126 \text{ E } 1$
 $A_3 = 1.01049598 \text{ E } -1$
 $A_4 = -5.74640225 \text{ E } -5$
 $A_5 = 0.0$
 $B_2 = 7.71136428 \text{ E } -2$
 $B_3 = -5.67539138 \text{ E } -5$
 $B_4 = 0.0$
 $B_5 = 4.08193371 \text{ E } -11$
 $C_2 = -1.52524293 \text{ E } 3$
 $C_3 = 2.19982681$
 $C_4 = 0.0$
 $C_5 = -1.66307226 \text{ E } -7$
 $k = 5.475$

(4) ρ_f

$A_f = 5.580845400 \text{ E } 2$
 $B_f = 8.544458040 \text{ E } 2$
 $D_f = 2.994077103 \text{ E } 2$

(2) C_v°

$a = 3.389005260 \text{ E } 1$
 $b = 2.507020671$
 $c = -3.274505926 \text{ E } -3$
 $d = 1.641736815 \text{ E } -6$
 $f = 0.0$
 $u_o = 1.6970187 \text{ E } 5$
 $s_o = 8.9448764 \text{ E } 2$

(3) P_{sat}

$A = 9.33438056 \text{ E } 1$
 $B = -4.39618785 \text{ E } 3$
 $C = -1.24715223 \text{ E } 1$
 $D = 1.96060432 \text{ E } -2$

$F_f = 3.521500633 \text{ E } 2$
 $G_f = -5.047419739 \text{ E } 1$

REFRIGERANTE 134a

$M = 102.03$
 $T_c = 374.23 \text{ } ^\circ\text{K}$
 $P_c = 4060.3 \text{ KPa}$
 $\rho_c = 515.3 \text{ Kg/m}^3$
 $T_o = 200 \text{ } ^\circ\text{K}$

Para SI de unidades,
 T en $^\circ\text{K}$, ρ en Kg/m^3 , P en KPa , C_v en $\text{KJ/Kg}^\circ\text{K}$ y R en $\text{KJ/Kg}^\circ\text{K}$

(1) P - ρ - T

$R = 0.0814905$
 $b = 3.755677 \text{ E } -4$
 $A_2 = -8.909485 \text{ E } -2$
 $A_3 = -1.016882 \text{ E } -3$
 $A_4 = 1.778071 \text{ E } -5$
 $A_5 = -7.481440 \text{ E } -8$
 $B_2 = 4.408654 \text{ E } -5$
 $B_3 = 2.574527 \text{ E } -6$
 $B_4 = -4.016976 \text{ E } -8$
 $B_5 = 1.670285 \text{ E } -10$
 $C_2 = -2.074834$
 $C_3 = 2.142829 \text{ E } -2$
 $C_4 = -2.977911 \text{ E } -4$
 $C_5 = 1.255922 \text{ E } -6$
 $k = 4.599967$

(4) ρ_f

$A_f = 5.281464 \text{ E } 2$
 $B_f = 7.551834 \text{ E } 2$
 $C_f = 1.028676 \text{ E } 3$
 $D_f = -9.491172 \text{ E } 2$
 $E_f = 5.935660 \text{ E } 2$

(2) C_v

$a = 3.154856$
 $b = -1.656054 \text{ E } -2$
 $c = 4.353378 \text{ E } -5$
 $d = -3.754497 \text{ E } -8$
 $f = -3.023189 \text{ E } 4$
 $u_o = 384.1765733$
 $s_o = 1.9584825$

(3) P_{sat}

$A = 4.069889 \text{ E } 1$
 $B = -2.362540 \text{ E } 3$
 $C = -1.306883 \text{ E } 1$
 $D = 7.616005 \text{ E } -3$
 $E = 2.342564 \text{ E } -1$
 $F = 6.770000 \text{ E } 2$

ANEXO I

Factores de conversión

Las constantes de las ecuaciones computacionales fueron calculadas originalmente en el Sistema Internacional (SI) de unidades. Para la conversión de las propiedades termodinámicas a Sistema Inglés (E) de unidades, las propiedades deben ser calculadas primero en (SI) de unidades y luego convertidas a (E) de unidades. Los factores de conversión usados se muestran en la parte inferior.

Por favor note que en la conversión de entalpía y entropía de (SI) a (E) de unidades, un cambio en los estados de referencia deben ser incluidos, donde

* Para HFC-134a

de: hr = 200 ; sr = 1 a 0°C para (SI) de unidades
 a: hr = 0 ; sr = 0 a -40°C para (E) de unidades

* Para CFC-12

de: hr = 0 ; sr = 0 a 200°K para (SI) de unidades
 a: hr = 0 ; sr = 0 a -40°C para (E) de unidades

En la ecuación de conversión mostrada abajo, H(ref) y S(ref) son la entalpía y entropía de líquido saturado a -40°C, donde

* Para HFC-134a

H(ref) = 148.4 KJ/Kg y S(ref) = 0.7967 KJ/Kg·°K

* Para CFC-12

H(ref) = 28.81074 KJ/Kg y S(ref) = 0.13318 KJ/Kg·°K

Conversiones:

P(psia) = P(KPa)·0.14504
 ρ (lb/ft³) = ρ (Kg/m³)·0.062428
 V(ft³/lb) = V(m³/Kg)·16.018
 H(Btu/lb) = [H(KJ/Kg) - H(ref)]·0.43021
 S(Btu/lb·°R) = [S(KJ/Kg·°K) - S(ref)]·0.23901
 Cv(Btu/lb·°F) = Cv(KJ/Kg·°K)·0.23901
 T(°C) = (5/9)(T[°F] - 32)
 T(°C) = T(°K) - 273.15
 T(°F) = (T[°C]·1.8) + 32
 T(°F) = T(°R) - 459.67
 T(°K) = 1.8 T(°R)

Tabla A1 : Propiedades termodinámicas del R-12* en SI de unidades

T	P	volumen, m ³ /Kg		entalpía, KJ/Kg			entropía, KJ/Kg·°K					
		v _f	v _g	h _f	h _g	S _f	S _g	S _{fg}	S _g			
°K	KPa											
240	87.5439	0.00067	0.18113	34.89944	166.69607	201.59551	0.15877	0.69457	0.85334			
252	144.1977	0.00068	0.11361	45.61925	161.44077	207.06002	0.20220	0.64064	0.84284			
260	195.3986	0.00070	0.08539	52.84619	157.79243	210.63862	0.23029	0.60690	0.83719			
268	259.4762	0.00071	0.06532	60.14647	154.00579	214.15226	0.25778	0.57465	0.83243			
274	317.1493	0.00072	0.05397	65.67600	151.06145	216.73745	0.27803	0.55132	0.82935			
280	384.0095	0.00073	0.04494	71.25810	148.01527	219.27337	0.29801	0.52862	0.82663			
284	434.1212	0.00073	0.03993	75.01188	145.92158	220.93346	0.31119	0.51381	0.82500			
288	488.9752	0.00074	0.03558	78.79437	143.77228	222.56665	0.32427	0.49921	0.82348			
294	580.7471	0.00075	0.03008	84.52725	140.43355	224.96080	0.34374	0.47766	0.82140			
298	648.6638	0.00076	0.02697	88.39309	138.12278	226.51587	0.35662	0.46350	0.82012			

* Propiedades obtenidas por el programa computacional.

Tabla A2 : Propiedades termodinámicas del R-134a* en SI de unidades

T °K	P KPa	volumen, m ³ /Kg		entalpía, KJ/Kg			entropía, KJ/Kg·°K		
		v _f	v _g	h _f	h _{fg}	h _g	S _f	S _{fg}	S _g
240	72.3993	0.00072	0.26076	157.0618	221.56203	378.62383	0.83283	0.92318	1.75601
252	126.1935	0.00074	0.15449	172.3107	213.76594	386.07664	0.89467	0.84827	1.74294
260	176.8066	0.00075	0.11222	182.6745	208.29336	390.96786	0.93501	0.80112	1.73613
268	242.0189	0.00076	0.08318	193.2022	202.56855	395.77075	0.97470	0.75585	1.73055
274	302.0723	0.00077	0.06723	201.2128	198.08865	399.30145	1.00409	0.72295	1.72704
280	372.9666	0.00079	0.05482	209.3303	193.42908	402.75938	1.03319	0.69082	1.72401
284	426.8505	0.00080	0.04806	214.8066	190.21175	405.01835	1.05246	0.66976	1.72222
288	486.4644	0.00080	0.04227	220.3388	186.89663	407.23543	1.07164	0.64894	1.72058
294	587.4676	0.00082	0.03506	228.7502	181.72152	410.47172	1.10026	0.61809	1.71835
298	663.0999	0.00083	0.03105	234.4396	178.12156	412.56116	1.11927	0.59772	1.71699

* Propiedades obtenidas por el programa computacional.

Tabla A3 : Propiedades termodinámicas del R-12* en sistema inglés (E) de unidades

T	P	volumen, ft ³ /Kg		entalpía, Btu/lb			entropía, Btu/lb·°F			
		Vr	Vg	hr	hrg	hg	Sr	Sfg	Sg	
°F	psia									
-20	15.2562	0.01079	2.44448	4.25035	70.92305	75.1734	0.00985	0.16131	0.17116	
-18	15.9852	0.01081	2.34017	4.67680	70.71474	75.3915	0.01081	0.16011	0.17092	
-16	16.7411	0.01083	2.24126	5.10376	70.50554	75.6093	0.01177	0.15892	0.17069	
-14	17.5245	0.01086	2.14744	5.53121	70.29547	75.8267	0.01273	0.15773	0.17046	
-12	18.3359	0.01088	2.05840	5.95918	70.08449	76.0437	0.01368	0.15656	0.17024	
100	131.8096	0.01269	0.30806	31.13163	55.97022	87.1019	0.06328	0.10001	0.16329	
105	141.1880	0.01280	0.28712	32.34197	55.17292	87.5149	0.06539	0.09771	0.16310	
110	151.0493	0.01292	0.26779	33.56412	54.35277	87.9169	0.06751	0.09541	0.16292	
115	161.4089	0.01305	0.24991	34.79892	53.50810	88.3070	0.06962	0.09312	0.16274	
120	172.2823	0.01317	0.23335	36.04738	52.63693	88.6843	0.07174	0.09081	0.16255	

* Propiedades obtenidas por el programa computacional.

Tabla A4 : Propiedades termodinámicas del R-134a* en (E) de unidades

T °F	P psia	volumen, ft ³ /Kg		entalpía, Btu/lb				entropía, Btu/lb·°F		
		v _f	v _g	h _f	h _{fg}	h _g	sf	s _{fg}	Sg	
-20	12.8853	0.01159	3.44551	6.03841	94.14982	100.18823	0.01393	0.21414	0.22807	
-18	13.5730	0.01161	3.28090	6.64441	93.84124	100.48565	0.01530	0.21247	0.22777	
-16	14.2894	0.01164	3.12569	7.25184	93.53085	100.78269	0.01667	0.21082	0.22749	
-14	15.0356	0.01167	2.97827	7.86042	93.21891	101.07933	0.01803	0.20917	0.22720	
-12	15.8122	0.01170	2.84107	8.47039	92.90513	101.37552	0.01940	0.20753	0.22693	
100	138.9923	0.01386	0.34079	45.14495	71.20177	116.34672	0.09174	0.12722	0.21896	
105	149.8006	0.01400	0.31493	46.93995	69.93748	116.87743	0.09488	0.12386	0.21874	
110	161.2262	0.01415	0.29120	48.75346	68.63326	117.38672	0.09802	0.12049	0.21851	
115	173.2918	0.01431	0.26940	50.58612	67.28645	117.87257	0.10117	0.11709	0.21826	
120	186.0209	0.01447	0.24933	52.43859	65.89419	118.33278	0.10432	0.11368	0.21800	

* Propiedades obtenidas por el programa computacional.

Figura A.1: Diagrama P-h para R-12 en (SI) de unidades

(Fuente: Departamento de Ingeniería Mecánica, Univeridad de Standford)

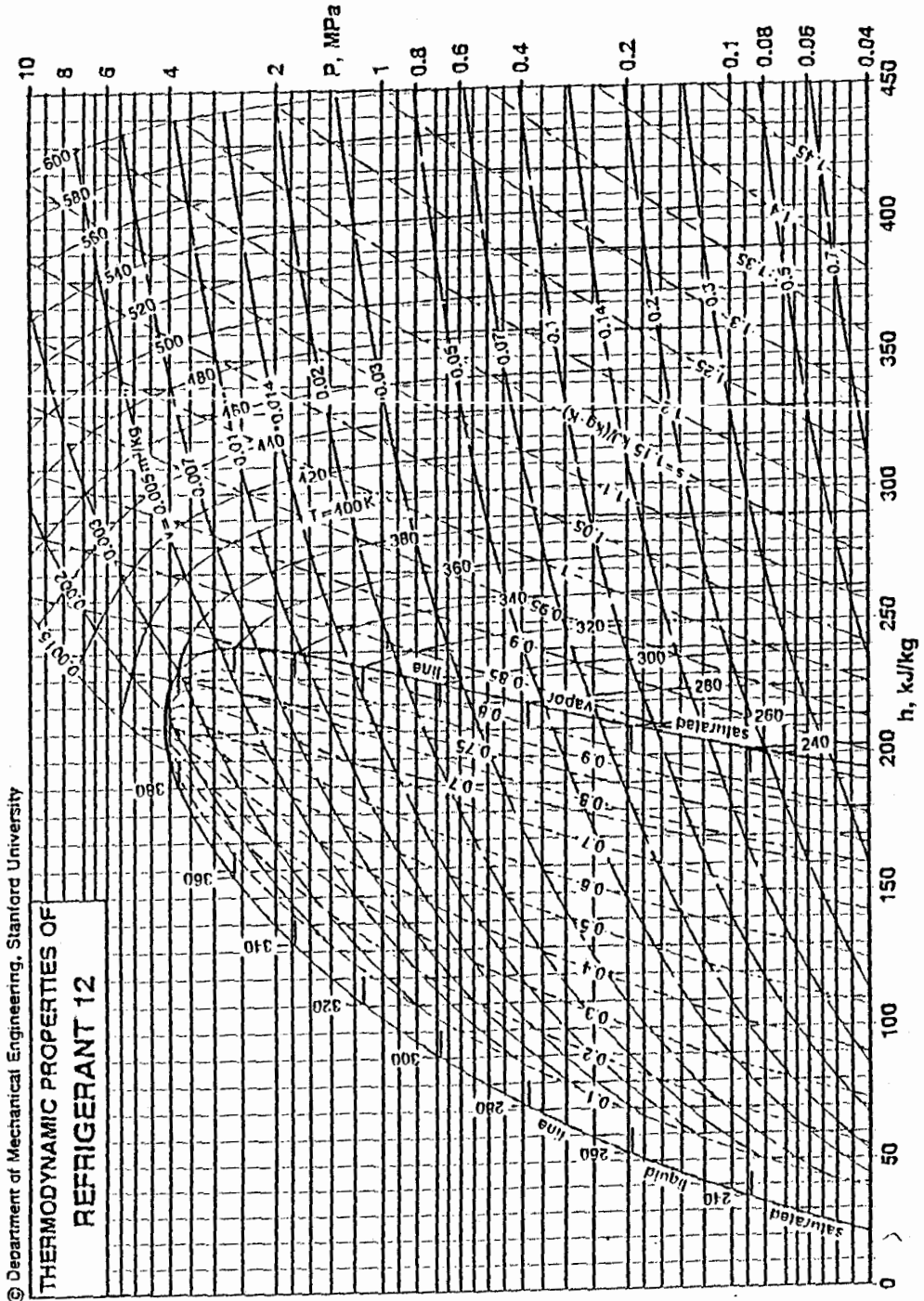


Figura A.2: Diagrama P-h para R-12 en sistema inglés (E)
de unidades

(Fuente: ASHRAE, 1993)

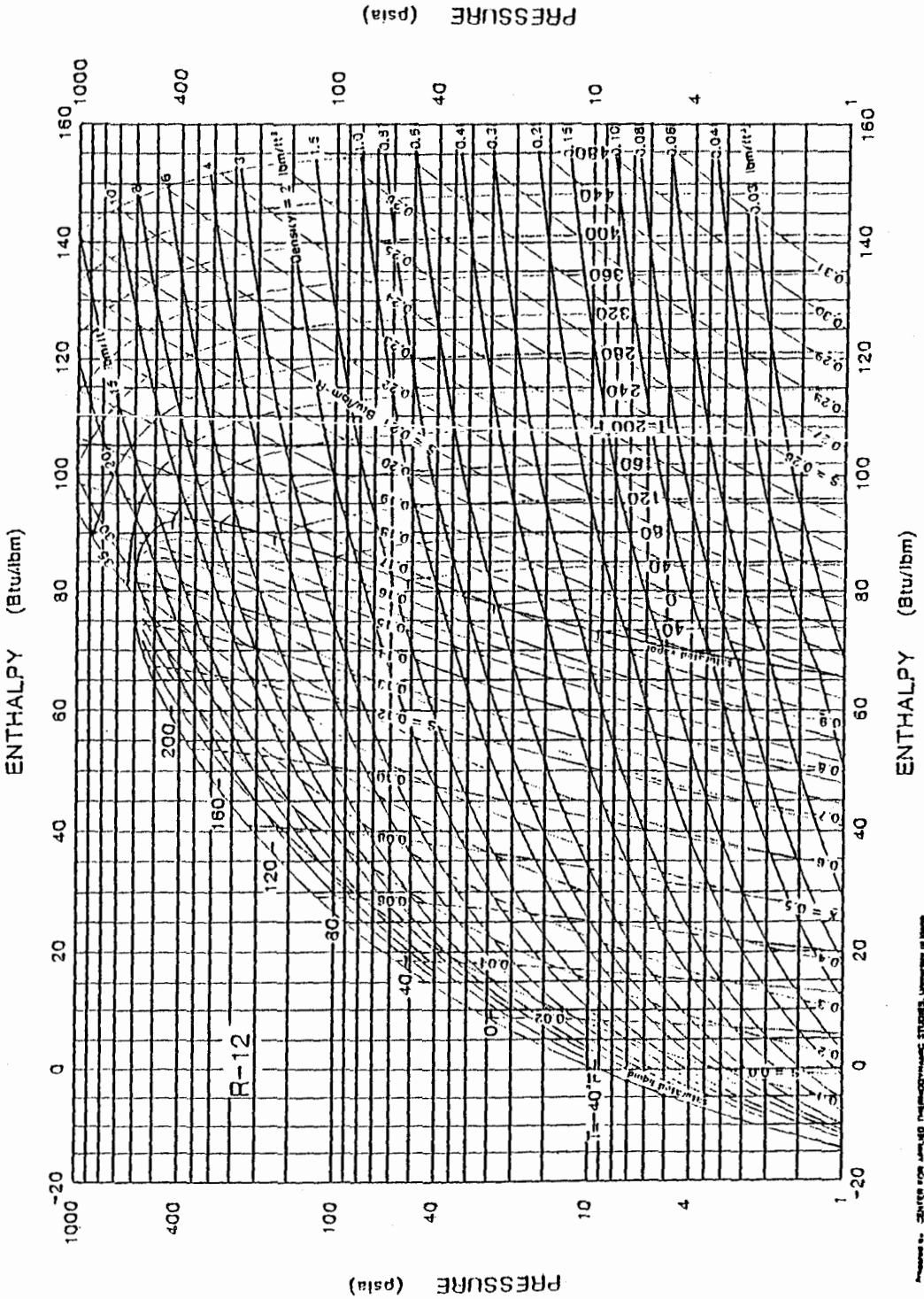


Figura A.3 : Diagrama P-h para R-134a en (SI) de unidades
 (Fuente: Boletín Du Pont, P-134a)

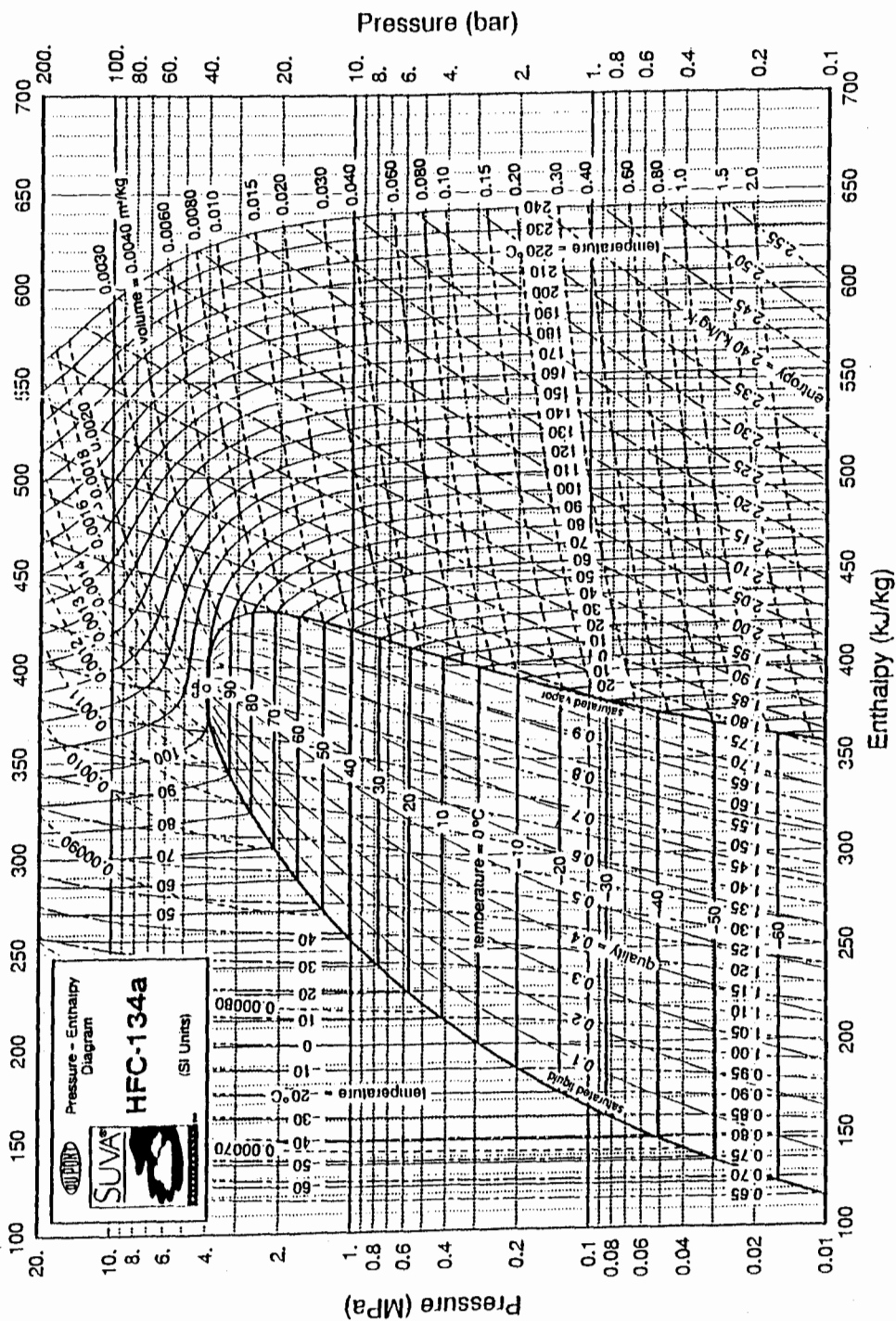
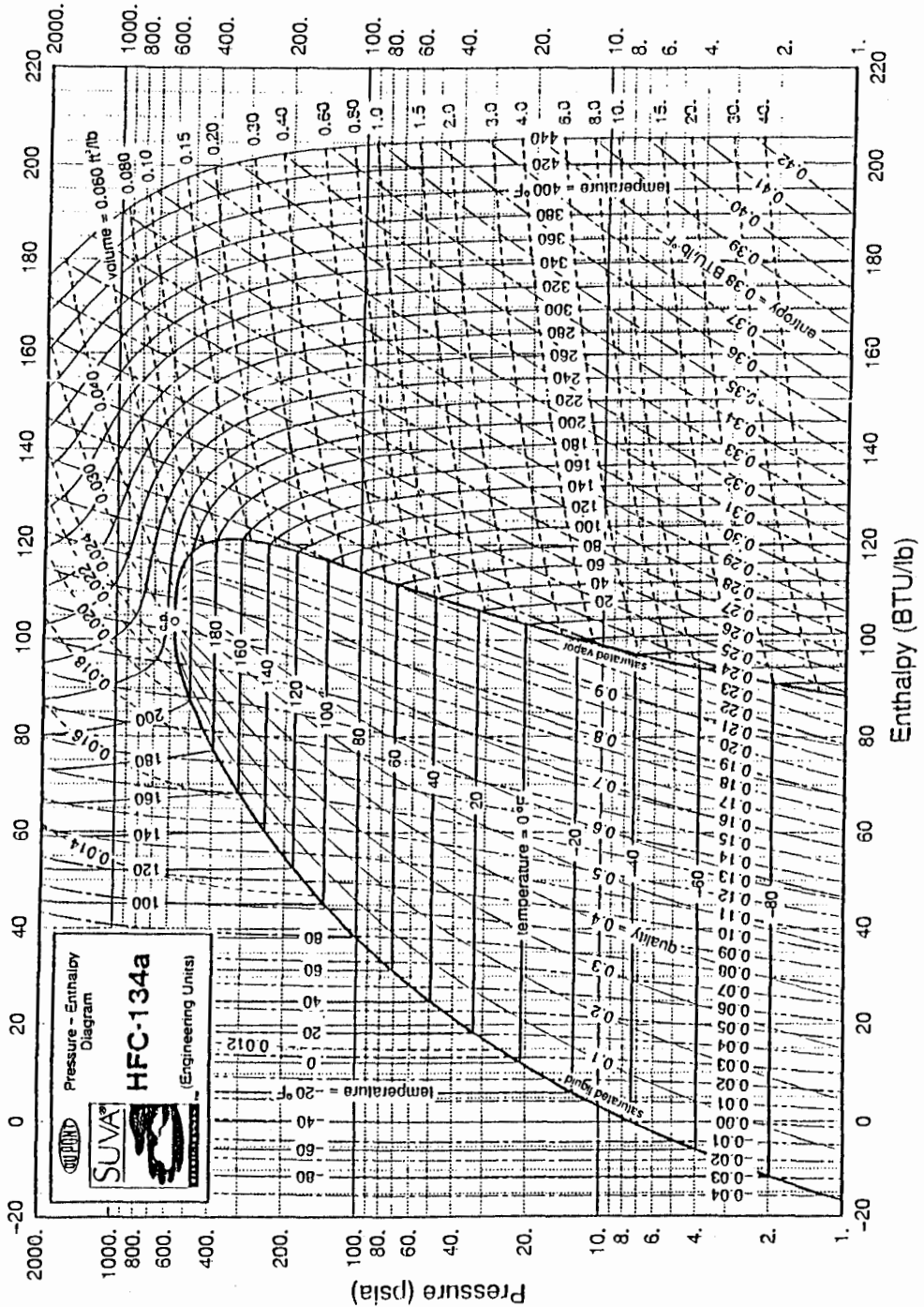


Figura A.4 : Diagrama P-h para R-134a en (E) de unidades
(Fuente: Boletín Du Pont, P-134a)



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BOLETIN DUPONT; P134a.

HFC-134a, Properties, Uses, Storage and Handling.

(pág 1 - 25)

2. BOLETIN DUPONT; T-134a-ENG.

Thermodynamic Properties of HFC-134a.

(pág 1 - 31)

3. IMPACT OF SCIENCE ON SOCIETY; No. 157, 1990.

New chemical products and their applications.

(pág 59 - 69)

4. BOLETIN DUPONT; ART-1.

Transport Properties of SUVA Refrigerants.

(pág 1 - 20)

5. ASHRAE FUNDAMENTALS HANDBOOK; I-P Edition 1993.

Thermodynamics and Refrigeration cycles.

(pág 1.1 - 1.9)

6. ASHRAE THERMODYNAMICS PROPERTIES OF REFRIGERANTS; 1969.

Refrigerants.

(pág 16.1 - 16.6)

7. MECHANICAL ENGINEERING, Edición/ Septiembre 1993.

*Improving heat pumps and air
conditioning.*

(pág 98 - 102)

8. MARKS MANUAL DEL INGENIERO MECANICO; Baumeister,

Avallone, Baumeister.

Vol. 2, octava edición.

Refrigeración Mecánica

(pág 19.2 - 19.4)

9. THERMODYNAMIC PROPERTIES IN S.I.

GRAPHS, TABLES AND COMPUTATIONAL

EQUATIONS FOR 40 SUBSTANCES ; W.C. Reynolds

Stanford University

(pág 72-77, 115-173)

10. ENGINEERING THERMODYNAMICS AN INTRODUCTORY TEXTBOOK.;

J.B. Jones/G.A.Hawkins, 2 Edition

Physical Properties II.

(pág 302 - 319)

11. INTRODUCCION A LOS
METODOS NUMERICOS; Thomas R. McCalla
Solución de ecuaciones no lineales
(pág 81 - 90)
12. ANALISIS NUMERICO; Richard L. Burden/J. Douglas Faires
Solución de ecuaciones de una variable
(pág 54 - 60)
13. QUIMICA, LA CIENCIA CENTRAL; Brown, Le May, Bursten
Química del Ambiente
(pág 717 - 732)
14. EL CALCULO CON GEOMETRIA ANALITICA 2; Louis Leithold,
quinta edición.
15. PROGRAMACION EN BASIC FOR THE EQUITY+ SYSTEMS, EPSON