



# Universidad Nacional Autónoma de México

---

FACULTAD DE QUIMICA

**DISEÑO DE EL EQUIPO DE COMPRESION PARA  
UNA ESTACION DE RECOLECCION DE GAS  
EN CACTUS, CHIAPAS.**

**T E S I S**

Que para obtener el título de  
**INGENIERO QUIMICO**

**p r e s e n t a**

**JOSE LUIS GALLEGOS MERCADO**

**México, D. F.**

**1982**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

	Página
<b>CAPITULO I    OBJETIVO</b>	
1.1 Introducción	2
1.2 Bases de Diseño	2
1.2.1 Características de la estación de compresión	3
1.2.2 Condiciones de proceso	3
1.2.3 Condiciones de diseño de compresores	4
1.2.4 Sistemas a Analizar	4
<b>CAPITULO II    PROCEDIMIENTOS DE CALCULO</b>	
2.1 Generalidades	6
2.1.1 Compresión en varias etapas	6
2.1.2 Selección de la presión intermedia de compresión	8
2.2 Selección del método de cálculo	10
2.3 Método de Mollier	13
2.4 Método de Exponente	16
2.4.1 Proceso Adiabático y Reversible considerando gas ideal	16
2.4.2 Proceso Politrópico y Adiabático con un gas ideal	19
2.4.3 Reglas de Mezclado	22
2.5 Método de las Propiedades Residuales.	23
2.5.1 Cálculo de las propiedades residuales	23
2.5.2 Reglas de mezclado	27
2.5.3 Evaluación del trabajo de compresión y de la temperatura de descarga.	27
2.6 Método del Balance de Entropía	29
2.6.1 Primera parte: Proceso Isoentrópico, Adiabático y Reversible.	29
2.6.2 Segunda parte: Correcciones por Irreversibilidad del proceso.	39
2.7 Nomenclatura.	40
<b>CAPITULO III    DESARROLLO Y CALCULO DEL SISTEMA</b>	
3.1 Sistemas a analizar	43
3.1.1 Compresión en una etapa	43
3.1.2 Compresión en dos etapas	44
3.1.3 Compresión en tres etapas	44
3.2 Cálculo de los sistemas	49
3.2.1 Compresión en una etapa	49

	Página
3.2.2 Compresión en dos etapas	57
3.2.3 Compresión en tres etapas	57
CAPITULO IV CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFIA	70
APENDICE	

CAPITULO I

OBJETIVO

## O B J E T I V O

### 1.1 INTRODUCCION.

Este estudio se desarrolló para determinar la influencia que tiene el método de cálculo al evaluar el trabajo de compresión en el diseño de equipo de compresión. Asimismo, se podrá obtener un panorama completo de cómo evaluar el trabajo de compresión, para que cuando sea necesario se aplique un método de cálculo que dé resultados confiables, y saber qué influencia tienen las suposiciones que normalmente se hacen con el fin de simplificar el cálculo del trabajo de compresión.

En este trabajo se aplicaron varios métodos de cálculo para analizar la influencia que éstos tienen sobre las variables involucradas en la compresión, como son la temperatura de descarga y el trabajo de compresión y el método para determinar el número adecuado de etapas intermedias de compresión; también se explican las bases termodinámicas de cada método y se desarrollan los procedimientos de cálculo necesarios para el método en cuestión. Asimismo, para cuando se requiera un gran número de cálculos, se elaboró un programa de computadora que permita aplicarlo fácilmente y obtener resultados confiables.

### 1.2 BASES DE DISEÑO.

El presente trabajo se aplicó para diseñar una estación de compresión localizada en Cactus, Chiapas, basándose en las condiciones del sitio y las de proceso que se tienen que satisfacer, que se dan enseguida. La estación recolecta gas procedente de la batería de separación y lo envía a procesar a la planta endulzadora de gas.

## 1.2.1 CARACTERISTICAS DE LA ESTACION DE COMPRESION.

Localización	Cactus, Chiapas.
Elevación sobre el nivel del mar.	10 metros.
Presión atmosférica	1 atmósfera.
Temp. de bulbo seco promedio.	37.8°C
Temp. de bulbo húmedo promedio.	27.8°C
Humedad máxima	95% a 28.3°C
Humedad mínima	75% a 37.8°C

## 1.2.2 CONDICIONES DE PROCESO.

Gas de alimentación.

La composición del gas amargo de alimentación a la estación de compresión es la siguiente:

COMPONENTE	% MOL.
C <sub>1</sub>	69.5
C <sub>2</sub>	12.27
C <sub>3</sub>	8.20
iC <sub>4</sub>	0.87
nC <sub>4</sub>	2.75
iC <sub>5</sub>	0.64
nC <sub>5</sub>	0.76
C <sub>6</sub> <sup>+</sup>	1.01
CO <sub>2</sub>	1.695
H <sub>2</sub> S	<u>2.305</u>
T O T A L:	100.00

El gas de alimentación se debe considerar saturado con agua a las condiciones de operación.

La temperatura del gas de alimentación es de 37.8°C.

La presión de alimentación es de 5.1 atmósferas man.

#### 1.2.3 CONDICIONES DE DISEÑO DE COMPRESORES.

Presión de succión = 5.1 atmósferas man.

Presión de entrega del gas en límites de batería. = 81.63 atmósferas man.

Temperatura de succión = 37.8°C

Temp. entrega del gas en Lim. Bat. = 54.44°C

Gasto de gas = 566 337 MCSO

#### 1.2.4 SISTEMAS A ANALIZAR.

El estudio se hizo para los tres sistemas que se dan en los diagramas de flujo 3.1 (Compresión en una etapa), 3.2 (Compresión en dos etapas), 3.3 (Compresión en tres etapas) (págs. 46 a 48), del capítulo III, los cuales se calcularon utilizando los métodos del capítulo II.



CAPITULO II  
PROCEDIMIENTOS  
DE  
CALCULO

## 2.1 GENERALIDADES. (1)

A continuación se presentarán algunos aspectos relacionados con el proceso de compresión, con el objeto de conocer su influencia sobre el trabajo de compresión y la temperatura de descarga, lo cual nos dará la pauta para decidir la forma en la que se efectuará la compresión.

### 2.1.1 COMPRESION EN VARIAS ETAPAS

La necesidad de efectuar la compresión en varias etapas puede generarse por varias razones. La primera está relacionada con la eficiencia del proceso. La fig. 2.1, ilustra el proceso de compresión para una trayectoria adiabática y para una isotérmica.

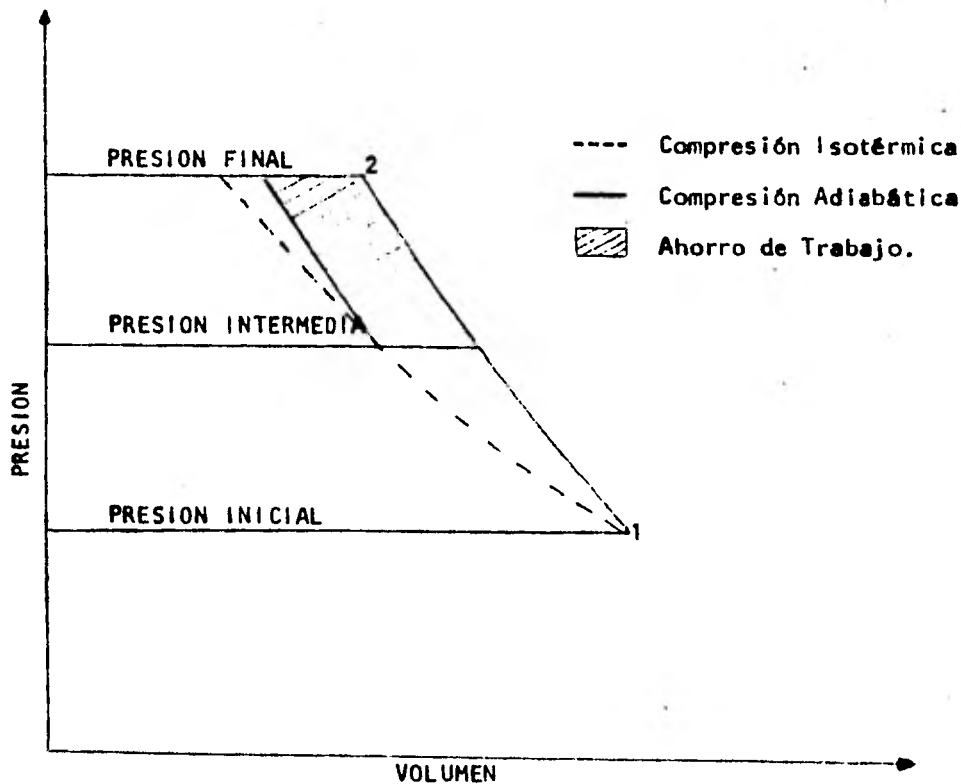


Fig No. 2.1

(1) Ver capítulo 10 de referencia 8 de la bibliografía.

Como se aprecia en la fig. 2.1, el proceso isotérmico requiere menos cantidad de trabajo que el proceso adiabático. El trabajo es el área bajo la curva de cada trayectoria. En los procesos reales la compresión es más parecida a un proceso adiabático que a un proceso isotérmico, y esto se debe a la imposibilidad de transferir una gran cantidad de calor, producto de la compresión, a través de una cámara de enfriamiento o dispositivos similares en el corto intervalo de tiempo en el cual se efectúa la compresión. De lo anterior se deduce que la decisión de efectuar la compresión en varias etapas puede deberse a un intento de mejorar la eficiencia del proceso, ya que la compresión en varias etapas permite el uso de interenfriadores, con el objeto de quitar calor y bajar la temperatura aproximadamente a la temperatura de entrada de el gas en la primera etapa, y con ello obtener una disminución del trabajo de compresión. En la fig. 2.1, se ilustra el ahorro de trabajo obtenido al efectuar la compresión en dos etapas usando un interenfriador que baje la temperatura del gas de descarga de la primera etapa hasta la temperatura de entrada a la primera etapa.

El trabajo mínimo de compresión, teóricamente, se presenta en un proceso isotérmico por lo cual aumentando el número de etapas de compresión y de interenfriadores se puede uno acercar al proceso isotérmico, con el consecuente ahorro de trabajo; pero al mismo tiempo que el trabajo disminuye, el costo inicial del equipo se incrementa, por lo cual un buen modo de decidir qué tan conveniente resulta la adición de interenfriadores es ver qué tanto disminuyen los requerimientos de potencia.

Otras de las posibles razones para una compresión en varias etapas son concernientes al diseño mecánico del equipo, por ejemplo, una de ellas es que al realizar la compresión en una sola etapa con una relación de compresión muy alta (relación de compresión  $r = \text{presión final} / \text{presión inicial}$ ), la temperatura de descarga resultante sea más alta que el límite de operación de los materiales de construcción usuales para compresores, lo cual obligaría a usar materiales especiales o bien imposibilitaría la compresión. Como segunda razón de tipo mecánico se dará un ejemplo para un compresor recíprocante. En el proceso de compresión de un gas, un aumento de presión va acompañado de una disminución en el volumen del gas, lo anterior trae como consecuencia que para compresores recíprocantes conforme aumenta la presión el tamaño del cilindro para manejar el gas disminuye; si se usara una relación de compresión muy alta, sería necesario diseñar el cilindro con la capacidad -

adecuada para manejar un gas con un volumen específico grande, el correspondiente a las condiciones de entrada, y todo el cilindro tendrá que ser diseñado para soportar la alta presión de descarga, lo anterior ocasionaría un alto costo del compresor. Un efecto similar se presenta en los compresores centrífugos aunque en éstos se manifiesta en el diámetro de los impulsores.

Algunas veces es necesaria una compresión en varias etapas para abatir la temperatura del fluido que se está comprimiendo por debajo de temperaturas a las cuales se pueden tener problemas de descomposición del fluido, inicio de reacciones químicas indeseables o algún problema específico del fluido a comprimir.

Finalmente se expondrá una razón muy común para efectuar la compresión en varias etapas y es la disponibilidad comercial de compresores con relaciones de compresión determinadas, por lo cual se tendrá que efectuar la compresión en varias etapas.

#### 2.1.2 SELECCION DE LA PRESION INTERMEDIA DE COMPRESION.

Cuando se va a efectuar una compresión en varias etapas se deben seleccionar las presiones intermedias óptimas de tal manera que se logre el máximo ahorro de trabajo. En la fig. 2.1, (Pág. 6) se puede observar que el área sombreada depende de la elección de la presión intermedia para la cual, el trabajo total de compresión de  $P_1$  a  $P_2$  es mínimo. Enseguida se desarrollará el procedimiento para obtener las presiones óptimas intermedias en los casos en que se decida efectuar la compresión en varias etapas. Este procedimiento se basa en un proceso adiabático para un gas ideal pero en la práctica se usa para cualquier tipo de proceso de compresión.

Para un trabajo en dos etapas la ecuación de trabajo isotérmico es:

$$\text{Con } P_1 V_1 = P_i V_i \quad (2.1)$$

El subíndice "1" indica que es a las condiciones iniciales. El subíndice "i" indica que es a las condiciones intermedias. La igualdad se obtiene debido a que se está suponiendo que el interenfriador baja la temperatura del gas hasta la temperatura inicial, lo anterior se demuestra a continuación:

$$P_1 V_1 = RT_1$$

$$P_i V_i = RT_i$$

$$\text{Si: } T_1 = T_i$$

$$\therefore P_1 V_1 = P_i V_i$$

$$- \sum W_c = \frac{k}{k-1} \left( P_1 V_1 \left[ \left( \frac{P_i}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] + P_i V_i \left[ \left( \frac{P_2}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right) \quad (2.2)$$

$$- \sum W_c = \frac{k}{k-1} \left( P_1 V_1 \left[ \left( \frac{P_i}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} + \left( \frac{P_2}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 2 \right] \right)$$

Lo anterior es para un proceso adiabático y un gas ideal.

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \text{relación de capacidades caloríficas.}$$

De la expresión de trabajo anterior la única variable es  $P_i$ . Para obtener la  $P_i$  óptima se derivará la expresión con respecto a  $P_i$  y después se igualará a cero para despejar el valor de  $P_i$  óptimo.

Haciendo lo anterior se obtiene:

$$P_i = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/2}$$

Como la relación global de compresión se define:

$$r = \frac{P_2}{P_1}$$

finalmente se obtiene:

$$P_i = r^{1/2} \quad (2.4)$$

Repitiendo el procedimiento para tres etapas se obtienen las siguientes presiones óptimas, una para cada una de las etapas intermedias.

Presión de descarga 1er. paso.

$$P_{i1} = \sqrt[3]{P_1^2 P_2} \quad (2.5 A)$$

Presión de descarga 2o. paso.

$$P_{i2} = \sqrt[3]{P_1 P_2^2} \quad (2.5 B)$$

Expresando las relaciones de compresión de cada etapa en términos de la relación global de compresión se obtiene:

$$\frac{P_2}{P_{i2}} = r^{1/3} \quad (2.6 A)$$

$$\frac{P_{i1}}{P_1} = r^{1/3} \quad (2.6 B)$$

Generalizando los resultados anteriores se llega a que las presiones intermedias óptimas son aquellas para las cuales las relaciones de compresión de cada etapa son iguales entre sí e iguales a la raíz enésima, (número de etapas en las cuales se va a efectuar la compresión) de la relación global de compresión.

$$R_i = r^{1/N} \quad (2.7)$$

La elección de N (1, 2, 3, 4, . . . . . N) depende de r y de si se necesita interenfriamiento o no. Si r es muy grande se necesitará N lo suficientemente grande para tener una buena regulación de temperatura por medio de interenfriadores, además de lo anterior existen  $R_i$  recomendadas, basadas en las capacidades estándares por etapas de los compresores comerciales. Si se calcula el compresor con valores de  $R_i$  muy grandes, es poco probable que se encuentre un compresor comercial con esa capacidad de compresión por etapa. Por lo anterior el número de etapas de compresión necesarias se determinará en base al aumento permisible de temperatura y/o la capacidad de compresión por etapa.

## 2.2 SELECCION DEL METODO DE CALCULO.

A continuación se dan las aplicaciones de cada uno de los métodos que se describirán posteriormente.

### METODO DE MOLLIER.

Es un método muy preciso y aplicable a cualquier proceso de compresión, sobre todo para compresores de refrigeración. El principal inconveniente de este método es que se aplica únicamente para componentes puros y se debe tener disponible un diagrama de Mollier del gas que se va a comprimir. Siempre que se tenga un diagrama de Mollier, este método se debe preferir a cualquier otro. Este método no se puede aplicar para mezclas gaseosas debido a que no es común que existan Mollier de mezclas gaseosas.

#### METODO DEL EXPONENTE.

Este método es aplicable tanto a mezclas gaseosas como a componentes puros, pero las suposiciones que se hacen para desarrollarlo lo restringen para presiones de compresión bajas, menores de 15 atmósferas. Aún cuando se use este método para presiones bajas, la exactitud es menor que la de cualquiera de los otros métodos que se describen aquí.

El uso de este método se debe limitar a los casos en los cuales sea imposible aplicar alguno de los otros métodos, debido a cualquiera de las siguientes causas:

- 1) No se tenga un diagrama de Mollier del fluido a comprimir.
- 2) No haya convergencia en el programa de computadora.

#### METODO DE LAS PROPIEDADES RESIDUALES.

Este método se puede aplicar en cualquier caso; el único inconveniente para su aplicación es que requiere un proceso iterativo para su solución, pero la confiabilidad de este método es bastante buena por lo que se debe usar cuando no se tenga un diagrama de Mollier, y cuando no sea aplicable el método que usa el programa de computadora.

#### METODO DEL BALANCE DE ENTROPIA.

Aplicable siempre, ya que la ecuación de estado que se utilizó es la de Redlich - Kwong, modificada por Soave, que tiene como parámetros las constantes críticas de los componentes, las cuales usualmente están disponibles.

La exactitud de este método es buena y teniendo un programa de computadora elaborado se puede usar siempre que sea posible. Uno de los problemas que se presentan en el uso de este método es que no exista convergencia en el programa de computadora, lo cual lo descartaría.

#### PRIORIDADES PARA EL USO DE UN METODO DE CALCULO:

A continuación se dan las prioridades de los diferentes métodos, éstas indican el orden deseado para el cálculo del compresor. Se debe calcular el trabajo de compresión con el método con prioridad más alta posible.

PRIORIDAD	METODO
1	Método de Mollier
2	Balance de Entropía
3	Propiedades Residuales
4	Método del Exponente.

NOTA: Cuando se tengan bajas presiones de compresión y no sea posible aplicar los métodos con prioridad 1 y 2 se podrá usar el método del exponente ya que su uso a bajas presiones, menores de 15 atm, no induce errores muy grandes.



### 2.3 METODO DE MOLLIER (2)

En este procedimiento la única suposición es la de considerar la compresión - reversible y adiabática ó isoentrópica.

El método es puramente gráfico y se explica a continuación.

1er. Paso.

Con la presión y la temperatura iniciales localizar en el diagrama de Mollier correspondiente, el punto de partida.

2do. Paso.

Leer el volumen y la entalpía ( $H_1$ ) que corresponden a las condiciones iniciales.

3er. Paso.

Siguiendo una línea de entropía constante llegar hasta la presión final.

4o. Paso

Leer la entalpía ( $H_2$ ) que corresponde a este punto.

5o. Paso.

Estimar la eficiencia del proceso como la de un proceso politrópico con el auxilio de la tabla 2.1 (Pág.14) para compresores centrífugos. En caso de que el flujo volumétrico sea más pequeño que cualquiera de la tabla, usar el valor de eficiencia más bajo.

6o. Paso.

Calcular el cambio de entalpía del proceso real como:

$$\Delta H_R = \frac{H_2 - H_1}{\text{EFICIENCIA}}$$

7o. Paso.

Con  $H_R = H_1 + \Delta H_R$  y la presión final, ubicar el punto de descarga del compresor.

8o. Paso.

Leer el volumen final y la temperatura final.

9o. Paso.

Calcular el trabajo como:

$$-W = \Delta H = H_R - H_1$$

En la figura 2.2, (Pág.15) se ilustra gráficamente el procedimiento:

TABLA 2.1  
EFICIENCIA POLITROPICA

CAPACIDAD	EFICIENCIA POLITROPICA
<u>Pies Cub. Std.</u> minuto	
500 - 8000	0.76
8001 - 58000	0.77
> 58000	0.78

(2) De referencia 3 de la Bibliografía.

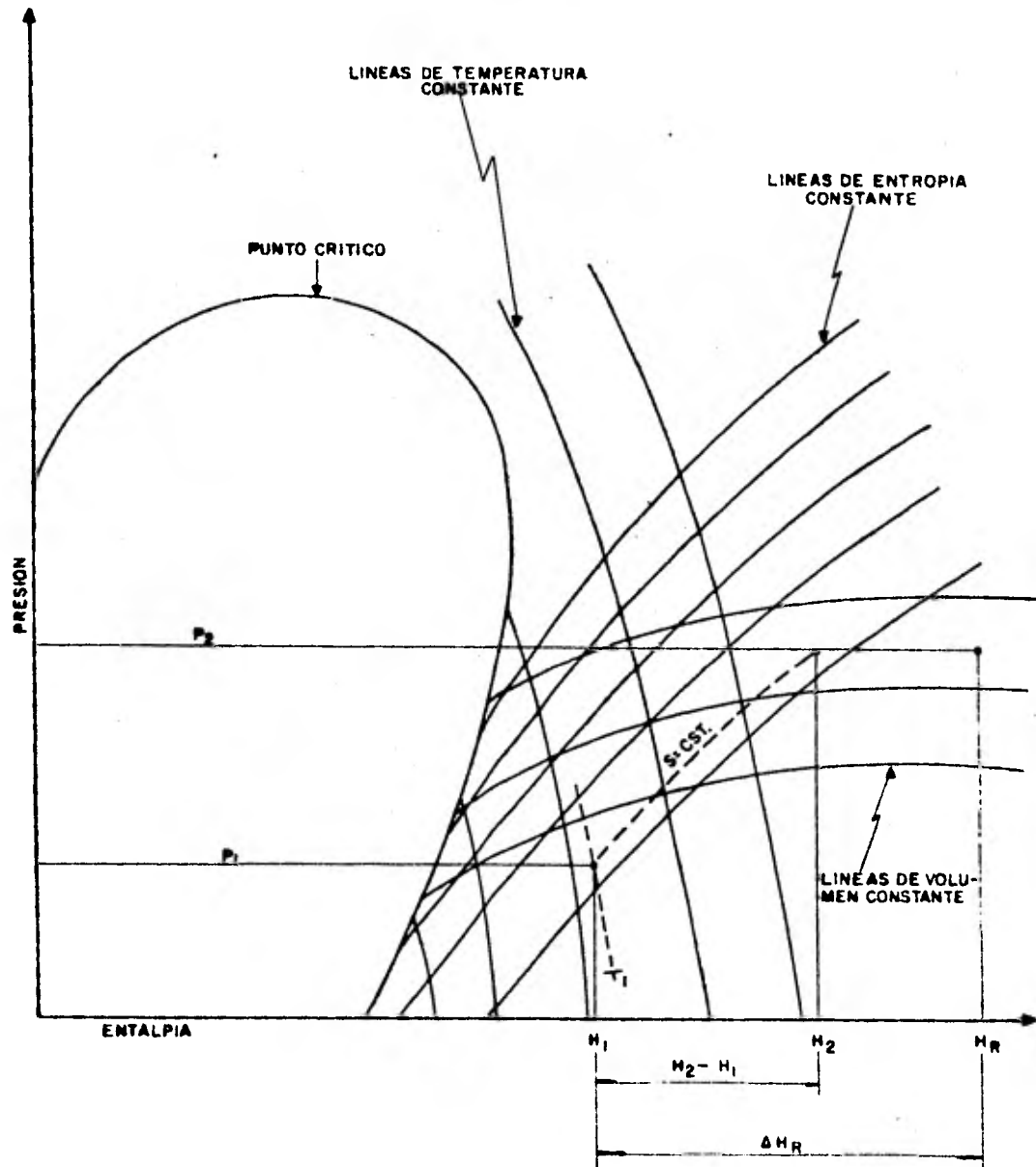


FIGURA 2.2  
 COMPRESION ISOENTROPICA

## 2.4 METODO DEL EXPONENTE

### 2.4.1 PROCESO ADIABATICO Y REVERSIBLE CONSIDERANDO GAS IDEAL.

Esta deducción se basa en considerar que el gas que se va a comprimir se comporta como un gas ideal y que la compresión se lleva a cabo adiabáticamente (no hay transferencia de calor con los alrededores) y el proceso es reversible.

A continuación se hace la deducción de las ecuaciones para calcular la temperatura de descarga y el trabajo de compresión usando las consideraciones anteriores.

#### 2.4.1.1 CALCULO DE LA TEMPERATURA DE DESCARGA.

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica:

$$dU = dQ - dW \quad (2.8)$$

Si se considera al proceso de compresión adiabático y reversible  $[dQ = 0]$ , la primera ley de la termodinámica se transforma en:

$$dU = -dW$$

Considerando que el gas a comprimir es un gas ideal, lo cual es en general -aproximadamente cierto a presiones menores de 15 atms, se tiene que:

$$dU = C_V dT \quad (2.9 A)$$

$$dW = P dV \quad (2.9 B)$$

usando la ley de gas ideal:

$$PV = RT \quad \therefore \quad P = \frac{RT}{V} \quad (2.10)$$

$$C_V dT = -P dV$$

$$C_V dT = -\frac{RT}{V} dV$$

$$\frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} \quad (2.11)$$

Para un gas ideal

$$C_p - C_v = R$$

Reacomodando la ecuación anterior:

$$\frac{C_p}{C_v} - \frac{C_v}{C_v} = \frac{R}{C_v} \quad \text{ó bien} \quad \frac{C_p}{C_v} - 1 = \frac{R}{C_v}$$

definiendo

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

se tiene que para un gas ideal:

$$k - 1 = \frac{R}{C_v}$$

sustituyendo en la ecuación (2.11)

$$\frac{dT}{T} = - (k-1) \frac{dV}{V} \quad (2.12)$$

El desarrollo siguiente se hará suponiendo que:

$$k = \text{const.}$$

lo que implicaría que tanto el  $C_p$  como el  $C_v$  sean constantes, que es el único modo de que se cumpla que

$$\frac{C_p}{C_v} = \text{Const} \quad \text{y} \quad C_p - C_v = R$$

La consideración anterior es el punto débil de este método ya que,  $C_p - C_v = R$  sólo se cumple en ciertos gases y la relación  $C_p / C_v$  es normalmente una función de la temperatura, por lo cual este método no siempre da resultados confiables.

Utilizando la suposición anterior e integrando la siguiente expresión:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = - \int_{V_1}^{V_2} (k-1) \frac{dV}{V}$$

Se llega a:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad (2.13)$$

Usando de nuevo a  $PV = RT$  y reorganizando se obtiene finalmente:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.14)$$

A la relación  $P_2/P_1$  se le conoce como relación de compresión y se le denota  $r$ .

Por lo anterior la temperatura que se obtiene al comprimir un gas hasta una presión  $P_2$  es:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 r^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.15)$$

#### 2.4.1.2 CALCULO DEL TRABAJO DE COMPRESION (DE FECHA).

Con las ecuaciones (2.13) y (2.14), se puede llegar a:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k = PV^k = \text{CONST.} \quad (2.16)$$

Además para un sistema abierto y considerando únicamente trabajo de fecha.

$$dw = -VdP \quad \text{que integrado da:}$$

$$W = - \int VdP \quad \text{ó bien} \quad -W = \int VdP \quad (2.17)$$

De (2.16) se obtiene:

$$V = \left(\frac{P_1}{P}\right)^{\frac{1}{k}} V_1 \quad (2.18)$$

Sustituyendo (2.18) en (2.17) e integrando se obtiene:

$$-W = \frac{kV_1 P_1}{k-1} \left[ \left(r\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2.19)$$

Sustituyendo  $P_1 V_1 = RT_1$  la ecuación queda:

$$-W = \frac{kR T_1}{k-1} \left[ \left(r\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2.20)$$

Las ecuaciones básicas para una compresión adiabática y considerando el gas como ideal:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2.15)$$

$$-W = \frac{k T_1 R}{k-1} \left[ \left(r\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2.20)$$

### 2.4.2 PROCESO POLITRÓPICO Y ADIABÁTICO CON UN GAS IDEAL.

En la práctica es más común suponer que el proceso de compresión es adiabático y que se sigue una trayectoria de compresión que satisface la relación siguiente:

$$PV^n = \text{Constante}$$

Al proceso que sigue la relación anterior se le conoce como proceso politrópico.

#### 2.4.2.1. CALCULO DEL TRABAJO DE COMPRESION (DE FECHA).

Para deducir la expresión que nos da el trabajo de compresión para un proceso adiabático y politrópico se hace lo siguiente:

Balace de Energía:

$$\Delta H + \frac{\Delta v^2}{2gc} + \Delta z \left( \frac{g}{gc} \right) = Q - W \quad (2.21)$$

Considerando proceso adiabático  $Q = 0$  y despreciando los cambios en energía cinética y potencial, la ecuación se simplifica a:

$$\Delta H = -W \quad (2.22)$$

además

$$\Delta H = C_p (T_2 - T_1)$$

Considerando al  $C_p = \text{constante}$  y expresado como:  $C_p = \frac{Rk}{k-1}$

(se está considerando gas ideal, por lo cual:  $C_p - C_v = R$  y  $k = \frac{C_p}{C_v}$ )

la expresión para el trabajo se convierte en:

$$-W = \left( \frac{Rk}{k-1} \right) (T_2 - T_1) \quad (2.23)$$

Usando la suposición de proceso politrópico.

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

y la ley del gas ideal:  $P = \frac{RT}{V}$  según (2.10)

Se llega a:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.25)$$

con lo anterior la ecuación de trabajo se convierte en:

$$-W = \frac{T_1 R k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.26)$$

Las ecuaciones de un proceso politrópico con un gas ideal son:

$$-W = \frac{T_1 R k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.26)$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.25)$$

#### 2.4.2.2. CORRECCIONES A LAS ECUACIONES DE UN PROCESO POLITROPICO.

Con el objeto de obtener mejores resultados en el cálculo del trabajo y de la temperatura final se hacen las correcciones siguientes:

Primera corrección.

Se introduce el concepto de eficiencia politrópica donde:

$$-W_p = \int V dP \quad \text{con: } PV^n = \text{constante}$$

Integrado se obtiene:

$$-W_p = \frac{nRT_1}{n-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.27)$$

W = Trabajo definido por la ecuación (2.26) por lo cual:

$$n_p = \frac{\frac{n}{n-1} RT_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{\frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} = n_p = \frac{\frac{n}{n-1}}{\frac{k}{k-1}} \quad (2.28)$$

Segunda corrección.

Usar un factor de compresibilidad promedio:

$$P_1 V_1 = \bar{Z} RT_1$$



$\bar{Z}$  = factor de compresibilidad promedio

Anteriormente se había usado  $PV = RT$ .

Tercera corrección.

Trabajo real de compresión =  $\frac{W}{n_p}$

con las ecuaciones anteriores se llega a:

$$-W = \frac{\bar{Z} T_1 R \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{n_p} \quad (2.29)$$

sustituyendo:

$$\frac{k-1}{k n_p} = \frac{n-1}{n}$$

$$-W = \frac{\bar{Z} T_1 R}{\frac{n-1}{n}} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.30)$$

Para la temperatura de descarga se utilizará la siguiente ecuación:

$$T_2 = - \frac{W}{Z R} \frac{n-1}{n} + T_1 \quad (2.31)$$

Ecuaciones corregidas para un proceso politrópico.

$$-W = \frac{\bar{Z} T_1 R}{\frac{n-1}{n}} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2.30)$$

$$T_2 = - \frac{W}{Z R} \frac{n-1}{n} + T_1$$

donde:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k n_p}$$

NOTA: El signo (-) del trabajo sirve para indicar que se efectúa trabajo sobre el sistema. Para efecto del cálculo de  $T_2$  siempre se debe adicionar una cantidad a  $T_1$ .

### 2.4.3 REGLAS DE MEZCLADO PARA GASES IDEALES.

Cuando se está trabajando con mezclas el peso molecular ( $\bar{P}_M$ ), el  $C_p$  y el  $C_v$  de la mezcla se calcularán de la manera siguiente:

Los factores de compresibilidad se deben calcular con las figs. 1a. a 1c - de la sección C del Apéndice.

Cuando se trate de mezclas las propiedades pseudocríticas se calculan como:

$$\bar{C}_p = \sum_{i=1}^N Y_i C_{pi} \quad (2.32)$$

$$C_v = C_p - R \quad (2.33)$$

$$\bar{P}_M = \sum_{i=1}^N Y_i P_{Mi} \quad (2.34)$$

$$\bar{P}_c = \sum_{i=1}^N Y_i P_{ci} \quad (2.35)$$

$$\bar{T}_c = \sum_{i=1}^N Y_i T_{ci} \quad (2.36)$$

Las propiedades reducidas se definen como:

$$\text{Prop. Reducidas} = \frac{\text{Propiedad}}{\text{Prop. Crítica}}$$

Por lo cual:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad \text{y} \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

Las propiedades pseudoreducidas se calculan como:

$$\bar{P}_r = \frac{P}{P_c} \quad \text{y} \quad \bar{T}_r = \frac{T}{T_c}$$

Los valores de las propiedades críticas para algunos compuestos se dan en la sección A del apéndice.

### 2.5 METODO DE LAS PROPIEDADES RESIDUALES (3)

Este método supone un proceso isoentrópico y que las propiedades de un gas real se pueden expresar como las propiedades del gas ideal menos un término que corrija por desviaciones con respecto a la idealidad. De acuerdo a esto cualquier propiedad de un gas puede ser expresada con una ecuación de la siguiente forma:

$$M = M' - \Delta M'$$

$M'$  = Propiedad para el estado de gas ideal

$\Delta M$  = Diferencia entre la propiedad en el estado, ideal y la propiedad en el estado real.

Las ecuaciones básicas para este método son las siguientes:

Balance de entropía.

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT - R \ln \frac{P_2}{P_1} - (\Delta S')_2 + (\Delta S')_1 \quad (2.37)$$

Considerando al proceso reversible, adiabático e isoentrópico  $S = 0$ , se tiene que:

$$0 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT - R \ln \frac{P_2}{P_1} - (\Delta S')_2 + (\Delta S')_1 \quad (2.38)$$

Ecuación para el cálculo del trabajo:

$$-W_s = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT - (\Delta H')_2 + (\Delta H')_1 \quad (2.39)$$

#### 2.5.1 CALCULO DE LAS PROPIEDADES RESIDUALES (4)

Como las ecuaciones anteriores están expresadas en función de las propiedades residuales lo primero que se debe establecer, son los criterios para el cálculo de las propiedades residuales  $H'$  y  $S'$ .

En este trabajo las propiedades residuales se calcularán usando la modificación de Lee-Kesler a la ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubbin, aunque

(3) Ver capítulo 6 de Referencia 8 de la Bibliografía.

solamente se describirá el procedimiento, ya que dichas propiedades ya han sido anteriormente calculadas y tabuladas, por lo cual se recomienda el uso de las tabulaciones que aparecen en la sección B del Apéndice que fueron calculadas por el método que se describe a continuación.

La modificación de Lee y Kesler es:

$$\frac{P_r V_r}{T_r} = 1 + \frac{B}{V_r} + \frac{C}{V_r^2} + \frac{D}{V_r^5} + \frac{c_4}{T_r^3 V_r^2} \left[ \beta + \frac{\gamma}{V_r^2} \right] \exp\left(\frac{\gamma}{V_r^2}\right) \quad (2.40)$$

donde:

$$B = b_1 - \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_4}{T_r^3}$$

$$C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3}$$

$$D = d_1 + \frac{d_2}{T_r}$$

La ecuación de estado anterior debe ser resuelta para  $V_r$  en dos ocasiones, una usando las constantes para el fluido considerado con lo cual se obtiene  $V_r^{(O)}$  y otra con las constantes para el fluido de referencia para obtener  $V_r^{(R)}$ .

Las constantes se dan en la tabla 2. 2. siguiente:

(4) Ver capítulo 5 de Referencia 7 de la Bibliografía y referencia 5.

TABLA 2.2  
CONSTANTES DE EC. MODIFICADA POR LEE-KESLER

CONSTANTE	FLUIDO SIMPLE	FLUIDO DE REFERENCIA
$b_1$	0.1181193	0.2026579
$b_2$	0.265728	0.331511
$b_3$	0.154790	0.027655
$b_4$	0.030323	0.203488
$c_1$	0.0236744	0.0313385
$c_2$	0.0186984	0.0503618
$c_3$	0.0	0.016901
$c_4$	0.042724	0.041577
$d_1 \times 10^4$	0.155488	0.48736
$d_2 \times 10^4$	0.623689	0.0740336
$B$	0.65392	1.226
	0.060167	0.03754

Con los valores de  $V_r^{(0)}$  y  $V_r^{(R)}$  se calculan:

$$z^{(0)} = \frac{P_r V_r^{(0)}}{T_r} \quad \text{y} \quad z^{(R)} = \frac{P_r V_r^{(R)}}{T_r}$$

y luego:

$$z = z^{(0)} + \left( \frac{w}{w_R} \right) (z^{(R)} - z^{(0)})$$

donde:

$$w_R = 0.3978$$

Con los valores de  $z^{(0)}$  y  $z^{(R)}$  se calculan las  $\Delta S'$  y  $\Delta H'$  residuales.

Cálculos de  $\Delta S'$  :

$$\frac{S^0 - S}{R} = -\ln \frac{P^0}{P} - \ln z + \frac{b_1 + \frac{b_3}{T_r^3} + \frac{2b_4}{T_r^2}}{V_r} - \frac{c_1 + \frac{2c_3}{T_r^3}}{2V_r^2} - \frac{d_1}{5V_r^5} - 2E \quad (2.41)$$

$$E = \frac{c_4}{2T_r^3 \gamma^1} \left( \beta + 1 - \left[ \beta + 1 + \frac{\gamma^1}{V_r^2} \right] \text{EXP} \left( - \frac{\beta^1}{V_r^2} \right) \right)$$

de donde:

$$\left( \frac{s^0 - s}{R} \right)^R$$

Se calcula usando las constantes del fluido de referencia,  $Z^{(R)}$  y  $V_r^{(R)}$ :

y  $\left( \frac{s^0 - s}{R} \right)^{(0)}$  se calcula usando las constantes del fluido considerado,  $Z^{(0)}$  y  $V_r^{(0)}$

finalmente:

$$\left( \frac{s^0 - s}{R} \right) = \left( \frac{s^0 - s}{R} \right)^{(0)} + \frac{W}{W_R} \left[ \left( \frac{s^0 - s}{R} \right)^{(R)} - \left( \frac{s^0 - s}{R} \right)^{(0)} \right] \quad (2.42)$$

$$W_R = 0.3978$$

$$s' = s^0 - s$$

Cálculo de  $H'$ :

$$\left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right) = -Tr \left[ Z^{(0)} - 1 - \frac{b_2 + \frac{2b_3}{Tr} + \frac{3b_4}{Tr^2}}{Tr V_r} - \frac{c_2 \frac{3c_3}{Tr^2}}{2Tr V_r^2} + \frac{d_2}{5Tr V_r^5} + 3E \right] \quad (2.43)$$

$\left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(R)}$  Se calcula usando las constantes del fluido de referencia,  $Z^{(R)}$  y  $V_r^{(R)}$ .

$\left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(0)}$  Se calcula usando las constantes del fluido considerado,  $Z^{(0)}$  y  $V_r^{(0)}$ .

finalmente:

$$\left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right) = \left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(0)} + \frac{W}{W_R} \left[ \left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(R)} - \left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)^{(0)} \right] \quad (2.44)$$

$$W_R = 0.3978$$

$$H' = H^0 - H$$

Como se mencionó antes, el planteamiento anterior se da únicamente como referencia ya que para la aplicación de éste método se recomienda el uso de las tabulaciones de la sección B del apéndice. Para el uso de estas tabulaciones sólo es necesario calcular la temperatura y la presión reducidas del fluido.

### 2.5.2 REGLAS DE MEZCLADO (5).

Cuando se trate de mezclas se debe usar el siguiente procedimiento para calcular las propiedades críticas.

$$T_{CM} = \frac{1}{8V_{CM}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Y_i Y_j \left( V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3} \right)^3 \left( T_{ci} T_{cj} \right)^{1/2} \quad (2.45)$$

$$V_{CM} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Y_i Y_j \left( V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3} \right)^3 \quad (2.46)$$

$$V_{ci} = \frac{(0.2905 - 0.085 W_i) RT_{ci}}{P_{ci}} \quad (2.47)$$

$$W_M = \sum_{i=1}^N Y_i W_i \quad (2.48)$$

$$P_{CM} = \frac{(0.2905 - 0.085 W_M) RT_{CM}}{V_{CM}} \quad (2.49)$$

### 2.5.3 EVALUACION DEL TRABAJO DE COMPRESION Y DE LA TEMPERATURA DE DESCARGA.

Para evaluar el trabajo de compresión se debe seguir el proceso iterativo que se describe a continuación.

- 1.- Suponer una temperatura de descarga utilizando como primera aproximación la temperatura dada por la ecuación 2.15.
- 2.- Con la ecuación de la 2.46 a la 2.50, calcular  $Tr_1$  y  $Pr_1$  (a temperatura de succión).
- 3.- Calcular  $Tr_2$  y  $Pr_2$  (a temperatura de descarga supuesta).
- 4.- De tablas de la sección B del apéndice leer los valores de  $\Delta S'_1$  y  $\Delta S'_2$  (Págs. B-1 y B-2).
- 5.- Calcular la integral  $\int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT$  de la manera siguiente, se supondrá que el  $C_p$  sigue la siguiente ecuación:

$$C_p = C_{PA} + C_{PB} (T) + C_{PC} (T^2) + C_{PD} (T^3)$$

- (5) Ver capítulo 4 de referencia 7 de la Bibliografía.

de la sección A del apéndice, se pueden obtener los valores de las constantes para la mayoría de los compuestos.

Sustituyendo e integrando se obtiene:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT = A \ln \frac{T_2}{T_1} + B (T_2 - T_1) + \frac{C}{2} (T_2^2 - T_1^2) + \frac{D}{3} (T_2^3 - T_1^3)$$

- 6.- Con la ecuación 2.37 comprobar si  $\Delta S \approx 0$
- 7.- Si  $\Delta S$  no es cercano a cero, suponer otra temperatura y regresar al paso 2.
- 8.- Si  $\Delta S$  es aproximadamente igual a cero con las tablas de la sección B - del apéndice, leer los valores de:

$$\Delta H'_1 \text{ y } \Delta H'_2$$

con las temperaturas de succión y descarga respectivamente.

- 9.- Valuar el trabajo de compresión reversible como:

$$-W = \Delta H = \left[ \int_{T_1}^{T_2} C_p dT - (\Delta H')_2 - (\Delta H')_1 \right] \quad (2.50)$$

- 10.- Estimar eficiencia politrópica de tabla 2.1 (Pág.14)

- 11.- Calcular el trabajo irreversible.

$$W_{IRREV} = \frac{H}{\eta_p}$$

- 12.- Calcular  $\Delta H$  irreversible como:

$$\Delta H_{IRREV} = \frac{W}{\eta_p}$$

- 13.- Suponer una temperatura de descarga para el proceso irreversible.
- 14.- Con la temperatura supuesta leer los valores de  $\Delta H'_1$  y  $\Delta H'_2$  de las tablas de la sección B del apéndice.
- 15.- Con ec. 2.50 calcular  $\Delta H_{IRREV}$ .
- 16.- Si  $\Delta H_{CALC} = \Delta H_{IRREV}$  se terminó la iteración, si no suponer otra temperatura y regresar al paso 14.



## 2.6 METODO DEL BALANCE DE ENTROPIA (6).

Este se basa en considerar al proceso de compresión isoentrópica y adiabática. Toma en cuenta el comportamiento no ideal de los gases, ya que se utiliza la ecuación de estado Redlich - Kwong, modificada por Soave.

Se utilizó esta ecuación debido a que utilizan como únicos parámetros las constantes críticas, pero el método es aplicable a cualquier ecuación de estado. Debido a los múltiples cálculos que este método involucra se elaboró un programa de computadora que permite aplicarlo fácilmente.

### 2.6.1 PRIMERA PARTE: PROCESO ISOENTROPICO, ADIABATICO Y REVERSIBLE.

Aquí se evaluará el trabajo de compresión y la temperatura de compresión sin considerar la irreversibilidad del proceso la cual se considerará posteriormente.

A continuación se dará una breve explicación de las bases termodinámicas de este método.

La entropía se puede expresar como una función de dos propiedades de estado, por conveniencia aquí se usarán como propiedades de estado el volumen y la temperatura.

$$S = S(T, V)$$

por consiguiente:

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T dV \quad (2.51)$$

Utilizando algunas de las relaciones de Maxwell se pueden hacer las siguientes substituciones:

$$\left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_V = \frac{C_V}{T} \quad \text{y} \quad \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \quad (2.52)$$

$$dS = \frac{C_V}{T} dT - \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV$$

Expresando la energía interna en función del volumen y la temperatura se tiene:

$$U = U(T, V)$$

por lo tanto:

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (2.53)$$

La ecuación se transformará utilizando las relaciones siguientes:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = C_V \quad \text{y} \quad \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$$

$$dU = C_V dT + \left[ T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P \right] dV \quad (2.54)$$

La definición de entalpía es:

$$H = U + PV \quad (2.55)$$

El balance de energía para una compresión en estado estacionario es:

$$\Delta H = Q - W \quad (2.56)$$

Si el proceso es adiabático,  $Q = 0$  y:

$$\Delta H = -W \quad (2.57)$$

Las ecuaciones de la 2.52 a la 2.57, son las ecuaciones básicas para el procedimiento que se desarrolla a continuación.

Este método se aprovecha del hecho de que  $U$ ,  $H$  y  $S$  son funciones de estado, lo cual implica que las variaciones de estas propiedades dependen únicamente del estado inicial y final, y no son funciones de la trayectoria que se sigue para pasar de un estado a otro. En consecuencia si evaluamos  $U$ ,  $H$  y  $S$ , para cualquier camino entre los mismos estados inicial y final, la variación total de una propiedad de estado se calcula como la suma de las variaciones parciales de dicha propiedad a lo largo de todos los segmentos del camino original, por ejemplo:

$$\Delta H_{1-3} = \Delta H_{1-2} + \Delta H_{2-3}$$

En base a lo anterior, el proceso de compresión se puede representar como el proceso en tres etapas representados en la fig. 2.3. (Pág.31).

La representación del proceso de compresión como un proceso en tres etapas - permite evaluar  $S$  ó  $U$  como una función únicamente de la temperatura y el volumen finales. La variación de entalpía se calcula como:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta PV \quad (2.58)$$

Para poder calcular  $\Delta S$  se necesita conocer el volumen y la temperatura finales, a las condiciones de descarga. Lo anterior se efectúa usando una ecuación de estado, aquí se usará la de Redlich - Kwong modificada por Soave.

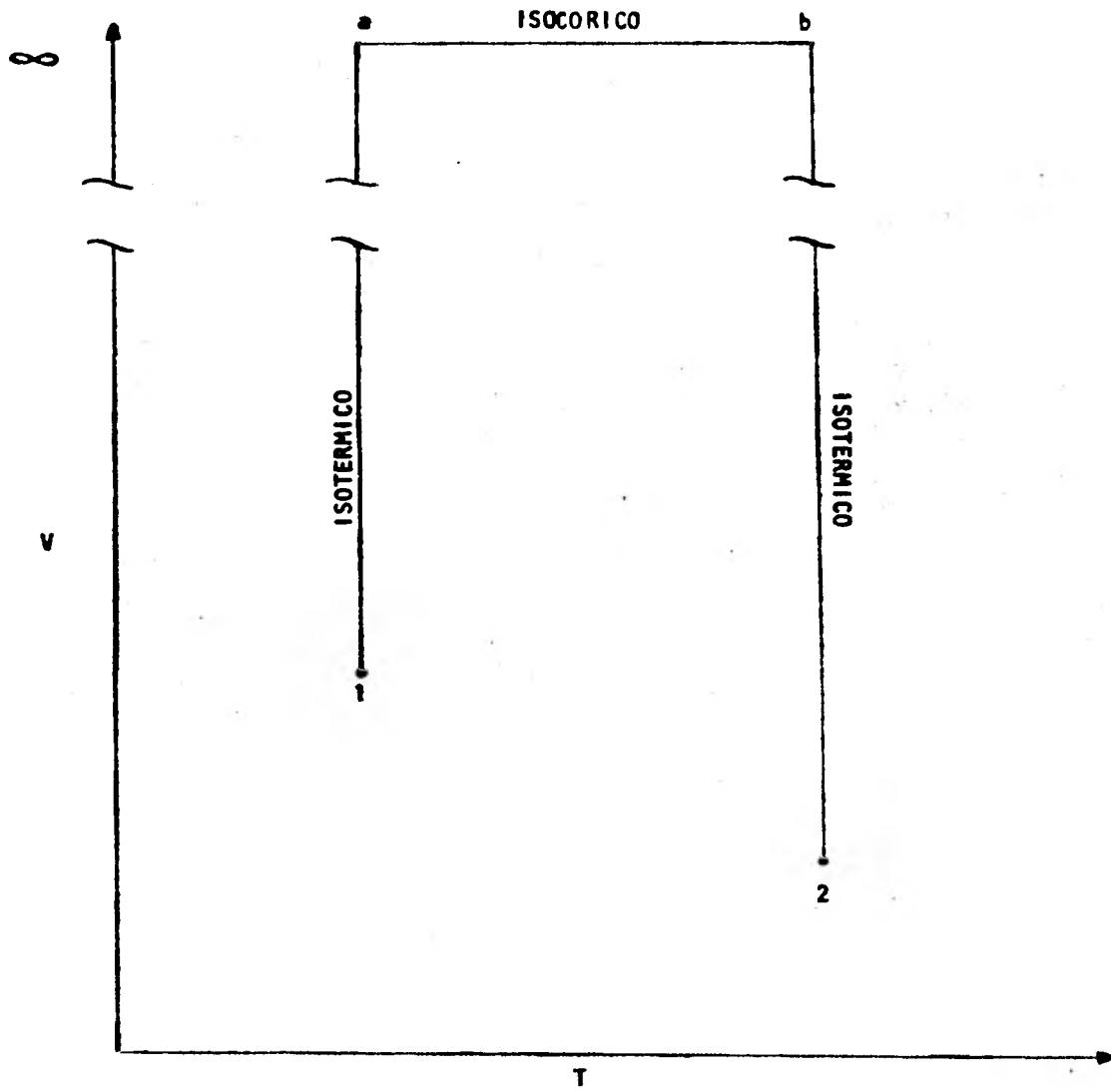


FIGURA 2.3  
PROCESO DE COMPRESION EN TRES ETAPAS

En este procedimiento de cálculo se tienen que plantear las siguientes ecuaciones simultáneas para calcular  $V_2$  y  $T_2$ .

$$S(T_2, V_2) = S(T_1, V_1)$$

y

$$P(T_2, V_2) = P_2$$

La dificultad de la resolución de las ecuaciones anteriores depende, de la complejidad de la ecuación de estado que se esté utilizando. Generalmente la primera ecuación involucra derivadas parciales y la segunda es la ecuación de estado.

Para su resolución se usará el método iterativo propuesto por Newton y Raphson, el cual se explicará más adelante.

#### 2.6.1.1 EVALUACION DE TEMPERATURA DE DESCARGA Y VOLUMEN FINAL $T_2$ y $V_2$ (7).

Considerando el proceso de tres etapas ilustrado en el diagrama  $V-T$ , fig. 2.3, (Pág.31) el trayecto 1-a está en  $T = T_1$ , el trayecto b-2 está en  $T = T_2$  y el trayecto a-b está en  $V = \infty$ . La variación total de entropía de 1 a 2 es:

$$\Delta S_{1-2} = \Delta S_{1-a} + \Delta S_{a-b} + \Delta S_{b-2}$$

donde:

$$\Delta S_{1-a} = \int_{V_1}^{\infty} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV \quad \text{Proceso isotérmico (trayectoria 1-a) Fig.2.3}$$

$$\Delta S_{a-b} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_V}{T} dT \quad \text{Proceso isocórico (trayectoria a-b) Fig.2.3}$$

$$\Delta S_{b-2} = \int_{\infty}^{V_2} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV \quad \text{Proceso isotérmico (trayectoria b-2) Fig. 2.3}$$

Las integrales anteriores se evaluarán usando la ecuación de estado de Redlich-Kwong modificada por Soave que es:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)} \quad (2.59)$$

donde:

$$\Omega_a = 0.4274802327$$

$$\therefore \Omega_b = 0.08664035$$

$$b = \sum_i Y_j \frac{\Omega_b R T c_j}{P_{c_j}} = \Omega_b R \sum_j \frac{Y_i T_{c_j}}{P_{c_i}} \quad (2.60)$$

$$F = \frac{\sum_i \sum_j Y_i Y_j (1 - K_{ij}) \left[ \frac{T_{c_i}}{P_{c_i}} \frac{T_{c_j}}{P_{c_j}} \right] F_i F_j}{\sum_j Y_j \frac{T_{c_j}}{P_{c_j}}} \quad (2.61)$$

$$F_i = \frac{1}{T_i} \left[ 1 + (0.48 + 1.57 W_i + 0.176 W_i^2) (1 - T_{r_i})^{1/2} \right]^2 \quad (2.62)$$

$$F_j = \frac{1}{T_j} \left[ 1 + (0.48 + 1.57 W_j - 0.176 W_j^2) (1 - T_{r_j})^{1/2} \right]^2 \quad (2.63)$$

Para comodidad en el uso de la ecuación se hará el siguiente arreglo de la función de temperatura  $F$  y de las constantes  $\Omega_a$ ,  $\Omega_b$ , y  $b$ .

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{\beta(T) RT}{V(V+b)} \quad (2.64)$$

donde:

$$\beta(T) = \frac{\Omega_a b F}{\Omega_b}$$

$$\beta(T) = \frac{\Omega_a \Omega_b R \sum_j \left[ \frac{Y_i T_{c_j}}{P_{c_j}} \right] \left[ \sum_i \sum_j Y_i Y_j (1 - K_{ij}) \right] \left[ \frac{T_{c_i}}{P_{c_i}} \frac{T_{c_j}}{P_{c_j}} \right] (F_i F_j)^{1/2}}{\Omega_b \sum_j Y_j \frac{T_{c_j}}{P_{c_j}}}$$

haciendo sustituciones y acomodando se llega a:

$$\beta(T) = \sum_i \sum_j Y_i Y_j (1 - K_{ij}) \left[ \frac{\Omega_a \Omega_b}{\Omega_b \Omega_b} b_i b_j F_i F_j \right]^{1/2} \quad (2.65)$$

Para el  $C_v$  (a presión nula) se usará la siguiente expresión:

$$C_v = C_p - R$$

$$C_p = C_{pA} + C_{pB} [T] + C_{pC} [T^2] + C_{pD} [T^3] \quad (2.67)$$

$R$  = Constante universal de los gases.

$C_{pA}$ ,  $C_{pB}$ ,  $C_{pC}$ , y  $C_{pD}$  son constantes características de cada gas.

### 2.6.1.1.1 EVALUACION DE LAS INTEGRALES PARA CALCULAR LOS CAMBIOS PARCIALES DE ENTROPIA.

Para el proceso isotérmico (trayectoria 1-a,  $T = \text{constante} = T_1$ ).

$$\Delta S_{1-a} = \int_{V_1}^{\infty} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV \quad (2.68)$$

A continuación se evalúa la derivada parcial de  $P$  con respecto a la temperatura a volumen constante:

$$\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = \frac{\partial}{\partial T} \left[ \frac{RT}{V-b} - \frac{\beta(T) RT}{V(V+b)} \right] \quad (2.69)$$

$$\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = \frac{R}{V-b} - \frac{\gamma'(T) R}{V(V+b)} \quad (2.70)$$

donde:

$$\gamma'(T) = \frac{d}{dT} (T\beta(T)) \quad (2.71)$$

Evaluando la derivada e integrando se obtiene:

$$\int_{V_1}^{\infty} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = R \ln \frac{V - b}{V_1 - b} - \frac{R}{b} \gamma'(T) \left[ \ln \frac{V_{\infty} + b}{V_{\infty}} - \ln \frac{V_1 + b}{V_1} \right] \quad (2.72)$$

En forma similar:

$$\Delta S_{b-2} = \int_{\infty}^{V_2} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV \quad (2.73)$$

$$\Delta S_{b-2} = R \ln \frac{V_2 - b}{V - b} - \frac{R}{b} \gamma'(T) \left[ \ln \frac{V_2 + b}{V_2} - \ln \frac{V_{\infty} + b}{V_{\infty}} \right] \quad (2.74)$$

Para el trayecto a volumen constante

$$\Delta S_{a-b} = \left[ C_{PA} - R \right] \ln \frac{T_2}{T_1} + C_{PB} (T_2 - T_1) + C_{PC} (T_2^2 - T_1^2) + C_{PD} (T_2^3 - T_1^3) \quad (2.75)$$

con lo anterior la variación total de entropía es:

$$\Delta S_{1-2} = \Delta S_{1-a} + \Delta S_{a-b} + \Delta S_{b-2} \quad (2.76)$$

$$S_{1-2} = R \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b} - \frac{R}{b} \int^T(T) \ln \frac{V_1(V_2 + b)}{V_2(V_1 + b)} + (C_{PA} - R) \ln \frac{T_2 + \frac{C_{PC}}{2} (T_2^2 - T_1^2)}{T_1} + \frac{C_{PD}}{3} (T_2^3 - T_1^3)$$

A la ecuación anterior la llamaremos

$$S(T_2, V_2) = \Delta S_{1-2}$$

Como se está suponiendo un proceso isoentrópico  $\Delta S_{1-2} = 0$ , por lo cual:

$$\Delta S_{1-2} = S(T_2, V_2) = 0$$

La segunda ecuación que nos permitirá calcular la temperatura final es la ecuación de estado de Redlich-Kwong, modificada por Soave, evaluada a las condiciones finales e igualada a cero.

$$\frac{RT_2}{V_2 - b} - \frac{\Omega_a b F R T_2}{\Omega_b V_2 (V_2 + b)} - P_2 = 0$$

Las constantes de la ecuación anterior se dieron previamente.

A la ecuación anterior la llamaremos  $P(T_2, V_2) = 0$

Para utilizar el método iterativo propuesto por Newton y Raphson para la resolución de ecuaciones simultáneas no lineales se deben de plantear las ecuaciones de iteración siguientes:

$$S(T_2^*, V_2^*) = \Delta T \left[ \frac{\partial S(T_2^*, V_2^*)}{\partial T} \right] + \Delta V \left[ \frac{\partial S(T_2^*, V_2^*)}{\partial V} \right] \quad (2.77)$$

$$P(T_2^*, V_2^*) = \Delta T \left[ \frac{\partial P(T_2^*, V_2^*)}{\partial T} \right] + \Delta V \left[ \frac{\partial P(T_2^*, V_2^*)}{\partial V} \right] \quad (2.78)$$

El \* indica que son soluciones supuestas.

La solución simultánea de las ecuaciones anteriores para obtener  $\Delta T$ ,  $\Delta V$  nos permite calcular la nueva aproximación a la solución del sistema de ecuaciones que nos interesa calcular.

Las nuevas aproximaciones están dadas por:

$$T^{*+1} = T^* + \Delta T$$

$$V^{*+1} = V^* + \Delta V$$

\*+1 indica que esta es la nueva suposición de la solución  $\Delta T$  y  $\Delta V$ , se calculan con las expresiones siguientes:

$$\Delta T = \frac{P(T_2^*, V_2^*) \left( \frac{\partial S(T_2^*, V_2^*)}{\partial V} \right) - S(T_2^*, V_2^*) \left( \frac{\partial P(T_2^*, V_2^*)}{\partial V} \right)}{D} \quad (2.79)$$

$$\Delta V = \frac{S(T_2^*, V_2^*) \left( \frac{\partial P(T_2^*, V_2^*)}{\partial T} \right) - P(T_2^*, V_2^*) \left( \frac{\partial S(T_2^*, V_2^*)}{\partial T} \right)}{D} \quad (2.80)$$

donde:

$$D = \left[ \frac{\partial P(T_2^*, V_2^*)}{\partial V} \right] \left[ \frac{\partial S(T_2^*, V_2^*)}{\partial T} \right] - \left[ \frac{\partial P(T_2^*, V_2^*)}{\partial T} \right] \left[ \frac{\partial S(T_2^*, V_2^*)}{\partial V} \right] \quad (2.81)$$

Las derivadas parciales necesarias para las iteraciones se evaluarán numéricamente.

#### 2.6.1.2 EVALUACION DE TRABAJO DE COMPRESION.

Con la  $T_2$  y el  $V_2$  calculados con el procedimiento anterior se debe evaluar el cambio de energía interna  $\Delta U$ , que nos permitirá mediante la expresión siguiente calcular el cambio de entalpía  $\Delta H$ , del proceso de compresión.

$$\Delta H = \Delta U + \Delta PV \quad (2.82)$$

A continuación se deduce la expresión para evaluar  $\Delta U$ , utilizando un proceso en dos etapas, figura 2.4 (Pág. 38).

Para la trayectoria 1 donde  $V = \text{constante}$ . Se tiene que:

$$dU = C_v dT$$



y como  $V = \infty$ ,  $P = 0$  se tiene  $C_V = C_V^*$

$$dU = C_V^* dT = C_V dT \quad (2.84)$$

Utilizando un estado de referencia para hacer la integración se llega a:

$$U_a - U_{REF} = \int_{T_{REF}}^T C_V dT \quad (2.85)$$

Y con  $U_{REF} = 0$ ;  $T_{REF} = T_0$  y  $C_V$  como se definió anteriormente, se llega a:

$$U_a = (C_{PA} - R) (T - T_0) + \frac{C_{PB}}{2} (T^2 - T_0^2) + \frac{C_{PC}}{3} (T^3 - T_0^3) + \frac{C_{PD}}{4} (T^4 - T_0^4)$$

Para la trayectoria 2,  $T = \text{constante}$ , por lo cual la ecuación 2.54 se vuelve:

$$dU = \left[ T \left( \frac{dP}{dT} \right)_V - P \right] dV \quad (2.86)$$

$$U(T_1V) = \frac{RT}{b} \left[ \beta(T) - \gamma(T) \right] \ln \frac{V+b}{V} + (C_{PA} - R) (T - T_0) + \frac{C_{PB}}{2} (T^2 - T_0^2) + \frac{C_{PC}}{3} (T^3 - T_0^3) + \frac{C_{PD}}{4} (T^4 - T_0^4)$$

El trabajo de compresión se determinará usando la siguiente expresión:

$$-W = \Delta H = \Delta U + \Delta PV \quad (2.87)$$

### 2.6.1.3. REGLAS DE MEZCLADO.

Para el cálculo de las propiedades críticas de la mezcla se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$T_{CM} = \left( \frac{\left[ \sum_j y_j (T_{cj}^{5/2} / P_{cj})^{1/2} \right]^2}{\sum_j y_j (T_{cj} / P_{cj})} \right)^{2/3} \quad (2.90)$$

$$P_{CM} = \frac{T_{CM}}{\sum_j y_j \left( \frac{T_{cj}}{P_{cj}} \right)} \quad (2.91)$$

Nota:  $C_V^* = C_V$  de gas ideal.

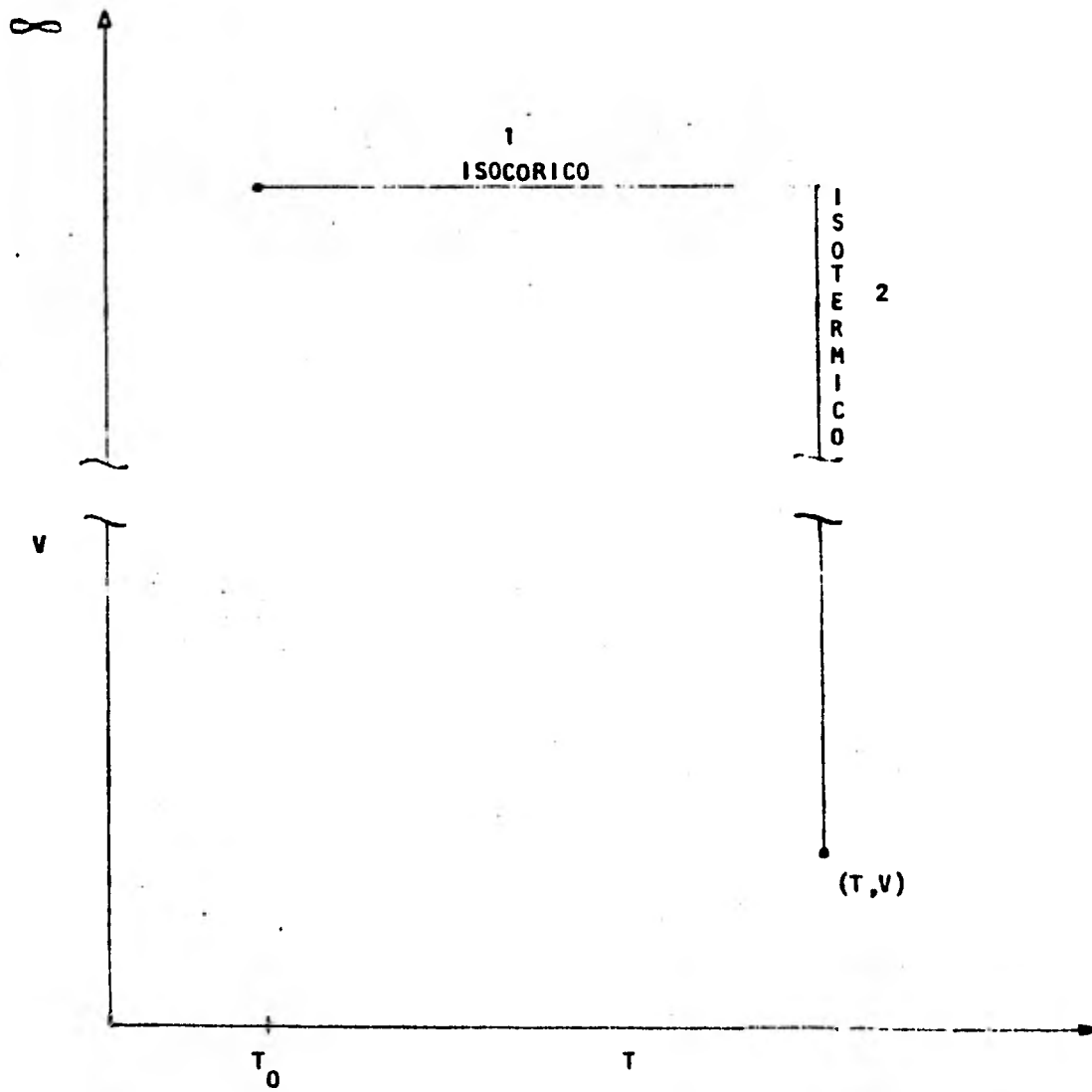


FIGURA 2.4  
TRAYECTORIA PARA EVALUAR CAMBIO DE ENERGIA.

## 2.6.2 SEGUNDA PARTE : CORRECCIONES POR IRREVERSIBILIDAD DEL PROCESO

Para un proceso irreversible se tiene que  $\Delta S > 0$ , el proceso se seguirá considerando adiabático. Para estas condiciones el balance de energía es:

$$\Delta H = -W \quad \text{Proceso irreversible.}$$

Conociendo la eficiencia del proceso, el trabajo real se puede calcular de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{-W_{\text{REVERSIBLE}}}{-W_{\text{REAL}}} \quad (2.88)$$

$$-W_{\text{REAL}} = \frac{-W_{\text{REVERSIBLE}}}{\eta} \quad \text{ó bien} \quad -W_{\text{REAL}} = \frac{H_{\text{REVERSIBLE}}}{\eta}$$

Para resolver el proceso irreversible se usarán como condiciones finales  $-W_{\text{REAL}}$  y  $P_2$ .

Las dos ecuaciones que nos permitirán calcular  $T_2$  y  $V_2$  para el proceso irreversible serán:

$$\Delta U + \Delta PV - \frac{\Delta H_{\text{REVERSIBLE}}}{\eta} = 0 \quad (2.89)$$

y

$$\frac{RT_2}{V_2 - b} - \frac{\Omega_{ab} FR T_2}{\Omega_b V_2 (V_2 + b)} - P_2 = 0$$

El procedimiento de solución de las ecuaciones simultáneas para obtener  $V_2$  y  $T_2$ , es similar al explicado en la primera parte, lo que cambia son las ecuaciones que se van a resolver simultáneamente.

- (6) Ver capítulo 6 de referencia 2 de la Bibliografía.
- (7) Ver capítulo 5 de referencia 7 de la Bibliografía.

## 2.7 NOMENCLATURA

$C_p$ , capacidad calorífica a p=cst. ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol } ^\circ\text{K}}$
$\bar{C}_p$ , capacidad calorífica promedio ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol } ^\circ\text{K}}$
$C_v$ , capacidad calorífica a v=cst. ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol } ^\circ\text{K}}$
$\bar{C}_v$ , capacidad calorífica promedio ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol } ^\circ\text{K}}$
$H$ , entalpía ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol}}$
$k$ , relación de capacidades caloríficas ,	adimensional.
$P$ , presión ,	atmósferas.
$P_c$ , presión crítica ,	atmósferas.
$P_{cm}$ , presión crítica de la mezcla ,	atmósferas.
$P_M$ , peso molecular promedio	adimensional.
$P_r$ , presión reducida ,	adimensional.
$\bar{P}_r$ , presión reducida de la mezcla ,	adimensional.
$r$ , relación de compresión ,	adimensional
$R$ , constante de los gases ,	$\frac{\text{atm.} \cdot \text{lt.}}{\text{gmol } ^\circ\text{K}}$
$S$ , entropía ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol } ^\circ\text{K}}$
$T$ , temperatura ,	$^\circ\text{K}$
$T_c$ , temperatura crítica ,	$^\circ\text{K}$ .
$T_{cm}$ , temperatura crítica de la mezcla ,	$^\circ\text{K}$
$T_r$ , temperatura reducida ,	adimensional.
$\bar{T}_r$ , temperatura reducida de la mezcla ,	adimensional.
$U$ , energía interna ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol}}$
$V$ , volumen ,	litros/gmol.
$V_c$ , volumen crítico ,	litros/gmol.
$W$ , trabajo ,	$\frac{\text{cal.}}{\text{gmol}}$
$w$ , factor acéntrico ,	adimensional.
$y$ , composición ,	adimensional.
$Z$ , factor de compresibilidad ,	adimensional
$\bar{Z}$ , factor de compresibilidad promedio ,	adimensional.

$\eta_p$ , eficiencia politrónica, adimensional.

Subíndices.

i = componente "iésimo".

1 = a condiciones de succión.

2 = a condiciones de descarga.

CAPITULO III  
DESARROLLO Y CALCULO  
DEL SISTEMA

### 3.1 SISTEMAS A ANALIZAR

Para el diseño de la estación de compresión se analizaron las siguientes alternativas:

- 1.- Compresión en una etapa.
- 2.- Compresión en dos etapas.
- 3.- Compresión en tres etapas.

Estas alternativas se evaluaron utilizando los métodos siguientes:

- 1.- Método del exponente.
- 2.- Método de propiedades residuales.
- 3.- Método del balance de entropía.

El método del Mollier no es aplicable en nuestro caso debido a que se trata de una mezcla gaseosa y no existe el diagrama de Mollier.

A continuación se da una descripción de cada una de las alternativas que se analizaron.

#### 3.1.1 Compresión en una etapa.

##### 3.1.1.1 Diagrama de flujo.

El diagrama de flujo de este sistema está representado en la fig.3.1 (Pág.46)

##### 3.1.1.2 Descripción del proceso.

El gas de alimentación a 5.1 atmósferas y 37.8°C proveniente de la batería de separación de líquidos entra al compresor CA - 101, donde se comprime hasta una presión de 82.31 atmósferas man.

El gas de alta presión pasa por el enfriador tipo soloaire EM - 101 donde es enfriado hasta la temperatura de 54.44°C especificada en las bases de diseño.

El gas efluente del enfriador EM - 101 pasa por el separador de condensados - TH - 101, donde el condensado (por aumento de presión y enfriamiento de la mezcla) se separa de la corriente gaseosa.

El gas se envía a la planta endulzadora de gas y los condensados se envían al drenaje.

### 3.1.2 COMPRESION EN DOS ETAPAS

#### 3.1.2.1 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo de este sistema es el 3.2 (Pág. 47)

#### 3.1.2.2 Descripción del proceso.

El gas de alimentación a 5.1 atmósferas man. y 37.8°C proveniente de la batería de separación entra al compresor CA - 101, donde se comprime hasta 22.31 atmósferas man.

El gas efluente del compresor CA - 101 pasa por el enfriador tipo soloaire - EM - 101 donde se enfría hasta 54.44°C.

El gas proveniente del enfriador EM - 101 pasa por el separador de condensado TH - 101, donde el agua condensada se separa de la corriente gaseosa.

El gas proveniente del separador de condensados TH - 101 se comprime en el compresor CA - 102 hasta una presión de 82.31 atmósferas man.

El gas de alta presión pasa por el enfriador tipo soloaire EM - 102 donde es enfriado hasta la temperatura de 54.44°C especificada en las bases de diseño.

El gas efluente del EM - 102 pasa por el separador de condensados TH - 102, donde el condensado se separa de la corriente gaseosa.

El gas se envía a la planta endulzadora de gas y los condensados se envían al drenaje.

### 3.1.3 COMPRESION EN TRES ETAPAS

#### 3.1.3.1 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo de este sistema es el 3.3 (Pág. 48).

#### 3.1.3.2 Descripción del proceso.

El gas de alimentación a 5.1 atmósferas man. y 37.8°C proveniente de la batería de separación entra al compresor CA - 101 donde se comprime hasta una presión de 13.54 atmósferas man.

El gas efluente del compresor CA - 101 pasa por el enfriador tipo soloaire - EM - 101 donde se enfría hasta 54.44°C.

El gas proveniente del enfriador EM - 101 se comprime en el compresor CA - 102 hasta una presión de 33.6 atmósferas man.



El gas efluente del compresor CA - 102 pasa por el enfriador tipo soloaire - EM - 102 donde se enfría hasta  $54.44^{\circ}\text{C}$ .

El gas proveniente del enfriador EM - 102 pasa por el separador de condensado TH - 101, donde el agua condensada se separa de la corriente gaseosa.

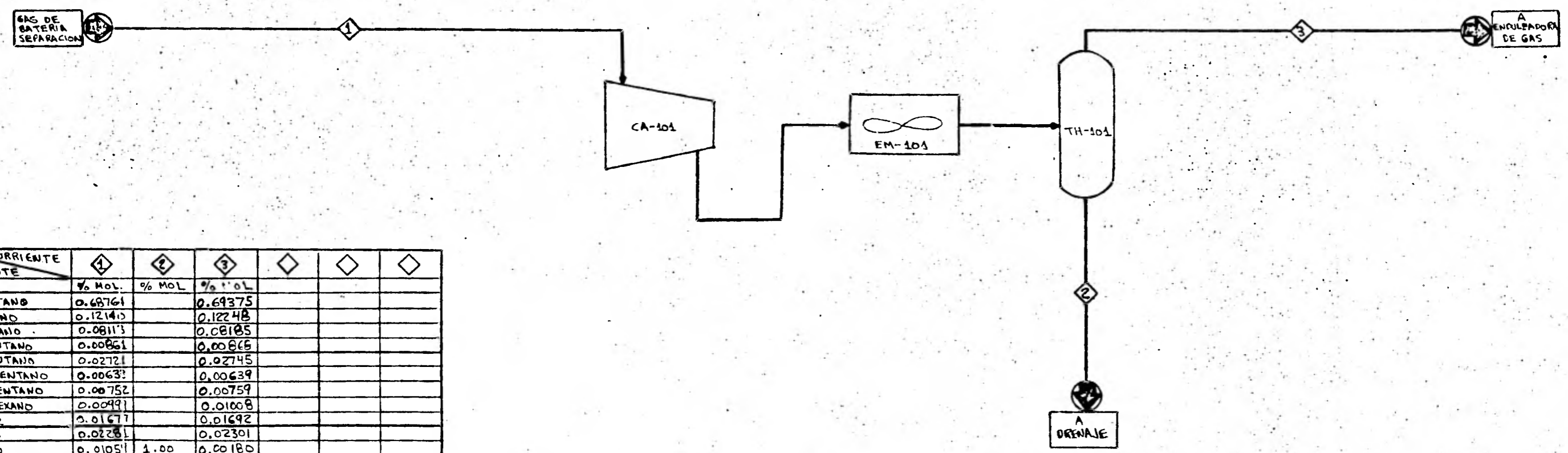
El gas proveniente del separador de condensados TH - 101 se comprime en el compresor CA - 103 hasta una presión de 82.31 atmósferas man.

El gas de alta presión pasa por el enfriador tipo soloaire EM - 103 donde es enfriado hasta la temperatura de  $54.44^{\circ}\text{C}$  especificada en las bases de diseño.

El gas efluente del enfriador EM - 103 pasa por el separador de condensados - TH - 102, donde el condensado se separa de la corriente gaseosa.

El gas se envía a la planta endulzadora de gas y los condensados se envían al drenaje.

CA-101 COMPRESOR CENTRIFUGO      EM-101 ENFRIADOR TIPO SOLOIRE      TH-101 SEPARADOR DE CONDENSADOS



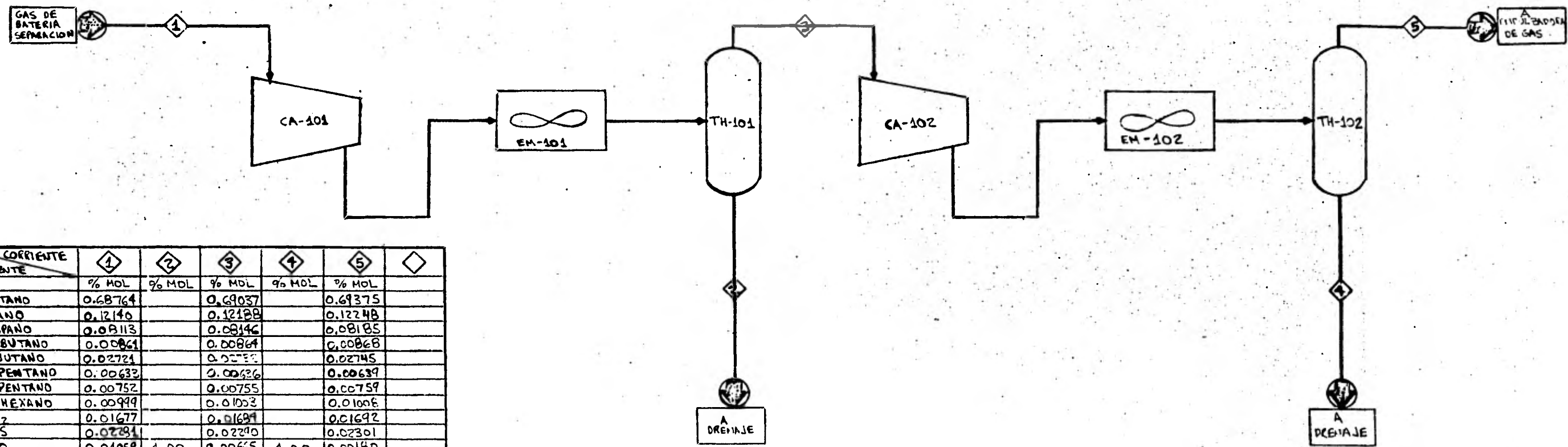
CORRIENTE COMPONENTE	1	2	3			
	% MOL.	% MOL.	% MOL.			
METANO	0.68761		0.69375			
ETANO	0.12140		0.12248			
PROPANO	0.08113		0.08185			
ISOBUTANO	0.00861		0.00866			
N-BUTANO	0.02721		0.02745			
ISOPENTANO	0.00633		0.00639			
N-PENTANO	0.00752		0.00759			
N-HEXANO	0.00491		0.01008			
CO <sub>2</sub>	0.01677		0.01692			
H <sub>2</sub> S	0.02281		0.02301			
H <sub>2</sub> O	0.01051	1.00	0.00180			
FLUJO TOTAL kmol/h	995.89	8.77	987.12			
PESO MOLECULAR PROM.	23.408	18.01	23.961			
PRESION kg/cm <sup>2</sup> abs.	6.1	82.63	82.63			
TEMPERATURA °C	37.81	54.48	54.48			
DENSIDAD @ P, T g/cm <sup>3</sup>	0.00024	0.0548	0.00463			

REVISIONES DESCRIPCION      FECHA      POR      No. de		NUM.      DIBUJOS DE REFERENCIA	APROBADO POR DEPTO. INGEN. PROVS. DEPTO. DIRS. PROVS. SUPTCIA. GRAL. P. I.	COMPRESION UNA ETAPA	FACULTAD DE QUIMICA U. N. A. M.	DISE. J. L. G. M. PROJ. J. L. G. M. REV. R. R. R. Z. CORR. R. R. R. Z. ESC. COY. EN	ESTACION DE COMPRESION CACTUS, CHIAPAS	B DIAGRAMA DE FLUJO 3.1
-----------------------------------------------------------	--	---------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------	------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------	----------------------------

CA-101 y 102  
COMPRESOR CENTRIFUGO

EM-101 y 102  
ENFRIADOR TIPO SERRAVALLE

TH-101 y 102  
SEPARADOR DE LIQUIDOS



CORRIENTE COMPONENTE	1	2	3	4	5	
	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL	% MOL
METANO	0.68764		0.69037		0.69375	
ETANO	0.12140		0.12188		0.12248	
PROPANO	0.08113		0.08146		0.08185	
ISO BUTANO	0.00861		0.00864		0.00868	
N-BUTANO	0.02721		0.02732		0.02745	
ISOPENTANO	0.00633		0.00636		0.00639	
N-PENTANO	0.00752		0.00755		0.00759	
N-HEXANO	0.00999		0.01003		0.01006	
CO <sub>2</sub>	0.01677		0.01689		0.01692	
H <sub>2</sub> S	0.02231		0.02240		0.02251	
H <sub>2</sub> O	0.01059	1.00	0.00665	1.00	0.00180	
FLUJO TOTAL kgol/h	995.89	3.94	991.95	4.83	987.12	
PESO MOLECULAR PROM.	23.903	18.04	23.932	18.01	23.961	
VELOCIDAD kg/cm <sup>2</sup> seg.	6.1	22.63	22.63	82.63	82.63	
TEMPERATURA °C	37.81	54.48	54.48	54.48	54.48	
DENSIDAD @ P. T. gml/cm <sup>3</sup>	0.0024	0.0548	0.0029	0.0548	0.00463	

REVISIONES				NUM.	DIBUJOS DE REFERENCIA	APROBADO POR	
C.P.	FECHA	DESCRIPCION	FECHA POR			DEPTO. INGENIA. PROY.	DEPTO. DISE. PROY.

COMPRESION  
DOS ETAPAS

FACULTAD DE QUIMICA  
U. N. A. M.

ELABORADO EN:

PROY.	J. L. G. V.
REV.	F. F. E.
COORD.	P. F. S.
ESC.	COT EN

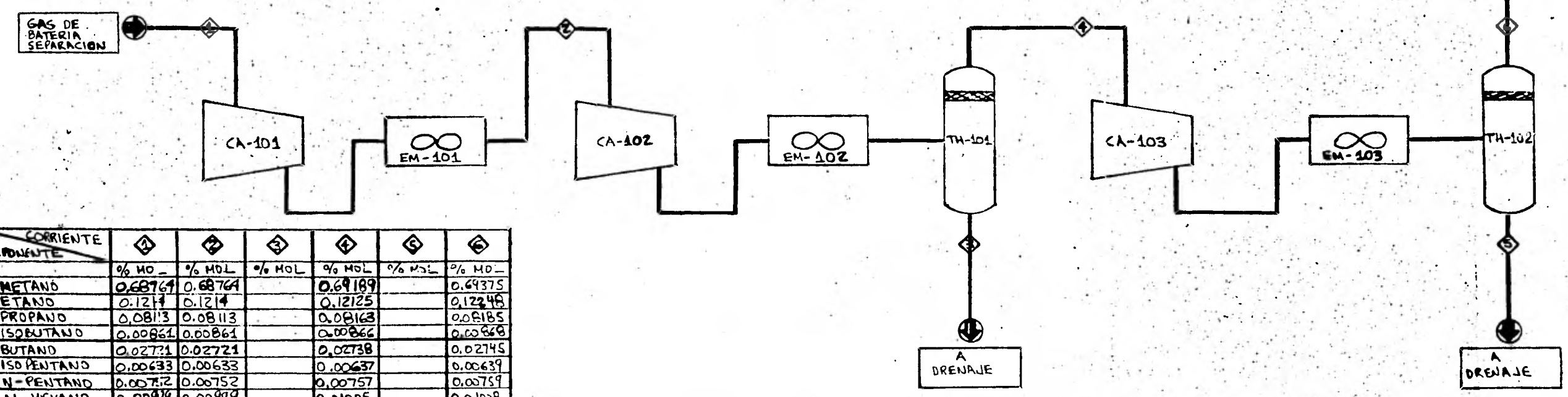
ESTACION DE COMPRESION  
CACTUS, CHIAPAS

DIAGRAMA DE FLUJO  
3.2

CA-101 A CA-103  
COMPRESOR CENTRIFUGO

EM-101 A EM-103  
EMFRIADOR TIPO SOLDAIRE

TH-101 y 102  
SEPARADOR DE COMPRESADOS



CORRIENTE COMPONENTE	1		2		3		4		5		6	
	% MO	% MOL	% MO	% MOL	% MO	% MOL	% MO	% MOL	% MO	% MOL	% MO	% MOL
METANO	0.68764	0.68764			0.69189				0.69375			
ETANO	0.1214	0.1214			0.12125				0.12248			
PROPANO	0.08113	0.08113			0.08163				0.08185			
ISOBUTANO	0.00861	0.00861			0.00866				0.00868			
BUTANO	0.02721	0.02721			0.02738				0.02745			
ISOPENTANO	0.00633	0.00633			0.00637				0.00639			
N-PENTANO	0.00752	0.00752			0.00757				0.00759			
N-HEXANO	0.00999	0.00999			0.01005				0.01008			
CO <sub>2</sub>	0.01677	0.01677			0.01687				0.01692			
H <sub>2</sub> S	0.02281	0.02281			0.02295				0.02301			
H <sub>2</sub> O	0.01059	0.01059	1.00		0.01059	1.00			0.01080			
FLUJO TOTAL kmol/h	995.139	995.89	6.11		989.78	2.66			987.12			
PESO MOLECULAR PROM.	23.908	23.908	18.01		23.945	18.01			23.961			
PRESION kg/cm <sup>2</sup> abs.	6.1	13.86	33.93		33.93	22.63			62.63			
TEMPERATURA °C	37.81	54.48	54.48		54.48	54.48			54.48			
DENS. @ P,T gml/cm <sup>3</sup>	0.00029	0.00054	0.0548		0.00141	0.0548			0.00463			

<table border="1"> <tr> <th>CP</th> <th>FECHA</th> <th>REVISIONES</th> <th>NUM.</th> <th>DEPTO. INGEN. PROY.</th> <th>DEPTO. OPER. PROY.</th> <th>DEPTO. OPER. PROY.</th> <th>DEPTO. OPER. PROY.</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>DESCRIPCION</td> <td>FECHA</td> <td>POR</td> <td>VER</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	CP	FECHA	REVISIONES	NUM.	DEPTO. INGEN. PROY.	DEPTO. OPER. PROY.	DEPTO. OPER. PROY.	DEPTO. OPER. PROY.			DESCRIPCION	FECHA	POR	VER			APROBADO POR DEPTO. INGEN. PROY. DEPTO. OPER. PROY. DEPTO. OPER. PROY.	DIBUJOS DE REFERENCIA NUM.	COMPRENSION TRES ETAPAS	FACULTAD DE QUIMICA U. N. A. M.	ELABORADO EN: ESC.	ESTACION DE COMPRESION CACTUS, CHIAPAS	DIAGRAMA DE FLUJO 3.3
CP	FECHA	REVISIONES	NUM.	DEPTO. INGEN. PROY.	DEPTO. OPER. PROY.	DEPTO. OPER. PROY.	DEPTO. OPER. PROY.																
		DESCRIPCION	FECHA	POR	VER																		

### 3.2 Cálculo de los sistemas.

El cálculo se dará en forma detallada únicamente para el primer sistema, ya que los demás se calcularon en forma similar.

#### 3.2.1 COMPRESION EN UNA ETAPA.

Composición del gas húmedo en la succión.

$$\text{Gas} = 566\,337 \text{ MCSD} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ Hr}} \times \frac{1 \text{ Kgmol}}{23.6947 \text{ M}^3}$$

$$\text{Gas} = 995.89 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr.}}$$

Moles de agua en gas.

Como se especifica que el gas está saturado la humedad del gas es:

$$Y^1 = \frac{P^{\circ} \text{H}_2\text{O}}{P_T - P^{\circ} \text{H}_2\text{O}} \frac{\text{Kgmol H}_2\text{O}}{\text{Kgmol gas seco.}}$$

Con  $P_T = 6.1 \text{ atmósferas abs.}$  y  $T = 37.8^{\circ}\text{C}$

$$Y^1 = \frac{0.0646}{6.1 - 0.0646} = 0.0107 \frac{\text{Kgmol H}_2\text{O}}{\text{Kgmol gas seco}}$$

Vapor agua =  $Y^1 \times \text{gas seco.}$

Además

$$\text{Vapor agua} + \text{gas seco} = 995.89 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr.}}$$

Con lo anterior

$$\text{Gas seco} = \frac{995.89}{1 + 0.0107} = 985.35 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr.}}$$

$$\text{Vapor agua} = 995.89 - 985.35 = 10.54 \frac{\text{Kgmol}}{\text{Hr.}}$$

COMPUESTO	COMPOSICION GAS SECO	KGMOL HR.	COMPOSICION GAS SATURADO CON AGUA.
C <sub>1</sub>	0.695	684.82	0.68764
C <sub>2</sub>	0.1227	120.90	0.12140
C <sub>3</sub>	0.082	80.80	0.08113
iC <sub>4</sub>	0.0087	8.57	0.00861
nC <sub>4</sub>	0.0275	27.10	0.02721
iC <sub>5</sub>	0.0064	6.31	0.00633
nC <sub>5</sub>	0.0076	7.49	0.00752
C <sub>6</sub> <sup>t</sup>	0.0101	9.95	0.00999
CO <sub>2</sub>	0.01695	16.70	0.01677
H <sub>2</sub> S	0.02305	22.71	0.02281
H <sub>2</sub> O	-	10.54	0.01059
	<u>1.0000</u>	<u>995.89</u>	<u>1.0000</u>

### 3.2.1.1 CALCULO DEL AGUA CONDENSADA.

Las condiciones de la descarga son:

$$P_t = 82.63 \text{ atmósferas abs. y } T = 54.44^\circ\text{C}$$

Por lo cual la humedad es:

$$Y_1 = \frac{0.1512}{82.63 - 0.1512} = 0.0018 \quad \frac{\text{Kqmol H}_2\text{O}}{\text{Kqmol gas seco}}$$

$$\text{Agua condensada} = 985.35 \frac{\text{Kqmol}}{\text{Hr.}} \times (0.0107 - 0.0018)$$

$$\text{Agua condensada} = 8.77 \frac{\text{Kqmol}}{\text{Hr.}}$$

### 3.2.1.2 METODO DEL EXPONENTE

Presión de entrada al compresor.

$$P_1 = 6.1 \text{ Atmósferas abs.}$$

Temperatura de entrada al compresor

$$T_1 = 311.11^\circ\text{K}$$

Presión de descarga del compresor

$$P_2 = 83.31 \text{ atmósferas abs.}$$

Propiedades iniciales.

Temperatura reducida a condiciones de entrada.

$$T_{r1} = \frac{T_1}{T_c}$$

De acuerdo con Ec. 2.36 y usando la composición del gas humedo calculada anteriormente, así como los datos de  $T_c$  de la tabla A-1 de la sección A del apéndice se obtiene:

$$\bar{T}_c = 245.21 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\bar{T}_{r1} = \frac{311.11}{245.21} = 1.27$$

Presión reducida a condiciones de entrada.

$$\bar{P}_{r1} = \frac{P_1}{P_c}$$

Usando Ec. 2.35

$$\bar{P}_c = 48.1 \text{ atmósferas.}$$

$$\bar{P}_{r1} = \frac{6.1}{48.1} = 0.13$$

Factor de compresibilidad a condiciones de entrada.

De figura 1-A de la sección C del apéndice se lee:

$$Z_1 = 0.98$$

Volúmen específico inicial.

$$V_1 = \frac{R \frac{\text{atm.m}^3}{\text{Kgmol } ^\circ\text{K}} T_1 (^\circ\text{K}) Z_1}{P_1 (\text{atm.})}$$

$$V_1 = \frac{82.057 \times 10^{-3} \times 311.11 \times 0.98}{6.1} = 4.1 \frac{\text{m}^3}{\text{Kgmol}}$$

$$G = \text{MCD} \times \frac{1 \text{ Kgmol}}{23.6947 \text{ m}^3}$$

$$G = 566 \ 337 \ \text{MCD} \frac{1 \ \text{día}}{24 \ \text{Hr.}} \times \frac{1 \ \text{hr}}{60 \ \text{min.}} \times \frac{1 \ \text{Kgmol}}{23.6947 \ \text{m}^3}$$

$$G = 16.60 \frac{\text{Kgmol}}{\text{min.}}$$

Flujo volumétrico a condiciones de entrada.

$$Q = 4.1 \frac{\text{m}^3}{\text{Kgmol}} \times 16.6 \frac{\text{Kgmol}}{\text{min}} = 68.06 \frac{\text{m}^3}{\text{min.}}$$

Capacidad calorífica a volumen constante.

$$\bar{c}_v = \bar{c}_p - 1.98$$

Para el  $\bar{c}_p$  se utilizó la expresión.

$$\bar{c}_p = \bar{c}_{pA} + \bar{c}_{pB} \times T + \bar{c}_{pC} \times T^2 + \bar{c}_{pD} \times T^3$$

Las constantes promedio se calcularon como:

$$\text{CONST} = \sum_{i=1}^N Y_i \text{CONST}_i$$

Los valores de las constantes para los componentes puros se dan en la tabla A-1 de la sección A del apéndice.

Para nuestra mezcla.

$$\bar{c}_p = 3.599 + 2.595 \text{ E-2} \times T - 5.904 \text{ E-6} \times T^2 - 6.096 \text{ E-10} \times T^3$$

$$\text{a } T = 311.11^\circ\text{K} \quad \bar{c}_p = 11.08 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}^\circ\text{K}}$$

$$\bar{c}_v = 11.08 - 1.98 = 9.10 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}^\circ\text{K}}$$

Estimación de la eficiencia politrópica.

De la tabla 2.1 (Pág. ) se tomó

$$\eta_p = 0.76$$

Relación de capacidades caloríficas.

$$k = \frac{c_p}{c_p} = \frac{11.08}{9.1} = 1.22$$

Parámetro de compresión.

$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k\eta_p} = \frac{1.22 - 1}{1.22 \times 0.76} = 0.24$$

Temperatura de descarga estimada de Ec. 2.25.

$$T_2 = 311.11^\circ\text{K} \times \frac{83.31 \text{ atm}}{6.1 \text{ atm.}}^{0.24} = 582.6^\circ\text{K}$$



Temperatura reducida a condiciones de descarga

$$T_{r2} = \frac{582.6^{\circ}\text{K}}{245.21^{\circ}\text{K}} = 2.38$$

Presión reducida a condiciones de descarga

$$P_{r2} = \frac{83.31 \text{ atm.}}{48.1 \text{ atm.}} = 1.73$$

Factor de compresibilidad a condiciones de descarga.

De la figura 1-B de la sección C (Pág. ) se lee

$$Z_2 = 0.99$$

Factor de compresibilidad promedio.

$$\bar{Z} = \frac{0.98 + 0.99}{2} = 0.985$$

Trabajo de compresión de acuerdo con Ec. 2.30 (Pág. )

$$-W = \frac{0.985 \times 311.11^{\circ}\text{K} \times 1.98}{0.24} \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}^{\circ}\text{K}} \frac{83.31}{6.1} 0.24 - 1$$

$$-W = 2206.54 \frac{\text{Cal.}}{\text{gmol.}}$$

Para una eficiencia de 0.76 se tiene

$$-W = 2903.34 \frac{\text{Cal.}}{\text{gmol.}}$$

Potencia de compresión.

$$P = 2903.34 \frac{\text{Cal.}}{\text{gmol}} \times 995890 \frac{\text{gmol}}{\text{hr.}} \times \frac{1 \text{ hr.}}{3600 \text{ seg.}} \times 0.004185 \frac{\text{KW}}{\frac{\text{Cal}}{\text{seg.}}}$$

$$P = 3361.26 \text{ Kwatts.}$$

Cálculo del enfriador.

$$Q = m C_p T$$

$$C_p = 13.43 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}^{\circ}\text{K}}$$

$$m = 995890 \frac{\text{gmol}}{\text{hr.}}$$

$$T_2 = 582.6^{\circ}\text{K}$$

$$T_1 = 311.11^{\circ}\text{K}$$

$$Q = 13.43 \times 995\,890 (582.6 - 311.11)$$

$$Q = 3.63 \times 10^9 \frac{\text{Cal}}{\text{hr.}}$$

### 3.2.1.3 METODO DE PROPIEDADES RESIDUALES.

Este es un procedimiento iterativo, (ver 2.5.3), aquí se darán únicamente las temperaturas que terminan la iteración.

$$T^+ = 480^\circ\text{K}$$

De las ecuaciones 2.46 a 2.50 y usando la tabla A-1 de la sección A del apéndice se obtiene:

$$W_m = 0.05248$$

$$P_{cm} = 48.23 \text{ atmósferas.}$$

$$T_{cm} = 250.17^\circ\text{K}$$

$$T_{r1} = \frac{311.11^\circ\text{K}}{250.17^\circ\text{K}} = 1.24 \quad P_{r1} = \frac{6.1 \text{ atm.}}{48.23 \text{ atm.}} = 0.127$$

Interpolando de tablas B-1 y B-2 del apéndice se obtiene:

$$\left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_1^0 = 0.04875$$

$$\left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_1^1 = 0.04123$$

$$T_{r2} = \frac{480^\circ\text{K}}{250.17^\circ\text{K}} = 1.92 \quad P_{r2} = \frac{83.31 \text{ atm.}}{48.23 \text{ atm.}} = 1.73$$

$$\left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_2^0 = 0.2147$$

$$\left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_2^1 = 0.0605$$

$$\frac{\Delta S_1}{R} = \left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_1^0 + W_m \left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_1^1$$

$$\frac{\Delta S_1}{R} = 0.04875 + 0.05248 \times 0.04123 = 0.05091$$

$$\frac{\Delta S_2}{R} = \left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_2^0 + W_m \left(\frac{S^0 - S}{R}\right)_2^1$$

$$\frac{\Delta S_2}{R} = 0.2147 + 0.05248 \times 0.0605 = 0.21788$$

El  $C_p$  está dado por la expresión.

$$C_p = 3.599 + 2.595 \text{ E-2} \times T - 5.904 \text{ E-6} \times T^2 - 6.096 \text{ E-10} \times T^3$$

Las unidades son

$$C_p = \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}^\circ\text{K}}$$

El valor de la integral es

$$\int_{560^\circ\text{R}}^{864^\circ\text{R}} \frac{C_p dt}{T} = 5.53196 \quad \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}^\circ\text{K}}$$

El cambio de entropía se calcula como

$$\Delta S = \int_{560}^{864} \frac{C_p dt}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad S_2 + S_1$$

$$\Delta S = 5.53196 - 1.986 \left( \ln \frac{83.31}{6.1} + (0.21788 - 0.05091) \right)$$

$$\Delta S = 0.008$$

Se toma a  $S = 0$

Cálculo de entalpía

$$\text{Con } T_{r2} = 1.92 \quad \text{y} \quad P_{r2} = 1.73$$

E interpolando en tablas B-3 y B-4 del apéndice se obtiene

$$\left(\frac{H^0 - H}{RT_c}\right)_2^0 = 0.515 \quad \left(\frac{H^0 - H}{RT_c}\right)_2^1 = 0.1449$$

$$\text{Con } T_{r1} = 1.24 \quad \text{y} \quad P_{r1} = 0.127$$

$$\left(\frac{H^0 - H}{RT_c}\right)_1^0 = 0.0874 \quad \left(\frac{H^0 - H}{RT_c}\right)_1^1 = 0.0433$$

$$\Delta H'_1 = RT_c \left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)_1^0 + W_m \left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)_1^1$$

$$\Delta H'_2 = RT_c \left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)_2^0 + W_m \left( \frac{H^0 - H}{RT_c} \right)_2^1$$

La entalpfa se calcula con Ec. 2.39 ya que

$$\Delta H = -W$$

$$\Delta H = 1968.63 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}}$$

$\Delta H$  Irreversible.

$$\Delta H_{\text{IRREV}} = \frac{H}{0.76} = \frac{1968.63}{0.76} \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}}$$

$$\Delta H_{\text{IRREV}} = 2590.3 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}}$$

La temperatura que provoca un cambio de entalpfa de  $2590.3 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}}$  es la temperatura final de la compresi3n.

Suponiendo temperaturas y calculando  $\Delta H$  hasta obtener un valor -- cercano a  $2590.3 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}}$

$$T_2 = 520^\circ\text{K}$$

En res3men se tiene

$$-W = 2590.3 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}} \quad T_2 = 520^\circ\text{K}$$

$$P = 2997.52 \text{ KWatts}$$

C3lculo del enfriador.

$$Q = 13.43 \frac{\text{Cal}}{\text{gmol}} \times 995890 \frac{\text{gmol}}{\text{hr.}} (520 - 311.11)^\circ\text{K}$$

$$Q = 2.79 \times 10^9 \frac{\text{Cal}}{\text{hr.}}$$

### 3.2.1.4 METODO DE LA EC. ESTADO MODIFICADA POR REDLICH-KWONG

Los resultados de este se dan en la tabla 4-1 ( P3g. 60) aquf no se da ning3n c3lculo ya que la mayorfa se efectuaron con el programa de computadora.

### 3.2.2 COMPRESION EN DOS ETAPAS

Las composiciones de la succión de cada etapa se dan en el diagrama de flujo 3.2 (Pág.47)

Los resultados están en las tablas 4-2 y 4-3 (Págs.61 y 62)

### 3.2.3 COMPRESION EN TRES ETAPAS

Las composiciones de la succión de cada etapa se dan en el diagrama de flujo 3.3 (Pág.48)

Los resultados están en las tablas 4-4 a 4-6 (Págs.63 a 65)

CAPITULO IV  
CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

Como se muestra en la tabla 4-1 (Pág. 60, ver índice de tablas en Pág. 59) con una relación de compresión alta se obtienen los siguientes resultados; con la ec. de estado de Redlich-Kwong modificada por Soave (para este método se utilizó el programa de computadora que se da en la sección D del apéndice) y el método de Propiedades Residuales los valores son muy similares entre sí, mientras que los mismos comparados con los obtenidos con el método del exponente son muy diferentes. La diferencia en los resultados obtenidos con cada método va disminuyendo conforme la relación de compresión disminuye (Ver tablas 4-2 a 4-9), lo cual demuestra que el uso del Método del Exponente se debe limitar a relaciones de compresión bajas, ya que el diseñar con éstas Relaciones de Compresión Altas nos conduce a sobrediseñar el equipo hasta en un 30% los enfriadores, y en un 10% los compresores, tal como se muestra en la tabla 4-1.

En las tablas 4-2 a 4-6, (Págs. 61 a 65) se observa que los resultados obtenidos con el método de la Ec. de Estado y el de Propiedades Residuales son semejantes, por lo cual en las tablas 4-7 a 4-9 (Págs. 66 a 68), ya no se menciona el método de Propiedades Residuales.

De acuerdo a los resultados de las tablas 4-7 a 4-9 la compresión se hará en dos etapas, los resultados se dan en tablas 4-2 y 4-3, ya que el aumentar una tercera etapa solo disminuye en un 2.16% el trabajo, tabla 4-10. Es importante observar que se obtiene una disminución de trabajo considerable si se diseña con el método de la Ec. de Estado en lugar de usar el método del exponente (tablas 4-7 a 4-9) por lo cual se debe limitar el uso de este último a relaciones de compresión bajas.

El comprimir en dos etapas nos permitirá también disminuir la temperatura máxima en el compresor, lo cual se muestra en la tabla 4-11.

## INDICE DE TABLAS

TABLA	CONTENIDO.
4-1	Parámetros para la compresión en una etapa .
4-2	Parámetros para la primera etapa de la compresión en dos etapas.
4-3	Parámetros para la segunda etapa de la compresión en dos etapas.
4-4	Parámetros para la primera etapa de la compresión en tres etapas.
4-5	Parámetros para la segunda etapa de la compresión en tres etapas.
4-6	Parámetros para la tercera etapa de la compresión en tres etapas.
4-7	Resumen para la compresión en una etapa.
4-8	Resumen para la compresión en dos etapas.
4-9	Resumen para la compresión en tres etapas.
4-10	Disminución de $-W$ y $Q$ con respecto al número de etapas.
4-11	Temperatura máxima con respecto al número de etapas.



TABLA 4-1  
COMPRESION EN UNA ETAPA

Método	Ec. Estado	Propiedades Residuales.	Exponente.
Parámetro			
Temp. de Descarga °K (°R)	519.7 (935.4)	520 (936)	582.6 (1048.68)
-W <sub>total</sub> Cal/gmol (Btu/Lbmol)	2593.58 (4668.4)	2590.3 (4659.58)	2903.34 (5225.22)
Q <sub>enfriador</sub> Cal/Hr. (Bth/hr)	$2.78 \times 10^9$ ( $11.07 \times 10^6$ )	$2.79 \times 10^9$ ( $11.09 \times 10^6$ )	$3.63 \times 10^9$ ( $14.41 \times 10^6$ )
Potencia <sub>total</sub> Kwatts (H. P.)	3003.19 (4027.35)	2997.52 (4019.74)	3361.26 (4507.47)
% Desv. de T con respecto Ec. Estado	-	0.06	12.11
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado	-	-0.19	11.93
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado.	-	0.18	30.17
% Desv. de H.P. con respecto Ec. Estado.	-	-0.19	11.93

## NOTA:

Valores obtenidos con una eficiencia de 0.76 y un gasto de  $995890 \frac{\text{gmol}}{\text{hr.}}$   
(2195.52 Lbmol/Hr.)

TABLA 4-2  
COMPRESION EN DOS ETAPAS  
PRIMERA ETAPA

Parámetro.	Método Ec. Estado	Propiedades Residuales	Exponente
Temp. de Descarga °K (°R)	414.1 (745.4)	412.0 (741.6)	429.2 (772.5)
-W etapa Cal/gmol (Btu/lbmol)	1194.3 (2149.8)	1188.6 (2139.42)	1255.9 (2260.54)
Q enfriador Cal/Hr. (Btu/hr)	$1.27 \times 10^9$ ( $5.04 \times 10^6$ )	$1.24 \times 10^9$ ( $4.93 \times 10^6$ )	$1.45 \times 10^9$ ( $5.77 \times 10^6$ )
Potencia etapa Kwatts (H. P.)	1383.0 (1854.60)	1376.29 (1845.64)	1454.14 (1950.03)
% Desv. de T con respecto Ec. Estado	-	-0.51	3.64
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado	-	-0.48	5.15
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado	-	-2.18	14.48
% Desv. de H.P. con respec to Ec. Estado	-	-0.48	5.15

## NOTA:

Valores obtenidos con una eficiencia de 0.76 y un -  
gasto de 995890 gmol/hr. -  
(2195.52 Lbmol/hr.)

TABLA 4-3  
COMPRESION EN DOS ETAPAS  
SEGUNDA ETAPA

Parámetro	Método	Ec. Estado	Propiedades Residuales.	Exponente
Temp. de Descarga °K (°R)		433.9 (781)	435 (783)	442.3 (796.2)
-W etapa Cal/gmol (Btu/lbmol)		1162.7 (2092.9)	1163.3 (2094.0)	1226.3 (2207.3)
Q enfriador Cal/hr. (Btu/hr)		$1.33 \times 10^9$ ( $5.26 \times 10^6$ )	$1.34 \times 10^9$ ( $5.31 \times 10^6$ )	$1.43 \times 10^9$ ( $5.68 \times 10^6$ )
Potencia etapa Kwatts (H. P.)		1341.07 (1798.4)	1341.74 (1799.3)	1414.46 (1896.82)
% Desv. de T con respecto Ec. Estado		-	0.26	1.95
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado		-	0.05	5.47
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado		-	0.95	7.98
% Desv. de H.P. con respecto Ec. Estado		-	0.05	5.47

## NOTA:

Valores obtenidos con una eficiencia de 0.76 y un gasto de 991950 gmol/hr. (2186.83) lbmol/hr.).

TABLA 4-4  
COMPRESION EN TRES ETAPAS  
PRIMERA ETAPA

Parámetro.	Método	Ec. Estado	Propiedades Residuales.	Exponente
Temp. de Descarga				
°K		377.0	377.0	383.2
(°R)		(678.6)	(678.6)	(689.8)
-W etapa				
Cal/gmol.		743.7	749.4	767.2
(Btu/lbmol).		(1338.6)	(1348.9)	(1380.9)
Q <sub>enfriador</sub>				
Cal/hr.		$7.86 \times 10^8$	$7.86 \times 10^8$	$8.59 \times 10^8$
(Btu/hr).		( $3.12 \times 10^6$ )	( $3.12 \times 10^6$ )	( $3.41 \times 10^6$ )
Potencia <sub>etapa</sub>				
Kwatts		861.13	867.75	888.28
(H.P.)		(1154.8)	(1163.67)	(1191.2)
% Desv. de T. con respecto Ec. Estado		-	0	1.65
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado		-	0.77	3.16
% Desv. de Q. con respecto Ec. Estado.		-	0	9.29
% Desv. de H.P. con respeg to Ec. Estado.		-	0.77	3.16

## NOTA:

Valores obtenidos con una eficiencia de 0.76 y un gasto de 995890 gmol/hr. (2195.52 Lbmol/hr).

TABLA 4-5  
COMPRESION EN TRES ETAPAS  
SEGUNDA ETAPA

Método Parámetro	Ec. Estado	Propiedades Residuales	Exponente
Temp. de Descarga °K (°R)	400 (720)	399 (718.2)	404.6 (728.2)
-W etapa Cal/gmol. (Btu/Lbmol)	809.6 (1457.2)	805.8 (1450.5)	835.0 (1503.0)
Qenfriador Cal/Hr. (Btu/hr)	$8.79 \times 10^8$ ( $3.49 \times 10^6$ )	$8.67 \times 10^8$ ( $3.44 \times 10^6$ )	$9.35 \times 10^8$ ( $3.71 \times 10^6$ )
Potencia etapa Kwatts (H. P.)	937.42 (1257.1)	933.09 (1251.3)	966.87 (1296.6)
% Desv. de T. con respecto Ec. Estado	-	-0.25	1.14
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado	-	-0.46	3.14
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado	-	-1.43	6.3
% Desv. de H.P. con respec to Ec. Estado	-	-0.46	3.14

NOTA:

Valores obtenidos con una eficiencia de 0.76 y un gasto de 995890 gmol/hr. (2195.52 Lbmol/hr).

TABLA 4-6  
COMPRESION EN TRES ETAPAS  
TERCERA ETAPA

Parámetro	Método	Ec. Estado	Propiedades Residuales	Exponente.
Temp. de Descarga °K (°R)		401.2 (722.1)	401.0 (721.8)	403.0 (725.4)
-W etapa Cal/gmol (Btu/Lbmol)		747.8 (1346.1)	750.3 (1350.5)	775.6 (1396.0)
Q enfriador Cal/Hr. (Btu/hr)		$8.9 \times 10^8$ ( $3.53 \times 10^6$ )	$8.9 \times 10^8$ ( $3.53 \times 10^6$ )	$9.12 \times 10^8$ ( $3.62 \times 10^6$ )
Potencia etapa Kwatts (H. P.)		860.63 (1154.13)	863.45 (1157.9)	892.6 (1197.0)
% Desv. de T con respecto Ec. Estado		-	-0.04	0.46
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado		-	0.33	3.71
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado		-	0	2.55
% Desv. de H.P. con respec to Ec. Estado		-	0.33	3.71

NOTA:

Valores obtenidos con una eficiencia de 0.76 y un gasto de 989780 gmol/hr. (2182.05 lbmol/hr.)

TABLA 4-7  
COMPRESION EN UNA ETAPA

Método	Ec. Estado	Exponente
Parámetro		
-W total		
Cal/gmol (Btu/Lbmol)	2593.58 (4668.4)	2903.34 (5225.22)
Q enfriador		
Cal/hr. (Btu/Hr)	$2.78 \times 10^9$ ( $11.07 \times 10^6$ )	$3.63 \times 10^9$ ( $14.41 \times 10^6$ )
Potencia total		
Kwatts. (H. P.)	3003.19 (4027.35)	3361.26 (4507.47)
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado.	-	11.93
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado	-	30.17
% Desv. de H.P. con respecto Ec. Estado.	-	11.93

Esta tabla da los resultados  
totales de la compresión.

TABLA 4-8  
COMPRESION EN DOS ETAPAS

Parámetro	Método	Ec.Estado	Exponente.
-W			
Total			
Cal/gmol. (Btu/Lbmol)		2357.0 (4242.7)	2482.2 (4467.84)
Enfriador			
Cal/hr. (Btu/Hr.)		$2.6 \times 10^9$ ( $10.3 \times 10^6$ )	$2.88 \times 10^9$ ( $11.45 \times 10^6$ )
Potencia			
Total			
Kwatts (H.P.)		2724.07 (3653.0)	2868.60 (3846.85)
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado		-	5.31
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado		-	11.17
% Desv. de H.P. con respec to Ec. Estado		-	5.31

Esta tabla da los resultados  
totales de la compresión.



TABLA 4-9  
COMPRESION EN TRES ETAPAS

Método Parámetro	Ec. Estado	Exponente.
-W total Cal/gmol (Btu/Lbmol)	2301.1 (4141.9)	2377.8 (4279.9)
Q enfriador Cal/hr. (Btu/Hr)	$2.56 \times 10^9$ ( $10.14 \times 10^6$ )	$2.71 \times 10^9$ ( $10.74 \times 10^6$ )
Potencia total Kwatts (H. P.)	2659.2 (3566.03)	2747.8 (3684.8)
% Desv. de -W con respecto Ec. Estado	-	3.33
% Desv. de Q con respecto Ec. Estado	-	5.92
% Desv. de H.P. con respecto Ec. Estado	-	3.33

Esta tabla da los resultados  
totales de la compresión.

TABLA 4-10

DISMINUCION DE -W y Q CON  
RESPECTO AL NUMERO DE ETAPAS.

No. de Etapas	% de Disminución de -W	% de Disminución de Q
Dos etapas	-9.12	-6.96
Tres etapas	-11.28	-8.4

## NOTA:

Valores calculados usando los resultados  
para una etapa con el método de la Ec. -  
Estado.

TABLA 4-11

TEMPERATURA MAXIMA CON  
RESPECTO AL NUMERO DE ETAPAS

No. de Etapas	Temp. Máxima °K (°R)	
Una etapa	519.7	(935.4)
Dos etapas	433.9	(781 )
Tres etapas	401.2	(722.1)

## NOTA:

Valores correspondientes al Método  
de la Ec. Estado.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- American Petroleum Inst. Technical Data Book.  
Petroleum Refining, Segunda Edición, 1970.
- 2.- Balzhiser Richard E., Samuels Michael R., Eliassen  
John D. Chemical Engineering Thermodynamics.  
Prentice Hall, Inc. Primera Edición, 1972.
- 3.- Carrier Corporation. Elliott Multistage Compressors,  
Bulletin P-25A, 1975.
- 4.- Carrier Corporation. Elliot Compressor Refresher.
- 5.- Lee Byung Ik, Kesler Michael G., A Generalized Thermo-  
dynamic Correlation Based On Three-Parameter Correspon-  
ding States, AIChE Journal, Vol. 21, No. 3 1975.
- 6.- Perry Robert H, Chilton Cecil H., Chemical Engineers -  
Handbook, Mc Graw-Hill, Inc. Quinta Edición, 1973.
- 7.- Reid Robert C., Prausnitz John M., Sherwood Thomas K.  
The Properties of Gases and Liquids, Mc Graw-Hill, Inc.  
tercera edición, 1977.
- 8.- Smith J.M., Van Ness H. C., Introduction to Chemical Engineering Ther-  
modynamics.  
Mc Graw-Hill, Inc. Tercera edición 1975

APENDICE

## INDICE DE APENDICE

- Sección A            Propiedades de componentes puros.
- Sección B            Tablas para evaluar propiedades residuales.
- Sección C            Gráficas de factores de compresibilidad.
- Sección D            Programa para calcular el trabajo de compresión  
usando la ecuación de estado de Redlich-Kwong -  
modificada por Soave.

S E C C I O N A

PROPIEDADES DE COMPONENTES PUROS

COMPUESTO	PM.	VC	PC	TC	W	CPA	CP3	CPC	C <sup>PD</sup>
	G/GHOL	LITROS	ATM	GDD. K	ADIM.	CAL/(GNOL*K)	CAL/(GNOL*K**2)	CAL/(GNOL*K**3)	CAL/(GNOL*K**4)
METANO *CH4*	16.043	.0990	45.4	190.6	.068	4.5981	1.24574E-02	2.86095E-06	-2.70291E-09
ETANO *C2H6*	30.070	.1480	48.2	305.4	.098	1.2920	4.25400E-02	-1.65700E-05	2.08100E-09
PROPANO *C3H8*	44.097	.2030	41.9	369.8	.152	-1.0090	7.31501E-02	-3.78910E-05	7.67797E-09
N-BUTANO *C4H10*	58.124	.2550	37.5	425.2	.193	2.2660	7.91300E-02	-2.64700E-05	-6.74000E-10
ISOBUTANO *C4H10*	58.124	.2630	36.0	409.1	.176	-3.3200	7.18900E-02	-4.40900E-05	6.91500E-09
N-PENTANO *C5H12*	72.151	.3040	33.3	469.6	.251	-8.6600	.11640	-6.16300E-05	1.26700E-08
ISOPENTANO *C5H12*	72.151	.3060	33.4	460.4	.227	-2.2750	.12100	-6.51900E-05	1.36700E-08
N-HEXANO *C6H14*	86.178	.3700	29.3	507.4	.296	-1.0540	.13900	-7.44891E-05	1.55099E-08
N-HEPTANO *C7H16*	100.205	.4320	28.0	540.2	.351	-1.2290	.16150	-8.72300E-05	1.82900E-08
ETILENO *C2H4*	28.054	.1290	49.7	282.4	.085	.70900	3.74000E-02	-1.99400E-05	4.19200E-09
PROPILENO *C3H6*	42.081	.1810	45.6	365.0	.149	.88600	5.50200E-02	-2.77100E-05	5.26600E-09
ISOBUTILENO *C4H8*	56.108	.2390	39.5	417.9	.190	3.8340	6.69800E-02	-2.60700E-05	2.17300E-09
BENCENO *C6H6*	78.114	.2590	48.3	562.1	.212	-9.1010	.11330	-7.20600E-05	1.70300E-08
AMONIACO *NH3*	17.031	.0725	111.3	405.6	.250	6.5240	5.69200E-03	4.07800E-06	-8.83000E-09
BIOXIDO DE CARBONO	44.010	.0940	72.8	304.2	.225	4.7280	1.75400E-02	-1.33800E-05	4.09700E-09
MONOXIDO DE CARBONO	28.010	.0931	34.5	132.9	.049	7.3730	-3.07000E-03	6.66200E-06	-3.03700E-09
NITROGENO *N2*	28.013	.0895	33.5	126.2	.040	7.4400	-3.24000E-03	6.40000E-06	-2.79000E-09
OXIGENO *O2*	31.999	.0734	49.8	154.6	.021	6.7130	-8.79000E-07	4.17000E-06	-2.54400E-09
BIOXIDO DE AZUFRE	64.053	.1220	77.8	430.8	.251	5.6970	1.60000E-02	-1.18500E-05	3.17200E-09
AGUA *H2O*	18.015	.0560	217.6	647.3	.344	7.7119	4.59492E-04	2.52107E-06	-8.59007E-10
SULFIDRICO *H2S*	34.080	.0985	88.2	373.2	.100	7.6291	3.43099E-04	5.80896E-06	-2.80993E-09

T A B L A A - 1

NOTA: DATOS OBTENIDOS DE APENDICE A DE LA REFERENCIA 7 DE LA BIBLIOGRAFIA.

S E C C I O N B

TABLAS PARA EVALUAR PROPIEDADES RESIDUALES.



TABLA B-1

$$\left( \frac{S^0 - S}{R} \right)^0$$

B-1

T <sub>r</sub>	P						
	0.010	0.050	0.100	0.200	0.400	0.600	0.800
0.30	11.614	10.000	9.319	8.635	7.961	7.574	7.304
0.35	11.185	9.579	8.898	8.205	7.529	7.140	6.869
0.40	10.802	9.196	8.506	7.821	7.144	6.755	6.483
0.45	10.453	8.847	8.157	7.472	6.794	6.404	6.132
0.50	10.137	8.531	7.841	7.156	6.479	6.089	5.816
0.55	9.850	8.245	7.555	6.870	6.193	5.803	5.531
0.60	9.590	7.993	7.294	6.610	5.933	5.544	5.273
0.65	9.355	7.772	7.052	6.368	5.694	5.306	5.036
0.70	9.142	7.584	6.854	6.140	5.467	5.082	4.814
0.75	8.948	7.425	6.685	5.917	5.240	4.866	4.600
0.80	8.771	7.291	6.531	5.764	5.026	4.654	4.390
0.85	8.608	7.179	6.394	5.610	4.864	4.494	4.231
0.90	8.458	7.086	6.271	5.494	4.714	4.346	4.083
0.93	8.368	7.012	6.194	5.404	4.614	4.246	3.983
0.95	8.318	6.969	6.151	5.351	4.561	4.194	3.931
0.97	8.281	6.937	6.119	5.308	4.518	4.151	3.889
0.98	8.254	6.912	6.094	5.274	4.484	4.117	3.856
0.99	8.234	6.892	6.074	5.249	4.459	4.083	3.823
1.00	8.220	6.876	6.058	5.229	4.439	4.063	3.799
1.01	8.210	6.863	6.045	5.212	4.422	4.046	3.777
1.02	8.203	6.853	6.034	5.198	4.408	4.031	3.757
1.05	8.188	6.837	6.018	5.171	4.371	3.994	3.721
1.10	8.168	6.812	5.993	5.134	4.324	3.947	3.674
1.15	8.145	6.786	5.967	5.096	4.277	3.900	3.627
1.20	8.125	6.761	5.942	5.058	4.230	3.853	3.580
1.30	8.078	6.714	5.895	5.001	4.173	3.796	3.523
1.40	8.037	6.673	5.854	4.959	4.126	3.749	3.476
1.50	8.000	6.637	5.818	4.912	4.079	3.702	3.429
1.60	7.967	6.605	5.786	4.870	4.032	3.655	3.382
1.70	7.937	6.576	5.757	4.828	3.985	3.608	3.335
1.80	7.909	6.549	5.730	4.786	3.938	3.561	3.288
1.90	7.883	6.523	5.704	4.744	3.891	3.514	3.241
2.00	7.858	6.498	5.679	4.702	3.844	3.467	3.194
2.20	7.814	6.453	5.634	4.657	3.799	3.422	3.149
2.40	7.772	6.410	5.591	4.614	3.754	3.377	3.104
2.60	7.731	6.368	5.549	4.572	3.709	3.332	3.059
2.80	7.691	6.327	5.508	4.530	3.664	3.287	3.014
3.00	7.652	6.287	5.468	4.488	3.622	3.242	2.969
3.50	7.574	6.219	5.390	4.410	3.544	3.164	2.891
4.00	7.500	6.155	5.326	4.346	3.480	3.100	2.827

T <sub>r</sub>	P							
	1.000	1.200	1.500	2.000	3.000	5.000	7.000	10.000
7.000	6.935	6.740	6.497	6.102	5.647	5.003	4.570	4.234
6.663	6.497	6.299	6.052	5.720	5.376	4.941	4.619	4.297
6.275	6.109	5.909	5.660	5.330	4.967	4.772	4.619	4.234
5.924	5.757	5.557	5.306	4.974	4.603	4.401	4.234	3.899
5.600	5.441	5.240	4.989	4.656	4.282	4.074	3.899	3.570
5.324	5.157	4.956	4.706	4.373	3.990	3.788	3.607	3.278
5.066	4.900	4.700	4.451	4.120	3.747	3.537	3.353	3.023
4.830	4.665	4.467	4.220	3.892	3.523	3.315	3.131	2.801
4.610	4.446	4.250	4.007	3.684	3.322	3.117	2.935	2.605
4.399	4.238	4.045	3.807	3.491	3.130	2.929	2.741	2.411
4.191	4.034	3.840	3.615	3.310	2.970	2.777	2.605	2.275
3.976	3.825	3.640	3.425	3.135	2.812	2.629	2.463	2.133
3.770	3.599	3.434	3.231	2.964	2.663	2.491	2.334	2.004
3.569	3.444	3.295	3.100	2.860	2.577	2.412	2.262	1.933
3.433	3.326	3.193	3.023	2.790	2.520	2.362	2.215	1.886
3.259	3.180	3.061	2.932	2.719	2.463	2.312	2.170	1.841
3.142	3.106	3.019	2.884	2.682	2.436	2.287	2.148	1.819
2.972	3.010	2.953	2.835	2.646	2.400	2.263	2.126	1.797
2.810	2.893	2.879	2.784	2.609	2.360	2.239	2.105	1.775
2.651	2.736	2.760	2.730	2.571	2.325	2.215	2.083	1.753
2.500	2.645	2.706	2.673	2.533	2.325	2.191	2.062	1.731
2.350	2.553	2.628	2.603	2.415	2.242	2.121	2.001	1.710
2.200	2.462	2.547	2.527	2.301	2.202	2.104	2.007	1.689
2.050	2.371	2.456	2.441	2.186	2.166	2.087	2.010	1.668
1.900	2.280	2.365	2.354	2.071	2.066	2.007	1.940	1.647
1.750	2.190	2.270	2.263	1.956	1.966	1.907	1.850	1.626
1.600	2.100	2.180	2.177	1.841	1.866	1.807	1.760	1.605
1.450	2.010	2.090	2.087	1.726	1.766	1.707	1.670	1.584
1.300	1.920	2.000	1.997	1.611	1.666	1.607	1.580	1.563
1.150	1.830	1.910	1.907	1.496	1.566	1.507	1.490	1.500
1.000	1.740	1.820	1.817	1.381	1.466	1.407	1.400	1.410
0.850	1.650	1.730	1.727	1.266	1.366	1.307	1.310	1.320
0.700	1.560	1.640	1.637	1.151	1.266	1.207	1.210	1.220
0.550	1.470	1.550	1.547	1.036	1.166	1.107	1.110	1.120
0.400	1.380	1.460	1.457	0.921	1.066	1.007	1.010	1.020
0.250	1.290	1.370	1.367	0.806	0.966	0.907	0.910	0.920
0.100	1.200	1.280	1.277	0.691	0.866	0.807	0.810	0.820
0.050	1.110	1.190	1.187	0.576	0.766	0.707	0.710	0.720
0.010	1.020	1.100	1.097	0.461	0.666	0.607	0.610	0.620

NOTA:

OBTENIDA DEL CAPITULO 5  
DE LA REFERENCIA 7 DE  
LA BIBLIOGRAFIA.

$$\left( \frac{3^p - 5}{R} \right)^{(1)}$$

T <sub>r</sub>	P.						
	0.010	0.050	0.100	0.200	0.400	0.600	0.800
0.30	16.702	16.774	16.764	16.744	16.705	16.665	16.626
0.35	15.413	15.408	15.401	15.387	15.359	15.333	15.305
0.40	13.990	13.986	13.981	13.972	13.953	13.934	13.915
0.45	12.564	12.561	12.558	12.551	12.537	12.523	12.509
0.50	11.202	11.200	11.197	11.192	11.182	11.172	11.162
0.55	9.915	9.948	9.946	9.942	9.935	9.928	9.921
0.60	8.670	8.678	8.626	8.623	8.617	8.611	8.606
0.65	7.455	7.459	7.432	7.429	7.424	7.419	7.415
0.70	6.240	6.216	6.191	6.191	6.195	6.191	6.197
0.75	5.025	4.956	4.940	4.940	4.945	4.942	4.948
0.80	3.810	3.716	3.726	3.726	3.725	3.726	3.726
0.85	2.595	2.516	2.526	2.526	2.525	2.526	2.526
0.90	1.380	1.316	1.326	1.326	1.325	1.326	1.326
0.95	0.165	0.153	0.153	0.153	0.153	0.153	0.153
1.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
1.05	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
1.10	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
1.15	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
1.20	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
1.30	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
1.40	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
1.50	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
1.60	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
1.70	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
1.90	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
2.00	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
2.20	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
2.40	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
2.60	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
2.80	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3.00	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
3.50	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
4.00	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

T <sub>r</sub>	P.							
	1.000	1.200	1.500	2.000	3.000	5.000	7.000	10.000
16.506	16.547	16.488	16.390	16.195	15.837	15.468	14.925	14.153
15.278	15.251	15.211	15.144	15.011	14.751	14.496	14.153	13.144
13.896	13.877	13.849	13.803	13.714	13.541	13.376	13.144	11.999
12.486	12.482	12.462	12.430	12.367	12.268	12.145	11.999	10.836
11.153	11.143	11.129	11.107	11.063	10.985	10.920	10.836	9.732
9.914	9.907	9.897	9.882	9.853	9.806	9.769	9.732	8.720
8.799	8.794	8.787	8.777	8.760	8.736	8.723	8.720	7.811
7.810	7.807	7.801	7.794	7.784	7.779	7.785	7.811	7.002
6.933	6.930	6.926	6.922	6.919	6.929	6.952	7.002	6.285
6.155	6.152	6.149	6.147	6.149	6.174	6.213	6.285	5.648
5.458	5.455	5.453	5.452	5.461	5.501	5.555	5.648	5.082
4.826	4.822	4.820	4.822	4.839	4.898	4.969	5.082	4.578
4.238	4.232	4.230	4.236	4.267	4.351	4.442	4.578	4.300
3.694	3.685	3.684	3.696	3.741	3.846	3.941	4.300	4.125
3.650	3.647	3.648	3.669	3.728	3.851	3.966	4.125	3.957
3.486	3.491	3.491	3.437	3.517	3.661	3.788	3.957	3.875
3.264	3.247	3.260	3.318	3.412	3.569	3.701	3.875	3.796
3.093	3.082	3.126	3.195	3.306	3.477	3.616	3.796	3.717
2.939	2.968	2.967	3.067	3.200	3.387	3.532	3.717	3.640
2.806	2.813	2.784	2.933	3.094	3.297	3.450	3.640	3.565
2.686	2.655	2.557	2.790	2.986	3.209	3.369	3.565	3.484
2.577	2.531	2.443	2.683	2.855	2.949	3.134	3.484	3.413
2.437	2.440	2.410	2.611	2.667	2.534	2.767	3.413	3.344
2.343	2.385	2.412	2.447	2.471	2.138	2.428	3.344	3.278
2.226	2.254	2.282	2.300	2.401	2.147	2.159	3.278	3.210
2.150	2.170	2.200	2.220	2.290	2.130	2.138	3.210	3.144
2.115	2.130	2.147	2.166	2.206	2.079	2.083	3.144	3.078
2.086	2.098	2.112	2.129	2.159	2.034	2.034	3.078	3.012
2.067	2.076	2.087	2.102	2.127	2.006	2.006	3.012	2.946
2.053	2.060	2.070	2.083	2.105	1.985	1.985	2.946	2.880
2.043	2.049	2.057	2.069	2.089	1.969	1.969	2.880	2.814
2.035	2.040	2.048	2.058	2.077	1.949	1.949	2.814	2.748
2.025	2.029	2.035	2.043	2.060	1.929	1.929	2.748	2.682
2.019	2.022	2.027	2.034	2.048	1.909	1.909	2.682	2.616
2.015	2.018	2.021	2.028	2.041	1.889	1.889	2.616	2.550
2.012	2.014	2.018	2.023	2.035	1.869	1.869	2.550	2.484
2.010	2.012	2.015	2.020	2.031	1.849	1.849	2.484	2.418
2.007	2.009	2.011	2.015	2.024	1.829	1.829	2.418	2.352
2.006	2.007	2.009	2.012	2.020	1.809	1.809	2.352	2.286

NOTA:

OBTENIDA DEL CAPITULO 5  
DE LA REFERENCIA 7 DE  
LA BIBLIOGRAFIA.

TABLA E-3

$$\left( \frac{H^{\circ} - H}{RT_c} \right)^{(2)}$$

T <sub>r</sub>	P							P							
	0.010	0.050	0.100	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.500	2.000	3.000	5.000	7.000	10.000
0.30	6.045	6.043	6.040	6.034	6.022	6.011	5.999	5.987	5.975	5.957	5.927	5.888	5.740	5.620	5.446
0.35	5.986	5.984	5.981	5.975	5.962	5.950	5.938	5.926	5.914	5.896	5.866	5.721	5.595	5.469	5.278
0.40	5.763	5.761	5.757	5.751	5.738	5.726	5.713	5.700	5.687	5.669	5.636	5.572	5.442	5.311	5.113
0.45	5.615	5.612	5.609	5.603	5.590	5.577	5.564	5.551	5.538	5.519	5.486	5.421	5.288	5.154	4.950
0.50	5.465	5.463	5.459	5.453	5.440	5.427	5.414	5.401	5.388	5.369	5.336	5.270	5.135	4.999	4.791
0.55	5.312	5.312	5.309	5.303	5.290	5.278	5.265	5.252	5.239	5.220	5.187	5.121	4.986	4.849	4.638
0.60	5.162	5.162	5.159	5.153	5.141	5.129	5.116	5.104	5.091	5.073	5.041	4.976	4.842	4.704	4.492
0.65	5.011	5.011	5.008	5.002	4.991	4.980	4.968	4.956	4.945	4.927	4.896	4.833	4.702	4.565	4.353
0.70	4.860	4.860	4.857	4.851	4.840	4.829	4.818	4.806	4.797	4.781	4.752	4.693	4.566	4.432	4.221
0.75	4.710	4.710	4.707	4.701	4.690	4.679	4.668	4.656	4.648	4.632	4.607	4.554	4.434	4.303	4.093
0.80	4.560	4.560	4.557	4.551	4.540	4.529	4.518	4.506	4.498	4.482	4.459	4.413	4.303	4.178	3.974
0.85	4.410	4.410	4.407	4.401	4.390	4.379	4.368	4.356	4.348	4.332	4.312	4.269	4.173	4.056	3.857
0.90	4.260	4.260	4.257	4.251	4.240	4.229	4.218	4.206	4.198	4.182	4.162	4.119	4.043	3.935	3.744
0.95	4.110	4.110	4.107	4.101	4.090	4.079	4.068	4.056	4.048	4.032	4.012	3.970	3.903	3.805	3.628
0.97	4.010	4.010	4.007	4.001	3.990	3.979	3.968	3.956	3.948	3.932	3.912	3.870	3.815	3.728	3.564
0.98	3.910	3.910	3.907	3.901	3.890	3.879	3.868	3.856	3.848	3.832	3.812	3.770	3.725	3.648	3.498
0.99	3.810	3.810	3.807	3.801	3.790	3.779	3.768	3.756	3.748	3.732	3.712	3.670	3.625	3.558	3.420
1.00	3.710	3.710	3.707	3.701	3.690	3.679	3.668	3.656	3.648	3.632	3.612	3.570	3.525	3.468	3.342
1.01	3.610	3.610	3.607	3.601	3.590	3.579	3.568	3.556	3.548	3.532	3.512	3.470	3.425	3.378	3.268
1.02	3.510	3.510	3.507	3.501	3.490	3.479	3.468	3.456	3.448	3.432	3.412	3.370	3.325	3.278	3.188
1.05	3.310	3.310	3.307	3.301	3.290	3.279	3.268	3.256	3.248	3.232	3.212	3.170	3.125	3.078	3.008
1.10	3.110	3.110	3.107	3.101	3.090	3.079	3.068	3.056	3.048	3.032	3.012	2.970	2.925	2.878	2.818
1.15	2.910	2.910	2.907	2.901	2.890	2.879	2.868	2.856	2.848	2.832	2.812	2.770	2.725	2.678	2.638
1.20	2.710	2.710	2.707	2.701	2.690	2.679	2.668	2.656	2.648	2.632	2.612	2.570	2.525	2.478	2.448
1.30	2.310	2.310	2.307	2.301	2.290	2.279	2.268	2.256	2.248	2.232	2.212	2.170	2.125	2.078	2.058
1.40	1.910	1.910	1.907	1.901	1.890	1.879	1.868	1.856	1.848	1.832	1.812	1.770	1.725	1.678	1.658
1.50	1.510	1.510	1.507	1.501	1.490	1.479	1.468	1.456	1.448	1.432	1.412	1.370	1.325	1.278	1.258
1.60	1.110	1.110	1.107	1.101	1.090	1.079	1.068	1.056	1.048	1.032	1.012	0.970	0.925	0.878	0.858
1.70	0.710	0.710	0.707	0.701	0.690	0.679	0.668	0.656	0.648	0.632	0.612	0.570	0.525	0.478	0.458
1.80	0.310	0.310	0.307	0.301	0.290	0.279	0.268	0.256	0.248	0.232	0.212	0.170	0.125	0.078	0.058
1.90	0.210	0.210	0.207	0.201	0.190	0.179	0.168	0.156	0.148	0.132	0.112	0.070	0.025	0.000	0.000
2.00	0.110	0.110	0.107	0.101	0.090	0.079	0.068	0.056	0.048	0.032	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000
2.20	0.010	0.010	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.40	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.60	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

NOTA:

OBTENIDA DEL CAPITULO 5  
DE LA REFERENCIA 7 DE  
LA BIBLIOGRAFIA.

TABLA B-4

B-4

$$\left( \frac{H^o - H}{H^o} \right) (1)$$

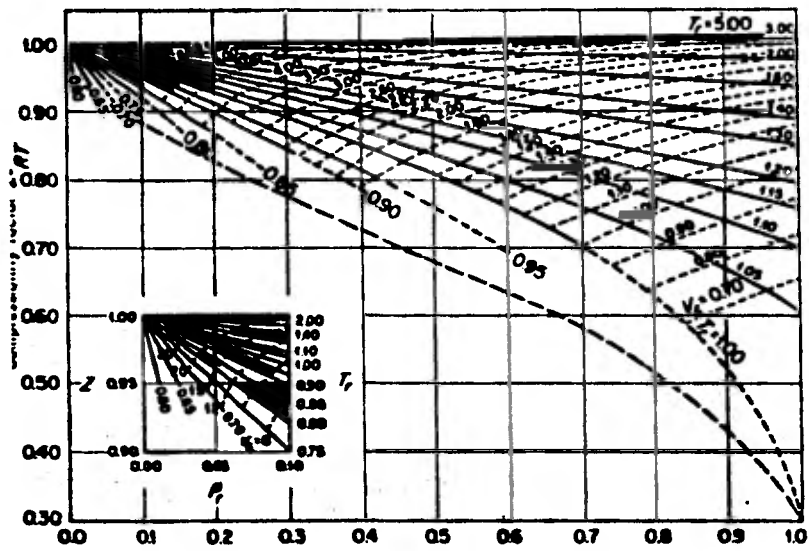
T <sub>r</sub>	P.							P.							
	0.010	0.050	0.100	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.500	2.000	3.000	5.000	7.000	10.000
0.30	11.098	11.096	11.095	11.091	11.083	11.076	11.069	11.062	11.055	11.044	11.027	10.992	10.935	10.872	10.781
0.35	10.656	10.655	10.654	10.653	10.650	10.646	10.643	10.640	10.637	10.632	10.624	10.609	10.581	10.554	10.529
0.40	10.121	10.121	10.121	10.120	10.121	10.121	10.121	10.121	10.121	10.121	10.122	10.123	10.128	10.135	10.150
0.45	9.515	9.515	9.516	9.517	9.519	9.521	9.523	9.525	9.527	9.531	9.537	9.549	9.576	9.611	9.663
0.50	8.868	8.869	8.870	8.872	8.876	8.880	8.884	8.888	8.892	8.899	8.909	8.932	8.978	9.038	9.111
0.55	0.080	0.211	0.212	0.215	0.221	0.226	0.232	0.238	0.243	0.252	0.267	0.290	0.360	0.425	0.531
0.60	0.059	7.568	7.570	7.573	7.579	7.585	7.591	7.596	7.603	7.614	7.632	7.669	7.745	7.824	7.950
0.65	0.045	0.247	0.249	0.252	0.259	0.266	0.273	0.278	0.285	0.297	0.317	0.359	0.471	0.573	0.731
0.70	0.034	0.185	0.185	0.186	0.190	0.196	0.203	0.208	0.215	0.228	0.259	0.329	0.471	0.613	0.837
0.75	0.027	0.142	0.142	0.142	0.146	0.152	0.159	0.164	0.171	0.184	0.225	0.316	0.471	0.613	0.837
0.80	0.021	0.110	0.110	0.110	0.114	0.120	0.127	0.132	0.139	0.152	0.203	0.316	0.471	0.613	0.837
0.85	0.017	0.087	0.087	0.087	0.091	0.097	0.104	0.109	0.116	0.129	0.180	0.316	0.471	0.613	0.837
0.90	0.014	0.070	0.070	0.070	0.074	0.080	0.087	0.092	0.099	0.112	0.163	0.316	0.471	0.613	0.837
0.93	0.012	0.061	0.061	0.061	0.065	0.071	0.078	0.083	0.090	0.103	0.154	0.316	0.471	0.613	0.837
0.95	0.011	0.056	0.056	0.056	0.060	0.066	0.073	0.078	0.085	0.098	0.149	0.316	0.471	0.613	0.837
0.97	0.010	0.052	0.052	0.052	0.056	0.062	0.069	0.074	0.081	0.094	0.145	0.316	0.471	0.613	0.837
0.98	0.010	0.050	0.050	0.050	0.054	0.060	0.067	0.072	0.079	0.092	0.143	0.316	0.471	0.613	0.837
0.99	0.009	0.048	0.048	0.048	0.052	0.058	0.065	0.070	0.077	0.090	0.141	0.316	0.471	0.613	0.837
1.00	0.009	0.046	0.046	0.046	0.050	0.056	0.063	0.068	0.075	0.088	0.139	0.316	0.471	0.613	0.837
1.01	0.009	0.044	0.044	0.044	0.048	0.054	0.061	0.066	0.073	0.086	0.137	0.316	0.471	0.613	0.837
1.02	0.008	0.042	0.042	0.042	0.046	0.052	0.059	0.064	0.071	0.084	0.135	0.316	0.471	0.613	0.837
1.05	0.007	0.037	0.037	0.037	0.041	0.047	0.054	0.059	0.066	0.079	0.131	0.316	0.471	0.613	0.837
1.10	0.006	0.030	0.030	0.030	0.034	0.040	0.047	0.052	0.059	0.072	0.127	0.316	0.471	0.613	0.837
1.15	0.005	0.025	0.025	0.025	0.029	0.035	0.042	0.047	0.054	0.067	0.123	0.316	0.471	0.613	0.837
1.20	0.004	0.020	0.020	0.020	0.024	0.030	0.037	0.042	0.049	0.062	0.119	0.316	0.471	0.613	0.837
1.30	0.003	0.013	0.013	0.013	0.017	0.023	0.030	0.035	0.042	0.055	0.115	0.316	0.471	0.613	0.837
1.40	0.002	0.008	0.008	0.008	0.012	0.018	0.025	0.030	0.037	0.050	0.111	0.316	0.471	0.613	0.837
1.50	0.001	0.005	0.005	0.005	0.009	0.015	0.022	0.027	0.034	0.047	0.107	0.316	0.471	0.613	0.837
1.60	0.000	0.002	0.002	0.002	0.006	0.012	0.019	0.024	0.031	0.044	0.103	0.316	0.471	0.613	0.837
1.70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.010	0.017	0.022	0.029	0.042	0.100	0.316	0.471	0.613	0.837
1.80	-0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.005	-0.011	-0.018	-0.023	-0.030	-0.043	-0.099	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
1.90	-0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.007	-0.013	-0.020	-0.025	-0.032	-0.045	-0.101	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
2.00	-0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.007	-0.013	-0.020	-0.025	-0.032	-0.045	-0.101	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
2.20	-0.001	-0.005	-0.005	-0.005	-0.009	-0.015	-0.022	-0.027	-0.034	-0.047	-0.103	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
2.40	-0.001	-0.006	-0.006	-0.006	-0.010	-0.016	-0.023	-0.028	-0.035	-0.048	-0.105	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
2.60	-0.001	-0.006	-0.006	-0.006	-0.010	-0.016	-0.023	-0.028	-0.035	-0.048	-0.105	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
2.80	-0.001	-0.007	-0.007	-0.007	-0.011	-0.017	-0.024	-0.029	-0.036	-0.049	-0.107	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
3.00	-0.001	-0.007	-0.007	-0.007	-0.011	-0.017	-0.024	-0.029	-0.036	-0.049	-0.107	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
3.50	-0.002	-0.008	-0.008	-0.008	-0.012	-0.018	-0.025	-0.030	-0.037	-0.050	-0.109	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837
4.00	-0.002	-0.008	-0.008	-0.008	-0.012	-0.018	-0.025	-0.030	-0.037	-0.050	-0.109	-0.316	-0.471	-0.613	-0.837

NOTA :

OBTENIDA DEL CAPITULO 5  
DE LA REFERENCIA 7 DE  
LA BIBLIOGRAFIA.

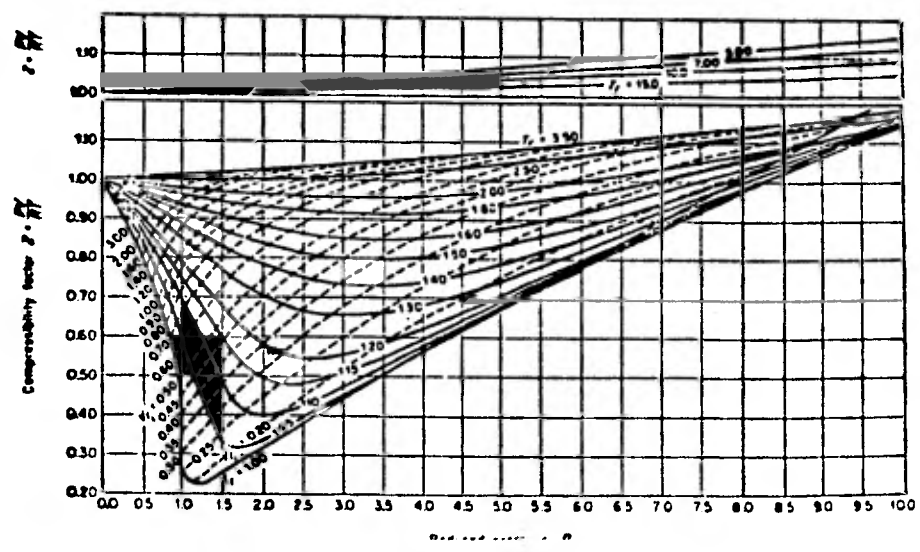
SECCION C

GRAFICAS DE FACTORES DE COMPRESIBILIDAD



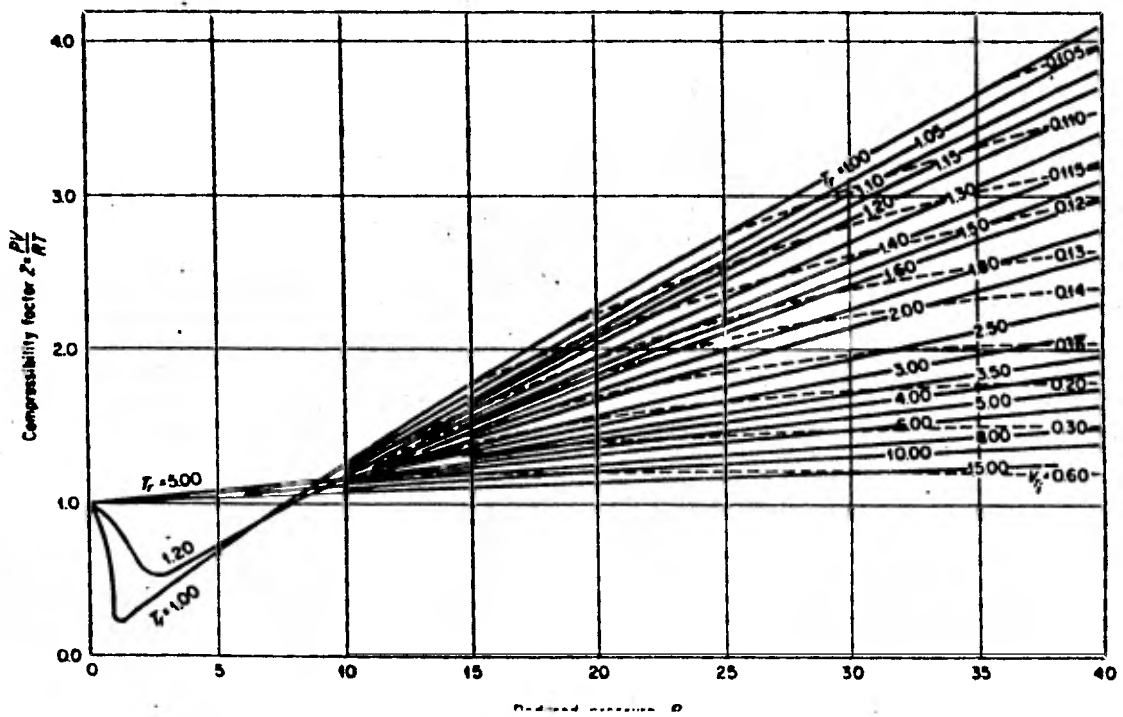
Presión Reducida  $P_r$

Figura 1-A



Presión Reducida  $P_r$

Figura 1-B



Presión Reducida  $P_r$

Figura 1-C

NOTA:

OBTENIDAS DEL CAPITULO 3  
DE LA REFERENCIA 7 DE  
LA BIBLIOGRAFIA.

**SECCION D**

**PROGRAMA PARA CALCULAR EL TRABAJO DE  
COMPRESION USANDO LA ECUACION DE ES-  
TADO DE REDLICH-KWONG MODIFICADA POR  
SOAVE.**



## DESCRIPCION DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL.

A continuación se explicará el desarrollo del programa de acuerdo al diagrama de flujo que se presenta en la pág. D-5.

- 1.- Lectura de datos: Dar el número de componentes (N), presión inicial ( $P_1$ ), temperatura inicial ( $T_1$ ) y presión final ( $P_2$ ).
- 2.- Se pregunta al usuario que defina los componentes de la matriz de propiedades (maprop), sólo es posible utilizar el programa para los componentes de los cuales se tienen datos almacenados, si en el futuro se decide introducir más componentes es posible hacerlo.
- 3.- Se le pide al usuario que introduzca las claves que identifican a los componentes de la mezcla con el objeto, de que el programa genere la matriz de propiedades de la mezcla a comprimir (propa), el orden de los componentes será el orden en el cuál se introduzcan sus claves respectivas.
- 4.- Se imprime el orden en el cuál quedó arreglada la matriz de componentes con el objeto de que el usuario conozca dicho orden.
- 5.- De acuerdo al ordenamiento impreso en 4 se deben introducir las composiciones respectivas.
- 6.- Se imprimen todos los datos suministrados al programa, el peso molecular y la suma de composiciones (éstos dos últimos calculados por el programa) para que el usuario cheque que sean correctos.
- 7.- De acuerdo a las reglas de mezclado descritas en la pág. 22 se calculan las propiedades de la mezcla.
- 8.- Se evalúa la capacidad calorífica a presión constante ( $C_{p1}$ ) de la mezcla a la temperatura inicial.
- 9.- Con el valor de  $C_{p1}$  se estima la temperatura final ( $T_2$ ) como:

$$T_2 = T_1 * (P_2/P_1)^{(R/C_{p1})}$$

donde R es la constante de los gases, esta temperatura se utilizará para iniciar la iteración de Newton-Raphson que se explicó en las págs. 35 y 36, que nos permitirá calcular la temperatura ( $T_2$ ) y el volumen final ( $V_2$ ).

- 10.- Como para calcular el volúmen inicial ( $V_1$ ) se requiere utilizar un procedimiento iterativo aquí se utiliza el método de Wegstein o bien el de Newton-Raphson si falla el primero, los cuáles se explicarán posteriormente. El valor inicial de la iteración se calcula con la ecuación virial que se explica en seguida:

Ecuación Virial:

Una ecuación virial es una ecuación de estado del tipo siguiente:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTB}{V^2} + \frac{RTC}{V^3} + \dots$$

Los parámetros B y C son conocidos como segundo, tercero, . . . etc, - coeficientes viriales y son función únicamente la temperatura del fluido.

Para dar nuestro estimado de volúmen para resolver la ecuación de Redlich-Kwong, modificada por Soave. Se utilizará una ecuación virial -- truncada hasta el segundo coeficiente y expresada en función de Z, el factor de compresibilidad. La ecuación es:

$$Z = 1 + \frac{BP}{RT}$$

Para estimar el segundo coeficiente virial se utilizará:

$$\frac{BPC}{RTC} = f(0) + wf(1)$$

$$f(0) = 0.1445 - \frac{0.33}{Tr} - \frac{0.1385}{Tr^2} - \frac{0.0121}{Tr^3} - \frac{0.000607}{Tr^8}$$

$$f(1) = 0.0637 + \frac{0.331}{Tr^2} - \frac{0.423}{Tr^3} - \frac{0.008}{Tr^8}$$

Las ecuaciones anteriores son válidas para componentes puros, cuando se trate de una mezcla gaseosa se usarán las siguientes reglas de mezclado.

$$B_M = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Y_i Y_j B_{ij}$$

$$P_{cij} = \frac{Z_{cij} RT_{cij}}{V_{cij}}$$

$$T_{cij} = (T_{ci} T_{cj})^{1/2} (1 - K_{ij})$$

$$V_{cij} = \left( \frac{V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3}}{2} \right)^3$$

$$z_{cij} = \frac{z_{ci} + z_{cj}}{2}$$

$$W_{ij} = \frac{W_i + W_j}{2}$$

Como el objeto de usar la ecuación virial es dar una aproximación a el volúmen, en este estudio se utilizará el valor de cero para los parámetros de iteración molecular  $K_{ij}$ .

Lo anterior se hace con el objeto de acelerar la convergencia del método de solución, ya que entre más cercano esté el valor supuesto a la solución más rápido converge el método iterativo, y la ecuación virial proporciona una buena aproximación al valor real de  $V_1$ .

11.- Se calcula el volúmen final como:

$$V_2 = V_1 * (P_1/P_2)^{**} (CV_1/CP_1)$$

Este valor se utilizará para iniciar la iteración de Newton-Raphson.

- 12.- Se inicia la iteración de Newton-Raphson que nos permitirá calcular  $V_2$  y  $T_2$  para una compresión isoentrópica y adiabática, el método se explicó en las págs. 35 y 36
- 13.- Cálculo del cambio de entalpía, esto se hace de acuerdo con el procedimiento descrito en las págs. 36 y 37, además se calcula la capacidad calorífica a presión constante a la temperatura final  $T_2$ , y el trabajo de compresión ( $W_{ides}$ ) reversible.
- 14.- Impresión de datos y de resultados para el proceso de compresión adiabática y reversible.
- 15.- Lectura de la eficiencia (Efic.) con el objeto de iniciar los cálculos para un proceso irreversible (Ver pág. 39 ).
- 16.- Con las ecuaciones que se dan en la pág. 39 y usando el método de Newton-Raphson se calculan el volúmen ( $V_2$ ) y la temperatura -

( $T_2$ ) que corresponden al proceso irreversible. Para iniciar el proceso iterativo se usarán los valores de  $V_2$  y  $T_2$  calculados para el proceso isoentrópico y adiabático.

- 17.- Se calcula la capacidad calorífica a presión constante ( $C_{pZR}$ ), el cambio de entalpía real (DHR) y el trabajo de compresión real - - (WREALS).
- 18.- Impresión de resultados para el proceso irreversible.



## DESCRIPCION DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA SEYDEL.

El método de convergencia usado en esta subrutina es el propuesto por - - - Wegstein, el cuál se explicará brevemente a continuación.

Para la aplicación del método es necesario que la función que se va a resolver sea de la forma siguiente:

$$f(X) = X$$

El método consiste en suponer dos posibles soluciones  $X_1$  y  $X_2$ , y en base a ellas calcular una nueva aproximación a la solución  $X$ , a continuación se descarta de los dos valores supuestos aquél que esté más alejado de la solución y se sustituye por el valor calculado. El procedimiento anterior se efectúa hasta que el nuevo valor de  $X$  no difiera mucho de su valor anterior o bien si el contador de iteraciones ha llegado a su máximo.

La fórmula para calcular la nueva aproximación es:

$$X = \frac{F_2 * X_1 - F_1 * X_2}{F_2 - F_1 + X_1 - X_2}$$

La trayectoria de convergencia del método se muestra en la figura D-1.

En la figura D-1 (Pág.D-8) el índice  $i$  indica la iteración, como se aprecia en la figura este método es de convergencia rápida.

En nuestro caso la función de la cual se quiere encontrar la solución es la ecuación de estado de Redlich-Kwong modificada por Soave arreglada del modo siguiente:

$$V = f(P, T, V)$$

Finalmente se hace notar que el obtener convergencia en este método de solución depende de como se supongan los valores iniciales, ya que para obtener convergencia es necesario que la solución se encuentre en el rango delimitado por los dos valores supuestos:

$$\text{Solución} \in (X_1, X_2)$$

En los casos en que no haya convergencia, un modo de intentar obtenerla, - será ampliar el rango delimitado por los dos valores iniciales supuestos, hacer  $X_1$  más pequeña y  $X_2$  más grande, o aumentar únicamente  $X_2$ , dejando el primer valor supuesto de  $X_1$ , o bien disminuir  $X_1$  dejando  $X_2$  igual al primer valor supuesto. - Lo anterior sólo se da como referencia ya que en el programa no está contemplado, pero en caso de requerirse es posible efectuarlo sin modificar grandemente el programa, o sea que sólo se da como un lineamiento para intentar obtener convergen - cia.

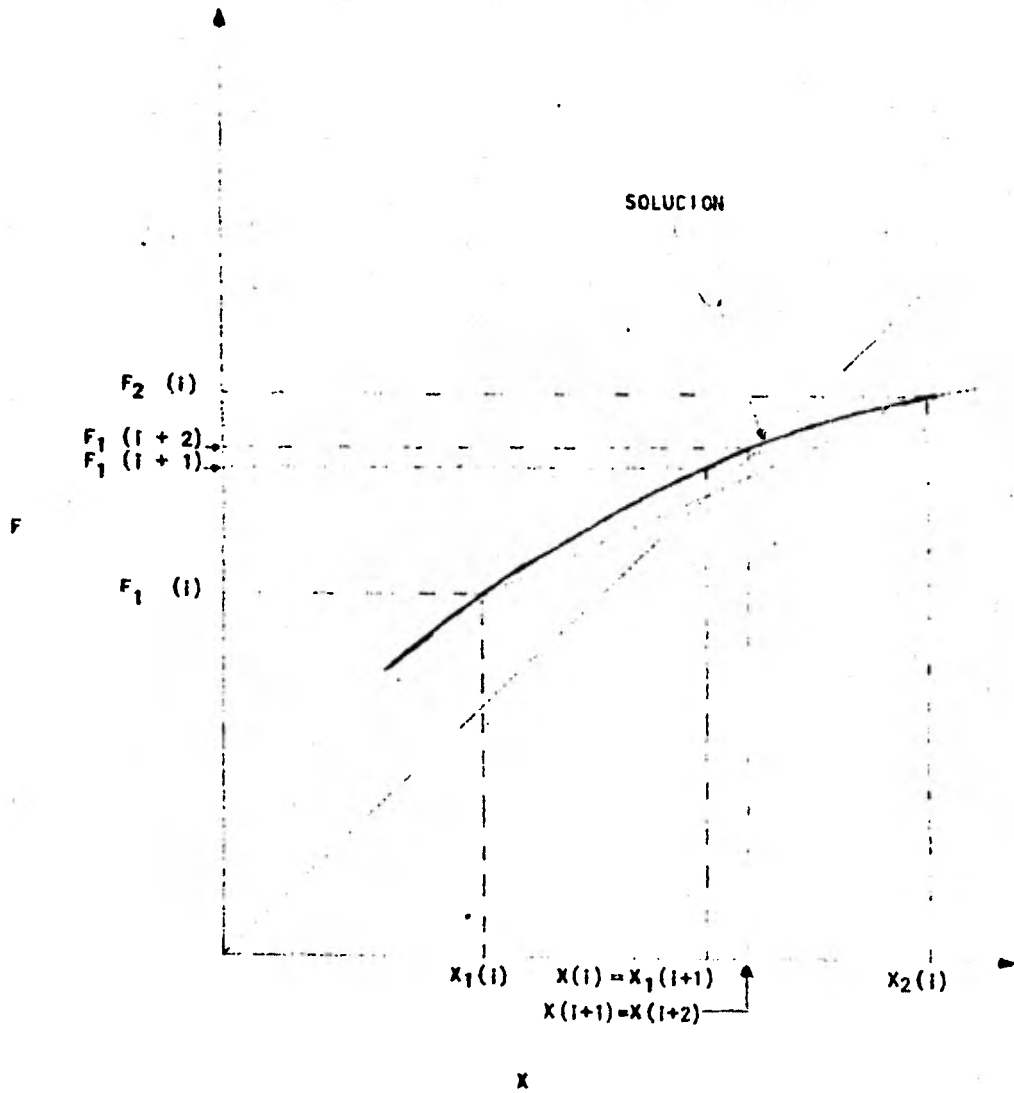


FIGURA D-1  
TRAYECTORIA DE CONVERGENCIA DEL METODO DE WEGSTEIN



## DESCRIPCION DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA NEWTON

El objeto de esta subrutina es aplicar el método de convergencia propuesto - por Newton - Raphson para la solución de ecuaciones no lineales, en los caso en que con el método de Wegstein explicado anteriormente no se obtenga convergencia.

Para usar este método la ecuación que se resuelve debe ser del tipo siguiente:

$$F(X) = 0$$

Para iniciar se debe suponer el valor de la solución,  $X_1$  luego evaluar la función en  $X$ . El valor de la nueva aproximación se calcula como:

$$X_{N+1} = X_N - \frac{F(X_N)}{F_1(X_N)}$$

Para calcular la derivada,  $F'(X_N)$  se utilizó la siguiente fórmula:

$$F'(X) = \frac{F(X + \Delta X) - F(X - \Delta X)}{2 \Delta X}$$

En el programa  $\Delta X$  es una función de  $X$  ( $\Delta X = \delta(X)$ ), y es igual a:

$$\Delta X = \frac{X}{1000}$$

El procedimiento anterior llega a su fin cuando  $F(X) < \epsilon$ , que se logra cuando el valor de la función evaluada en el punto  $X$  es cercano a cero o bien se alcanza el valor máximo del contador, (no hay convergencia).

En la figura D-2 (Pág. D-10) se muestra graficamente la trayectoria de convergencia del método.

En caso de no obtener convergencia con este método se debe cambiar de punto de arranque (valor inicial), en el programa  $X = 0.001 (V_1)$  o sea 0.001 del valor calculado con la ecuación virial, ya que la convergencia de este método depende fuertemente de éste. Aquí se sugiere primero reducir aún más el valor de  $X$ , por ejemplo  $X = 0.0001 X$ , posteriormente hacerlo  $X = 0.1 X$  y si con ninguno de estos cambios se obtiene la convergencia hacer  $X = 10 X$ . Lo anterior son solamente posibles modificaciones que de ningún modo asegura obtener convergencia, pero pueden ser usadas en intentos para obtenerla.

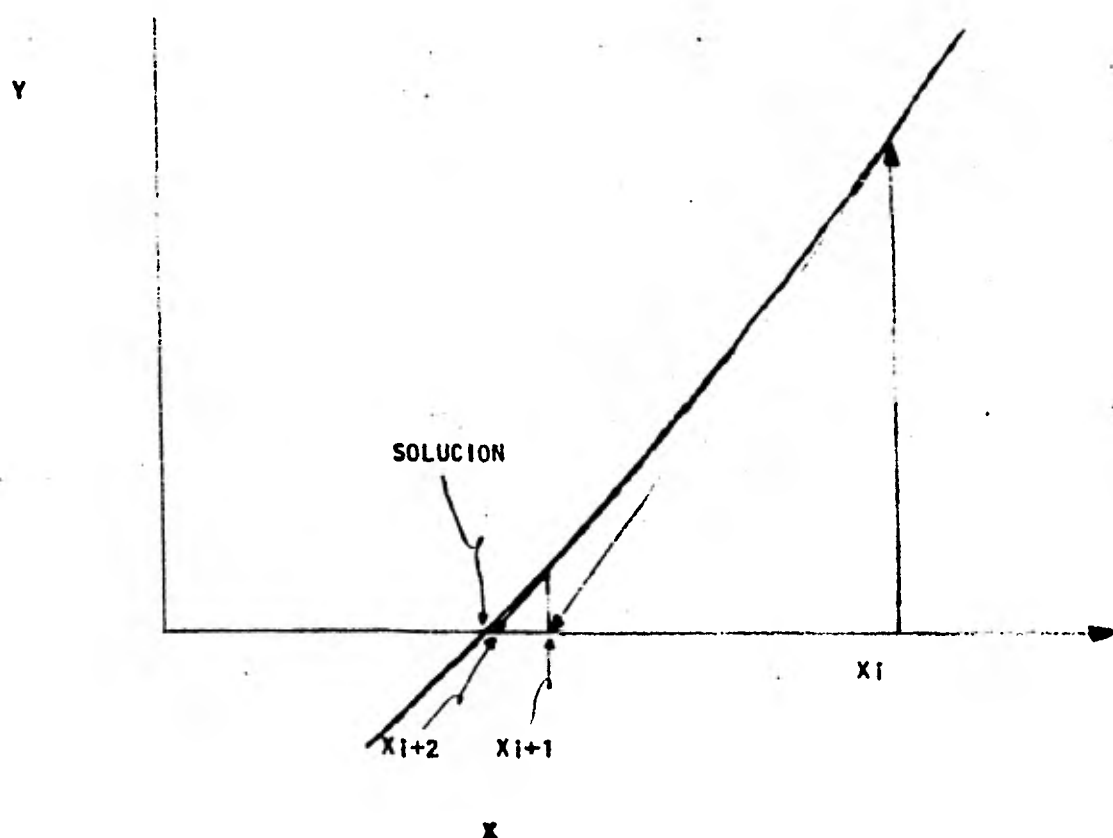


FIGURA D-2  
TRAYECTORIA DE CONVERGENCIA DEL METODO DE NEWTON-RAPHSON.



## INSTRUCCIONES PARA USAR EL PROGRAMA

Para este trabajo se empleo un Teletipo, Teletype Modelo 43, conectado a una Computadora C.D.C.- Modelo Cyber 170/730, propiedad de Petróleos Mexicanos.

Las instrucciones se presentarán al mismo tiempo que un ejemplo. Lo que está subrayado es lo que se tiene que teclear, lo que se encuentra en mayúsculas es escrito por la computadora.

ATTACH, COMPR, ID = ING, CY = 5

Esta instrucción deja disponible el programa.

EDITOR

RUN, FORTRAN, FILE = COMPR

Estas dos instrucciones inician la ejecución del programa.

PARA EMPEZAR LOS CALCULOS  
TECLEE 1000

Este mensaje indica que el programa está listo para ejecutarse, aunque el mensaje indica teclear 1000 en realidad es suficiente teclear cualquier número, en este ejemplo se tecleo 6785.

PROGRAMA PARA CALCULAR EL TRABAJO DE COMPRESION DE EL VALOR DEL NUMERO DE COMPONENTES "N"

Debe teclear un número que este entre 1 y 19 que indica cuantos componentes tiene la mezcla.

3

DE EL VALOR DE LA PRESION INICIAL "P1" EN ATMS.

Teclee la presión de entrada al compresor, las unidades de esta deberán ser atmósferas.

1.4

DE EL VALOR DE LA TEMPERATURA INICIAL "T1" EN GR, KELVIN

## Nota:

Las instrucciones de uso son para el programa que se usa en PEMEX, pero este puede adaptarse facilmente a otra instalación.

Teclée el valor de la temperatura a la que se encuentra el fluido al ser -  
comprimido.

278.1

DE EL VALOR DE LA PRESION FINAL  
"P 2" EN ATMS.

1

Se debe teclear la presión hasta la cual se va a comprimir el gas, las uni -  
dades deberán ser atmósferas.

¿CONOCE LAS CLAVES DE LOS COMPONENTES  
DE LA MEZCLA?

SI LAS CONOCE TECLEE 1 SI NO LAS CONOCE TECLEE 0

Si quiere conocer de cuáles componentes se tienen propiedades en el programa  
y con que clave están almacenados teclee cualquier número diferente de 1, si te --  
clea 1 no se imprimirá lo siguiente.

0

PARA EL METANO	*CH4*	LA CLAVE ES	1
PARA EL ETANO	*C2H6*	LA CLAVE ES	2
PARA EL PROPANO	*C3H8*	LA CLAVE ES	3
PARA EL N-BUTANO	*C4H10*	LA CLAVE ES	4
PARA EL ISOBUTANO	*C4H10*	LA CLAVE ES	5
PARA EL N-PENTANO	*C5H12*	LA CLAVE ES	6
PARA EL ISOPENTANO	*C5H12*	LA CLAVE ES	7
PARA EL N-HEXANO	*C6H14*	LA CLAVE ES	8
PARA EL N-HEPTANO	*C7H16*	LA CLAVE ES	9
PARA EL ETILENO	*C2H4*	LA CLAVE ES	10
PARA EL PROPILENO	*C3H6*	LA CLAVE ES	11
PARA EL ISOBUTILENO	*C4H8*	LA CLAVE ES	12
PARA EL BENCENO	*C6H6*	LA CLAVE ES	13
PARA EL AMONIACO	*NH3*	LA CLAVE ES	14
PARA EL BIOXIDO DE CARBONO		LA CLAVE ES	15
PARA EL MONOXIDO DE CARBONO		LA CLAVE ES	16
PARA EL NITROGENO	*N2*	LA CLAVE ES	17
PARA EL OXIGENO	*O2*	LA CLAVE ES	18
PARA EL BIOXIDO DE AZUFRE		LA CLAVE ES	19

A CONTINUACION APARECERAN LOS VALORES QUE USARA EL PROGRAMA EN LOS CALCULOS, SI ALGUNO ES DIFERENTE AL VALOR QUE DEBE TENER, TIENE QUE TECLEAR O, SI TODOS LOS VALORES SON CORRECTOS TE -- CLEE 10.

La impresión de los datos le permitirá checarlos y en caso de que algunos fueran incorrectos se tendría que volver a teclear todos los datos. El peso molecular es calculado por el programa y no se tiene que checar, también se efectuó la suma de las composiciones, si es diferente de 1 se comatió un error en la composición, las conversiones de unidades también son efectuadas por el programa.

LA MEZCLA QUE SE COMPRIMIRA ES:

COMPONENTE		COMPOSICION
PROPANO	*C3H8*	.890
N-BUTANO	*C4H10*	.060
ETANO	*C2H6*	.050
		<hr/>
		1.000

EL PESO MOLECULAR DE LA MEZCLA ES:

PM                      44.237

LA COMPRESION ES DE:

P1 = 1.400 ATMOSFERAS ( 20.580 LBS/(PULG.)<sup>2</sup>) A P2= 7.000 ATMOSFERAS  
(102.900 LBS/(PULG.)<sup>2</sup>)

T1 = 278.100 GRADOS KELVIN ( 500.580 GDDS. RANKINE).

10

Empieza la ejecución del programa, la impresión de resultados se hace en dos sistemas de unidades, los primeros resultados son para un proceso isoentrópico y - adiabáticos. Los resultados para los datos anteriores son:

A CONTINUACION DEBE DAR LA CLAVE QUE CORRESPONDE A CADA COMPONENTE NO ES NECESARIO DARLAS EN ALGUN ORDEN EN ESPECIAL SOLO TIENE QUE TECLEAR TANTAS CLAVES COMO SEA EL VALOR DE "N", EL NUMERO DE COMPONENTES DE EL VALOR DE LA PRIMERA CLAVE.

Del listado anterior seleccione que componentes se encuentran presentes en la mezcla a comprimir, y que claves les corresponden, la computadora le pedirá - datos hasta que haya tecleado "N" claves.

3

DE LA CLAVE DEL SIGUIENTE COMPONENTE

4

DE LA CLAVE DEL SIGUIENTE COMPONENTE

2

EL ORDEN Y EL NOMBRE DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA ES EL SIGUIENTE.

El siguiente listado indica los componentes de la mezcla y el orden en que fueron suministradas sus claves, en este mismo orden se deberán suministrar las posiciones respectivas.

PROPANO	*C3H8*	1
N-BUTANO	*C4H10*	2
ETANO	*C2H6*	3

A CONTINUACION DEBE DAR LA COMPOSICION DE CADA COMPONENTE SIGUIENDO EL ORDEN DEL LISTADO ANTERIOR, EL NUMERO QUE APARECE LE INDICA DE QUE COMPONENTE DEBE DAR LA COMPOSICION.

Las composiciones deberán ser tecleadas siguiendo el mismo orden en que fueron tecleadas las claves, si se teclean en un orden diferente la computadora las asignará al componente del cual está pidiendo la composición.

DE LA COMPOSICION DEL COMPONENTE	1
<u>89</u> DE LA COMPOSICION DEL COMPONENTE	2
<u>06</u> DE LA COMPOSICION DEL COMPONENTE	3
<u>05</u>	

LA MEZCLA QUE SE COMPRIMIRA ES

COMPONENTE		COMPOSICION
PROPANO	*C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> *	.890
N-BUTANO	*C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> *	.060
ETANO	*C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> *	<u>.050</u>
		1.000

EL PESO MOLECULAR DE LA MEZCLA ES

$$PM = 44.237$$

LA COMPRESION ES DE

$$P_1 = 1.400 \text{ ATMOSFERAS ( } 20.580 \text{ LBS/(PULG.)}^2 \text{) A } P_2 = 7.000 \text{ ATMOSFERAS ( } 102.900 \text{ LIBRAS/(PULG.)}^2 \text{).}$$

PARA UN PROCESO DE COMPRESION ADIABATIVO, ISOENTROPICO Y REVERSIBLE LOS RESULTADOS SON

CONDICIONES INICIALES

$$\begin{aligned} T &= 278.10000 \text{ GRADOS KELVIN ( } 500.58000 \text{ GDOS. RANKINE)} \\ P &= 1.40000 \text{ ATMOSFERAS ( } 20.58000 \text{ LIBRAS/(PULG)}^2 \text{)} \\ V &= 15.79278 \text{ LITROS/GMOL ( } 252.98060 \text{ (FT)}^3 \text{/LBMOL)} \\ CP &= 16.67305 \text{ CAL/((GMOL)(GR. KELVIN)) ( } 16.67305 \text{ BTU/((LBMOL) (GR. RANKINE))}. \end{aligned}$$

CONDICIONES FINALES

$$\begin{aligned} T &= 336.44442 \text{ GRADOS KELVIN ( } 605.59996 \text{ GRADOS RANKINE)} \\ P &= 7.00000 \text{ ATMOSFERAS ( } 102.90000 \text{ LIBRAS/(PULG)}^2 \text{)} \\ V &= 3.60715 \text{ LITROS/GMOL ( } 57.78206 \text{ (FT)}^3 \text{/LBMOL)} \\ CP &= 19.69111 \text{ CAL/((GMOL)(GR. KELVIN)) ( } 19.69111 \text{ BTU/((LBMOL) (GR. RANKINE))}. \end{aligned}$$

EL CAMBIO DE ENTALPIA ES

$$DH = .92476E+03 \text{ CAL/ GMOL ( } .16635E+04 \text{ BTU/LBMOL).}$$

EL CAMBIO DE ENTROPIA ES

$$DS = -.00001 \text{ CAL/((GMOL)(GR. KELVIN)) ( } -.00001 \text{ BTU/((LBMOL)(GR. RANKINE))}. \end{aligned}$$



EL TRABAJO DE COMPRESION POR MOL DE GAS POR HORA ES

$$W = .14413E-02 \text{ HP/(GMOL/HR)} ( .65377E+00 \text{ HP/(LBMOL/HR)})$$

A CONTINUACION DEBE DAR EL VALOR DE LA EFICIENCIA .77

Con el objeto de calcular el efecto de la eficiencia del proceso se debe tener en cuenta el valor esperado de la eficiencia, que depende del tipo de compresor y del fabricante del mismo, si no se tiene ningún dato se puede dar el valor de la eficiencia de acuerdo a lo explicado en la pág. 13.

EN ESTE EJEMPLO ES DE 0.77.

Los siguientes resultados son para un compresor con una eficiencia de 0.77.

PARA UN PROCESO IRREVERSIBLE DEL CUAL SE  
CONOCE LA EFICIENCIA LOS RESULTADOS SON

CONDICIONES INICIALES.

$$\begin{aligned} T &= 278.10000 \text{ GRADOS KELVIN ( 628.79938 GRADOS RANKINE)} \\ P &= 1.40000 \text{ ATMOSFERAS ( 20.58000 LIBRAS/(PULG)2)} \\ V &= 15.79278 \text{ LITROS/GMOL ( 252.98060 (FT)3/LBMOL)} \\ CP &= 16.67305 \text{ CAL/((GMOL)(GR.KELVIN)) ( 16.67305 BTU/((LBMOL)(GR.RANKINE)))} \end{aligned}$$

PARA UNA EFICIENCIA DE .770 SE OBTIENEN  
LAS SIGUIENTES CONDICIONES FINALES.

$$\begin{aligned} T &= 349.33299 \text{ GRADOS KELVIN ( 628.79938 GRADOS RANKINE)} \\ P &= 7.00000 \text{ ATMOSFERAS ( 102.90000 LIBRAS/(PULG)2)} \\ V &= 3.78968 \text{ LITROS/GMOL ( 60.70589 (FT)3/LBMOL)} \\ CP &= 20.33074 \text{ CAL/((GMOL)(GR.KELVIN)) ( 20.33074 BTU/((LBMOL)(GR.RANKINE)))} \end{aligned}$$

EL CAMBIO DE ENTALPIA ES

$$DH = .12010E+04 \text{ CAL/ GMOL ( .21604E+04 BTU/LBMOL)}$$

EL CAMBIO DE ENTROPIA ES

$$DS = .80414 \text{ CAL/((GMOL)(GR.KELVIN)) ( .80414 BTU/((LBMOL)(GR.RANKINE)))}$$

EL TRABAJO DE COMPRESION POR MOL DE GAS POR HORA ES:

$$W = .18718E-02 \text{ HP/(GMOL/HR)} ( .84905E+00 \text{ HP/(LBMOL/HR)})$$

El programa está estructurado para que una vez terminado un cálculo empiece a efectuar otro, lo cual puede hacerse en caso de querer cambiar alguna de las -- condiciones, composición, componente, presión de descarga, etc., si se quiere efectuar otro cálculo sólo se necesitará introducir los nuevos datos de acuerdo a lo explicado.

Si ya no se van a efectuar más cálculos teclee la siguiente instrucción que dará por terminado el programa.

% A

Para obtener la potencia del accionador sólo tiene que multiplicar el resultado en  $\frac{\text{H.P.}}{\text{GMOL/HR}}$  ( $\frac{\text{H.P.}}{\text{LBMOL/HR.}}$ ) por el flujo molecular en  $\frac{\text{GMOL}}{\text{HR}}$  ( $\frac{\text{LBMOL}}{\text{HR}}$ ), en caso de tenerlo en otras unidades  $\frac{\text{LITROS}}{\text{HR}}$ ,  $\frac{\text{GRAMOS}}{\text{HR}}$ , etc. En los resultados se dan las propiedades necesarias para hacer la conversión, peso molecular y volúmen. El valor de volúmen específico que se debe utilizar para la conversión es el volúmen específico a las condiciones iniciales.

**H O T A :**

El trabajo calculado en el programa es únicamente trabajo de compresión por lo cual será necesario sumar a este las pérdidas de tipo mecánico, las cuales cambian según el tipo de compresor y según el fabricante, pero conociendo la marca posible del compresor es posible estimar las pérdidas de tipo mecánico y por consiguiente la potencia total requerida para efectuar la compresión.

## LISTADO DE VARIABLES

Este listado se dará en orden alfabético y aparecerán en él sólo las más importantes.

## Programa Principal.

B (i, J)		segundo coeficiente virial.
BBM,	$\frac{\text{litros}^3}{\text{gmol.}}$	, segundo coeficiente virial.
COMP,		adimensional, composición del componente "iésimo".
CP2i,	$\frac{\text{atm-litro}}{\text{gmol } ^\circ\text{K}}$	capacidad calorífica a presión constante calculada a la temp. final del proceso isoentrópico.
CPZR	$\frac{\text{atm. litro}}{\text{gmol.gr.Kelvin}}$	capacidad calorífica del gas a presión constante - calculada a la temperatura final del proceso reversible.
DETER	$\frac{\text{atm}^2}{(\text{gr. Kelvin})^2}$	determinante para resolver las 2 ecuaciones simultáneas que se generan para utilizar el método de - Newton-Raphson.
DET	$\frac{\text{atm litro}}{\text{gmol gr.Kelvin}}$	Derivada de entalp con respecto a T con V = constante.
DEV	ATM	derivada de entalp con respecto a V con T= constante.
DH	$\frac{\text{atm litro}}{\text{gmol}}$	cambio de entalpía para un proceso isoentrópico, - adiabático y reversible.
DPTVT	$\frac{\text{atm}}{\text{gr. Kelvin}}$	derivada de PTV con respecto a T con V= constante.
DPTVV	$\frac{\text{atm}}{(\text{litro/gmol.})}$	derivada de PTV con respecto a V con T= constante.
DSTVT	$\frac{\text{atm litro}}{\text{gmol (gr.Kelvin)}}^2$	derivada de STV con respecto a T con V= constante.
DSTVV	$\frac{\text{atm}}{\text{gr.Kelvin}}$	derivada de STV con respecto a V con T= constante.
DT	Gr.Kelvin,	cambio de temperatura, calculado con el Newton-Raphson que hace la temperatura se aproxime a la solución de las simultáneas.

DV	$\frac{\text{litró}}{\text{gmol.}}$	cambio de volúmen, calculado con el Newton-Raphson que hace que el volúmen se aproxime a la solución de las simultáneas.
ENTALP	$\frac{\text{atm.litró}}{\text{gmol.}}$	Ecuación que representa el cambio de entalpía de un proceso irreversible, esta ecuación está igualada a cero.
EFIC	adimensional	Eficiencia para un proceso irreversible.
I COMP	adimensional	Indica el componente de la matriz de propiedades que se encuentra presente en la mezcla a comprimir con el objeto de generar propa, la matriz de la mezcla a comprimir.
K (I, J)		Matriz que se utiliza en el cálculo del segundo coeficiente virial, almacenada con los parámetros de interacción molecular.
MAPROP (I, J)		Matriz que almacena las propiedades de todos los componentes del banco de datos. La localidad y la propiedad almacenada es igual que para propa (I, J), la diferencia es que el índice I es la clave que le corresponde a un componente dado, en propa (I, J). I depende del orden en el cual se introduzcan las claves.
N,	adimensional	Número de componentes de la mezcla.
NCOMAT,	adimensional	Número de componentes en la matriz de propiedades, Maprop.
P,	adimensional	Presión reducida de la mezcla usada en el cálculo del segundo coeficiente virial.
PI	ATM,	Presión inicial.
PMP	$\frac{\text{g}}{\text{mol.}}$ ,	Peso molecular promedio de la mezcla.
PTV,	atm.	Ecuación de estado de Redlich-Kwong, modificada por Soave igualada a cero.
PROPA	(I, J)	Matriz que almacena las propiedades de la mezcla que se va a comprimir, a continuación se indica la localidad y la propiedad almacenada.

PROPA	(1,1) =	"Nombre del componente", 10 caracteres.
PROPA	(1,2) =	"Nombre del componente", 10 caracteres.
PROPA	(1,3) = CPA,	$\frac{\text{atm. litro}}{\text{gmol.gr-Kelvin}}$ , 1er. constante de la expresión para calcular el CP.
PROPA	(1,4) = CPB,	$\frac{\text{atm. litro}}{\text{gmol-gr-Kelvin}}$ 2a. constante de la expresión - para calcular el CP.
PROPA	(1,5) = CPC,	$\frac{\text{atm. litro}}{\text{gmol-gr-Kelvin}}$ 3a. constante de la expresión - para calcular el CP.
PROPA	(1,6) = CPD,	$\frac{\text{atm. litro}}{\text{gmol-gr-Kelvin}}$ 4a. constante de la expresión - para calcular el CP.
PROPA	(1,7) = a,	$\frac{\text{litros}^3 \text{ ATM}}{\text{gmol.}^3}$ , 1a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,8) = Ao,	$\frac{\text{litros}^2 \text{ ATM}}{\text{gmol.}}$ , 2a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,9) = b,	$\frac{\text{litro}^2}{\text{gmol}^2}$ , 3a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,10) = Bo,	$\frac{\text{litro}}{\text{gmol}}$ , 4a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,11) = C <sub>1</sub> ,	$\frac{\text{litros}^3 - (\text{gr.kelvin})^2 - \text{atm}}{\text{gmol.}^3}$ 5a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,12) = Co,	$\frac{\text{litros}^2 - (\text{gr. kelvin})^2 - \text{atm}}{\text{gmol.}^2}$ 6a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,13) =	$\frac{\text{litro}^3}{\text{gmol}^3}$ , 7a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,14) =	$\frac{\text{litro}^2}{\text{gmol}^2}$ , 8a. constante de la ecuación de estado de B.W.R.
PROPA	(1,15) = PM,	$\frac{\text{gm}}{\text{gmol}}$ , Peso molecular.
PROPA	(1,16) = TC,	Gr. Kelvin, Temperatura crítica.
PROPA	(1,17) = V <sub>c</sub> ,	litros/gmol, Volumen crítico.

PROPA	(1,18) = $Z_c$ ,	adimensional,	factor de compresibilidad crítico.
PROPA	(1,19) = $W$ ,	adimensional,	factor acéntrico.
PROPA	(1,20) = $P_c$ ,	ATM	Presión crítica.

El índice 1, indica que se trata del "iesmo" componente.

$P_2$ ,	ATM,	Presión final.
R	$\frac{\text{litró atm}}{\text{gmol}^\circ\text{K}}$	Constante de los gases.
STV,	$\frac{\text{atm. litro}}{\text{gmol,gr. Kelvin}}$	Cambio de entropía de la mezcla.
SUMCOMP,	adimensional,	Suma de composiciones, debe ser casi igual a 1.
T,	Gr.Kelvin	Temperatura crítica de la mezcla para el cálculo del segundo coeficiente virial.
T0	Gr.Kelvin,	Temperatura de referencia para el cálculo de la entalpía.
T1	Gr.Kelvin	Temperatura inicial.
T2	Gr.Kelvin	Temperatura final.
TR,	adimensional	Temperatura reducida de la mezcla usada en el cálculo del segundo coeficiente virial.
V	$\frac{\text{litros}}{\text{gr. mol}}$ ,	Volúmen crítico de la mezcla para el cálculo del segundo coeficiente.
V1,	$\frac{\text{litros}}{\text{gr. mol}}$ ,	Volúmen inicial calculado con la ecuación virial.
V1	$\frac{\text{litros}}{\text{gmol}}$ ,	Volúmen inicial.
V2	$\frac{\text{litros}}{\text{gmol}}$ ,	Volúmen final.
WIDES	$\frac{\text{hp}}{(\text{gmol/Hr.})}$ ,	Trabajo de compresión por gmol/hr.
WM,	adimensional	Factor acéntrico de la mezcla, usado en el cálculo del segundo coeficiente virial.

WREAL	$\frac{HP}{(\text{gmol/Hr.})}$	, Trabajo de compresión por gmol/hr, para un proceso irreversible.
Y	(1) adimensional	Vector que almacena el valor de la composición del componente i.
Z	adimensional	Factor de compresibilidad de la mezcla usado en el cálculo del segundo coeficiente virial.





```

350 FORMAT(7H A CONTINUACION DEBE DAR LA COMPOSICION DE CADA COMPONENTE NO 5900
ITE SIGUIENDO EL 760H ORDEN DEL LISTADO ANTERIOR, EL NUMBER QUE A006000
2 PARECE LE INDICA DE QUE 735H COMPONENTE DEBE DAR LA COMPOSICION 006100
3 /) 006200
351 FORMAT(/) 006300
    PMP=OSSUMCOMP=J 006400
360 DO 400 I=1,N 006500
370 PRINT 360,I 006600
380 FORMAT(35H DE LA COMPOSICION DEL COMPONENTE ,10X,I2 /) 006700
390 READ *,CJMP 006800
    PMP=PMP+PKOPA(I,15)*CJMP 006900
    SUMCOMP=SUMCOMP+CJMP 007000
400 Y(I)=COMP 007100
    T1IN=T1*1.8+P1 IN=P1*14.7+P2IN=P2*14.7+PRINT 21 007200
21 FORMAT(10X,7A CONTINUACION APARECERAN LOS VALORES QUE USARA EL PRO007300
    IGRAMA EN LOS #/10X,#CALCULOS, SI ALGUNO ES DIFERENTE AL VALOR 0007400
2 QUE DEBE TENER, TIENE QUE #/10X,#TECLEAR 0, SI TODOS LOS VALORES 0007500
3 SON CORRECTOS TECLEE 10#6(/)) 007600
    PRINT 1 007700
    DO 22 I=1,N 007800
22 PRINT 3,PROPA(I,1),PROPA(I,2),Y(I) 007900
    PRINT 4,SUMCOMP 008000
    PRINT 5,PMP,P1,P1IN,P2,P2IN 008100
    PRINT 24,T1,T1IN 008200
24 FORMAT(10X,#T1=#,F12.3,# GRADOS KELVIN(#,F13.3,# GRADOS RANKINE)# 008300
    1,5(/)) 008400
    READ *,CHLCK 008500
    IF(CHECK.EQ.0) GO TO 10 008600
420 CPDM=OSCPCH=OSCPDM=OSMP=OSCPAN=OSBRW=0 SSUMCOMP=0 008700
    XTCH=0 XTCH=0 008800
430 DO 560 I=1,N 008900
    BRW=BRW+Y(I)*PROPA(I,16)/PROPA(I,20) 009000
    CPAM=CPAM+Y(I)*PROPA(I,3) 009100
    CPBM=CPBM+Y(I)*PROPA(I,4) 009200
    CPCM=CPCH+Y(I)*PROPA(I,5) 009300
    XTCH=XTCH+Y(I)*PROPA(I,16) 009400
    XPCM=XPCM+Y(I)*PROPA(I,20) 009500
    SUMCOMP=SUMCOMP+Y(I) 009600
550 CPDM=CPDM+Y(I)*PROPA(I,6) 009700
560 PMP=PMP+Y(I)*PROPA(I,15) 009800
    PRINT *,XPCM,XTCH 009900
    CPAM=(CPAM/4.13E-2+CPBM=CPBM/4.13E-2+CPCH=CPCM/4.13E-2+CPDM=CPDM/4.
113E-2 010000
    CPBM=CPBM/1.8+CPCH=CPCM/1.8**2+CPDM=CPDM/1.8**3 010200
    PRINT *,CPAM,CPBM,CPCM,CPDM 010300
    CPAM=CPAM*4.13E-2+CPBM=CPBM*4.13E-2+CPCH=CPCM*4.13E-2 010400
    CPDM=CPDM*4.13E-2 010500
    CPBM=CPBM*1.8+CPCH=CPCM*1.8+1.8*CPDM=CPDM*1.8**3 010600
    BRW=BRW+R*BRW 010700
640 CP1=CFP(T1) 010800
650 CV1=CP1-K 010900
660 T2=T1*(P2/P1)**(R/CP1) 011000
670 BRW=0 011100
680 DO 760 I=1,N 011200
690 DO 780 J=1,N 011300
700 T=SQRT(PKOPA(I,16)*PROPA(J,16)*(1-K(I,J)) ) 011400
710 V=((PROPA(I,17)**(1./5.))+PROPA(J,17)**(1./3.))/2)**3 011500
720 Z=(PKOPA(I,16)+PROPA(J,16))/2 011600
    
```

```

730 WM=(PROPA(I,19)+PROPA(J,19))/2
740 P=Z*R*T/VSTR-T1/T
750 FG=C.1445-C.33/TR-J.1385/TR**2-J.0121/TR**3-U.000607/TR**4
760 F1=C.6637+C.331/TR**2-0.423/TR**3-0.006/TR**4
770 B(I,J)=T*K*(F0+WM*F1)/P
780 BDM=BDM+E(I,J)*Y(I)*Y(J)
790 Z=1+BDM*P1/R/T1
800 V1=R*Z*T1/P1
810 VS1=0.0*V1+VS2=1.2*V1
    CALL ECKM(T1,GTRM,BTFM)
    GTKM1=GTKM
820 CALL SEYDL(VS1,VS2,P1,T1,V1,VI)
830 V2=V1*(P1/P2)**(CV1/CP1)
    T2=T1*1.15*V2*V2*1.15
840 DD 970 IT=1,15
    CALL FSTV(T2,V2,STV)
    CALL FPTV(T2,V2,PTV)
    CALL DERIVA(T2,V2,DSTVT,FSTV,1)
    CALL DERIVA(T2,V2,DSTVV,FSTV,2)
    CALL DERIVA(T2,V2,DPTVT,FPTV,1)
    CALL DERIVA(T2,V2,DPTVV,FPTV,2)
910 DETER=DPTVV*DSTVT-DPTVT*DSTVV
920 DV=(STV*DPTVT-PTV*DSTVT)/DETER
930 DT=(PTV*DSTVV-STV*DPTVV)/DETER
940 T2=T2+DT
950 V2=V2+DV
    PRINT 980 ,T2,V2
960 IF(ABS(DT).LT.1E-2.AND.ABS(DV).LT.1E-3) GO TO 1010
970 CONTINUE
980 FORMAT(' DESPUES DE ',I5,' ITERACIONES , T= ',E13.5,' GR. KELVIN
1 Y V= ',E15.5,' LITROS/GMOL',/)
990 PRINT 1000
1000 FORMAT(1H0,19H LA ITERACION FALLO )
1010 CONTINUE
    CALL FEHLRG(T1,V1,ENERG1)
    CALL FLNRG(T2,V2,ENERG)
    DH=ENERG - ENERG1 + P2*V2 - P1*V1
1020 CONTINUE
    CP2I=1/P(T2)
    CPID1=CP1/4.13E-2
    CP2ID=CP2I/4.13E-2
    STVSS=STV/4.13E-2
    V1IN=V1*.4536*35.3147
    T1IN=T1*1.85*P1IN=P1*14.7*P2IN=P2*14.7
    T2IN=T2*1.85*V2IN=V2*0.4536*35.3147
    DHIDE=DH/4.13E-2
    DH1IN=DHIDE*453.6/252.16
    WIDE=DHIDE*453.6*1.34102/(252.16*56.8699*6J)
    WIDES=WIDE/453.6
    PRINT 1
1 FORMAT(1H1 ,10X,'LA MEZCLA QUE SE COMPRIMERA ES ',//,15X,'COMPONEN 1650)
    UENTE',10X,'COMPOSICION',//)
    DO 2 I=1,4
2 PRINT 3, PROPA(I,1),PROPA(I,2),Y(I)
3 FORMAT(10X,2A10,8X,F8.5)
    PRINT 4 , SUNCUMPR
4 FORMAT(/,37X,'-----',/,36X,F8.5//)
    PRINT 5,P1P,P1, P1IN,P2,P2IN

```



```

PRINT 7, T1, T2IN, P1, P1IN, V1, V1IN, CPID1, CPID1          023100
PRINT 15, LFIC                                               023200
15 FORMAT(10X, *PARA UNA EFICIENCIA DE *, F5.3, * SE OBTIENEN LAS SIGUIE 023300
2NTES*, //, 10X, *CONDICIONES FINALES* //)                  023400
PRINT 7, T2, T2IN, P2, P2IN, V2, V2IN, CP2RD, CP2RD        023500
PRINT 12, DHR, DHRIN                                         023600
STVSS=STV/4.13E-2                                           023700
PRINT 1231, STVSS, STVSS                                     023800
1231 FORMAT(10X, *EL CAMBIO DE ENTROPIA ES //10X, #05= #, F12.5, # CAL/(GM0023900
1L)(GR. KELVIN)) (#, F12.5, # BTU/(LBMOL)(GR. RANKINE)) //) 024000
PRINT 13, WREALS, WREAL                                       024100
DATA NCGMAT/21/                                              024200
DATA TO, R, NPROP/273.3, .082057, 20/                       024300
DATA (MAPRUP(1, I), I=1, 19)/1CHMETANO , 10H *CH4*        ,024400
10.1849, 5.1449E-4, 1.1812E-7, -1.1163E-13, 0.0494, 1.055,   024500
20.00238004, 0.0426, 2545.0, 22257.0, 0.124357E-3, 0.0006, 16.043, 290.6, 024600
399E-3, 0.288, 0.008/                                         024700
DATA (MAPRUP(3, I), I=1, 19)/1CHPROPANO , 10H *C3H8*      ,024800
1-4.1672E-2, 3.0212E-3, -1.5649E-6, 3.171E-10,              024900
29.47E-1, 6.6722E-2, 2.25E-2, 9.7313E-2, 1.29E+3, 5.08250E+5, 025000
36.07175E-4, 2.2E-2, 44.097, 369.8, .203, 0.231, 0.152/    025100
DATA (MAPRUP(2, I), I=1, 19)/1C METANO , 10H *C2H6*        ,025200
15.3396E-2, 1.7569E-3, -6.64341E-7, 6.59453E-11, 3.4510E-1, 4.15556, 025300
21.122E-2, 6.27724E-2, 3.2767E+4, 1.79592E+5, 2.43387E-4, 1.18E-2, 30. 025400
307.365, 4.0, 148, 0.235, 0.098/                             025500
DATA (MAPRUP(4, I), I=1, 19)/10HN-BUTANO , 10H *C4H10*     , 025600
19.35458E-2, 3.268069E-3, -1.092211E-6, -2.78362E-11, 1.80231, 025700
210.0647, 3.99983E-2, 1.24361E-1, 3.164E5, 9.9283E5, 1.10132E-3, 025800
33.4E-2, 58.124, 425.2, .255, .274, .193/                   025900
DATA (MAPRUP(5, I), I=1, 19)/10HISOBUTANO , 10H *C4H10*   ,026000
1-1.37116E-2, 3.795057E-3, -1.020517E-6, 2.855045E-10, 1.93703 , 026100
1.1023264E1, 4.24552E-2, 1.37544E-1, 2.8601E5, 8.49943E5,   026200
31.07408E-3, 3.4E-2, 58.124, 406.1, .263, .283, .176/     026300
DATA (MAPRUP(6, I), I=1, 19)/10HN-PENTANO , 10H *C5H12*   ,026400
1-3.57658E-2, 4.80732E-3, -2.545319E-6, 5.23271E-10, 4.0740, 026500
21.21794E1, 6.6612E-2, 1.56751E-1, 4.2417E5, 2.12121E6, .081E-3, 4.75E-2, 026600
1.72.151, 469.6, .304, .262, .251/                          026700
DATA (MAPRUP(10, I), I=1, 19)/10HETILENO , 10H *C2H4*     , 3.75417E-026800
12 , 1.54462E-3, -0.23522E-7, 1.731296E-10, 2.59E-1, 3.33958, 026900
28.6E-3, 5.56833E-2, 2.112E4, 1.3114E5, 1.78E-4, 9.23E-3, 28.054, 027000
3282.4, .129, .276, .085/                                    027100
DATA (MAPRUP(11, I), I=1, 19)/10HPROPILENO , 10H *C3H6*   ,027200
13.65918E-2, 2.323626E-3, -1.144423E-6, 2.174850E-10, 7.74056E-1, 027300
26.1122, 1.07059E-2, 0.50647E-2, 1.02611E5, 4.39182E5, 4.55696E-4, 027400
21.829E-2, 42.081, 365.0, 0.101, 0.275, .149/              027500
DATA (MAPRUP(12, I), I=1, 19)/10HISOBUTILENO , 10H *C4H8* ,027600
11.563442E-1, 2.766274E-5, -1.076691E-6, 3.97449E-11, 1.6927, 027700
28.93325, 3.40156E-2, 1.16023E-1, 2.7492E5, 9.2720E5, 9.10089E-4, 027800
32.95945E-2, 56.108, 417.9, .235, .275, .19/              027900
DATA (MAPRUP(13, I), I=1, 19)/10H8EILICENO , 10H *C6H6*   ,028000
1-3.345713E-1, 4.07929E-3, -2.576078E-6, 7.03339E-10, 5.57, 0.509772, 028100
27.663E-2, 5.030055E-2, 1.176418E6, 3.42977E6, 7.001E-4, 2.93E-2, 028200
378.114, 562.1, .259, .271, .212/                          028300
DATA (MAPRUP(14, I), I=1, 19)/10H8EILICENO , 10H *C6H6*   ,028400
12.044412E-1, 2.37990E-4, 1.684214E-7, -1.16879E-10, 1.0354029E-1, 028500
23.7692019, 7.1950516E-4, 5.1646121E-2, 1.575329E2, 1.735709E5, 028600
34.6541779E-5, 1.9805186E-2, 17.331405.6, .0725, .242, .25/ 028700
DATA (MAPRUP(15, I), I=1, 19)/10H8EILICENO , 10H CARBONIO ,028800

```

11.952664E-1,7.24402E-4,-5.52594E-7,1.692061E-10,1.16314E-1, 028900  
 22.73742,4.1239E-3,4.99101E-2,1.491834,1.30567E5,6.47E-3, 029000  
 35.394E-3,44.01,334.2,094,274,229/ 029100  
 DATA (MAPRUP(16, I), I=1, 19) / 10HMOXICO D , 10HE CARBONO , 029200  
 13.045049E-1,-1.26791E-4,2.751406E-7,-1.254281E-10,3.663E-2, 029300  
 21.34122,2.6315E-3,5.45425E-2,1.040E3,8.56209E-3,1.35E-4,6E-3, 029400  
 328.01,132.9,0.931,295,0.49/ 029500  
 DATA (MAPRUP(17, I), I=1, 19) / 10HNI TRUGENU , 10H \*12\* , 029600  
 13.07272E-1,-1.33612E-4,2.6432E-7,-1.15227E-10,2.5102E-2, 029700  
 21.053642,2.3277E-3,4.07426E-2,7.2641E2,8.659E3,1.272E-4 , 029800  
 35.3E-3,28.013,126.2,0.895,29,0.04/ 029900  
 DATA (MAPRUP(18, I), I=1, 19) / 10H NI GENU , 10H \*12\* , 030000  
 12.772469E-1,-1.63027E-4,1.7222E-7,-1.050672E-10,1.6268994E-1, 030100  
 29.50651963[-1,3,58834736[-3,3,5328505E-3,1.2327374E4, 030200  
 33.26435918E4,-3.927058654,3.01E-2,31.997,154.6,0.0734,2.18,0.021/ 030300  
 DATA (MAPRUP(19, I), I=1, 19) / 10H NI XIOJ DC , 10H AZUFRE , 030400  
 12.352861E-1,6.648E-4,-4.89405E-7,1.310036E-10,8.4468E-1, 030500  
 22.12044,1.4653E-2,2.6182E-2,1.1335E5,7.9384E5,7.1955E-3, 030600  
 35.9236E-3,64.063,430.8,122,260,251/ 030700  
 DATA (MAPRUP(7, I), I=1, 19) / 10H NI SOPEITANJ , 10H \*C5H12\* , 030800  
 1-0.0939575,4.4973E-3,-2.692347E-6,5.64571E-10, 030900  
 23.7562,1.27954E1,6.6012E-2,1.60053E-1,6.75E5,1.74632E6, 031000  
 31.7E-3,4.03E-2,7.151,466.4,306,271,227/ 031100  
 DATA (MAPRUP(9, I), I=1, 19) / 10H NI HEPTANJ , 10H \*C7H16\* , 031200  
 1-5.07577E-2,6.66995E-3,-3.60136E-6,7.55377E-10, 031300  
 21.036475,1.75206E1,1.51954E-1,1.99E-1,2.47E6,4.74574E6, 031400  
 34.35611E-3,9E-2,10,205,540,2,432,262,352/ 031500  
 DATA (MAPRUP(3, I), I=1, 19) / 10H NI HEXANO , 10H \*C6H14\* , 031600  
 1-4.353E-2,5.7407E-3,-3.6764E-6,6.4656E-10,300,0, 031700  
 166.178,507.4,0.37,0.26,0.296/ 031800  
 DATA (MAPRUP(20, I), I=1, 20) / 10H NI AGUA , 10H \*H2O\* , 031900  
 13.185E-1,1.8977E-5,1.0422E-7,-3.5477E-10,800,0, 032000  
 118.01E,647.3,0.056,0.229,0.344,217,6/ 032100  
 DATA (MAPRUP(21, I), I=1, 20) / 10H NI SULLFIDRJC , 10H \*H2S\* , 032200  
 13.1506E-1,1.4171E-5,2.3941E-7,-1.1605E-10,60,0, 032300  
 134.06,373.2,0.0985,284,0.160,61,2/ 032400  
 DATA ARW, BRW/0.4274802327, 0.08664035/ 032500  
 DATA (MAPRUP(1, 20), I=1, 19) / 45.4,48.2,41.9,37.5,30,11,3, 032600  
 133.4,29.3,20.0,49.7,45.6,39.5,40.3,111.3,72.0,34.5,33.0, 032700  
 249.8,77.8/ 032800  
 GO TO 10 032900  
 END 033000

SUBROUTINE SLYDEL(X1,X2,P,T,X,VI)	033100
COMMON/P/DHRW,I,BTF,W,P2,P3,VI,ENENG1,TC,GTRW,CPA,1,CPCN,CPD,1	033200
FUNC(Z)=I+T*Z/(P*(Z-BHRW))-CTI*W*F*T/(Z+D(IR!!)/P	033300
10 XN=0	033400
20 DO 150 I=1,30	033500
30 F2=FUNC(X2)	033600
40 F1=FUNC(X1)	033700
50 DIV=F2-F1+X1-X2	033800
60 IF(DIV.EQ.0) GO TO 190	033900
70 X=(F2*X1-F1*X2)/(F2-F1+(X1-X2))	034000
80 IF(ABS((X-X1)/X).LT.1E-3) RETURN	034100
100 XN=X	034200
110 IF(ABS(F1-X1).LT.ABS(F2-X2)) GO TO 140	034300
120 X1=X	034400
130 GO TO 150	034500
140 X2=X	034600
150 CONTINUE	034700
160 CALL I.EWTJN(VI,P,T)	034800
170 X=VI	034900
180 RETURN	035000
190 IF(ABS(F1-X1).LT.ABS(F2-X2)) X2=X2+0.01*X2	035100
200 IF(ABS(F1-X1).LT.ABS(F2-X2)) X2=X2+0.01*X2	035200
210 IF(ABS(F1-X1).GT.ABS(F2-X2)) X1=X1+0.01*X1	035300
220 GO TO 150	035400
230 RETURN	035500
240 END	035600

ROUTINE NEWTON 73/730 OPT=1

FTN 4.8+513

D-31

6/06/11

```

SUBROUTINE NEWTON(X,P,T)                                035700
REAL MA,ME                                              035800
COMMON/P/BMRW,R,BTRW,P2,P3,V1,EENERG1,T0,GTNW,CPAM,SPBK,CPC1,CPDM 035900
FUNC(Z)=R*T*Z/(P*(Z-BMRW))-BTRW*K*T/(Z+BMRW)/P-Z      036000
X=0.001*X                                              036100
10 DO 60 I=1,30                                         036200
   PRINT *,X                                           036300
20 F=FUNC(X)                                           036400
30 IF(ABS(F).LT.1E-5) RETURN                            036500
40 MA=X+X/1000000 ME=X-X/1000                        036600
50 D=(FUNC(MA)-FUNC(ME))/(2*X/1000)                   036700
60 X=X-F/D                                             036800
70 PRINT 90                                           036900
60 RETURN                                             037000
90 FORMAT(30X,*NO HAY CONVERGENCIA*)                  037100
100 END                                               037200

```

DUTIE FTV

73/730 UPT-1

FTII 4.6+528

D-32

82/06/11

SUBROUTINE FTV(T,V,PTV)  
COINQH/P/BHRW,R,BRTW,P2,V1,LHERG1,TC,GTRW,CPAM,CPBN,CPCH,CPDM  
CALL ECRH(T,GTRW,BTKW)  
PTV=R\*T/(V-BHRW)-STRW\*R\*T/(V+(V+BHRW))-P2  
RETURN  
END

037300  
037400  
037500  
037600  
037700  
037800



ROUTINE FENTALP 73/730 OPT=1

FTN 4.8+J13

D-33  
82/06/11

SUBROUTINE FENTALP(T,V,ENTALP)	037900
COMMON/P/BMRW, B, BTRW, P2, P1, V1, ENERG1, TO, GTRW, CPA1, CPBM, CPC1, CPDM	038000
COMMON/ENT/LR LAL	038100
CALL FENERG(T,V,ENERG)	038200
ENTALP=ENERG-ENERG1+P2+V-P1+V1-CPAL	038300
RETURN	038400
END	038500

OUTLINE FENERG

73/730 UPT=1

FTII 4.0+510

D-34

02/00/11

```
SUBROUTINE FENERG(T, V, ENERG) 038600
COMMON/P/BHRW, R, BTRW, P2, P1, V1, ENERGI, T0, GTRW, CPA1, CPB1, CPC1, CPDM 038700
CALL ECRW(T, GTRW, BTRW) 038800
ENERG = (BTRW - GTRW) * R * T * ALG((V + BHRW) / V) / BHRW + (CPA1 - R) * (T - T0) + (T * T 038900
1 T0 * T0) * CPB1 / 2 + (T ** 3 - T0 ** 3) * CPC1 / 3 + (T ** 4 - T0 ** 4) * CPDM / 4 039000
RETURN 039100
END 039200
```

UTIME FSTV

73/730 OPT=1

FTN 4.0+520

02/06/11

SUBROUTINE FSTV(T,V,STV)	039300
COMMON/P/BMRW,R,BTRW,P2,P1,V1,ENERG1,T0,GTRW,CPAN,CPBM,CPC1,CPDM	039400
COMMON/PP/CTRW1,T1	039500
CALL ECRW(T,GTRW,BTRW)	039600
STV=R*ALOG((V-BMRW)/(V1-BMRW))+K*ALOG((V+BMRW)/V)*GTRW/BMRW-R*ALOG	039700
1((V1+BMRW)/V1)*GTRW1/BMRW+(CPAN-E)*ALOG(T/T1)+CPBM*(T-T1)+CP	039800
DM*(T+T-T1)/2+CPDM*(T+3-T1**3)/3	039900
RETURN	040000
END	040100

```

SUBROUTINE ECRW(T,GTRW,BTRW)
DIMENSION Y(25),PROPA(25,25),BTRW(25),FRW(25),K(25,25),FRWJ(25)
COMMON/ECRW/ Y,PROPA,K,AFW,BRW,N
COMMON/P/BTRW,R
REAL K
DO 20 I=1,N
BTRW(I)=BRW*R*PROPA(I,16)/PROPA(I,20)
FRW(I)=0.43+1.574*PROPA(I,19)-0.176*PROPA(I,14)**2
20 FRW(I)=((1+FRW(I))*(1-SQRT(1/PROPA(I,16))))**2)*PROPA(I,16)/T
GTRW=LSBTRW=0
DO 30 I=1,N
DO 30 J=1,N
C=Y(I)*Y(J)*(1-K(I,J))*SQRT(BTRW(I)*BTRW(J)*FRW(I)*FRW(J))
1*AKW/BMW
BTRW=BTRW+C
30 GTRW=GTRW+C*(FRW(I)/SQRT(FRW(I))+FRW(J)/SQRT(FRW(J)))
GTRW=-0.5*GTRW
RETURN
END
040200
040300
040400
040500
040600
041300
041400
041500
041600
041700
041800
041900
042000
042100
042110
042200
042300
042400
042500

```

JTIN: DL RIVA 73/730 OPT=1

FT: 4.3+513

D-37

62/06/11

	SUBROUTINE DERIV(X,Y,DERIV,FUNC,IND)	042600
	EXTERNAL FUNC	042700
	IF (IND.EQ.1) GO TO 10	042800
	F1=X	042900
	FM1=X	043000
	AUM=Y/1000.	043100
	FM2=Y-AUM	043200
	F2=Y+AUM	043300
	GO TO 20	043400
10	F2=Y	043500
	FM2=Y	043600
	AUM=X/1000.	043700
	FM1=X-AUM	043800
	F1=X+AUM	043900
20	CALL FUNC(F1,F2,DER1)	044000
	CALL FUNC(FM1,FM2,DER2)	044100
	DERIV=(DER1-DER2)/(2*AUM)	044200
	RETURN	044300
	END	044400