



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

"MODELO A REGIMEN NO PERMANENTE  
PARA EL CALCULO DE SISTEMAS  
DE RELEVO DE PRESION"

ERNESTO ALFARO PASTOR

RAMON ALVARADO MALACARA

INGENIERIA QUIMICA

1980

M-19079



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

Tesis

ABO \_\_\_\_\_

FECHA 1980

PROC. \_\_\_\_\_

176-14



Jurado asignado originalmente:

Presidente	Prof.	ALEJANDRO ANAYA DURAND
Vocal	Prof.	ROBERTO ANDRADE CRUZ
Secretario	Prof.	PAFAEL GARCIA NAVA
1er. Suplente	Prof.	ANTONIO FRIAS MENDOZA
2° Suplente	Prof.	ENRIQUE BRAVO MCNROY

Sitio donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO

Sustentantes:

ERNESTO ALFARO PASTOR	<u><i>Ernesto Alfaro</i></u>
RAMON ALVARADO MALACARA	<u><i>R. Alvarado</i></u>

Asesor del tema:

Prof.	PAFAEL GARCIA NAVA	<u><i>P. Garcia Nava</i></u>
-------	--------------------	------------------------------



Agradecimiento:

Al personal del Departamento de Sistemas de la División de Procesos de la Subdirección de Proyectos del INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.

En especial a los ingenieros: Rafael García Nava, Sergio Acosta Arreguín y Juan Rodríguez Marín, ya que sin su valiosa cooperación no hubiera sido posible llevar a cabo este trabajo.

---



A mis padres ERNESTO ALFARO ESPEJO y ROSA PASTOR CASTELLO  
asi como mi esposa MARTHA PAVIA REYES por la paciencia  
y el apoyo que recibí.

Gracias





A MIS PADRES POR SU  
GRAN DEDICACION



I N T R O D U C C I O N



En el estudio del flujo de fluidos el caso más conocido es el que consiste en un regimen permanente de flujo y teniendo solamente una fase. Para el tratamiento de este tipo de regimen existen una gran cantidad de correlaciones y métodos en los que se considera una gran variedad de casos. Por lo tanto, podemos decir, que este campo, si no ha sido agotado, si por lo menos ampliamente estudiado.

Un campo que se encuentra aún en estos inicios, es el estudio del flujo de fluidos, también en una sola fase, pero considerando que el regimen de flujo no es permanente o estable, en otras palabras, el regimen es transitorio, por lo que es llamado también únicamente transiente.

El motivo de que este tipo de regimen no haya sido ampliamente estudiado, es que solamente se presenta bajo condiciones especiales de flujo, como son grandes longitudes de tuberia o complejas redes de estas mismas.

Sin embargo, durante la última década, se han empezado a desarrollar algunos métodos y algoritmos para poder resolver las ecuaciones básicas que se pueden plantear para estos casos (ecuación de continuidad y balance de energía), que además se encuentra en forma de ecuaciones diferenciales parciales y que deben ser resueltas simultáneamente. El interés hacia este tipo de situaciones es debido a la instalación de grandes redes de distribución de gas natural, que junto con los grandes gasoductos, deben ser simulados de una manera más racional y exacta. Sin embargo, aunque se han obtenido algunos programas que cumplen satis-

factoriamente con este propósito, se sigue aún tratando de lograr métodos aún más complejos, en los que sea posible considerar todos los casos y situaciones que se pueden presentar y no sea necesario el tener que hacer suposiciones especiales, como se verá en el desarrollo de esta tesis.

Otro de los motivos por el cual no se había podido desarrollar convenientemente el estudio de los distintos tipos de transiente, es que hasta la década anterior, el uso de las computadoras no se encontraba aún suficientemente avanzado, ya que su programación era difícil y a un alto costo. El rápido desarrollo de estas máquinas, a partir de los años sesentas a la fecha ha permitido el surgimiento de los distintos lenguajes de programación (Fortran, Cobol, Algol, etc. ), que junto con nuevos métodos numéricos, han podido ser aplicados a las soluciones del estado no permanente.

Uno de nuestros propósitos al iniciar esta tesis, es el de describir los métodos de transiente de presión y gasto que hasta la fecha se tiene y mencionar el surgimiento de los nuevos métodos, los cuales aún no son accesibles en su totalidad a todo el mundo. Por lo tanto nuestra principal idea es la de presentar, en general, que es un transiente junto con la forma en que se puede deducir sus ecuaciones básicas. Esto se hará en los capítulos 3, 4 y 5, tratando de presentar mediante programas, no muy complejos, de computadora algunos ejemplos de cálculo, para tener una mayor claridad en las demostraciones.

En el capítulo 6, se tratará, muy brevemente, otro de los aspectos

tos referentes a un transiente, pero no solo de gasto másico y presión, sino que en esta ocasión se tratará con el problema de la temperatura como una variable más en función del tiempo y el espacio.

En el capítulo **VIII** trataremos de ver la forma de minimizar el error cometido, en la solución de las ecuaciones básicas, al efectuar las suposiciones hechas en los otros capítulos.

En el **VIII** capítulo se presentará el caso especial de un tanque cerrado sometido al desfogue de una válvula y a partir de esto se calculará el perfil de presión vs tiempo.

Hemos dejado al último de esta introducción la mención de los capítulos 1 y 2 que corresponden, de alguna manera a los sistemas de relevo de presión.

Un sistema de relevo de presión constituye una parte importante de una planta industrial, debido a que forma parte del sistema de seguridad de esta y por lo tanto es responsable de la conservación, en buen estado, de los equipos y la vida de los operarios.

Debido a que una de las partes de un sistema de relevo de presión, corresponde a una red de tubería en la que se pueden tener longitudes medianas de tubo recto, ha surgido la duda, de que si al calcular estos sistemas, sería conveniente el considerar o no al régimen no permanente de flujo y comprobar hasta que punto es válida la suposición que se hace de que al producirse una falla en la planta, el sistema de relevo de presión se encuentra instantáneamente en un estado estable y si esto no nos lleva a un sobredimensionamiento excesivo del cabezal de desfogue con su consiguiente aumento en el costo total de este.



Este será pues, otro de los puntos a tratar en esta tesis, y como es necesario, para poder hacer mención de los sistemas de relevo de presión, el capítulo 1 corresponderá a una breve descripción de lo que son estos sistemas y en el capítulo 2 trataremos de ver el cálculo de estos en la forma en que actualmente se realiza, desarrollando además un programa de computadora que pueda efectuar estos cálculos, para poder comparar las diferencias de la suposición de régimen permanente con los otros capítulos.

Es necesario aclarar un último punto, el régimen tanto permanente como no permanente, puede presentarse en una fase, para fluidos - compresibles y para incompresible, pero nuestro estudio se va a limitar a los fluidos compresibles, pero será posible adaptarlo a los incompresibles haciendo solamente la suposición de que la densidad no es una función del tiempo y el espacio.

C A P I T U L O 1

"Descripción de los sistemas de relevo de presión"



## 1.- El Objetivo del capítulo:

El objetivo principal de este capítulo es el presentar un esquema general de lo que son los sistemas de relevo de presión, la utilidad de estos sistemas y la definición de algunos términos que van a ser desarrollados en capítulos posteriores, en los que se describirá de una manera más detallada el cálculo de estos sistemas.

Daremos primero una descripción de lo que son los sistemas de relevo de presión:

Podríamos decir que un sistema de relevo de presión, es una serie de dispositivos para prevenir una sobre-presurización que puedan dañar al equipo y demás accesorios de una planta (tuberías,-- válvulas etc.) cuando ocurre una falla en el sistema.

Los daños causados al equipo por una sobrepresión, pueden dar lugar a paros innecesarios, además que representan un riesgo para el personal laboral, causando a las industrias grandes cargas económicas y responsabilidades en la vida de sus trabajadores.

## 2.- Causas comunes de exceso de presión

Las principales causas que provocan una sobrepresurización en el equipo de una planta suelen ser:

a).- Exposición al fuego u otra fuente externa de calor: Un recipiente con un líquido, al ser sometido al fuego externo, formará o generará vapor y existirá una sobrepresión debido al aumento de volumen de fluido. Toda la carga del líquido dentro del recipiente deberá considerarse como masa a relevar.

La zona expuesta a fuego del recipiente deberá ser el área mojada por el líquido. Los cálculos deben basarse en la geometría de la unidad y el aislante( en el caso de que se tenga), aunque en la mayoría de los casos si el aislante puede ser destruido por el fuego, se considerará al recipiente como no aislado. Se debe evitar por lo tanto no exceder de un 20% de la presión de diseño del equipo.

Se considerará al fuego en zonas dentro de la planta, no en toda ella, salvo en el caso de que el tamaño de ésta sea menor de 2500 ft<sup>2</sup>.

Un recipiente se considerará sometido a fuego si su altura es menor de 25 ft, pero si es mayor no estará sometido a fuego.

Es importante tomar en cuenta los recipientes que contienen gas si son sometidos a fuego, ya que en este caso también habrá una sobrepresión debido al aumento de volumen, pero éste será menos drástico que en caso de el líquido.

b.-Salida bloqueada: cuando inadvertidamente queda bloqueada una unidad, todo el vapor que está llegando. se concentrará en esta generando una sobrepresión y debe considerarse toda esta carga como masa a relevar.

c.-Falla de reflujo: Al no existir reflujo en torres de destilación, el gas de la parte superior de esta generará una sobrepresión y la válvula de relevo deberá dimensionarse de tal forma que pueda manejar todo el vapor corriente arriba del condensador.

d.- Falla de agua de enfriamiento: Cuando por algun motivo falla el suministro de agua de enfriamiento, se deberá analizar todo el vapor que se condensa por medio de esta y deberá existir un dispositivo para relevarlo ya que este vapor generará un aumento de

presión en los equipos o en las líneas por las que circule.

e.-Falla de corriente eléctrica: Cuando existe una falla de éste tipo puede dejar de haber potencia en las bombas y compresores y falta de aire de instrumentos y se deberá analizar en qué equipos se genera una sobrepresión debido a no poder manejar la carga de gas y esta será el gasto a relevar.

f.- Falla de control: Puede ser la falla de una válvula y por lo tanto se deberá examinar el aumento de presión que puede producir para poder determinar el gasto a relevar en un equipo. Si por ejemplo por una falla de una válvula de control existe una entrada de gas mayor de la que debiera entrar a un recipiente se considerará este aumento como el gasto a relevar.

g.- Ruptura de tubos: Cuando la corrosión que sufren las tuberías del haz de un cambiador de calor hace que los fluidos que maneja este, se pongan en contacto y puede suceder que esto provoque una reacción química que aumente la presión en el haz o en la coraza del mismo, también es posible que sin que exista una reacción química, la diferencia de presiones crea una sobrepresión en la coraza del intercambiador que deberá ser considerada en el análisis de la falla.

h.- Expansión de líquido: Cuando un líquido debido a un aumento de temperatura sufre una expansión térmica esto puede provocar un aumento de la presión de la tubería. Generalmente se necesitan válvulas pequeñas para controlar esto. Estas fallas son reportadas en el API-RP 520 (47).

Una falla importante que debe tenerse en cuenta es el error humano, o sea, el que un empleado cometa una falla por dejar cerrada

da una válvula o por el contrario abierta otra que genere esto una sobrepresión. En general algunos de estos casos pueden caer dentro de algunas de las fallas anteriores, pero es necesario hacer un análisis cuidadoso de riesgos para evitar imprevistos.

Es necesario en cada una de estas fallas el determinar cual puede ser su gasto a relevar así como su temperatura y presión de relevo para poder dimensionar el equipo de relevo de una manera mas acertada.

Por lo general el API 520 reporta o considera que no debe darse mas de una de estas fallas a la vez, salvo que en el análisis se vea que una de estas puede provocar en algun caso alguna de las otras.

Es por esto que el sistema de relevo de presión se debe dimensionar para el caso mas critico ya que si se dimensiona para todos los casos juntos, el tamaño del equipo de relevo puede ser excesivo.

### 3.- Generalidades sobre el sistema de relevo de presión:

En el siguiente diagrama esquemático se muestra un sistema de relevo de presión:

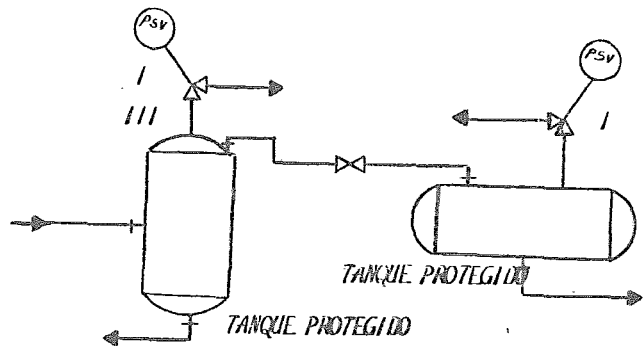
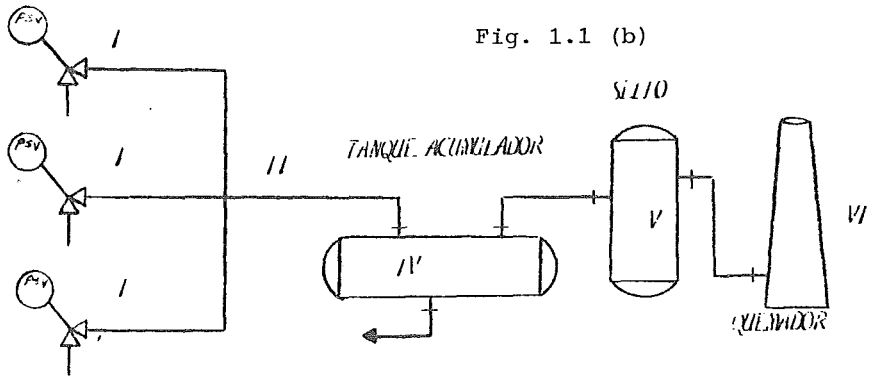


Fig. 1.1 (a)

Fig. 1.1 (b)



válvulas de relevo

Donde los elementos constitutivos son:

- I Valvula de relevo
- II Cabezal (Red de tuberías)
- III Disco de ruptura
- IV Tanque separador de líquido ( Knock out)
- V Sello de líquido
- VI Quemador

Normalmente es un sistema cerrado, pero también podemos tener un sistema de desfogue abierto a la atmósfera, o sea que descargue directamente a ésta, dependiendo de la naturaleza del fluido.

La serie de accesorios de que consta normalmente un sistema de relevo de presión son:

(I) Una valvula de relevo o de seguridad, que es una valvula a justada para abrir a una cierta presión que es igual o menor que la presión de diseño del equipo, permitiendo el flujo en una sola dirección, pues al disminuir la presión en el equipo esta vuelve a cerrar. Podemos decir que ésta valvula es el acce



sorio principal del sistema de relevo de presión y es a la que hay que darle un calculo mas cuidadoso.

La valvula normalmente esta conectada a una red tubería (II) o cabezal al que pueden unirse las descargas de varios sistemas con sus respectivas valvulas de relevo.

El disco de ruptura (III) es otro dispositivo del sistema de relevo de presión y consiste en un disco metalico diafragmado, en el que el grosor de la película metálica esta calculado para romper a una cierta presión y que generalmente se usa en combinación con una valvula de relevo. Es necesario tener cuidado cuando se utiliza solo este tipo de dispositivo ya que su descarga será continua y no se detendrá hasta que la presión del gas en el sistema se equilibre con la presión corriente arriba del disco.

Después se tiene el tanque separador de líquido (Knock Out) cuya función es el separar el liquido que arrastre el gas en el sistema de relevo.

El sello es para condensar algo de humedad (V) pero su principal función es evitar el regreso de la flama del quemador o que entre aire si la flama del quemador se apaga.

En el quemador (VI) es donde se quema el gas. Esto se hace generalmente si el fluido es toxico y es necesario quemarlo antes de lanzarlo a la atmosfera API st 521 (48).

#### 4.- Generalidades sobre valvulas de relevo de presión (I):

Son accesorios de relevo de presión los cuales están específicamente diseñados para abrir completamente con una pequeña acumulación sobre la presión de ajuste.

La siguiente tabla API 520 (47) nos muestra algunas de las condiciones a las que trabajan las valvulas de relevo de presion y el sistema a relevar:

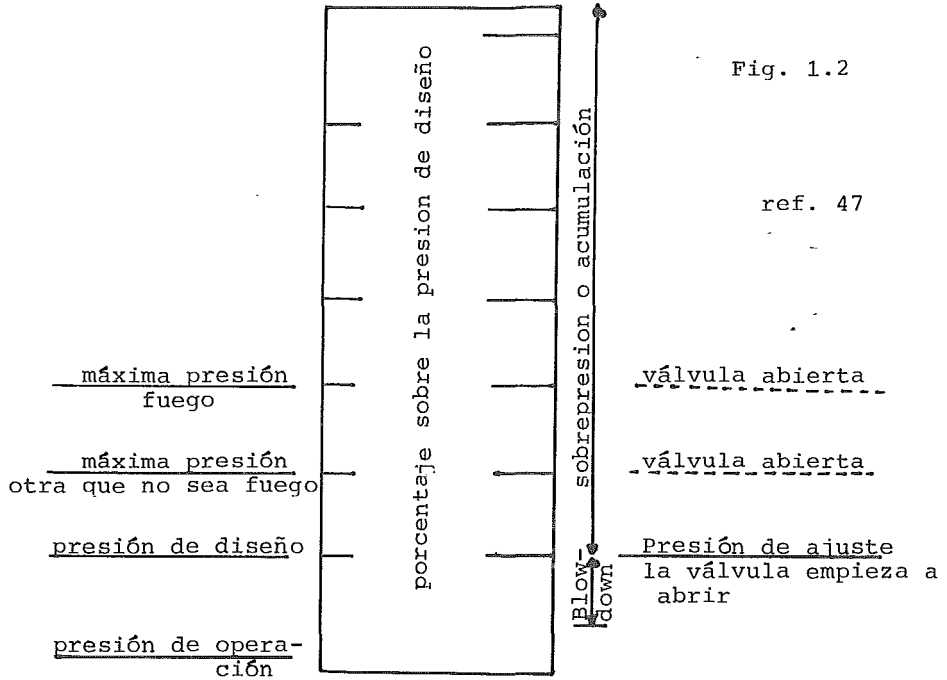


Fig. 1.2

ref. 47

Para poder utilizar algunos terminos que se darán durante el resto del capitulo y refiriéndose a las valvulas de relevo, daremos a continuación una serie de definiciones sobre las valvulas de relevo:

- 1a Valvula de relevo. Son accesorios de relevo de presión que actúan con la presión estática de la corriente antes de la valvula y las cuales abren proporcionalmente con el incremento de esta presión estática, sobre la presión de ajuste. Generalmente se usan para líquidos.
- 2a Valvula de seguridad.- Es un accesorio de relevo de presión el cual está diseñado para abrir completamente con un incremento sobre la presión de ajuste del sistema. Generalmente se utilizan para gases o vapores.
- 3a Valvula de relevo de presión.- Se le denomina indistintamente a cualquier tipo de valvula de relevo ya sea que maneje líquido o gases.
- 4a Máxima presión permitida de trabajo.- Para un recipiente depende esta presión del material, su grosor y las condiciones de servicio, por lo general el recipiente, en condiciones normales, no opera arriba de esta presión.
- 5a Presión de operación.- Es un valor fijado por el proceso y es la presión a la que normalmente trabaja el recipiente.
- 6a Presión de Ajuste.- Es la presión a la cual la valvula de relevo se ajusta para abrir. En una valvula de relevo de presión que maneje gas o vapor, la presión de ajuste es considerada la presión interna a la cual la valvula abre completamente.
- 7a Acumulación.- Es el incremento de la presión sobre la presión de ajuste del recipiente durante la descarga a través de la valvula de relevo de presión. Esta se expresa en porcentaje de presión.

- 8a Sobrepresion.- Es tambien el incremento sobre la presion de ajuste del sistema pero expresado en unidades de presion.
- 9a Elevacion.- Es el levantamiento del disco en la valvula de relevo de presion debido a la presion interna del recipiente.
- 10a Contrapresion.- Es la presion corriente abajo para la valvula de relevo de presion o presion en el sistema de relevo de presion.
- 11a Contrapresion Superimpuesta.-Es la presion a la descarga del lado del sistema de relevo, antes que abra la valvula.
- 12a Contrapresion generada.- Es la presion a la descarga que da como resultado un flujo, una vez que la valvula de relevo ha abierto.
- 13a Maxima contrapresion permitida.- Es la maxima contrapresion a la descarga de la valvula, si esta es superada, el gasto que releve la valvula puede no ser el esperado o aún mas, la valvula puede no abrir.

Generalmente la cabeza estática desarrollada por la presion interna del recipiente se utiliza para vencer la fuerza del resorte de la valvula y levantar el disco convirtiéndose esta fuerza en energía cinética en el orificio de la valvula.

Este tipo de valvulas se clasifican en balanceadas y convencionales, dependiendo del efecto de la contrapresión en su ejecución. Es conveniente aplicar los sistemas de relevo y sus sistemas de descarga a tanques que esten diseñados para trabajar a mas de 15 psig.

En la valvula comun o convencional la apertura se incrementa gradualmente con el incremento de la presion sobre la presion de a-

juste.

Las valvulas de seguridad abren completamente con una pequeña sobrepresion( acción "POP") y se mantienen abiertas hasta que la presión cae una presión definida y entonces cierran completamente (reseat pressure). Esto solo ocurre cuando el fluido manejado es compresible ya que en líquidos esta apertura y el cierre son de una forma mas gradual.

En una valvula convencional la presión de ajuste se ve afectada por la contrapresión de lado de la descarga de la valvula. Así el espacio de venteo sobre el disco, a la línea de descarga, produce un incremento en la presión de ajuste cuando la presión se incrementa. Esto es, que la presión interna debe vencer a la fuerza del resorte y a la contrapresión que se incrementa conforme se mueve el disco, porque el bonete no está venteado.

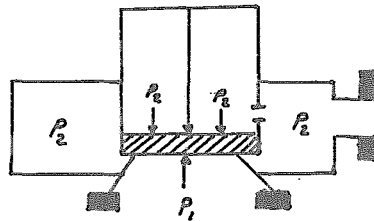


fig. 1.3

válvula no venteada

Si el bonete esta venteado a la atmosfera, la presión de ajuste decrece. Esto es, la contrapresión se suma a la presión interior para vencer la fuerza del resorte y además la presión dentro del bonete se mantiene constante.

Con una contrapresión constante, el resorte puede ser ajustado para producir la presión de apertura deseada.

Ahora, si la valvula descarga dentro de un sistema cerrado de relevo de presion, como por ejemplo una red de tuberia, se encontrarán variaciones en la contrapresion. Entonces no se puede ajustar el resorte adecuadamente.

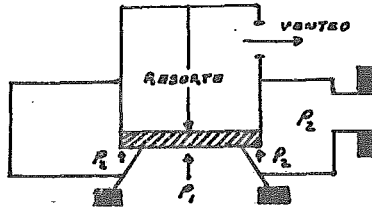


Fig. 1.4

válvula venteada a la atmósfera

Para manejar esta situación, la valvula de relevo de presion balanceada, con fuelle, fue desarrollada. La proporcion del fuelle es tal que el area abierta a la atmosfera, es igual al area efectiva del disco, el cual es expuesto a la presion del proceso y teóricamente esto elimina cualquier efecto de la contrapresion, pues la fuerza que debe vencer la presion del proceso solo va a depender de la fuerza del resorte. Aunque esto ultimo en realidad es teórico, pues la valvula se afecta cuando la contrapresion es de aproximadamente el 50% de la presion de ajuste. Las fuerzas a travez del disco de una valvula de fuelle balanceado son las que se muestran en la figura:

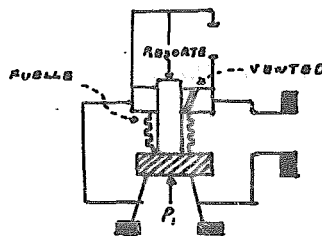


Fig. 1.5

Válvula de fuelle

La valvula de relevo operando con piloto es usada para una operacion en un punto fijo. Generalmente se utiliza cuando la presion de ajuste está muy cercana a la presion de operacion.

Un piston diferencial en la valvula principal es cargado a travez de un orificio por la presion del proceso. La valvula abre cuando la presion de ajuste es alcanzada. Este venteo de la presion sobre el piston de la valvula principal, permite a ésta abrir ampliamente. Cuando la presion disminuye un cierto intervalo, la valvula piloto se cierra, y toda la presion del sistema es inmediatamente desviada al domo de la valvula principal, el piston instantáneamente se mueve hacia abajo para cerrar la valvula principal.

#### 4.1 Materiales de construcción:

Generalmente se utiliza acero al carbon con algunas partes de acero inoxidable, esto es para el cuerpo de la valvula, en algunos procesos especiales puede hacerse de Monel, Hastelloy mezclados con acero o acero inoxidable, segun las condiciones a que van a ser expuestas. Para temperaturas interiores debajo de los 450<sup>o</sup>F se utilizan resortes de acero al carbon, para mayores temperaturas, se utilizan resortes de acero-tungsteno. Si hay corrosion, se utilizan resortes laminados con niquel o tambien aluminizados.

#### 4.2 Calculo de válvulas de seguridad.

Por medio de la deducccion hecha por Ed Mister (52) llegaremos a la ecuacion general para el calculo del area del orificio de una valvula de relevo de presion partiendo primero

de un balance de energia.

$$E_1 + P_1 V_1 + \frac{u_1^2}{2g_c} + X_1 q + O = E_2 + P_2 V_2 + \frac{u_2^2}{2g_c} + X_2 q + w_s \quad 1.4.2.1.$$

que se puede poner como:

$$\Delta E + \Delta(PV) + \frac{\Delta u^2}{2g_c} + \Delta X \frac{q}{g_c} = 0 - w_s \quad 1.4.2.2.$$

Si la entalpia la definimos como:

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(PV) \quad 1.4.2.3.$$

Y si combinamos la ecuacion 1.4.2.2. con la ecuacion 1.4.2.3. tendremos:

$$\Delta H + \frac{\Delta u^2}{2g_c} + \Delta X \frac{q}{g_c} = 0 - w_s \quad 1.4.2.4.$$

En un orificio se puede despreciar el termino de energia potencial  $\Delta X$ , así como los términos de trabajo  $w_s$  y calor  $Q$ .

De esta forma llegaremos a la ecuación:

$$\Delta H = - \frac{\Delta u^2}{2g_c} \quad 1.4.2.5.$$

Si la velocidad inicial es despreciable comparada con la velocidad final, la ecuación se reduce a :

$$u = \sqrt{2 g_c (H_1 - H_2)} \quad 1.4.2.6.$$

En el caso de hidrocarburos es posible que muchas veces no se tengan cartas en donde se puedan obtener los valores de entalpia, asi que será necesario derivar otra ecuación a partir de la ecuacion 1.4.2.3. Tenemos por definicion que:

$$\Delta H = Q + \int v dp \quad 1.4.2.7.$$

Si además existe fricción, esta ecuacion queda:



$$\Delta H = 0 + \int v dP + F \quad 1.4.2.8.$$

Donde F es el término que corresponde a la fricción. Si combinamos la ecuación 1.4.2.8. con la ecuación 1.4.2.3. y se cancelan y se diferencian los términos tendremos:

$$v dP + dF + \frac{u du}{g_c} + \frac{q}{g_c} dX = -dw_s \quad 1.4.2.9.$$

Que corresponde a la forma diferencial del teorema de Bernoulli. Si nuevamente se considera que la energía potencial y el trabajo son despreciables, la ecuación queda:

$$v dP + dF + \frac{u du}{g_c} = 0 \quad 1.4.2.10.$$

Este tipo de orificios son diseñados generalmente para tener un flujo con una fricción muy cercana a cero. Esto sería el caso ideal, pero si consideramos además que en orificio la longitud es muy pequeña entonces si es posible despreciar el término de fricción.

Si sabemos además que el flujo es adiabático y la velocidad acústica, que es alcanzada en este punto, el máximo flujo se alcanzará entonces cuando el cambio de energía cinética es igual al cambio en energía de presión.

La presión entonces no puede caer por debajo de la presión crítica de flujo o P<sub>cf</sub>.

Esta presión P<sub>cf</sub> puede ser encontrada a partir de un exponente isoentrópico, definiendo el cambio de volumen con la presión como:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \quad 1.4.2.11.$$

Y si además tenemos que:

$$\int_1^2 VdP = P_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left( (P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad 1.4.2.12.$$

Y de la ecuacion 1.4.2.8. tendremos:

$$VdP + \frac{u du}{g_c} = 0 \quad 1.4.2.13.$$

Entonces:

$$\int_1^2 VdP = - \frac{u^2}{2g_c} \quad 1.4.2.14.$$

Combinando las ecuaciones 1.4.2.13 y 1.4.2.14 llegaremos a:

$$\frac{u_2^2}{g_c n P_1 V_1} = \frac{2}{n-1} \left( 1 - (P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}} \right) \quad 1.4.2.15.$$

Si además tenemos que:

$$\frac{dP}{dV} = -n \frac{P}{V} \quad 1.4.2.16.$$

Y de la ecuación 1.4.2.13. tenemos que:

$$VdP = - \frac{G^2}{g_c} \frac{V dV}{V} \quad 1.4.2.17.$$

donde:

$$u = GV$$

$$du = G dV$$

G = masa velocidad

Combinando la ecuación 1.4.2.16 con la ecuación 1.4.2.17 tendremos:

$$G^2 = g_c n \frac{P}{V} \quad 1.4.2.18$$

Y

$$u^2 = g_c n P_2 V_2 \quad 1.4.2.19.$$

Y de esta ultima tenemos:

$$u^2 = g_c P_2 V_2 \quad 1.4.2.20.$$

De la ecuacion 1.4.2.15 tenemos

$$\frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{2}{n-1} \left( 1 - (P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}} \right) \quad 1.4.2.21.$$

Y el lado izquierdo de esta ecuacion es igual a :

$$(P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}}$$

Sustituyendo en la ecuacion 1.4.2.21 este valor reorganizando y considerando a  $P_2$  como  $P_{cf}$  queda:

$$\frac{P_{cf}}{P_1} = \left( 2/n-1 \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad 1.4.2.22.$$

Y para obtener el valor de  $V_{cf}$

$$V_{cf} = V_1 (P_1/P_{cf})^{1/n} = V_1 (n+1/2)^{1/n-1} \quad 1.4.2.23.$$

Y por lo tanto el valor queda

$$\frac{P_{cf}}{V_{cf}} = (P/V)_{cf} \quad 1.4.2.24.$$

Que tambien puede obtenerse a partir de la ecuacion 1.4.2.22 y las ecuaciones 1.4.2.23 y 1.4.2.24 de la forma:

$$(P/V)_{cf} = (P/V)_1 (2/n+1)^{\frac{n+1}{n-1}} \quad 1.4.2.25.$$

Combinando la ecuacion 1.4.2.25. con la ecuacion 1.4.2.18 para obtener la masa velocidad maxima tendremos que :

$$G_{max} = \sqrt{q_c n P_1 \rho_1 (2/n+1)^{\frac{n+1}{n-1}}} \quad 1.4.2.26.$$

En donde:

$$\rho_1 = 1/V_1$$

La ecuacion anterior es para flujo crítico y puede ser derivada por diferenciación, cambiando las unidades de la ecuación 1.4.2.15

$$G^2 = 2g_c P_1 \rho_1 (n/n-1) (P_2/P_1)^{2/n} (1 - (P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}}) \quad 1.4.2.27.$$

Para el flujo máximo:

$$\frac{dG^2}{d(P_2/P_1)} = 0 = 2g_c P_1 \rho_1 (n/n-1) (2/n(P_2/P_1)^{\frac{2-n}{n}} - \frac{n+1}{1} \frac{P_2^{\frac{1}{n}}}{P_1}) \quad 1.4.2.28.$$

Cuando  $n=1$

$$G^2 = 2g_c P_1 \rho_1 (P_2/P_1)^2 \ln(P_2/P_1) \quad 1.4.2.29.$$

Y

$$G_{\max} = \sqrt{\frac{g_c P_1 \rho_1}{e}} = 0.605 \sqrt{g_c P_1 \rho_1} \quad 1.4.2.30.$$

Si

$$\rho = P M / Z R T$$

Introduciendo el coeficiente de descarga en la ecuacion 1.2.4.26 rearreglando e introduciendo W y A como una función de G, queda:

$$W = 3600 \sqrt{\frac{32.2}{1544}} \sqrt{n(2/n+1)^{\frac{n+1}{n-1}}} K A P \sqrt{\frac{M}{Z T}} \quad 1.4.2.31.$$

También introduciendo el valor de K cuyo valor para un buen diseño es de 0.975. La ecuación 1.4.2.31 también puede escribirse como:

$$W = C K A P \sqrt{\frac{M}{Z T}} \quad 1.4.2.32$$

En donde:

$$C = 520 \sqrt{n(2/n+1)^{\frac{n+1}{n-1}}} \quad 1.4.2.33.$$

Y para el calculo del area del orificio de la valvula:

$$A = \frac{W}{C K P} \frac{1}{\sqrt{\frac{M}{Z T}}} \quad 1.4.2.34.$$

Esta ecuacion es reportada en el API RP 520(47) y es la ecuación general cuando se tiene cualquier tipo de gases, aunque también se reporten ecuaciones para cuando se tienen casos especiales como vapor de agua.

Las ecuaciones proporcionadas por los distintos fabricantes son derivaciones de esta misma.

#### 4.3 Elección de las válvulas

Una vez que se ha calculado el orificio de la valvula se debe elegir el tamaño estandar inmediato superior al calculado. Estos orificios se denominan por letras que corresponden a los siguientes tamaños:

D	Area	0.110 in <sup>2</sup>
E	Area	0.196 in <sup>2</sup>
F	Area	0.307 in <sup>2</sup>
G	Area	0.503 in <sup>2</sup>
H	Area	0.785 in <sup>2</sup>
J	Area	1.287 in <sup>2</sup>
K	Area	1.838 in <sup>2</sup>
L	Area	2.853 in <sup>2</sup>
M	Area	3.600 in <sup>2</sup>
N	Area	4.340 in <sup>2</sup>
P	Area	6.380 in <sup>2</sup>

Q Area 11.050 in<sup>2</sup>

R Area 16.000 in<sup>2</sup>

T Area 26.000 in<sup>2</sup>

Una vez que se ha elegido el orificio estandar, en una carta de selección proporcionada por el fabricante, que es una adaptación del API-526 (49), se elige el tipo de la valvula.

#### 5.- Red de tuberia o cabezal de desfogue (II)

Consiste en una red de tuberia a la que están conectadas las descargas de las valvulas de relevo de presion y su función es la de llevar el fluído hasta el tanque de separación.

Es una sección de la planta a la que es necesario darle un buen diseño ya que de ella depende el buen funcionamiento de las valvulas de relevo y por lo tanto la protección del equipo de la planta.

Esta red de tuberia está sujeta a esfuerzos debido a los distintos fluídos que maneja.

Pueden existir en esta red choques termicos fuertes ya que la descarga de una valvula puede ser a muy altas temperaturas o como es mas frecuente muy bajas temperaturas, producto de la fuerte expansión del fluído a travez de la valvula de relevo.

Para evitar que al dimensionar la tuberia queden unidas tuberias muy pequeñas con tuberias muy grandes debido a la gran diferencia entre las presiones de relevo de las valvulas de desfogue, es recomendable el separar las valvulas que desfogan a mas alta presion en un cabezal distinto de las valvulas que desfogan a una presión menor. Pero aun si hay diferencias de presiones de descarga entre las valvulas, lo que produce esfuerzos debido a

las presiones.

En los capítulos siguientes nos dedicaremos exclusivamente al análisis de las redes de tubería y no al resto del sistema de desfogues salvo en ocasiones en que sea preciso el mencionar algo sobre éste.

#### 6.- Discos de ruptura (III)

Es un accesorio para proteger al equipo contra la sobrepresión causada por una falla. Puede ser usado solo o lo que es más común en combinación con una válvula de relevo de presión.

Como los discos son hechos de distintos metales y pueden protegerse ambos lados contra la corrosión de los fluidos generalmente se usan para proteger a la válvula de relevo de presión y que ésta no esté en contacto directo con el fluido que va a relevar sino hasta que la falla se produce y la válvula desfogue.

Cuando se utiliza de esta manera se tiene la ventaja también de poder controlar la salida del fluido una vez que se acaba la falla debido a que cierra la válvula de relevo.

En los casos en que se utiliza solo, no es posible controlar el flujo una vez terminada la falla ya que como el disco consiste de un diafragma que se rompe, éste no podrá volver a cerrar salvo que sea cambiado.

Los materiales de construcción más comunes son: Aluminio, Monel, Inconel y aceros inoxidable austeníticos, aunque algunas veces los discos son hechos de cobre, oro, platino y titanio. El rango aproximado de la película metálica va de 0.002 a 0.06

pulgadas de espesor, los tamaños de los discos van de 1/2 a 24 pulgadas de diámetro.

#### 7.- Tanque separador de liquido (Knock Out)(IV)

Es un tanque puesto inmediatamente despues de la tuberia de descarga cuya función es la de evitar que el liquido pueda llegar al quemador, ya que practicamente en cualquier proceso se espera que se forme liquido durante la descarga debido al enfriamiento en las tuberias.

El liquido se separa en el tanque por un cambio de velocidad y debido a la gravedad, almacenando las partículas del liquido. Estos sistemas se diseñan por ensayo y error considerando el tiempo de residencia, la velocidad del gas que debe ser baja para permitir a las partículas de liquido caer.

#### 8.- Sello(V)

Un sello es colocado en la base del quemador y aunque sirva tambien para atrapar líquido, su principal función es la de mantener una presion mínima al quemador y evitar un regreso de la flama de éste. Generalmente están diseñados para llenarse con líquido, usualmente agua.

#### 9.- Quemador (VI)

Los quemadores están diseñados para poder quemar a la atmosfera los excesos de gas sin que estos sean toxicos, además sirven para eliminar el gas en caso de una emergencia y deben poder manejar estas cantidades de gas. Estos necesitan un piloto de ignición para poder mantener la estabilidad de la flama.



Los principales tipos de quemadores que hay son:

a.- Quemadores elevados.-Tienen una estructura para soportarlo y mantener la combustion, por lo general no requieren de una gran área aunque hay casos especiales.

b.- Quemadores de suelo.- Su diseño es mas o menos igual a los quemadores elevados, pero estas no presentan una estructura que los soporte, una desventaja es, entonces, que estos quemadores deben estar aislados de la planta, pero tienen como ventaja una mayor facilidad de mantenimiento.

c.- Quemadores sin humo.- Estos se utilizan cuando puede haber problemas por la producción de humo, esto es, problemas con la comunidad por la contaminación ambiental; entre los métodos para conseguir este tipo de quemadores están el inyectar vapor o la distribución del flujo en pequeños quemadores (diseño multiyet), el multiyet puede ser usado en combinación con un quemador convencional para manejar las capacidades en exceso.

Indice de Variables:

- C Constante dependiente del coeficiente isoentrópico
- E Energía
- F Pérdidas por fricción
- G Masa velocidad
- $g_c$  Aceleración de la gravedad
- H Entalpía
- K Constante(0.96)
- $\eta$  Coeficiente isoentrópico
- $P_{CF}$  Presion crítica (sonica)
- P Presion

Q Calor  
u Velocidad  
V Volumen  
 $V_{CF}$  Volumen critico  
W Gasto masico  
X Altura.



## CAPITULO II

'Descripción del cálculo del cabezal de desfoque a régimen permanente'



## 1.- Objetivo.

El cálculo de los sistemas de relevo de presión se lleva a cabo normalmente como si el sistema fuera una red de tubería sujeta a un estado estable o régimen permanente de flujo.

La cantidad total de gas a relevar, será la suma de los gastos que cada válvula releve; sin tomar en cuenta el tiempo de falla como si la válvula estuviera desfogando continuamente.

Este es el caso más crítico y por lo tanto si diseñamos para estas condiciones, estaremos siempre del lado seguro. En capítulos posteriores se tratará a esta red en un estado transitorio, pero en este capítulo veremos el cálculo considerando que las variables de presión, temperatura, gasto y densidad no son una función del tiempo; sino solo de su posición en la red. En el capítulo anterior se dió una descripción sobre lo que son los sistemas de relevo y los criterios para la selección de las válvulas de relevo, por lo que en este caso nos enfocaremos únicamente al dimensionamiento de las líneas de tubería.

Solamente se tratará el caso de desfogue de fluidos compresibles siempre en una sola fase. Se mostrarán algunos métodos de cálculo y la comparación de estos, así como en diagrama de flujo para el cálculo de la red de tubería.

Iniciaremos con el cálculo de caída de presión en una sola línea, pues es el elemento básico ya que una red está formada por líneas simples de tuberías, unidas por codos, válvulas, compresores etc.

## 2.- Caída de presión en una línea simple.

Cálculo de caída de presión en una línea de tubería si considera-

mos un tramo de tubo, que tenga una sección constante y una longitud  $dl$ , por el que está fluyendo gas, como se muestra en la figura:

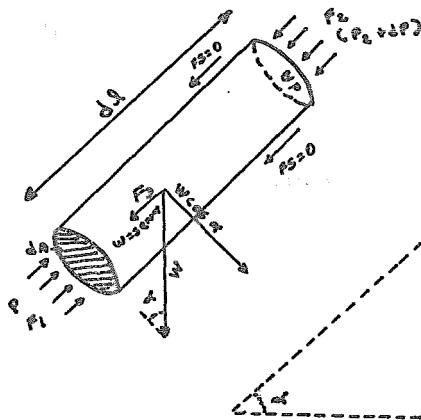


Fig. 2.1

Para un fluido ideal no existe resistencia, esto es,  $F_s = 0$ , quedan actuando entonces 3 fuerzas que son  $F_1 = PdA$ ,  $F_2 = (P+dP)dA$  y la componente del peso en la misma dirección de las otras que es  $F_3 = w \text{ sen } \alpha = dl dA \text{ sen } \alpha$ .

Si efectuamos nuestro balance de fuerzas, tendremos que la fuerza  $F_1$  es contraria a  $F_2$  y  $F_3$  por lo tanto:

$$\sum F = F_1 - F_2 - F_3 \quad 2.2.1$$

Si sustituimos estas fuerzas por sus valores tendremos:

$$\sum F = F_1 - F_2 - F_3 = \rho dA - (P+dP)dA - \rho dA dl \text{ sen } \alpha \quad 2.2.2$$

Si la diferencia de alturas entre el punto inicial y el final de  $dl$  está dada por:

$$dz = dl \operatorname{sen} \alpha \quad 2.2.3$$

Entonces la ecuación 2.2.2. se reduce a :

$$\sum F = - dP dA - \rho dP dz \quad 2.2.4$$

La fuerza que resulta de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa y a su aceleración:

$$\sum F = a dm \quad 2.2.5$$

La masa va a ser igual al peso dividido entre una constante  $dm=W/g$  y la aceleración va a ser el cambio de la velocidad en un tiempo  $dt$  , entonces  $a= dv/dt$  . Así la fuerza se convierte en:

$$\sum F = (W/g) (dv/dt) \quad 2.2.6$$

Si el peso de un fluido es su volumen multiplicado por su densidad entonces:

$$\sum F = dA dl (\rho/g) dv/dt \quad 2.2.7$$

Si igualamos las ecuaciones 2.2.4 y 2.2.7 tendremos:

$$- dP dA - \rho dP dz = (\rho/g)dA dv (dl/dt) \quad 2.2.8$$

Si  $dl/dt$  es la velocidad y multiplicamos ambos lados de la ecuación por  $-1/\rho dA$  tendremos:

$$(1/\rho) dP + (1/g) v dv + dz = 0 \quad 2.2.9$$



Esta es la fórmula general descubierta por Euler para un fluido ideal. Cuando un fluido no es ideal, presenta una resistencia al flujo, esta es, las pérdidas por fricción con las paredes del tubo, las denominaremos como  $h_l$ , entonces la ecuación 2.2.9 se transforma en:

$$(1/\rho) dP + (1/g) v dv + dz + h_l = 0 \quad 2.2.10$$

Integrando entre límites las partes diferenciales de la ecuación 2.2.10 tendremos.

$$(1/\rho) \int_1^2 dP + (1/g) \int_1^2 v dv + \int_1^2 dz - h_l = 0$$

$$(1/\rho) (P_2 - P_1) + (v_2^2 - v_1^2) / 2g + (z_2 - z_1) = h_l \quad 2.2.11$$

Esta es la ecuación de Bernoulli, la cual es aplicable a fluidos incompresibles, en los que además se puede eliminar el término de energía cinética pues  $v_2 = v_1$ , o también a fluidos compresibles cuando los cambios de densidad no son grandes, principalmente si el cambio de la presión inicial no sobrepasa un 10%. El cálculo de las pérdidas por fricción, está dado por la ecuación de Darcy:

$$h_l = K v^2 / 2g \quad 2.2.12$$

En la que  $K$  es una constante que depende de la tubería y del número de Reynolds, así pues:

$$K = f \frac{L}{D} \quad 2.2.13$$

El factor de fricción varía con el número de Reynolds, el diámetro y la rugosidad de la tubería.

El número es una medida de la turbulencia de el fluido, si este es menor a 2 100, el fluido es laminar y el factor de fricción es tará dado por  $F = 64/Re$ .

Si el número de Reynolds se encuentra entre 2 100 y 4 000 estará en la molesta zona de transición que aunque se tome para los cálculos como turbulenta, en realidad presenta problemas de cálculo. Arriba de los 4 000 se encuentra en la zona completamente turbulenta, y se han dado varias correlaciones para el cálculo del factor de fricción la mayoría de ellos son de la forma:

$$f = C R_e^n \quad 2.2.14$$

En las cartas propuestas por Lewis F. Moody (43) y en base a los experimentos de Nikurdasse se ve que la zona de transición está determinada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = 2 \log_{10} \frac{Re \sqrt{f'}}{2.51} \quad 2.2.15$$

Y Colebrook (41) propone para la región turbulenta la función:

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = 2 \log_{10} \frac{3.7 D}{\epsilon} \quad 2.2.16$$

Si se juntan estas 2 ecuaciones llegaremos a la función general propuesta por Colebrook (41):

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f'}} \right] \quad 2.2.17$$

Para resolver esta ecuación Jude T- Sommerfeld (41) propone el método iterativo de Newton-Raphson, reduciéndolo a la ecuación:

$$y = x + 2 \log_{10} (A + B x)$$

en donde:

$$x = 1 / \sqrt{f}$$

$$A = \epsilon / 3.7 D$$

$$B = 2.51 / Re$$

Este método consiste en encontrar el valor de X para que Y sea cero, pero es necesario obtener la derivada de la Y con respecto a la X, de la forma:

$$y' = dy/dx = 1 + \frac{2 B \log_{10} e}{A + B x}$$

Es necesario suponer un valor inicial de X para la siguiente iteración tendremos que el valor de X será

$$x_{nueva} = x_{vieja} - \frac{Y(x_{vieja})}{Y'(x_{vieja})}$$

Los resultados obtenidos van a depender del valor que se use como convergencia, un buen valor será  $1 \times 10^{-6}$

Si la velocidad está definida como:

$$v = \frac{W}{\rho A}$$

2.2.18

En donde  $W$  es el gasto en masa.

Con todo esto el numero de Reynolds quedará definido por la relación:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad 2.2.19$$

Cuando se tiene un fluido incompresible la densidad no varía cuando cambia la presión de una manera apreciable. Pero el cálculo de un fluido compresible tendría que considerar, necesariamente, que esta densidad varíe considerablemente con la presión, por eso vemos el cálculo de la densidad por medio de las ecuaciones de estado:

### 2.1 Calculo de Densidades,

El cálculo más sencillo de las densidades de un fluido compresible, es usar la ley de los gases ideales, corregida por el factor de compresibilidad, esto es:

$$\rho = \frac{P}{Z R T} \frac{PM}{C} \quad 2.2.1.1$$

Streeter (35) propone el cálculo del factor de compresibilidad por medio de una función sencilla de la forma:

$$Z = 1 + 0.257 \frac{P}{P_C} - 0.516 \frac{P T_C}{P_C T} \quad 2.2.1.2$$

Esta ecuación está en función de las propiedades críticas del gas. Otra forma puede ser, usando el método de Pitzer (54) en el cual se define al factor de compresibilidad como:

$$Z = Z(0) + \omega Z(1) \quad 2.2.1.3$$

En donde  $\omega$  es el factor ascentrico, y  $z^{(0)}$ ,  $z^{(1)}$  son funciones de la presión y temperaturas reducidas.

Lo mas exacto para el cálculo de la densidad es utilizar una ecuación de estado mas complicada directamente.

Una ecuación de estado que da resultados satisfactorios es la ecuación de REDLICH-KWONG (55) que en su forma general está dada como:

$$P = \frac{R T}{V - b_1} - \frac{a_1}{T^{0.5} V(V+b_1)} \quad 2.2.1.4$$

En donde:

$$a_1 = \frac{0.4278 R^2 T_C^{2.5}}{P_C}$$

$$b_1 = \frac{0.0867 R T_C}{P_C}$$

En donde  $V$  es el volúmen molar del cual podemos obtener la densidad como:

$$\rho = \frac{PM}{V}$$

Como se ve la ecuación 2.2.1.4 no es despejable para el volúmen y este debe ser obtenido por algún método de iteración.

También es posible obtener a partir de esta ecuación el factor de compresibilidad dado como:

$$Z = \frac{1}{1-h} - \frac{A_1^2}{B_1} \frac{h}{1+h} \quad 2.2.1.5$$

en donde:

$$A_1^2 = \frac{a_1}{R^2 T^{2.5}}$$

$$B_1 = \frac{b_1}{R T}$$

$$h = \frac{B_1 P}{Z} = \frac{b}{V}$$

$$\frac{A_1^2}{B_1} = \frac{a_1}{b_1 R T^{1.5}}$$

La ecuación 2.2.1.5, es una ecuación cúbica y en las regiones en que tiene 3 raíces positivas, la mayor corresponde a la fase gas y la menor a la fase líquida.

GIORGIO SOAVE (46) presenta también una ecuación del tipo Redlich-Kwong que en este caso sustituye el término  $a_1/T^{0.5}$  por una  $a_2$  que es función de la temperatura.  $a_2(T)$ , en la que para un componente puro está definida como:

$$a_2(T) = a_1 \alpha_1(T)$$

y

$$\alpha_1^{0.5} = 1 + m_1(1 - T_r^{0.5})$$

En donde la pendiente  $m_1$  es función de los factores ascéncricos.

Para mezclas de gases, se propone:

$$a_1 = \left( \sum x_i a_i^{0.5} \right)^2 ; \quad b_1 = \sum x_i b_i$$

## 2.2 Cálculo de viscosidades.

Segun el método de los estados correspondientes tenemos que:

$$\mu_e = \mu_c \left( T_c^{1/6} / P_c^{1/2} P_c^{1/2} \right) \quad 2.2.2.1$$

En el que se tiene:

Para gases no polares:

$$\mu_e = 34 * 10^{-5} T_r^{0.94} \quad \text{si } T_r < 1.5$$

$$\mu_e = 17.78 * 10^{-5} (4.58 T_r - 1.67)^{5/8} \quad \text{si } T_r \geq 1.5$$

Para gases polares con enlace de hidrógeno; con  $T_r < 2$

$$\mu_e = (7.55 * T_r - 0.55) * 10^{-5} Z_c$$

Para gases polares sin enlace de hidrógeno  $T_r > 2.5$

$$\mu_e = (1.90 T_r - 0.29) * 10^{-4} Z_c$$

### 3.- Ecuaciones para fluidos compresibles.

Volviendo a la ecuación 2.2.10 cuando el fluido es compresible es necesario tener otra ecuación si hay cambios fuertes de presión.

Para la siguiente derivación, será necesario hacer algunas consideraciones:

- a.- El flujo de gas es isotérmico
- b.- El gas se comporta idealmente
- c.- Solo se considerará fluido compresible
- d.- Los cambios por elevación son despreciables
- e.- La sección de tubería es uniforme y constante a lo largo de esta.

La ecuación 2.2.10 se reduce a :

$$v \, dP + \frac{v \, dv}{g} + h_l = 0 \quad 2.3.1$$

La ecuación 2.2.12 puede ser sustituida en la ecuación 2.3.1 pa-

ra definir el valor de las pérdidas por fricción y nos dará;

$$v \, dP + \frac{v \, dv}{g} + \frac{f v^2 \, dl}{2g} = 0 \quad 2.3.2$$

Quedándonos una ecuación diferencial en función de la presión, la velocidad y la longitud. Si utilizamos la masa velocidad  $G$  para eliminar el término de velocidad, de la forma:

$$v = GV \quad y \quad dv = G \, dV \quad 2.3.3$$

Si utilizamos la ley de los gases ideales que nos dice  $PV = P_2 V_2 = a_3$  y sustituimos la ecuación 2.3.3 en la ecuación 2.3.1 tendremos;

$$\frac{P \, dP}{P_2^2} - \frac{G^2 V_2^2}{g P_2} \frac{dP}{P} + \frac{f G^2 V_2^2 \, dl}{2g P_2 D} = 0 \quad 2.3.4$$

Si integramos esta ecuación entre los límites de  $P_1$  a  $P_2$  tendremos:

$$1/2 \left[ 1 - \frac{P_1^2}{P_2^2} \right] + \frac{G^2 V_2^2}{g P_2} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) + \frac{f G^2 V_2^2 L}{g P_2 D} = 0 \quad 2.3.5$$

Si conocemos el valor de  $P_2$  y las condiciones finales de la línea, la ecuación puede ser resuelta para  $P_1$  directamente con algún método iterativo. A continuación se presenta un método sencillo de resolución.

Suponemos que la caída de presión se debe únicamente a las pérdidas por fricción. En una línea uniforme tendremos que la presión inicial estará dada como si fuera un fluido incompresible, esto es:



$$P_i - P_2 = \frac{f G^2 V_2 L}{2 D g} \quad 2.3.6$$

Y rearrreglando esto tendremos:

$$\frac{P_i}{P_2} = 1 + \frac{f G^2 V_2 L}{2 g D P_2} \quad 2.3.7$$

Y si esta ecuacion la combinamos con la ecuacion 2.3.5 tendremos:

$$\frac{P_i}{P_2} = 1/2 \left[ \frac{P_1}{P_2} + 1 \right] - \frac{G^2 V_2}{g P_2} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad 2.3.8$$

Esta última ecuación puede ser reacomodada de una manera mas útil si sustituimos el valor de g y usamos la presión en PSIA y el diámetro en pulgadas quedando entonces:

$$\frac{P_i}{P_2} = 1/2 \left[ \frac{P_1}{P_2} + 1 \right] - 2.16 \cdot 10^{-4} \frac{G^2 V_2}{P_2} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad 2.3.9$$

El siguiente monograma facilita la solución de ésta última ecuación

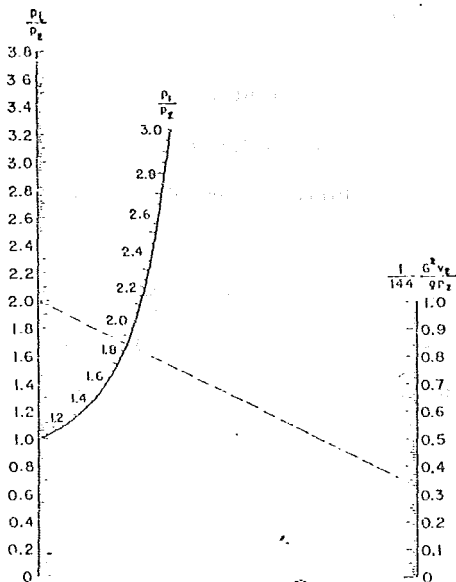


Fig. 2.2  
ref. 17

El procedimiento de cálculo sería:

1.- Calcular de la penúltima ecuación  $P_1/P_2$  usando el valor de  $f$ , obtenido de una gráfica o por cálculo directo.

2.- Calcular  $2.16 \times 10^{-4} G^2 V_2 / P_2 = G^2 V_2 / 144 \rho P_2$  que es necesario en el nomograma.

3.- Encontrar  $P_1/P_2$  del nomograma uniendo al eje de  $P_1/P_2$  con el eje de  $G^2 V_2 / 144 \rho P_2$  por una línea recta, como se conoce el valor de  $P_2$  entonces  $P_1$  puede ser calculada.

La posibilidad de error cometido por este método consiste en no haber asumido la temperatura correcta de  $T_2$  que es necesaria para encontrar el valor de la viscosidad y para encontrar el factor de fricción a partir del número de Reynolds, además del cálculo del volumen final, por lo tanto es necesario asumir una temperatura a partir de la temperatura de relevo que es conocida, pero también requiere de conocer  $P_1$ , para asumir esta temperatura es necesario usar por lo tanto un método de ensayo y error.

Un método alternativo es el presentado por Joseph Cowinson (3) para obtener el cálculo de la caída de presión en una línea por la que fluye gas, a condiciones isotérmicas, lógicamente es necesario que la velocidad sea menor que la acústica. El método nos permitirá desarrollar una ecuación que en base a las condiciones finales de la tubería nos proporcione la presión inicial.

Si partimos de que el producto  $PV$  es constante de la manera siguiente:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = P V = R T = C \quad 2.3.10$$

Y que la relación entre las velocidades es :

$$\frac{v}{v_2} = \frac{V}{V_2} \quad 2.3.11$$

Siempre que la tubería tenga un diámetro constante. Si la ecuación 2.3.11 la elevamos al cuadrado se tiene:

$$\frac{v^2}{v_2^2} = \frac{V^2}{V_2^2} \quad 2.3.12$$

y reorganizando esto ;

$$\frac{v^2}{v_2^2} \frac{V_2^2}{V^2} = 1 \quad \text{o} \quad \frac{1}{\frac{v^2}{v_2^2} V^2} = \frac{1}{v_2^2 V_2^2} \quad 2.3.13$$

Si multiplicamos esto por  $PV$ , nos queda:

$$\frac{P V}{v_2^2 V^2} = \frac{P V}{v_2^2 V_2^2} \quad 2.3.14$$

Si cambiamos  $PV$  por  $P_2V_2$  en el lado derecho de la igualdad, basándose en la ecuación 2.3.10 y cancelamos con la  $v_2^2$  nos queda:

$$\frac{P}{v_2^2 V} = \frac{P_2}{v_2^2 V_2} \quad 2.3.15$$

Y esto también es :

$$\frac{V}{v^2} = \frac{P V_2}{v_2^2 P_2} \quad 2.3.16$$

Si usamos ahora la ecuación de balance de energía que se definió con la ecuación 2.3.2 y la multiplicamos por  $2g/\alpha$  queda:

$$2 \alpha V \frac{dP}{v} + 2 \frac{dv}{v} + \frac{f dl}{D} = 0 \quad 2.3.17$$

Si sustituimos en la ecuación 2.3.17 la ecuación 2.3.16 e integramos entre los límites iniciales y finales tendremos:

$$\frac{2 \alpha V_2}{v_2^2 P_2} \int_1^2 P \, dP + 2 \int_1^2 \frac{dv}{v} + \frac{f}{D} \int_1^2 dl \quad 2.3.18$$

Efectuando la integración queda de la siguiente forma:

$$\left[ \frac{2 \alpha V_2}{v_2^2 P_2} \frac{(P_2^2 - P_1^2)}{2} \right] + 2 \ln \frac{v_2}{v_1} + \frac{f L}{D} = 0 \quad 2.3.19$$

Para cálculos simples, o rápidos, en donde la longitud no sea mayor de 200 pies o si el cambio de velocidad es pequeño, el término  $\ln v_2/v_1$  puede ser despreciado sin incurrir en un error apreciable, y la ecuación queda:

$$P_2^2 - P_1^2 = - \left[ (v_2^2 P_2) / \alpha V_2 \right] (f L) / D \quad 2.3.20$$

Y despejando el valor de  $P_1$  tendremos que :

$$P_1 = \left[ P_2^2 + \left( (v_2^2 P_2) / \alpha V_2 \right) f L / D \right]^{1/2} \quad 2.3.21$$

Y si cambiamos  $1/v_2$  por  $\rho_2$  entonces tenemos:

$$P_1 = \left[ (f L \rho_2 v_2^2) (2 P_2) / 2 \alpha D + P_2^2 \right]^{1/2} \quad 2.3.22$$

Ahora si la longitud es mayor o la caída de presión es más drástica entonces la ecuación quedará como:

$$P_1 = \left[ (f L \rho_2 v_2^2) (2 P_2) / (2 \alpha D) + P_2^2 + \ln \frac{v_2}{v_1} \frac{(2 v_2^2 - 2 P_2^2)}{\alpha} \right]^{1/2} \quad 2.3.23$$

Nótese que es necesario conocer la temperatura final de la línea para poder evaluar las condiciones de densidad y factor de fricción.

Una ecuación que da excelentes resultados, es la ecuación de flujo adiabático. Para deducir esta ecuación partiremos otra vez de la ecuación 2.3.2.

Si en esta ecuación sustituimos el valor de la velocidad por  $v$  y su densidad  $dv = G dv$  tendremos que:

$$v \, dP + \frac{v G^2 \, dv}{\alpha_c} + \frac{f}{2} \frac{G^2 v^2}{\alpha_c D} \, dL = 0 \quad 2.3.24$$

Dividiendo entre el volumen:

$$dP + \frac{G^2 \, dv}{\alpha_c} + \frac{f}{2} \frac{G^2 v}{\alpha_c D} \, dL = 0 \quad 2.3.25$$

Despejando a  $dP$ :

$$- dP = \frac{G^2 \, dv}{\alpha_c} + \frac{f}{2} \frac{G^2 v}{\alpha_c D} \, dL \quad 2.3.26$$

Factorizando  $G$  y  $\alpha_c$  en esta ecuación:

$$-dP = \frac{G^2}{\alpha_c} \left( dv + \frac{v f}{2 D} \right) \quad 2.3.27$$

y como  $v=1/\rho$  y  $dv=-d\rho/\rho^2$  entonces queda:

$$-dP = \frac{G^2}{\alpha_c} \left( -\frac{d\rho}{\rho^2} + \frac{f dL}{2 D \rho} \right) \quad 2.3.28$$

Multiplicando por  $\rho$  toda la ecuación:

$$-\rho dP = \frac{G^2}{\alpha_c} \left( -\frac{d}{\rho} + \frac{f}{2 D} dL \right) \quad 2.3.29$$

Integrando la primera parte de la ecuación, teniendo en cuenta que  $P v^\eta = K$ , entonces:

$$\int_{P_1}^{P_2} \rho dP = \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{v}$$

Multiplicando por  $P^{1/\eta}/P^{1/\eta}$  tendremos:

$$-\int_{P_1}^{P_2} \frac{P^{1/\eta}}{P^{1/\eta} v} dP = \int_{P_1}^{P_2} \rho dP$$

pero  $P^{1/\eta} v = K^{1/\eta}$ , este término es constante y por lo tanto puede salir de la integral:

$$-\int_{P_1}^{P_2} \rho dP = -\frac{1}{P_2^{1/\eta} v_2} \int_{P_1}^{P_2} P^{1/\eta} dP$$

Efectuando la integración:

$$-\int_{P_1}^{P_2} \rho dP = -\frac{1}{P_2^{1/\eta} v_2} \left( \frac{n}{n+1} \right) \left( P_2^{\eta+1/\eta} - P_1^{\eta+1/\eta} \right)$$

Y cambiando el signo:

$$-\int_{f_1}^{f_2} \rho dP = \frac{1}{V_2} \left( \frac{\eta}{\eta+1} \right) \left( \frac{P_1^{\eta+1/\eta} - P_2^{\eta+1/\eta}}{P_2^{1/\eta}} \right) \quad 2.3.30$$

Integrando ahora la segunda parte de la ecuación 2.3.29:

$$\frac{G^2}{g_c} \left[ \int_{f_1}^{f_2} \frac{f}{2D} dL - \int_{\rho_1}^{\rho_2} \frac{d\rho}{\rho} \right] = \frac{G^2}{g_c} \left( \frac{fL}{2D} - \ln \rho_2 / \rho_1 \right)$$

El término del  $\ln \rho_2 / \rho_1$  si lo multiplicamos por  $P_1^{1/\eta} P_2^{1/\eta} / P_1^{1/\eta} P_2^{1/\eta}$  y se eliminan los términos constantes queda entonces; coro:

$\ln (P_2/P_1)^{1/\eta}$ , y la ecuación quedará entonces como:

$$\frac{G^2}{g_c} \left( \frac{fL}{2D} - \ln (P_2/P_1)^{1/\eta} \right) \quad 2.3.31$$

Si cambiamos 2.3.30 y 2.3.31 tendremos:

$$\frac{1}{V_2} \left( \frac{\eta}{\eta+1} \right) \left( \frac{P_1^{\eta+1/\eta} - P_2^{\eta+1/\eta}}{P_2^{1/\eta}} \right) = \frac{G^2}{g_c} \left( \frac{fL}{2D} - \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\eta} \right) \quad 2.3.32$$

Y despejando el valor de  $P_1$ :

$$P_1 = \left( \frac{G^2}{g_c \rho_2} \frac{\eta}{\eta+1} P_2^{1/\eta} \left( \frac{fL}{2D} - \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\eta} \right) + P_2^{\eta+1/\eta} \right)^{\eta/\eta+1} \quad 2.3.32$$

Que es la ecuación adiabática, que también nos puede proporcionar el valor de la presión inicial en función de las condiciones finales. Henry Y. Mak (18) propone una nueva ecuación para obtener estimaciones más rápidas.

Parte de la definición del número de Mach que es:

$$M_1 = 1.336 \cdot 10^{-5} (W/PA^2) * (ZT/PM)^{1/2} \quad 2.3.33$$

La ecuación isotérmica basada en las condiciones de entrada es:

$$\frac{f L}{D} = (1/M_1^2) (1 - (P_2/P_1)^2) - \ln (P_1/P_2)^2 \quad 2.3.34$$

o si es considerada a las condiciones finales en donde nos es más útil:

$$\frac{f L}{D} = (1/M_2^2) (1 - (P_2/P_1)^2) - \ln (P_1/P_2)^2 \quad 2.3.35$$

Para comparar estas cinco ecuaciones:

Ecuación de fluidos incompresibles(DARCY)... 2.2.11 (40)

Ecuación de MISSEN 2.3.5 (17)

Ecuacion de CONISON 2.3.23 ( 3)

Ecuación de flujo adiabático 2.3.32 (40)

Ecuación de MAK 2.3.35 (18)

Se ha implementado un programa de computadora llamado 'ECUACIONES' en el que se modifican las condiciones finales y se calculan las presiones iniciales para cada una de estas ecuaciones.

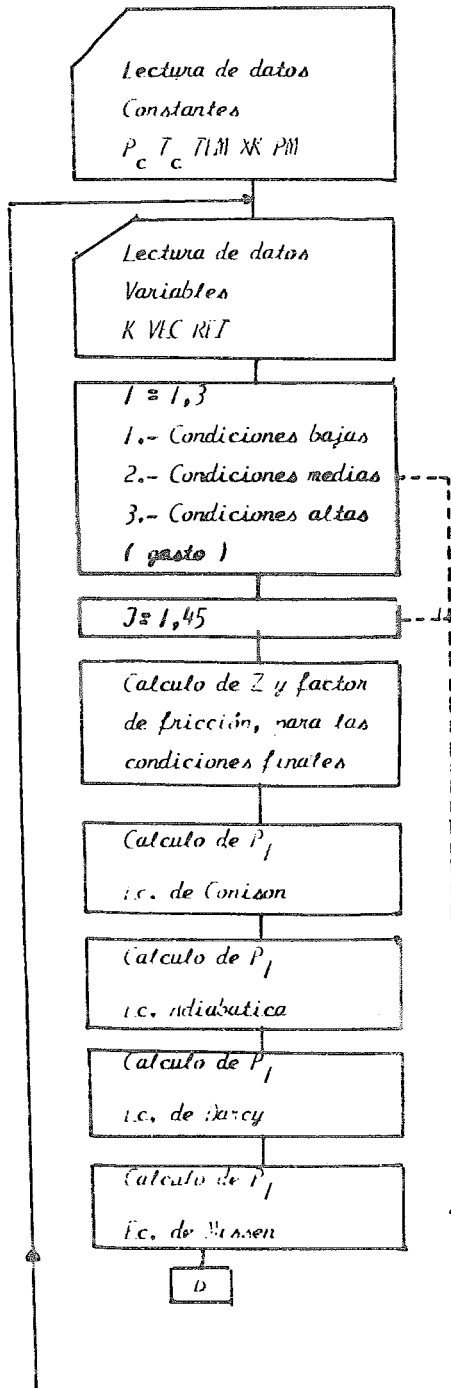
El diagrama de flujo se presenta en la figura 2.3.1

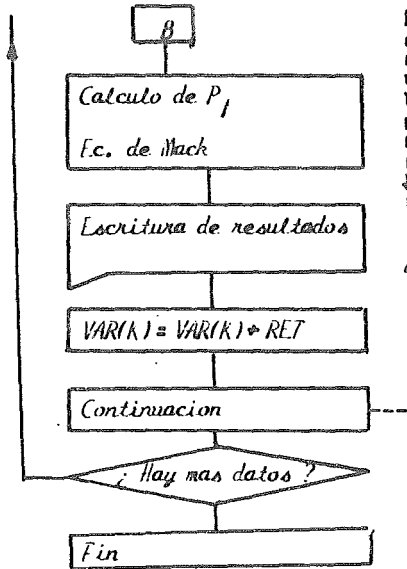
Es necesario alimentarle al programa los siguientes datos:



FIG. 2.3.1

( A )





1.- Tarjeta ( formato libre, separado por comas)

Pc      presión crítica del gas en  
Tc      Temperatura críticas del gas en  
Tem     Temperatura del gas en °F  
XK      Coeficiente adiabático.  
PM      Peso molecular del gas

Tarjeta 2

Nom     Nombre del gas (alfanumérico)

Tarjeta 3 (formato libre)

K        condicion que se va a cambiar, una de las siguientes  
         cuatro:

Var (1)    presión inicial en PSIA

Var(2)    viscosidad en centipoises

Var(3)    longitud de la linea en pies

Var(4)    diámetro de la linea en pulgadas

RET        Cambio de la variable que se eligió para cambiar.

La tercera tarjeta se puede repetir cuantas veces se desee y en cada caso se incrementará 45 veces la variable que se haya elegido, permaneciendo constantes las otras tres.

Un listado del programa se presenta en el anexo I y a la vez se muestran tambien algunos de los resultados obtenidos por la computadora, de los cuales se han seleccionado los mas significativos:

### 2.3.1 Conclusiones sobre las ecuaciones.

De los resultados obtenidos, que en general son los valores mas bajos los que proporcionan la ecuación de Missen (17). la ecuación Conison (3) da los siguientes resultados ligeramente mas altos que los de Missen pero la diferencia entre las dos no es notable.

La ecuación de flujo adiabático da resultados mas altos que las dos anteriores cuando el coeficiente  $\eta$  es mayor que 1. Aunque la diferencia no es muy sensible y da valores ligeramente abajo de la ecuación de Conison; para flujo isotérmico esto es:  $\eta = 1$ , por lo tanto esta ecuación es recomendable debido a que prevee cambios que las otras no consideran.

La ecuación de Darcy da muy buenos resultados cuando las caídas de presión no son fuertes y presenta la ventaja de que no necesita iteraciones en su cálculo, sino que este es directo, pero para caídas fuertes de presión los valores que proporciona estan fuera de la realidad ( nota: para caídas fuertes de presión tiende a corregirse si la densidad es alta).

La ecuación de Mak está fuera de la realidad para condiciones medias y altas de caída de presión, pues por lo general da valores muy elevados y además tampoco presenta facilidad de cálculo.

En conclusión se recomienda la ecuación adiabática para estos casos, aunque las ecuaciones de Missen y Conison dan buenos resultados tambien.

### 4.- Velocidad Sónica

Existe una limitación física en la velocidad de un fluido en una línea de tubería y esta es, que no es posible rebasar la veloci-

dad del sonido en el gas a las condiciones de presión y temperatura dadas. Si aumentamos la diferencia de presiones el gasto será el mismo.

La velocidad sónica de un gas está definida como:

$$V_s = \sqrt{k \rho_c Z R T / PM} \quad 2.4.1$$

Si en una línea por la que fluye gas a condiciones no sónicas disminuimos el diámetro, aumentará la velocidad. Si se sigue disminuyendo el diámetro la velocidad seguirá aumentando hasta que se alcance la velocidad sónica y si disminuimos aun más el diámetro encontraremos que la velocidad será la misma, y por lo tanto el gasto másico se verá reducido.

Cuando se diseña una línea es necesario evitar caer en el flujo sónico ya que este nos traerá problemas de ruido y vibraciones en la tubería, aunque el flujo sónico nos proporcionará la máxima capacidad de la línea.

Para encontrar la presión crítica en la cual una línea alcanza el flujo sónico se utiliza la ecuación de Crocker(2):

$$P_t = W/D^2 \frac{(R T (k(k+1)))^{1/2}}{11400} \quad 2.4.2$$

En este caso el gasto máximo de una línea estará dado por:

$$W = \frac{P_t D^2 11400}{(RT/(k(k+1)))^{1/2}} \quad 2.4.3.$$

El mínimo diámetro que puede tener una línea o diámetro sónico será:

$$D_s = \left[ \frac{W}{P_t} \frac{(R T / (k(k+1)))^{1/2}}{11400} \right]^{1/2} \quad 2.4.4$$

5.- Temperatura de salida de una valvula

Cuando un gas se expande a condiciones adiabáticas este aumentará su energía cinética en base unicamente a su energía interna trayendo esto una disminución en su temperatura. Este proceso puede llevarse a cabo de tres maneras:

- a.- Isoentálpicamente
- b.- Isoentrópicamente
- c.- Politrópicamente

Si el proceso se lleva a cabo isoentálpicamente, el cambio de la temperatura con respecto a la presión estará dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial P} = \mu \quad 2.5.1$$

Al coeficiente  $\mu$  se le llama coeficiente Joule Thomson y si consideramos las derivadas como incrementos finitos entonces la temperatura final después de una expansión estará dada por:

$$T_2 = T_1 - \mu (P_1 - P_2) \quad 2.5.2$$

Si el proceso es isoentrópico se cumplirá la relación  $P_1 V_1^{\mu} = P_2 V_2^{\mu}$  y el cambio de la temperatura después de la expansión estará dada por:

$$T_2 = T_1 (P_2 / P_1)^{\mu+1/\mu} \quad 2.5.3.$$

En donde  $\gamma$  es el coeficiente isoentrópico.

El proceso realmente se puede considerar como un proceso adiabático politrópico que se encuentra entre los dos anteriores, pero realmente es muy difícil evaluar exactamente a cual de los dos se acerca más.

El proceso isoentrópico resulta en temperaturas finales mucho más bajas que el proceso isoentálpico y la diferencia entre las dos puede ser considerable, sobre todo cuando las expansiones son fuertes, como normalmente sucede en el desfogue de estas válvulas.

La tendencia anterior era, considerar que el proceso era isoentálpico, pero en la actualidad parece inclinarse más hacia el isoentrópico. Ya Edmister (52) en su deducción del cálculo del orificio de una válvula propone un proceso isoentrópico aunque el API RP 520 (47) para el uso de esta misma ecuación propone el uso de un coeficiente adiabático.

Robert Kern (21) propone a su vez que el cálculo de estos orificios así como las expansiones cortas de tuberías deben ser isoentrópicas.

En el programa que se explicará posteriormente se consideran ambos casos, isoentrópica e isoentálpica y se dejan como opciones.

#### 6.- CÁLCULO DE UN SISTEMA DE DESFOGUE.

El cálculo de un sistema de desfogue no puede ser hecho con gran exactitud debido a que es difícil conocer todas las variables que intervienen como son: gastos, presiones, propiedades físicas, etc., estas solo pueden ser estimadas de una manera aproximada

tratando de acercarse lo mas posible a la realidad.

Si el sistema es subdiseñado, es decir, que el dimensionamiento de las tuberias sea menor que el requerido, las contrapresiones ejercidas sobre las válvulas estarán por arriba de lo permitido (máxima contrapresion permisible) y el gasto que podrán relevar no será el maximo ya que no se podrá lograr un flujo sonico en estas, o si el caso es aun mas critico puede su ceder que las valvulas ni siquiera puedan abrir causando daños considerables al equipo que protegen, por lo tanto es necesario tratar de evitar sobrepasar este límite.

Por el contrario si nos encontramos demasiado excedidos en el cálculo de estos sistemas, o sea que el sobrediseño sea excesivo estaremos causando un gasto innecesario y si consideramos que en general los diámetros que se utilizan en estos cabezales son grandes, el costo puede ser considerable, además de los problemas para poder acomodar en los racks de tuberia a secciones de tal magnitud.

Es la maxima contrapresion permitida por lo tanto un limite que no debemos rebasar pero debemos tratar de estar lo mas cercano posible.

Es necesario hacer algunas consideraciones para poder efectuar el calculo de estos sistemas:

- a) El régimen de flujo es permanente, es decir que el gas fluyendo ha alcanzado este estado y por lo tanto no es función del tiempo.



- b) Todas las válvulas de desfogue por una misma causa abren al mismo tiempo.
- c) Las válvulas han sido diseñadas con anterioridad quedando con esto fijo la máxima contrapresión permitida así como los gastos y composiciones, la temperatura de relevo y las propiedades físicas del gas que fluirá por cada una de las tuberías.
- d) Solamente se produce una falla a la vez o si por la situación se ve que existe la posibilidad de que se den varias fallas estas se juntarán en un solo caso.
- e) La presión al final del cabezal principal, ya sea en el tanque (knockout) o en el quemador se encuentra fija.
- f) Se conoce ya la configuración geométrica del sistema así como las longitudes y accesorios para cada tramo.

Consideraremos un tramo como una sección simple de tubería, únicamente con sus posibles accesorios.

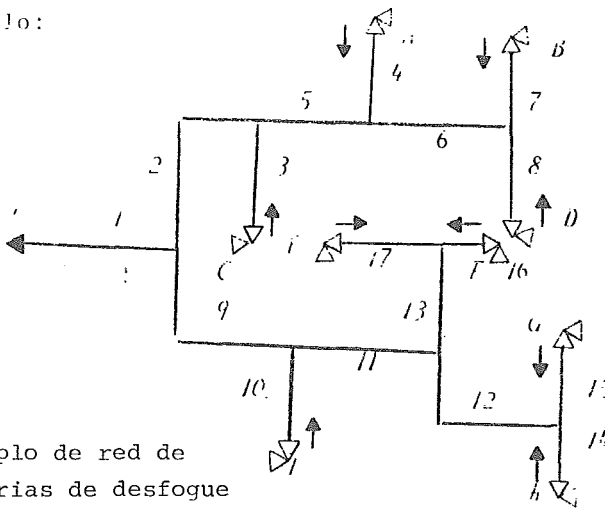
Una unión será la llegada de dos o más tramos a un punto determinado. Es necesario determinar el orden de cálculo o secuencia que se seguirá para el cálculo de estos sistemas, esto se hará de la manera siguiente;

Se empezará a calcular siempre por el último tramo o cabezal principal, el cálculo se hará de adelante hacia atrás, se seleccionará a continuación uno de los tramos que llegan a la unión de este tramo principal, si corresponde a la salida directa de una válvula, se considerará inmediatamente y se seguirá con los otros tramos con los que se seguirá un procedimiento similar hasta que a la unión de uno de estos solo lleguen tramos correspon-

dientes a valvulas en este caso se habrá llegado al final del sistema de desfoque.

Ejemplo:

Fig. 2.3



Ejemplo de red de tuberías de desfoque

La orden de cálculo es este caso puede ser:

1,9,10,11,13,17,16,12,15,14,2,3,5,4,6,7,8

Esto quiere decir que calcularemos primero el sistema 1 proceguiremos con el 9, después del 10 y así sucesivamente.

En este ejemplo le hemos puesto letras para denominar a las valvulas de la A a la I. Ahora es necesario conocer las valvulas que desfojan a cada sistema de la manera:

VALVULA	DESFOGA A LOS SISTEMAS
A	4,5,2,1
B	7,6,5,2,1
C	3,2,1
D	8,6,5,2,1
E	17,13,11,9,1
F	16,13,11,9,1
G	15,12,11,9,1
H	14,12,11,9,1
I	10,9,1

De esta forma se conocen los gastos que desfogan a cada sistema y partiendo del sistema uno, y siguiendo la orden de cálculo, es posible establecer la contrapresión de cada sistema utilizando alguna de las ecuaciones vistas en la sección 3 de este capítulo. El dimensionamiento se hará partiendo del diámetro sónico dado por la ecuación de Crocker (2) para el sistema uno, en el caso de que la presión que resulte sea mayor que la máxima contrapresión permitida en la válvula más crítica de este sistema, se aumentará el diámetro al siguiente comercial. A continuación se pasará al siguiente sistema en la orden de cálculo, usando como presión final la contrapresión del sistema uno y nuevamente se comparará la contrapresión obtenida con las máximas contrapresiones permitidas de las válvulas asociadas, aumentando el diámetro si es necesario y partiendo también del diámetro sónico. Se continuará calculando según la orden de cálculo, usando como presión final de cada sistema la contrapresión del sistema del cual depende o desfoga este. Cuando se llegue a una válvula la comparación se hará contra su máxima contrapresión permitida.

Para evitar que un sistema tenga un diámetro mayor que aquel al cual desfoga, se usará este último como limitante para el aumento del diámetro del sistema en cuestión y en el caso de que se alcance esta limitante se aumentará el diámetro del sistema al que desfoga.

#### 7.- Programa de Computadora.

Para evitar la gran cantidad de cálculos e iteraciones que es necesario hacer en el dimensionamiento de los sistemas de relevo de

presion, se ha implementado un programa de computadora, llamado "desfogue", en lenguaje Fortran el cual fue corrido en una computadora Univac 1106 y se presenta un listado en el anexo 11.

El programa consta de 477 instrucciones , además de 4 subrutinas que efectúan lo siguiente:

- a.- Sonic    Calcula el diametro sonico y selecciona un diametro comercial
- b.- Contp    Calcula las contrapresiones para un sistema dado.
- c.- Tval     Calcula la temperatura de salida de las valvulas ya sea isoentálpicamente o isoentrópicamente.
- d.- Propme   Calcula las propiedades medias en un sistema.

El programa puede calcular a partir de los datos de configuración del sistema y los datos de las valvulas a desfogar en cada falla,, la orden de calculo y proporcionará los diametros seleccionados junto con su contrapresion calculada indicando si el sistema corresponde a una valvula.

Los datos requeridos por el programa son:

Tarjeta 1

Letreros de comentarios

Tarjeta 2 (formato de NAMELIST con nombre Opcion)

Lopc        Si tiene un valor de 2 se calculará la expansion de las valvulas como isoentálpicamente en caso contrario se considerará isoentrópicamente.

P fija     Presion a la salida del sistema uno. Psia

P atm      Presion atmosferica. Psia

Toler      Maxima tolerancia de error en las temperaturas de salida de las valvulas.

X dim      Si tiene un valor de 2 no se dimensionará al sistema si-

no que solo se calcularaan las contrapresiones.

Tarjeta 3	COLUMNA
Numero del sistema	1 a 3
Valvula(2) o sistema(1)	5
Sistema al que desfoga	7 a 9
Longitud recta de tuberia. ft	12 a 19
Diámetro interno. in (opcional)	21 a 28

Tarjeta 4

Letrero que diga " Fin de configuración"

Tarjeta 5

Letrero con el nombre de la falla

Tarjeta 6 (separados por comas)

Numero del sistema que es la valvula

Temperatura de relevo. °R

Presion de relevo. Psia

Diámetro del orificio de la valvula. in

Maxima contrapresion permisible. Psia ( opcional)

Capacidad calorífica del gas(promedio) Btu-hr/lb mol °F

Coeficiente adiabático del gas(promedio) Cp/Cv

Viscosidad del gas(promedio),centipoises.

Factor de compresibilidad del gas (promedio)

Peso molecular del gas (promedio)

Tarjeta 7

Letrero que diga "Fin de falla"

Se deben poner tantas tarjetas como sistemas se tengan en la red poniendo una tarjeta 4.

Se deben poner tantas tarjetas 6 como válvulas se tengan en cada falla poniendo una tarjeta 5 y una tarjeta 7 por cada falla que se tenga. La caída de presión en las tuberías se considera como isotérmica.

8.- Ejemplo de cálculo.

Para mostrar el uso del programa de computadora "desfogue" se efectuará el dimensionamiento de una red sencilla de tubería de la forma:

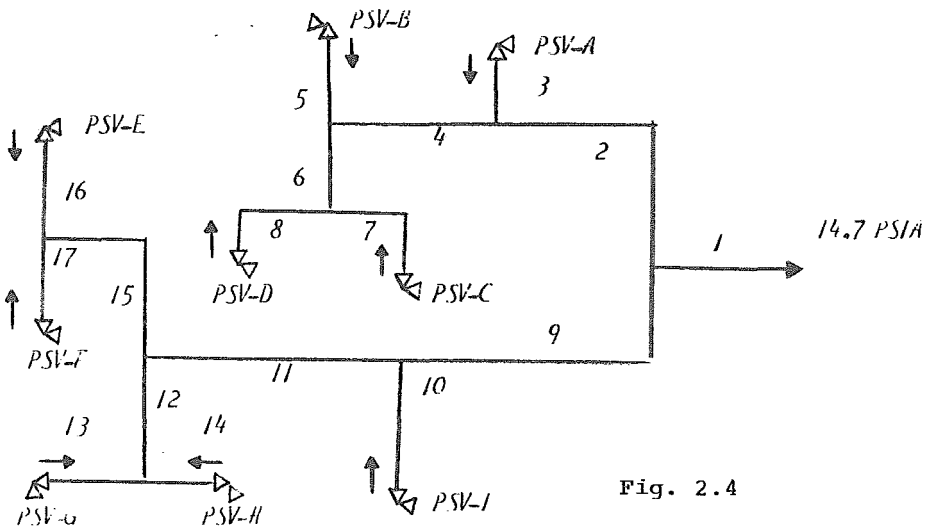


Fig. 2.4

Ejemplo de cálculo en una red de desfogue

Esta red tiene 17 sistemas que tienen las siguientes características:

Sistema	Clase	Longitud(ft)	Sistema al que desfoga
1	Sistema	300	0
2	Sistema	200	1
3	Válvula	125	2
4	Sistema	100	2
5	Válvula	130	4
6	Sistema	135	4
7	Valvula	110	6
8	Válvula	190	6
9	Sistema	98	1
10	Válvula	17	9
11	Sistema	45	9
12	Sistema	72	11
13	Válvula	33	12
14	Válvula	11	12
15	Sistema	45	11
16	Válvula	79	15
17	Válvula	91	15

Para la falla en cuestión se tienen 9 válvulas con las siguientes condiciones de relevo:

Valvula	Sist.Num.	Gasto(lb/hr)	Pres.de relevo(psia)	Tem.Rel. Max.	Cont.
A	3	20 000	90	250 <sup>o</sup> F	25
B	5	18 000	85	260	23
C	8	12 000	94	260	28
D	7	15 000	98	280	29
E	16	16 000	93	220	27

F	17	21 000	100	250	30
G	13	27 000	84	260	25
H	14	18 000	89	230	26
I	10	17 000	89	220	26

La presión al final del sistema uno es de 14.7 psia.

Las propiedades medias a las condiciones de relevo de los gases son, para la falla de prueba:

Valvula	Cap.Cal. (btu-hr/mol <sup>0</sup> F)	Viscosidad Cp	Factor de Compres.	Peso Mol.
A	0.8	0.01	1.0	29
B	0.9	0.02	1.0	28
C	0.8	0.015	1.0	23
D	0.7	0.018	1.0	24
E	0.6	0.018	1.0	25
F	0.5	0.02	1.0	18
G	0.7	0.019	1.0	19
H	0.9	0.016	1.0	24
I	0.8	0.011	1.0	22

Los resultados se muestran al final del anexo II en la forma en que los proporciona el programa.

La figura V-A del anexo V nos muestra estos resultados sobre la red antes presentada, en las que se puede ver las contrapresiones para cada sistema.



## Indice de Variables

A	Sección transversal de la tubería
a	Aceleración
D	Diámetro
dz	Diferencia de alturas
f	Factor de fricción
F	Fuerza
G	Masa velocidad
$g_c$	Aceleración de la gravedad
$h_L$	Pérdidas por fricción
k	$C_p/C_v$ coeficiente adiabático
M	Número de Mach
L	Longitud
l	Longitud
P	Presión
PM	Peso molecular
$P_c$	Presión crítica
$P_t$	Presión terminal o sónica
R	Constante de los gases
$Pe$	Número de Reynolds
T	Temperatura
$T_c$	Temperatura Crítica
t	Tiempo
$V_s$	Velocidad sónica
V	Velocidad
W	Gasto másico
Z	Factor de Compresibilidad

- $\rho$  Densidad
- $m$  Coeficiente Isoentrópico
- $\epsilon$  Rugosidad de la tubería
- $\eta$  Viscosidad



### C A P I T U L O   I I I

"Descripción general de un transiente de presión y gasto y  
la deducción de sus ecuaciones básicas"



1.- OBJETIVO.

El objetivo del presente capítulo es definir lo que es un transiente, las formas en que se plantean las ecuaciones básicas, así como su utilidad práctica; la solución de las ecuaciones será analizada en capítulos subsiguientes.

2.- Definición.

El transiente es un estado transitorio o de cambio, para poder entender mejor este concepto, es necesario hablar primero de un estado en el que no existe cambio, esto es el estado estable ó continuo.

Para efecto de lo anterior vamos a considerar una pequeña sección de tubería de longitud  $\Delta L$ , como es la siguiente figura:

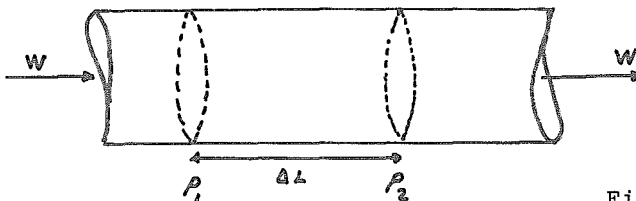


Fig. 3.1

Para considerar un estado estable ó continuo es necesario una condición fundamental, que el gasto másico  $W$  en un punto  $P1$ , debe ser igual al gasto másico en el punto  $P2$ , es decir, que la acumulación de la sección de tubería es cero .

Esta condición también debe cumplirse para intervalos de tiempo pequeños ó sea que  $\Delta T \rightarrow 0$ . La importancia de marcar lo anterior, es que podría presen

tarse una confusión con un transiente en estado estable, ya que durante intervalos de tiempo mayor, el estado transitorio puede provocar primero una acumulación y posteriormente una desacumulación, teniendo en el resultado final de este termino de tiempo una acumulación nula, el cual se puede describir de la siguiente manera:

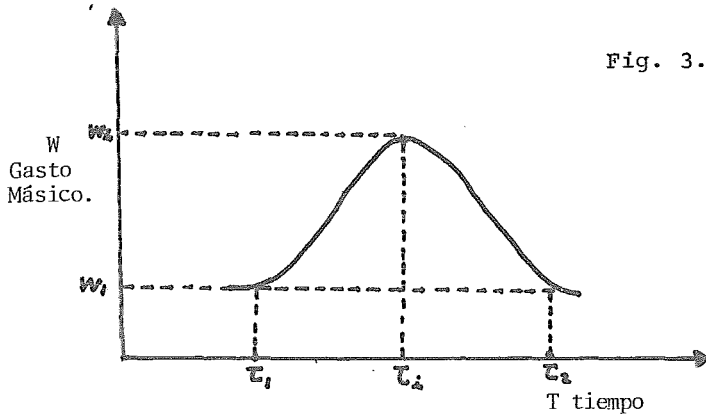


Fig. 3.2

Donde el intervalo de tiempo total será igual a la diferencia  $T_2 - T_1$ . en cuyo termino el gasto másico es el mismo, pero siendo  $T_2 - T_1$  el tiempo en el que se presenta el estado transitorio, observamos que el gasto másico efectivamente es diferente, aún cuando el efecto total nos indique un estado estable.

Otra diferencia que se observa en estos sistemas, es que en estado estable los parametros como presión, temperatura, densidad, son funciones únicamente de la posición en la línea, es decir, que podemos tener N valores de presión, temperatura, densidad y un gasto másico para describir una línea. En caso de un transiente también estas variables dependen del tiempo, así tendremos  $N \times M$  valores de presión, temperatura, densidad y gasto másico.

El transiente puede presentarse para cualquier tipo de fluido, tanto compresible

sible como incompresible, aunque en este último la densidad no será una función del tiempo. También es posible tener un transiente para un fluido multifásico, pero en este caso las ecuaciones se complicarían aún más, ya que para estos casos solo se tienen correlaciones especiales para casos de estado estable.

Este estudio se va a limitar al transiente de fluidos compresibles, aunque los fluidos incompresibles se tratarían de una manera similar, únicamente con la salvedad de que es necesario introducir una ecuación de estado para determinar la densidad, también es necesario el analizar la posibilidad de que se presente un golpe de ariete.

Existen tres maneras de presentar un transiente en un sistema de transporte de gas, y estos son:

- 1.- El transiente es generado en la carga, o sea que la entrada al sistema varía con este sistema y el transiente se propaga a través del sistema.
  - 2.- Si un equipo de compresión, opera con flujo que varió ó una variación de potencia con el tiempo. Esto genera un transiente que se propaga en ambas direcciones del punto de generación.
  - 3.- Cambiando la configuración de la trayectoria de una red de tuberías se provoca también un transiente que se propaga en el sistema.
- 3.- Ecuaciones básicas.

El modelo matemático del que se parte, para interpretar el transiente se plantea con la siguiente definición:

Una sección de tubería se puede definir como un tubo de diámetro constante que tiene solamente una entrada y una salida.

Todas las tuberías que transportan gas son redes de secciones simples de tu



bería unidas através de varios elementos, como son compresores, codos, válvulas, etc.

Las tres ecuaciones básicas de conservación que se pueden aplicar a la tubería son:

- a. - Conservación de Masa.
- b. - Conservación de Momento.
- c. - Conservación de Energía.

No es necesaria la aplicación simultánea de las dos últimas, ya que más adelante se demuestra la simplificación usando conservación de momento.

Si el gas dentro de la tubería está definido como un sistema termodinámico entonces el sistema puede intercambiar masa y momento con el universo en solo dos puntos, en la entrada y en la salida de la tubería.

El sistema puede intercambiar energía en cualquier punto a lo largo de la sección de tubería y después a los alrededores. Para esto es necesario evaluar los coeficientes de transferencia de calor del gas a las paredes de la tubería y también a los alrededores; para lo anterior se requiere conocer los coeficientes de transferencia de calor de la tubería, las características predominantes de los alrededores y la temperatura del medio que rodea la sección de tubería. Condiciones en las cuales nos ponen en una situación de aproximación de los valores reales, con un considerable margen de desviación.

Por esta razón solo se obtendrá con el propósito del análisis, un perfil de temperaturas de una forma aproximada.

### 3.1. - Conservación de Masa.

La ecuación de continuidad establece que el flujo másico neto que fluye hacia el exterior de un volumen es igual a la velocidad con que decrece ó au

menta la masa dentro el volumen.

Para una tubería de sección constante, la expresión matemática de la ecuación de continuidad es:

$$\frac{d\rho v}{dx} = - \frac{d\rho}{dt} \quad \dots 3.1.1.$$

Si como se muestra en la siguiente figura, una sección de tubería, se asume que el gas solo fluye através de las áreas marcadas como A1 y A2. El cambio de la masa por unidad de tiempo ( $\Delta T$ ) que ocurre en el volumen encerrado entre A1 y A2 y las paredes de la tubería, es la suma de la masa que entra y que sale de la tubería, se puede anotar:



Fig. 3.3

$$\Delta m = \Delta t \iint (\rho v) dA \quad \dots 3.1.2.$$

(Entradas y Salidas)

Otra expresión para el cambio de la masa por unidad de tiempo es:

$$\Delta m = -\Delta t \iiint \frac{d\rho}{dt} dv \quad \dots 3.1.3.$$

(Tubería, Secc., Vol..)

Igualando ambas expresiones obtendremos lo siguiente:

$$\iint \rho v dA = - \iiint \frac{d\rho}{dt} dv \quad \dots 3.1.4.$$

Y por el teorema de divergencia:

$$\iiint \left( \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dv = 0 \quad \dots 3.1.5.$$

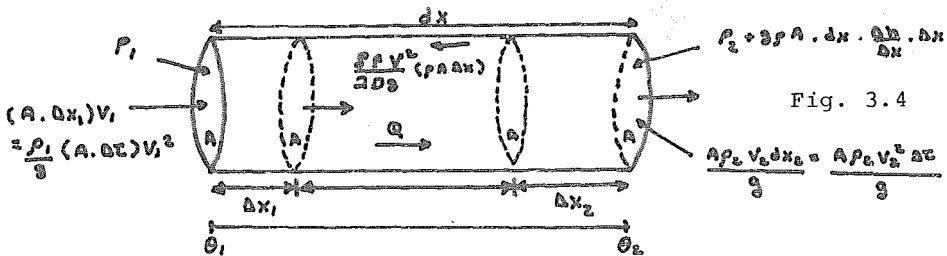
Si consideramos que el volumen V es arbitrario, y la integración de la relación 3.1.5 es continua:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \dots 3.1.6.$$

Que es la ecuación básica que vamos a aplicar:

### 3.2.- Conservación de Momento.

Para el propósito de esta derivación vamos a considerar un volumen, que se encuentra dentro de una sección de tubería de longitud dx y área transversal igual a A como se muestra en la siguiente figura:



Vamos a enfocar nuestra atención en un balance de fuerzas, dentro del volumen mencionado, la fuerza neta que actúa sobre el gas dentro de este volumen, es la suma de las fuerzas debidas al gradiente de presión del gas, con las paredes de la tubería, y las fuerzas debidas a la elevación.

Considerando la dirección positiva de las fuerzas aplicadas al gas en la dirección positiva de dx.

Las cantidades se pueden definir de la siguiente manera:

$$\frac{P_1 + P_2}{2} = P \qquad \Delta P = P_2 - P_1 \quad \dots 3.2.1.$$

$$\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \rho \qquad \theta = \theta_2 - \theta_1$$

$$\frac{V_1 + V_2}{2} = V \qquad \Delta V = V_2 - V_1$$

$$\frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{2} = \rho V \qquad \Delta \rho V = \rho_2 V_2 - \rho_1 V_1$$

$$\Delta X_1 = V_1 \Delta t \qquad \Delta X_2 = V_2 \Delta t$$

$$\Delta h = h_2 - h_1$$

Las fuerzas debidas a la fricción pueden ser obtenidas de la expresión de pérdida energía por fricción por unidad de masa y por unidad de longitud, (ecuación de Darcy).

$$E_f = \frac{f v^2}{2Dg} \quad \dots 3.2.2.$$

La masa que se encuentra dentro de este volumen es  $(A \cdot dx) \rho$ . En donde  $A \cdot dx$  sería el volumen; entonces las pérdidas por fricción del gas a través de la longitud se pueden expresar como:

$$\frac{f v^2}{2 D g} (\rho \cdot (A \cdot dx)) dx \quad \dots 3.2.3.$$

Notese que estamos obteniendo el producto de las pérdidas debidas a la fricción por unidad masa y por unidad de longitud por la masa contenida dentro de este volumen y por la longitud total.

La energía perdida debido a la fricción durante el desplazamiento también --

puede escribirse como:

$$- F_f \cdot dx \quad \dots 3.2.4.$$

Donde el signo resulta de la dirección negativa de  $F_f$ , por lo que entonces:

$$-F_f \cdot dx = \frac{f v^2}{2 D} (A \cdot dx) \cdot dx \quad \dots 3.2.5.$$

Rearreglando ésto:

$$F_f = - \frac{f v^2}{a D g} (A \cdot dx) \quad \dots 3.2.6.$$

Las fuerzas debidas al gradiente de presión  $F_p$  son:

$$F_p = - \frac{dp}{dx} (A \cdot dx) \quad \dots 3.2.7.$$

Si  $dp/dx$  es una cantidad negativa, esta fuerza es positiva.

Las fuerzas debidas a la elevación se conocen como cabeza estática y pueden escribirse como:

$$F_g = - (PA \cdot dx) dh/dx \quad \dots 3.2.8.$$

Si  $dh/dx$  es negativa  $F_g$  es positiva.

La fuerza debida a la velocidad de cambio de momento dentro del volumen es:

$$F_m = \frac{A \cdot dx}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad \dots 3.2.9.$$

Considerando ahora la adición de momento al volumen, por la cantidad de gas que se adiciona a la entrada de area  $A_1$ , el cual es en el incremento de tiempo  $\Delta t$ . El cambio en el momento total dentro del volumen es:

$$\rho / g (A \cdot \Delta x) V \quad \dots 3.2.10.$$

La velocidad promedio del gas entrante puede ser representada por:

$$V = \Delta x' / \Delta T$$

Entonces  $\Delta x' = V \Delta t$  del cual el cambio de momento del gas debido al gas entrante queda como:

$$\rho (A \cdot \Delta t) V^2 / g \quad \dots 3.2.11.$$

El cambio de momento del gas debido al gas que sale es similar:

$$(A \cdot \Delta t) V^2 / g + \frac{\partial}{\partial x} (\rho (A \cdot \Delta t) V^2 / g) dx \quad \dots 3.2.12.$$

Así el cambio neto de momento debido al movimiento del gas es:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho (A \cdot \Delta t) V^2 / g) dx \quad \dots 3.2.13.$$

Si A y  $\Delta t$  son independientes de x podemos reorganizar lo anterior a la forma:

$$(1/g) \left( \frac{\partial}{\partial x} (\rho V^2) \right) (A \cdot dx) \Delta t \quad \dots 3.2.14.$$

Si  $F_m$  es el cambio neto de momento en el tiempo  $\Delta T$  entonces:

$$F_m = 1/g \frac{\partial \rho V^2}{\partial x} (A \cdot dx) \quad \dots 3.2.15.$$

Las fuerzas aplicadas al gas deben ser igual por lo tanto a las fuerzas de energía cinética del gas y tenemos:

$$\begin{aligned} & \frac{-f V^2}{2Dg} \rho (A \cdot dx) - \frac{\partial P}{\partial x} (A \cdot dx) - \rho (A \cdot dx) \frac{\partial h}{\partial x} \\ & = \frac{1}{g} \frac{\partial \rho V}{\partial t} (A \cdot dx) + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} (\rho V^2) (A \cdot dx) \quad \dots 3.2.16. \end{aligned}$$

Rearreglando elementos llegamos a la siguiente relación:

$$g \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v^2)}{\partial x} + \frac{g \partial h}{\partial x} + \frac{f \rho v^2}{2 D} = \eta \quad \dots 3.2.17.$$

Que es la ecuación de conservación de momento para la sección de tubería.

### 3.3.- Ecuación de Estado.

En las dos ecuaciones anteriores obtenidas, teníamos dos variables independientes, posición y tiempo, y tres variables dependientes, presión, densidad y velocidad. Para determinar una solución es necesario, una tercera ecuación, esta es la ecuación de estado.

En este caso utilizaremos la ecuación del gas ideal modificada a través del factor de compresibilidad(21) .

$$P = \frac{\rho Z R \theta}{144 M} \quad \dots 3.3.1.$$

Una ecuación empírica que puede ser utilizada para obtener el factor de compresibilidad de una forma aceptablemente aproximada es la siguiente:

$$Z = 1 + (0.257 - 0.533 \frac{\theta_c}{\theta}) P/P_c \quad \dots 3.3.2.$$

En donde el subíndice C indica las propiedades de temperatura y presión críticas.

### 3.4.- Incorporación del Perfil de Temperaturas dentro de la Ecuación de Momento.

En algunos casos podemos sustituir en la ecuación de momento el valor de presión que nos da la ecuación de estado.

$$\rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \rho R/M \left( \rho z \frac{\partial \theta}{\partial x} + \theta \frac{\partial \rho z}{\partial x} \right) + \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial x} + f \rho v^2 / 2D = 0 \quad \dots 3.4.1.$$

Con la ecuación de continuidad y la anterior relación podríamos obtener una sola igualdad que sería una derivada parcial de segundo orden, esto nos llevaría a un modelo matemático más complejo, por lo que las dos relaciones son tratadas separadamente has encontrar la solución.

### 3.5.- Condiciones a la Frontera y Condiciones Iniciales.

El especificar las condiciones iniciales del gas, ya sea, por sus propiedades como; densidad, presión, masa velocidad ó volumen, nos proporcionara un punto de inicio, para una integración numerica. La forma de introducir estas variables, es obtener los valores en los distintos puntos a lo largo de la tubería y de esta manera si algún error es introducido en alguna de las condiciones iniciales este debe ser gradualmente eliminado por la integración numerica. Es recomendable partir de configuración de estado estable a lo largo de la sección.

De acuerdo a las ecuaciones diferenciales que se tienen, es necesario especificar dos condiciones a la frontera, si se quiere tener una solución unica y estable. Las posibles condiciones en este problema son:

a.- Presión a la entrada.



- b.- Velocidad a la entrada.
- c.- Masa por unidad de tiempo a la entrada.
- d.- Presión a la salida.
- e.- Velocidad a la salida.
- f.- Masa por unidad de tiempo a la salida.

Estas variables deben de ser fijadas como una función del tiempo y cuando esto sea las otras variables restantes tendran un valor unico, además de que será posible determinar los valores de presión, gasto y velocidad en los puntos intermedios de la línea.

Desde el punto de vista matemático son posibles los valores negativos , para la densidad y para la velocidad, pero del punto de vista físico, tenemos que la velocidad es un vector y por lo tanto tiene dirección y sentido, por lo que es lógico que se consideren valores positivos y negativos, que nos indican la dirección del flujo ( negativo = sentido contrario a lo considerado inicialmente = reversible).

No sucede lo mismo con la densidad, la cual es una cantidad escalar, lo cual nos indica que no tiene sentido el hablar de densidades negativas, por lo que será necesario cuidar que la densidad sea una función de tiempo y espacio positiva.

Es también conveniente el tomar a las dos condiciones a la frontera en el mismo punto, es decir, ya sea a la salida ó la entrada pues físicamente es más facil el poder controlar esta situación, debido a alguna acción tomada anteriormente en un solo pun

to como es el abrir una válvula, en cambio el considerarlo en puntos distintos nos llevara al problema de poder obtener un -- buen control físico sobre estas variables.

#### Indice de Variables.

- A Area de la sección de tubería.
- D Diámetro de la tubería.
- f Factor de fricción.
- g Aceleración de la gravedad terrestre.
- h Altura.
- M Masa entrante ó saliente.
- P Presión del gas.
- Pc Presión crítica del gas.
- R Constante de los gases.
- t, T Tiempo.
- V Velocidad.
- W Gasto másico.
- x Distancia.
- z Factor de compresibilidad.
- Al Longitud.
- $\theta$  Temperatura
- $\theta_c$  Temperatura crítica.
- $\rho$  Densidad.





CAPITULO IV

"Calculo de una linea simple de tuberia soletida  
a un transiente de presion y gasto masico"



## 1.- Objetivo

En el capítulo 3 se desarrollaron una serie de ecuaciones básicas, que nos servirán para determinar un sistema que se encuentra en régimen permanente pero estas ecuaciones quedaron en forma de ecuaciones diferenciales parciales y por lo tanto su solución no fue dada. En este capítulo se aplicará el método utilizado por Halbert P.W. y L.A. Lotito (30) para resolver un transiente de presión y gasto para una línea de tubería, compuesta solamente por una sección sencilla de tubo, con una sola entrada y una sola salida. El método utilizado es un método explícito, es decir que si tubiéramos una red de tubería, tendríamos que calcular línea por línea, llevándose con esto un gran tiempo de cálculo aunque una pequeña capacidad de memoria.

El programa desarrollado por Halbert Y Lotito (31) se llama PIPERTRAN IV y sirve para el cálculo de redes de tubería que transportan gas. Otro programa importante que calcula una red de tubería, de una manera explícita, es el diseñado por London Station (L.P.S.), cuyo nombre es SATAN (Steady and Transients Analysis in Networks) (32), en el que se pueden obtener tanto la red en estado estable, como proporcionarle a esta una condición de estado inestable y el programa hará el análisis completo de la red.

No se dispone de estos programas, solamente se tiene un esbozo de la técnica usada en cada uno de estos y en su oportunidad se dará una breve descripción de como funcionan.

La idea, entonces, de el capítulo, es la de crear un programa

propio, con sus limitaciones, que nos pueda determinar el transiente de presión en una sección de tubería y nos pueda dar esto los primeros resultados de transiente, para poder determinar los tiempos promedio en que las tuberías que se están llenando alcanzan el estado estable y si el método empleado para el cálculo de los sistemas de desfogue, es decir a estado estable, es el correcto o si es necesario entonces hacer alguna otra consideración al calcular estos sistemas. Por lo tanto podemos decir que este programa servirá para hacer un análisis cualitativo sobre el transiente de una red de desfogue

Hay que tomar en cuenta que el método desarrollado en PIPERTRAN IV es principalmente utilizado en un transiente oscilatorio, que es aquél en que las variables de presión, gasto y temperatura cambian generalmente de una forma oscilatoria senoidal con respecto a un intervalo pequeño de tiempo (generalmente parten de un estado estable), pero en el que sin embargo, las condiciones promedio en un tiempo mayor, podemos decir que se mantienen consta<sup>n</sup>tes, pues las variables cambian con valores por arriba y abajo de estas condiciones. Por lo tanto va a ser necesario adaptar este método al tipo de transiente que podemos tener durante un desfogue a una tubería, que consiste en partir de una tubería por la que no existe flujo, es decir toda tiene la misma presion, y empezar a aplicarle una presión en uno de sus extremos y medir el tiempo en el que se obtiene el régimen permanente de este flujo, además se obtendrán una serie de gráficas para mostrar este cambio de una manera mas objetiva.

Todo esto nos llevará a poder explicar un primer modelo de transiente de presión y gasto, que nos servirá de comparación para

cuando tratemos de explicar los modelos mas complicados en los siguientes capítulos.

## 2.- Ecuaciones iniciales.

Es necesario aclarar en esta sección, que en desarrollo de este modelo no se considerará a la temperatura como una variable ni dependiente del tiempo, ni dependiente de la longitud del tubo, es decir que todo el proceso se considerará como isotérmico, pues un cambio de temperatura nos obligaría a considerar ese cambio en la densidad, y además sería necesario introducir este modelo en ecuaciones en las que estuvieran consideradas los coeficientes de transferencia de calor.

La primera ecuación propuesta es la ecuación de continuidad que fue vista con mayor detalle en su desarrollo en el capítulo 3;

$$\frac{\partial \rho v}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad 4.2.1.$$

No es necesario por lo tanto una mayor explicación con respecto a esta ecuación.

La segunda ecuación también fue desarrollada en el capítulo anterior, teniendo su forma isotérmica como:

$$g \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v^2)}{\partial x} + \rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f \rho v^2}{2 D} = 0 \quad 4.2.2.$$

Esta ecuación es el balance de energía aplicado en una sección diferencial de un tubo simple, por el que circula gas..

Vemos los términos; en la ecuación anterior, que representan a la energía cinética. Estos son:

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} \quad , \quad \frac{\partial (\rho v^2)}{\partial x} \quad 4.2.3.$$



Si los multiplicamos por el cociente A/A en donde A es el área correspondiente a la sección transversal por la que fluye el gas, la ecuación no se altera y queda como:

$$\frac{\partial(\rho V A)}{\partial t} \cdot \frac{1}{A} \quad , \quad \frac{\partial(\rho V^2 A)}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} \quad 4.2.4.$$

Si el gasto másico se puede definir como una función de la densidad, la velocidad y el área de flujo de la forma  $Q = VA\rho$  Si lo sustituimos en la ecuación anterior tendremos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \frac{1}{A} \quad , \quad \frac{\partial(QV)}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} \quad 4.2.5.$$

El cambio del gasto con respecto a la distancia y el cambio del mismo con respecto al tiempo es en la mayoría de los casos despreciable con respecto a los cambios debidos a la presión, con respecto a la distancia, por lo que numerosos autores no lo toman en cuenta, como son: Streeter (28), Stoner (28) y Lotito(30) en el desarrollo de PIPETRAN IV así que en este caso podemos considerar que:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \frac{1}{A} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} \approx 0 \quad 4.2.6.$$

En el capítulo VIII analizaremos el método propuesto por W.You (29) en el que se hace una evaluación del error cometido al hacer la consideración anterior y la forma de corregirlo, pero por lo tanto supondremos que es válida la consideración que hemos torado.

La ecuación 4.2.2. entonces se puede reducir a :

$$g \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f \rho V^2}{2 D} = 0 \quad 4.2.7.$$

El término  $V^2$  en la ecuación anterior corresponde al vector velocidad que tiene una dirección indicada por el signo y por lo tanto no debe ser considerada como elevada al cuadrado, sino de la forma  $V |V|$ , pues si el signo es negativo esto nos indicará que el flujo va en la dirección contraria a la que habíamos supuesto, esto es, un flujo reversible, por lo tanto la ecuación 4.2.7. se convierte en:

$$\rho g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{f \rho}{2D} V |V| = 0 \quad 4.2.8.$$

En este momento tenemos 2 ecuaciones ( 4.2.1 y 4.2.8. ) en las que tenemos 3 variables dependientes que son: presión, densidad y velocidad, y por lo tanto nuestro sistema está indeterminado y es necesario entonces contar con otra ecuación, que corresponde a una ecuación de estado de la forma:

$$P = \frac{\rho Z R \theta}{(MW)} \quad 4.2.9.$$

En donde Z es el factor de compresibilidad, que también depende de la presión y la temperatura.

En el capítulo II se vio cómo calcular Z en funciones de la presión, temperatura y las propiedades críticas, pero en muchos casos se necesita una ecuación, que aunque no dé resultados muy exactos pero sí satisfactorios. Halbert y Lotito (30) proponen la siguiente ecuación:

$$Z = 1. + a P + \frac{b P}{\theta} \quad 4.2.10$$

Y para los valores de a y b tenemos:

$$a = 0.257 / P_c$$

$$b = -0.533 \theta_c / P_c$$
4.2.11

Esta ecuación por lo tanto también es función de las propiedades críticas, pero es más sencilla de resolver.

No es necesario usar, necesariamente la ecuación de estado de gas ideal corregida por el factor de compresibilidad, sino que puede ser sustituida por cualquier otra ecuación de estado, pero su forma de resolver será más complicada que la que aquí se presentará y la derivación será distinta a la mostrada.

Si ahora regresamos a la ecuación de continuidad dada por la ecuación 4.2.1. y multiplicamos también por el cociente de áreas A/A esta se convierte en :

$$\frac{\partial (\rho V A)}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$
4.2.12

Si sustituimos el valor del producto  $Q = \rho VA$  (gasto másico) en la ecuación anterior tendremos entonces:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$
4.2.13

Y si rearmamos la ecuación 4.2.9. para poder obtener la densidad como una función de la presión:

$$\rho = \frac{P (MW)}{Z R \theta}$$
4.2.14

Y si la sustituimos en la ecuación 4.2.13 para eliminar la densidad, llegaremos a :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} + \frac{\partial (P (MW))}{Z R \theta \partial t} = 0$$
4.2.15

y nuevamente se considera un flujo isotérrico en el que la temperatura no varía ni con la distancia ni con el tiempo, entonces se podrá tomar a ésta como una constante quedando la derivada como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} + \frac{(MW)}{Z R \Theta} \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad 4.2.16$$

Y rearrreglando esta ecuación nos queda como:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{Z R \Theta}{(MW) A} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 4.2.17$$

Si el valor de P. lo tomamos como  $10.72 \text{ (lb/in}^2\text{)}(\text{ft}^3)/(\text{mol})(^\circ\text{R})$  para transformar la presión de  $\text{lb/ft}^2$  a  $\text{lb/in}^2$  y si el área de flujo está definida por  $A = \pi D^2/4$  y sustituímos estos valores en la ecuación 4.2.17 tendremos que:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{10.72 Z \Theta}{(\pi/4)(MW) D^2} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 4.2.18$$

Y efectuando las operaciones:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{13.66 Z \Theta}{(MW) D^2} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 4.2.19$$

Si los términos constantes los agrupamos en uno solo, de la manera siguiente, tendremos que ;

$$C_1 = \frac{13.66 Z \Theta}{(MW) D^2} \quad 4.2.20$$

Y la ecuación 4.2.19 se puede reducir a la forma de las ecuaciones diferenciales:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - C_1 \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 4.2.21$$

De aquí vemos que el cambio de la presión con respecto al tiempo

va a ser directamente proporcional al cambio del gasto másico con respecto a la distancia, y cuando se alcance el régimen permanente y se tenga entonces que:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

O sea que el gasto másico es el mismo en toda la tubería o lo que es lo mismo, la acumulación es cero entonces tendremos que:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0$$

Por lo tanto la presión no cambiará más con respecto al tiempo y el estado estable se habrá alcanzado.

Analizaremos ahora a la ecuación de conservación de momento, a la que habíamos llegado por medio de la ecuación 4.2.8., si dividimos toda la ecuación entre el valor de la aceleración de la gravedad tendremos que:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{f \rho V^2}{2 D g} = 0 \quad 4.2.22$$

En esta ecuación se ha eliminado la dependencia directa con respecto al tiempo, por lo que, es posible entonces cambiar las derivadas parciales por derivadas totales con respecto únicamente a la distancia.

Ahora bien, si despejamos el término que nos indica el cambio de la presión con respecto a la distancia llegaremos a :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{f \rho V^2}{2 D g} - \rho \frac{\partial h}{\partial x} \quad 4.2.23$$

De la ecuación 4.2.23 podemos analizar ahora por separado el término que nos indica la pérdida de energía debido al esfuerzo

cortante o pérdidas por fricción en la tubería, esto está dado por la ecuación de Darcy.

$$-\frac{f \rho V^2}{2 D g} = h_1 \quad 4.2.24$$

Es necesario recordar, que tal como se vio en el capítulo II, esta ecuación solo puede ser usada para fluidos compresibles siempre y cuando las caídas de presión no excedan un 10% a la presión inicial, o sea que los cambios de densidad no sean elevados.

Si a la ecuación 4.2.24 la multiplicamos por  $(A^2/A^2) \times (\rho/\rho)$  tendremos entonces:

$$-\frac{f \rho^2 V^2 A^2}{2 D g \rho A^2} = h_1 \quad 4.2.25$$

Pero  $\rho^2 V^2 A^2 = Q^2$  es el gasto másico elevado al cuadrado, por lo que si en la ecuación 4.2.25 sustituimos este gasto másico nos quedará entonces:

$$-\frac{f Q^2}{2 D g \rho A^2} = h_1 \quad 4.2.26$$

Si sustituimos en esta ecuación el valor de la densidad obtenido en la ecuación 4.2.15 tendremos :

$$-\frac{f Q^2 Z R \Theta}{2 D g A^2 P (MW)} = h_1 \quad 4.2.27$$

Si ahora agrupamos los términos que son constantes en uno solo, de la siguiente manera:

$$C_2 = \frac{f Z \Theta R}{2 D g A^2 (MW)} \quad 4.2.28$$

Como se hizo la consideración de que el flujo era isotérmico, se ha podido poner entonces a la temperatura dentro de estos términos constantes.

Se han tomado además las siguientes consideraciones:

a.- Se ha considerado que el factor de fricción calculado para las condiciones iniciales de la tubería, es válido para toda esta. Esto no es estrictamente cierto, pues el factor de fricción varía con la presión, el gasto y la temperatura, pero esta variación es mínima y por eso la consideración de mantenerlo como constante no nos lleva a un error apreciable.

b.- El factor de compresibilidad  $Z$  también se ha considerado constante, dado que su variación en una sección pequeña de tubería no es muy apreciable y para efectos prácticos se puede efectuar esto y no considerar su variación con respecto a la presión.

Si el área de la tubería la sustituimos por su valor en función del diámetro, esto es  $A = D^2/4 \cdot \pi$ , en la ecuación 4.2.28 tendremos entonces que la constante  $C_2$  se reduce a :

$$C_2 = \frac{f Z \theta R (4)^2}{2 D g D^4 \pi^2 (MW)} \tag{4.2.29}$$

Si cambiamos las unidades de presión de lb/ft<sup>2</sup> a lb/in<sup>2</sup> y efectuamos las operaciones con las constantes numéricas, entonces la ecuación 4.2.29 quedará de la manera siguiente:

$$C_2 = 1.0854 * 10^{-6} \frac{f Z \theta}{D^5 (MW)} \tag{4.2.30}$$

Analicemos ahora el término de las pérdidas de energía debido al cambio de alturas, este es,:

$$- \frac{\rho \partial h}{\partial x} = h_z \quad 4.2.31$$

Tambien si sustituimos el valor de la densidad obtenido en la ecuación 4.2.15 en esta ecuación tendremos que:

$$- \frac{P (MW)}{Z R \odot} \frac{\partial h}{\partial x} = h_z \quad 4.2.32$$

Si sustituimos el valor de la ecuación 4.2.32 y la ecuación 4.2.31 en la ecuación general 4.2.23, esta se convertirá en:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{f Q^2 Z R \odot}{2 D g A^2 P (MW)} - \frac{P (MW)}{Z R \odot} \frac{\partial h}{\partial x} \quad 4.2.33$$

Si multiplicamos por la presión a ambos lados de la ecuación para eliminarla del término de pérdidas por fricción tendremos:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x} = - C_2 Q^2 - \frac{P (MW)}{Z R \odot} \frac{\partial h}{\partial x} \quad 4.2.34$$

Ahora separando también los términos constantes en la parte de cambios de energía debido a la altura se tendrá la ecuación:

$$C_e = \frac{(MW)}{Z R \odot} \quad 4.2.35$$

Si efectuamos también las operaciones de las constantes numéricas para reducir esta ecuación, tendremos:

$$C_e = 1.29 * 10^{-3} \frac{(MW)}{Z \odot} \quad 4.2.36$$

Y si ahora agregamos esta ecuación a la ecuación 4.2.34 nuestra ecuación final de cambios de energía debidos a los cambios de



presión quedarán de la manera:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x} = +/- C_2 Q^2 - C_e \frac{\partial h}{\partial x} P^2 \quad 4.2.37$$

Y ahora la presión se expresará en Psi.

El signo +/- que aparece en la ecuación, proviene del vector velocidad que fue eliminado anteriormente, pero su signo persiste intrínsecamente en el término del gasto, ya que en lugar de ser  $Q^2$  es  $Q \cdot |Q|$  lo que nos permite conocer el signo. Un signo negativo nos indicará que el flujo es en el sentido inverso a lo que se había supuesto, esto es, un flujo reversible.

Por último nuestras ecuaciones básicas quedarán entonces de la manera siguiente:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} &= - C_1 \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \frac{\partial P^2}{\partial x} &= +/- C_2 Q^2 - C_e \frac{\partial h}{\partial x} P^2 \end{aligned} \right\} 4.2.38$$

### 3.- Resolución del modelo matemático

En esta sección se propondrá un método de cálculo o algoritmo para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales propues-

tos en la ecuación 4.2.38 de la sección anterior.

Para resolver las ecuaciones diferenciales utilizaremos el método de las diferencias finitas, que básicamente dice

$$\frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \implies \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad 4.3.1$$

Si dividimos la tubería en distintas secciones o tramos, tendremos, para el primer tramo:

$$\frac{dy_i}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} + E(\Delta x) \quad 4.3.2$$

Para la sección final de la tubería será:

$$\frac{dy_i}{dx} = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x} + E(\Delta x) \quad 4.3.3.$$

Y para cualquier sección intermedia de la tubería la diferencial estará definida por:

$$\frac{dy_i}{dx} = \frac{y_{i+1/2} - y_{i-1/2}}{\Delta x} + E(\Delta x)^2 \quad 4.3.4.$$

En estas tres ecuaciones (4.3.2., 4.3.3., 4.3.4.) el valor  $E(\Delta x)$  es el error cometido por la aproximación, que será menor conforme el valor de  $\Delta x$  tienda a cero..

Si la tubería está dividida en  $N$  tramos, entonces la longitud de cada uno de estos tramos o celdas estará definida por:

$$\Delta x = \frac{L}{N} \quad 4.3.5$$

En donde  $L$  es la longitud total de la tubería.

Si aplicamos las ecuaciones 4.3.4. y la ecuación 4.3.5 a la e-

cuación 4.2.21 tendremos que:

$$\frac{dP_{i+1/2}}{dt} = - \frac{N C_1}{L} (Q_{i+1} - Q_i) \quad 4.3.6$$

O sea, en forma rearrglada:

$$\frac{dP_{i+1/2}}{dt} = - \frac{C_1}{(N/L)} (Q_{i+1} - Q_i) \quad 4.37$$

Esta va a ser entonces nuestra ecuación fundamental, ya que nos proporciona una forma de evaluar el cambio de la presión intermedia dentro de una celda central de la tubería, con respecto al tiempo.

Las celdas quedarían entonces como:

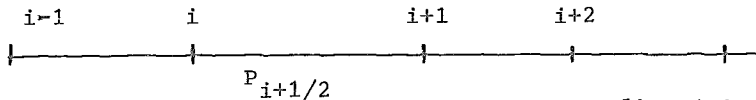


fig. 4.1

Si consideramos a  $P_{i+1/2}$  como:

$$P_{i+1/2} = \sqrt{\frac{P_i^2 + P_{i+1}^2}{2}} \quad 4.3.8$$

Entonces podemos obtener a partir de una presión inicial de la celda,  $P_0$ , el valor de  $P_i$  y con esto obtener el valor final de la celda  $P_{i+1}$  que corresponderá al valor inicial de la siguiente celda y así sucesivamente a lo largo de la tubería y entonces tendríamos que :

$$P_{i+1} = \sqrt{P_{i+1/2}^2 * 2 - P_i^2} \quad 4.3.9$$

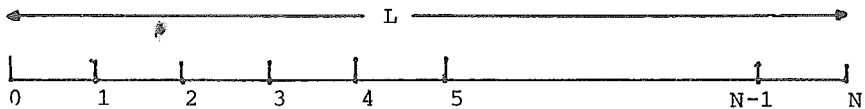
Ahora nuestro problema principal será el poder evaluar, para cada tiempo, los valores del gasto  $Q_i$  y  $Q_{i+1}$ .

De la ecuación 4.3.7 podemos ver que cuando la diferencia de los gastos en una sección de tubería sea cero, o el gasto entrante sea igual al gasto saliente, entonces se habrá alcanzado el régimen permanente y la presión ya no cambiará con respecto al tiempo.

Analicemos ahora el caso de un modelo de  $N$  celdas, para tratar de establecer los valores de gasto.

El modelo sería de la forma:

Fig. 4.2



Si analizamos ahora la primera celda, para una cierta presión inicial tendremos un gasto  $Q_0$ .

La longitud de cada celda, entonces, estará dada por  $L/N$ , como se mostró anteriormente.

Para el análisis de esta celda es necesario conocer la presión media dentro de la risma, y entonces el cambio de la presión con respecto a la distancia será entre  $P_0$  y  $P$  y por lo tanto  $\Delta x = (L/N)/2$  o sea el valor correspondiente a media celda.

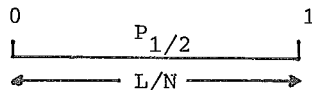


Fig. 4.3

Si aplicamos el método de las diferencias finitas pero para una celda inicial o condiciones iniciales tendremos:

$$\frac{\delta P^2}{\delta x} = \frac{P_{1/2}^2}{(L/2N)} - P_0^2 = \frac{2N(P_{1/2}^2 - P_0^2)}{L} \quad \dots 4.3.10.$$

En este caso el cambio de la altura se puede considerar constante para toda la tubería y por lo tanto:

$$\frac{\delta h}{\delta x} = \frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{\Delta H}{L} \quad \dots 4.3.11.$$

En donde  $\Delta H$  es la altura total de la línea y  $L$  es la longitud de esta.

Si sustituimos las relaciones 4.3.10 y 4.3.11 en la 4.2.37 tendremos que:

$$\frac{2N(P_{1/2}^2 - P_0^2)}{L} = -C_2 Q_0^2 + C_e \frac{\Delta H}{L} P_0^2 \quad \dots 4.3.12.$$

Si cambiamos  $C_e^* = C_e \Delta H$  por  $C_e \Delta H$  y despejamos el valor de el gasto inicial al cuadrado, entonces la ecuación 4.3.12 resultara como:

$$Q_0^2 = - \frac{2 N (P_{1/2}^2 - P_0^2)}{C_2 L} + \frac{C_e^* P_0^2}{C_2 L} \quad \dots 4.3.13.$$

Reagrupando terminos tendremos que:

$$Q_0^2 = \frac{-2 N P_{1/2}^2}{C_2 L} - \frac{2 N P_0^2}{C_2 L} + \frac{C_e^* P_0^2}{C_2 L}$$

y

$$Q_0^2 = \frac{-2 N P_{1/2}^2}{C_2 L} - \frac{P_0^2 (2N - C_e^*)}{C_2 L} \quad \dots 4.3.14.$$

Si reunimos en terminos generales a las constantes, de la forma:

$$A_0 = \frac{-2 N}{C_2 L} \quad ; \quad B_0 = - \frac{(2 N - C_e^*)}{C_2 L} \quad \dots 4.3.15.$$

Y por lo tanto la relación 4.3.14 quedará como:

$$Q_0^2 = A_0 P_{1/2}^2 - B_0 P_0^2 \quad \dots 4.3.16.$$

Estas constantes serviran, unicamente para la celda inicial de tubería.

Ahora analicemos, el caso de la ultima celda de la línea, que corresponderá

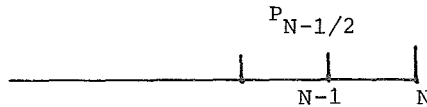


Fig. 4.4

En este caso el cambio de presión con respecto a la distancia se hará sobre una longitud  $L/2N$ , y nuevamente la longitud de la celda será:  $L/N$ . Si le aplicamos el método de las diferencias finitas, pero, para una sección final tendremos que:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x} = \frac{P_N^2 - P_{N-1/2}^2}{(L/2N)} = \frac{2N}{L} (P_N^2 - P_{N-1/2}^2) \quad \dots 4.3.17.$$

Y reorganizando esta ecuación y despejando el valor de el gasto final al cuadrado tendremos:

$$Q_N^2 = - \frac{2 N (P_N^2 - P_{N-1/2}^2)}{C_2 L} + \frac{C_e^* P_N^2}{C_2 L} \quad \dots 4.3.18.$$

Si agrupamos terminos tendremos:

$$Q_N^2 = - \frac{2 N (P_{N-1/2})^2}{C_2 L} - \frac{P_N^2 (2N - C_e^*)}{C_2 L} \quad \dots 4.3.19.$$

Y si reunimos los terminos constantes, de la forma:

$$A_1 = \frac{2 N}{C_2 L} \quad ; \quad B_1 = \frac{(2N + C_e^*)}{C_2 L} \quad \dots 4.3.20.$$

Y nuestra ecuacion final para obtener los valores de gasto al ultimo tramo de tubería estará dada por:

$$Q_N^2 = A_1 P_{N-1/2}^2 - B_1 P_N^2 \quad \dots 4.3.21.$$

Veamos el caso de los nodos intermedios. Si tenemos la linea definida como:



Fig. 4.5

Si aplicamos el método de diferenciales finitas, pero para las celdas centrales, la ecuación 4.3.4 será lo siguiente:

$$\frac{2N(P_{i+1/2}^2 - P_{i-1/2}^2)}{L} = -C_2 Q_i^2 + \frac{C_e \Delta H}{L} P_i^2 \quad \dots 4.3.22.$$

En donde  $Q_i$  va de  $i=2, N-1$ .

Nuevamente rearrreglando esta igualdad tendremos que:

$$Q_i^2 = \frac{2N P_{i+1/2}^2}{C_2 L} - \frac{2N P_{i-1/2}^2}{C_2 L} - \frac{C_e^* P_i^2}{C_2 L} \quad \dots 4.3.23.$$

El valor de presión  $P_i$  puede ser obtenido si se aplica la ecuación 4.3.8, para los valores de las presiones medias de los nodos anterior y posterior.

Si sustituimos esto en la ecuación 4.3.23 tendremos:

$$Q_i^2 = \frac{2N}{C_2L} P_{i+1/2}^2 - \frac{2N}{C_2L} P_{i-1/2}^2 - \frac{C_e^*}{C_2L} P_{i-1/2}^2 \dots 4.3.24.$$

$$- C_e P_{i+1/2}^2 / C_2L$$

Y

$$Q_i^2 = \frac{P_{i+1/2}^2 (2N - C_e^*)}{C_2L} - \frac{P_{i-1/2}^2 (2N + C_e^*)}{C_2L} \dots 4.3.25.$$

Reuniendo en términos constantes:

$$B_0 = \frac{2N - C_e^*}{C_2L} \quad ; \quad B_1 = \frac{2N + C_e^*}{C_2L} \dots 4.3.26.$$

Y por lo tanto:

$$Q_i^2 = - \frac{B_1 P_{i+1/2}^2}{2} - \frac{B_2 P_{i+1/2}^2}{2} \dots 4.3.27.$$

Ahora ya es posible calcular los gastos en toda la línea y en función de estos conocer el cambio de la presión con respecto al tiempo.

Es necesario hacer notar que no se obtuvieron ecuaciones para calcular normalmente la presión inicial ó final, sino solo las presiones intermedias ya que no es posible debido a los grados de libertad de la línea, que son dos, y por lo tanto es necesario fijar dos variables, para que el sistema quede determinado.

El cambio de las presiones con respecto al tiempo estará dado si consideramos que:



$$\frac{dP_{i+1/2}}{dt} \approx \frac{\Delta P_{i+1/2}}{\Delta t} \quad \dots 4.3.28.$$

Es necesario tambien conocer los valores de gasto y presión en toda la linea en el tiempo cero, ya que de estos partireros para el estado transitorio.

#### 4.1 Procedimiento de calculo:

Para poder resolver el ródelo matemático planteado anteriorrente, el procedimiento será entonces:

- a.- Para el tiempo cero conoceros las presiones en toda la linea (en el caso de una linea de desfogue la presión sería la misma en toda la linea), y el gasto tambien debe ser conocido (para el sistema de desfogue será cero).
- b.- Al tiempo  $T + \Delta T$  habrá abierto la válvula ó sea se habrá establecido la variación de presión, por lo tanto se establecera un gasto másico en el nodo cero debido a la diferencia de presiones entre el nodo cero y el nodo uno.
- c.- La diferencia en gastos entre el nodo cero y el nodo uno ó entre el nodo  $i$  y el nodo  $i+1$ . si es otra variación de presión, establecera un cambio de presión con respecto al tiempo, de la forma  $dP/dT$  lo que nos permitira establecer los nuevos valores de presión.
- d.- En el caso del sistema de desfogue se establecerá una diferencia de gastos entre el nodo uno y el nodo dos y se nodra establecer nuevamente una  $\Delta P/\Delta T$ , en el siguiente incremento será entre el dos y el tres y así sucesivamente.
- e.- Cuando ya se ha establecido una diferencia de gastos en todos

los nodos del sistema se continuara iterando hasta que el tiempo llegue a  $T_{max}$ . ó la diferenciá de los gastos sea muy pequeña.

Para poder observar una línea que es sometida al desfogue de una válvula se ha creado un programa de computadora del que se muestra un listado en el anexo III-A. El programa consta de 255 instrucciones en lenguaje FORTRAN y fué corrido en una maquina UNIVAC 1106.

El metodo con el que fue creado el programa es el que se mostró durante el desarrollo del capítulo.

Los datos necesarios para que el programa funciones son:

Longitud de tubo recto (ft).

Gasto al inicio de la tubería (lb/hr).

Presión al inicio de la tubería (Psia).

Presión al final de la tubería (Psia).

Diámetro interno de la tubería (in.).

Presión Crítica del gas (Psia).

Temperatura Crítica del gas ( $^{\circ}R$ ).

Temperatura del gas ( $^{\circ}F$ ).

Se considera que la línea se encuentra a la presión de salida y - al abrir la válvula, que tiene una presión corriente arriba mayor que la presión del sistema, el gas empezara a fluir hacia la tubería y la presión comenzara a aumentar dentro de esta hasta que se alcance un perfil de estado estable, considerando también que la presión y el gasto inicial no cambian con respecto al tiempo.

Se corrio un ejemplo, tomando como gas al etileno, el cual des-

foga a una presión de 300 psia y a un régimen de gasto de 240945 lb/hr, a través de una válvula a una tubería que se encuentra a una presión de 14.7 psia. La presión crítica del etileno es de 742 psia y la temperatura crítica es de 509.6 °R, además el gas se encuentra a 0 °F y se considerara que es constante con respecto al tiempo y al espacio. La tubería tendrá una longitud de --- 12041 pies (ft) y un diámetro de 10" (in).

Los resultados se muestran al final del mencionado anexo III-A enlistados en hoja de computadora.

Utilizando un graficador marca CALCOM asociado a la maquina UNIVAC 1106 se graficaron estos resultados y corresponden a las figuras II-V, que corresponde al cambio de la presión con respecto al tiempo en un nodo situado a 9031 pies de la válvula, y III-V que corresponde al mencionado nodo pero muestra el cambio del gas to másivo con respecto al tiempo.

En ambas figuras se muestra una curva asintótica que aumenta rápidamente en un principio y se va estabilizando hasta que el cambio con respecto al tiempo ya se puede considerar despreciable.-- en ese momento, se ha alcanzado el estado estable ó régimen permanente.

Podemos ver, en base a los resultados obtenidos, que el régimen permanente en este caso es alcanzado en aproximadamente 2 minutos ó 120 segundos. Esto nos proporciona bases para ver que el estado transitorio a que es sometida una tubería sujeta al desfogue de una válvula es sumamente rápido ya que en la mayoría de los casos, -

las longitudes de tubo recto difícilmente sobrepasan los --- 1000 pies, lo que hace aún más rápido el alcance del régimen permanente.

También se graficaron de la misma forma los perfiles del gasto másico y presión en toda la línea de tubería y esto se puede ver en las figuras IV-V y V-V del anexo V.

Cuando se tiene un transiente oscilatorio, ó sea que el gasto ó la presión que deben ser fijados, cambian de una manera senoidal y por lo tanto el resto de la línea variará de una forma equivalente y considerando además que el transiente se presenta en un tiempo  $\Delta T \rightarrow 0$  por que en un tiempo mayor se puede considerar como régimen permanente, también puede ser tratado con el método de Halbert y Lotito (31) y para esto se generó un programa simple de computadora en el lenguaje FORTRAN y que fué corrido en la máquina antes mencionada, el que es listado en el anexo III-B.

Los datos necesarios para alimentar al programa son idénticos que en el caso anterior, pero además se requiere de los valores de la curva senoidal que siguen tanto al el gasto másico inicial como a la presión inicial.

Se corrió una línea por la que fluye etileno a 150 °F y las dimensiones de la línea son; diámetro 7.998 " , longitud 10000 ft.

Los resultados se muestra en los listados de computadora al final del anexo III-B y además se han graficado estos resultados, mostrando el cambio de presión inicial en la figura VI-V y el cambio del gasto másico inicial en la figura VII-V en el anexo V.

Se muestran también en el anexo V el cambio en el perfil de presiones a lo largo de la línea en la figura VIII-V y el cambio de el perfil de gastos másicos en la línea también en la figura IX-V.

Indice de Variables.

- A Area, sección transversal de la tubería.
- D Diámetro interno.
- f Factor de fricción
- gc Aceleración por la gravedad terrestre.
- hl Perdidas pro fricción.
- H Altura.
- L Longitud.
- MW Peso molecular.
- Pc Presión crítica.
- P Presión.
- Q Gasto.
- R Constante de los gases.
- T Tiempo.
- V Velocidad del gas.
- x Longitud de una sección de tubería.
- z Factor de compresibilidad.
- $\rho$  Densidad.
- $T$  Temperatura.
- $T_c$  Temperatura crítica.

C A P I T U L O   V

" Descripción general de redes de tuberías y sus soluciones a régimen no permanente "



### 5.1 .- Objetivo.

En el capítulo anterior se mostró el método utilizado por G.Paul Distéfano (31), en el programa de PIPERTRAN IV, que es el más simple y el más utilizado actualmente para resolver un transiente de presión y gasto. Este método es aplicable a una línea simple de tubería.

Cuando se tiene una red de tubería, es decir, una serie de tramos simples de tubería, los cuales están interconectados por distintos tipos de accesorios (válvulas, coples, codos, etc.), por lo tanto se puede aplicar el método mencionado en el anterior capítulo con algunas variaciones, esto es, calculando línea por línea y guardando los resultados del final de una de éstas, que corresponderá al principio de la otra, siguiendo una secuencia de cálculo hasta completar la red ( un ejemplo de ésta metodología fué utilizada en el capítulo II para calcular una red de desfogue considerando un régimen permanente de flujo). A esto se le llama un método explícito de cálculo de redes de tubería y es posible efectuarlo principalmente en redes pequeñas y no muy complicadas o en aquéllas redes que no tengan "Loop" (circuitos cerrados de tubería), debido a que consume mucho tiempo de cálculo, aún utilizando una máquina computadora, además que es poco flexible para efectuar cambios en la red. Sin embargo presenta la ventaja, de ocupar poco espacio de memoria por la razón de conservar un mínimo de datos. El método que se utilizará en el presente capítulo corresponde a un método implícito y consiste en calcular la red de una sola vez, como un todo por medio de un planteamiento de sus ecuaciones básicas y su resolución simultánea.



El método implícito es mucho más flexible con respecto a cambios en la configuración de la red o cambio de flujo en una sección de tubería, aunque, puede presentar el problema de que necesite una gran área de memoria de la maquina computadora, sobre todo comparado con el método explícito, y es posible de que no pueda disponer en todo momento de esta área. Otro problema serio que presenta el sistema implícito es que los algoritmos de evaluación así como el análisis de la red, son más complejos, ya que hay que determinar el número exacto de grados de libertad de esta y en base a esto plantear las ecuaciones básicas, que por ser no lineales es difícil conocer si son ó no independientes de las otras. Es por esto que aquí solamente nos limitaremos a exponer algunas de las resoluciones a las ecuaciones básicas y se presentara la resolución a la red de tubería por el método de Stoner (28) únicamente, presentandose un programa de computadora para la resolución de una red simple de tubería por el método de las diferencias finitas. Empezaremos pues, por ver la forma en que utilizaremos nuestras ecuaciones fundamentales que fueron vistas y deducidas en el capítulo tres, pero que requeriran de algunos cambios para este proposito.

## 5.2.- Ecuaciones Fundamentales.

### 5.2.1.- Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad vista en el capítulo tres tiene la forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} = 0 \quad \dots 5.2.1.1.$$

Si el gasto másico esta definido como:

$$Q = \rho v A \quad \dots 5.2.1.2.$$

Multiplicando la ecuación 5.2.1.1 por el cociente A/A tendremos que:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho A v)}{\partial x} \frac{1}{A} = 0 \quad \dots 5.2.1.3.$$

Sustituyendo la ecuación 5.2.1.2 en la anterior:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{1}{A} = 0 \quad \dots 5.2.1.4.$$

Si utilizamos la relación de estado de la siguiente forma.

$$\rho = \frac{P}{Z} \frac{(MW)}{R T} \quad \dots 5.2.1.5.$$

Y sustituyendola en la igualdad 5.2.1.4 llegamos a:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \left( \frac{MW}{Z R T} \right) + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{1}{A} = 0 \quad \dots 5.2.1.6.$$

El fluido se considerará como isotermico, por lo tanto, al no ser la temperatura una variable dependiente ni del tiempo ni de la distancia, se puede sacar de la diferencial al igual que el peso moléculas.

Para hacer dimensionalmente correcta la ecuación 5.2.1.6 es necesario introducir el valor  $g_c$ , de la forma:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \frac{MW}{Z R T} + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{g_c} = 0 \quad \dots 5.2.1.7.$$

Para el fluido compresible en cuestión, su velocidad sónica estará dada por:

$$V = \sqrt{Z R T / MW} \quad \dots 5.2.1.8.$$

Si multiplicamos la ecuación 5.2.1.7 por esta velocidad sónica al cuadrado tendremos:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \left( \frac{MW}{Z R T} \right) v^2 + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{\rho c} \cdot v^2 = 0 \quad \dots 5.2.1.9.$$

Y aplicando el valor de esta velocidad sónica definida por la ecuación - 5.2.1.8 y cancelando terminos llegaremos a:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{v^2}{\rho c A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots 5.2.1.10.$$

Que será la forma en que utilizaremos la relación de continuidad en el presente capítulo.

### 5.2.2.- Ecuación de Conservación de Energía.

Partiendo del balance de energía obtenido del cap. III tendremos:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \rho g c \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f \rho v^2}{2 D} = 0 \quad \dots 5.2.2.1.$$

Si comenzamos por analizar el termino:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t}$$

Si a este lo multiplicamos por el cociente A/A se tendra:

$$\frac{\partial \rho v A}{\partial t} \cdot \frac{1}{A}$$

Y sustituyendo el valor del gasto másico dado por la ecuación 5.2.1.2 tendremos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \frac{1}{A}$$

El siguiente termino por analizar corresponde a:

$$\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x}$$

Este termino tiene un valor muy pequeño comparado con los otros terminos, por lo tanto se puede considerar como despreciable.

Los dos términos analizados anteriormente corresponden al balance por la energía cinética del sistema.

El término que corresponde a la altura es:

$$\rho g_c \frac{\partial h}{\partial x}$$

Si el valor de la densidad es sustituido por su valor dado en la ecuación de estado 5.2.1.5 tendremos:

$$\frac{P}{Z R T} g_c \frac{\partial h}{\partial x}$$

Y de acuerdo a la ecuación 5.2.1.8 se tendrá:

$$\frac{P}{V^2} g_c \frac{\partial h}{\partial x}$$

Si el cambio de la altura con respecto a la distancia se efectúa de una forma gradual podremos tener que  $dh/dx \approx \sin \alpha$  en donde  $\alpha$  será el ángulo que se forme con la horizontal, entonces:

$$P / V^2 g_c \sin \alpha$$

El último término que se va a analizar es que nos evalúa las pérdidas de energía debido a la fricción que es:

$$\frac{f \rho v^2}{2 D}$$

Haremos la suposición de que el factor de fricción calculado a las condiciones iniciales en la sección de tubería y a cada tiempo es válido para toda esta debido a que su cambio se puede considerar como despreciable.

Si multiplicamos este término por los cocientes  $\rho/\rho$  y  $A^2/A^2$  tendremos:

$$f \rho^2 v^2 A^2 / (2 D \rho A^2)$$

Sustituyendo el gasto másico dado por la ecuación 5.2.1.2 llegamos a:

$$\frac{f Q^2}{2 D A^5}$$

Y sustituyendo el valor de la densidad que nos da la ecuación 5.2.1.5 tendremos:

$$\frac{f Q^2 Z R T}{2 D A^2 P (MW)}$$

Y nuevamente en base a la ecuación 5.2.1.8 se llegará a que:

$$\frac{f Q V^2}{2 D P A^5}$$

El término del cambio de la presión con respecto a la distancia no se analiza debido a que este se utilizara en la misma forma en que se tiene.

Si ahora sustituimos todos los términos antes vistos en la ecuación 5.2.2.1 se llegara a:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{P}{v^2} \sin \alpha + \frac{f Q^2 V^2}{P \alpha_c^2 2 D A^2} = 0 \quad \dots 5.2.2.2.$$

A esta ecuación se le agregó además el factor gc para hacerla dimensionalmente correcta.

La ecuación 5.2.2.2 será la forma en que utilizaremos la ecuación de conservación de energía en el presente capítulo.

### 5.3. - Resolución de las Ecuaciones.

Es necesario, antes de continuar, el definir dos términos importantes:

"Tramos" Secciones simples de tubería de longitud  $\Delta x$  y de sección transversal constante.

"Nodos" Puntos de unión de 2 ó más tramos de tubería.

A continuación daremos la resolución de las ecuaciones anteriores por el método de las diferencias finitas y posteriormente por el método de las características, haciendo también alusión al método empleado por P.S.G'acher(32).

Para lo anterior es necesario hacer un pequeño preámbulo sobre las ecuaciones diferenciales parciales.

### 3.1 Ecuaciones diferenciales parciales:

Una ecuación diferencial típica sería de la forma:

$$\sum_{i=1}^n A_i' \frac{\partial u}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^n B_i' \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} + C' u + D' = 0 \quad 5.3.1.1$$

Las  $A_i'$  deben ser evaluadas en el punto de coordenadas  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  y sus valores serán negativos, positivos o cero.

Si todas las  $A_i'$  no son cero y tienen el mismo signo, podemos decir que la ecuación tiene una forma elíptica.

Si todas las  $A_i'$  no son cero y tienen con una excepción, el mismo signo tendremos una ecuación de forma hiperbólica.

Si una  $A_i'$  es cero y las restantes no lo son y son del mismo signo y el coeficiente  $B_i'$  de esa  $A_i'$  no es cero se tendrá una forma típicamente parabólica.

Si todas las  $A_i'$  son cero, entonces la forma de la ecuación se puede decir que es lineal y la ecuación 5.3.1.1 se reduce a

$$\sum_{i=1}^n B_i' \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} + C' u + D' = 0 \quad 5.3.1.2$$

Esta última forma es como tenemos a nuestras ecuaciones fundamentales vistas en las secciones anteriores.

### 3.2 Método de las diferencias finitas.

En una aproximación por medio de diferencias finitas, tendremos para las diferencias centrales:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2 \Delta x} + o[(\Delta x)^2] \quad 5.3.2.1$$

En donde  $o[(\Delta x)^2]$  es el error estandar.

Si aplicamos esto para el caso que tenemos, de la forma:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{P'_B + P_B - P'_A - P_A}{2 \Delta x} \quad 5.3.2.2.$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{P'_A + P'_B - P_A - P_B}{2 \Delta t} \quad 5.3.2.3.$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q'_B + Q_B - Q'_A - Q_A}{2 \Delta x} \quad 5.3.2.4$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q'_A + Q'_B - Q_A - Q_B}{2 \Delta t} \quad 5.3.2.5$$

Las variables en esta caso son:

- $P_A$  .- Presión en el tiempo  $T$  al inicio de la sección
- $P'_A$  .- Presión en el tiempo  $T + \Delta T$  al inicio de la sección
- $P_B$  .- Presión en el tiempo  $T$  al final de la sección
- $P'_B$  .- Presión en el tiempo  $T + \Delta T$  al final de la sección
- $Q_A$  .- Gasto en el tiempo  $T$  al inicio de la sección
- $Q'_A$  .- Gasto en el tiempo  $T + \Delta T$  al inicio de la sección
- $Q_B$  .- Gasto en el tiempo  $T$  al final de la sección
- $Q'_B$  .- Gasto en el tiempo  $T + \Delta T$  al final de la sección

Esto se puede ver mas claramente en la siguiente gráfica:

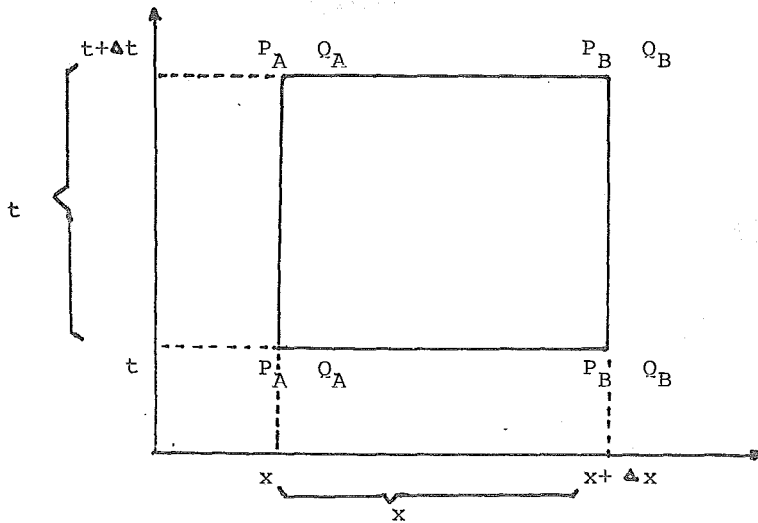


fig 5.1

### 3.3. Ecuaciones finales, método de las diferencias finitas

Si sustituimos los valores correspondientes a las derivadas par



ciales en las ecuaciones fundamentales 5.2.1.10 y 5.2.2.2 tendremos:

a.- Para la ecuación de continuidad:

$$\frac{P'_A + P'_B - P_A - P_B}{2 \Delta x} + \frac{V^2}{g_c A} \frac{(Q'_B + Q_B - Q'_A - Q_A)}{2 \Delta x} = 0 \quad 5.3.3.1$$

b.- Para la ecuación de conservación de energía:

$$\frac{P'_B + P_B - P'_A - P_A}{2 \Delta x} + \frac{1}{A g_c} \frac{(Q'_A + Q'_B - Q_B - Q_A)}{2 t} + \frac{g_c \operatorname{sen} \alpha (P'_A + P'_B - P_A - P_B)}{v^2} + \frac{f V^2}{g_c^2 4 D A^2} \frac{(Q'_A + Q'_B + Q_A + Q_B)^2}{(P'_A + P'_B + P_A + P_B)} = 0 \quad 5.3.3.2$$

Si arreglamos estas ecuaciones y agrupamos en términos constantes de la forma:

$$K_1 = \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{V^2}{A g_c}$$

$$K_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{1}{A g_c}$$

$$K_3 = \frac{\Delta x}{2 V^2} \frac{g_c \operatorname{sen} \alpha}{1}$$

$$K_4 = \frac{f V^2 \Delta x}{g_c 2 D A^2}$$

Las ecuaciones se reducen entonces a:

a.- Ecuación de continuidad:

$$P'_A + P'_B - P_A - P_B + K_1 (Q'_B + Q'_B - Q'_A - Q_A) = 0$$

5.3.3.3.

b.- Ecuación de conservación de energía:

$$P'_B + P'_B - P'_A - P_A + K_2 (Q'_A + Q'_B - Q_A - Q_B)$$

5.3.3.4

$$+ K_3 (P'_A + P'_B + P_A + P_B) + K_4 \frac{(Q'_A + Q'_B + Q_A + Q_B)^2}{(P'_A + P'_B + P_A + P_B)} = 0$$

De esta forma se tienen dos ecuaciones simultáneas no lineales para cada tramo de tubería.

Para poder resolver estas ecuaciones, es necesario utilizar algún método numérico. En este caso se utilizó el método de Newton Raphson para ecuaciones simultáneas no lineales.

Es necesario por lo tanto abrir aquí un paréntesis para explicar mejor este método.

### 3.3.1 Método de Newton Raphson

Si se tiene un sistema de N ecuaciones no lineales y N incógnitas de la forma:

$$a_{11}x_1^2 + a_{21}x_2^2 + \dots + a_{n1}x_n^2 + b_{11}x_1 + b_{21}x_2 + \dots + b_{n1}x_n + C_1 = f_1 = 0$$

$$a_{12}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + \dots + a_{n2}x_n^2 + b_{12}x_1 + b_{22}x_2 + \dots + b_{n2}x_n + C_2 = f_2 = 0$$

$$\vdots$$

$$a_{1n}x_1^2 + a_{2n}x_2^2 + \dots + a_{nn}x_n^2 + b_{1n}x_1 + b_{2n}x_2 + \dots + b_{nn}x_n + C_n = f_n = 0$$

Nótese que el orden de estas ecuaciones es de 2, que fue utilizado por comodidad, pero puede ser extendido a ecuaciones de cualquier orden.

Las ecuaciones anteriores pueden linealizarse de la forma:

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Delta x_n = -f_1$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Delta x_n = -f_2$$

⋮

⋮

⋮

$$\frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Delta x_n = -f_n$$

Que son ecuaciones lineales simultaneas y pueden ser resueltas de la forma:

$$\underbrace{\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{vmatrix}}_J \underbrace{\begin{vmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{vmatrix}}_{\bar{X}} = \underbrace{\begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{vmatrix}}_{\bar{F}}$$

En el que la matriz J es llamada "JACOBIANO", del sistema.

Inicialmente se deben suponer valores de  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  y los nuevos valores de  $X_i$  se pueden conocer de la forma:

$$X_i(\text{nueva}) = X_i(\text{antigua}) + \Delta X_i$$

Veamos este método ilustrado con un ejemplo sencillo de 2 ecuaciones:

$$f_1 = X^2 + Y^2 - 3X - 19 = 0$$

$$f_2 = 2Y^2 - 2X - Y - 5 = 0$$

Las derivadas parciales son:

$$\frac{\partial f_1}{\partial X} = 2x - 3$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial Y} = 2y$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X} = -2$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial Y} = 4y - 1$$

Si suponemos valores iniciales de  $X=6$  y de  $y=2$  entonces:

$$f_1 = (6)^2 + (2)^2 - 3(6) - 19 = 3$$

$$f_2 = 2(2)^2 - 2(6) - (2) - 5 = -11$$

Los valores de las derivadas parciales:

$$\frac{\partial f_1}{\partial X} = 2(6) - 3 = 9$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial Y} = 2(2) = 4$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X} = -2$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial Y} = 4(2) - 1 = 7$$

El sistema queda como:

$$\begin{vmatrix} 9 & 4 \\ -2 & 7 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -3 \\ 11 \end{vmatrix}$$

Resolviendo este sistema tendremos que  $\Delta X = -0.9154$  y  $\Delta Y = 1.3098$  de esta forma tendremos:

$$X = 6 + (-0.9154) = 5.084$$

$$Y = 2 + (1.3098) = 3.309$$

La siguiente tabla nos muestra los valores que se van obteniendo en las siguientes iteraciones:

X	Y
6	2
5.0845	3.3098
4.9999	3.0156
4.9999	3.00004
5	3

Los valores reales son  $X = 5$  y  $Y = 3$

Es necesario tener cuidado con este método ya que si existen raíces imaginarias el método no convergirá, lo mismo que si tenemos algún punto de indeterminación en alguna de las curvas, es pro-

riables dependientes Q y P y dos variables independientes X y T. Estas ecuaciones pueden ser combinadas por medio de un multiplicador de valor no conocido ( $\lambda$ ) y rearrregladas como sigue :

$$L = L_1 + L_2 = \frac{1}{A g_c} \left[ \frac{\partial Q}{\partial X} \lambda v^2 + \frac{\partial Q}{\partial t} \right] + \lambda \left[ \frac{\partial P}{\partial X} \frac{1}{\lambda} + \frac{\partial P}{\partial t} \right] + \frac{P g_c}{v^2} \text{sen } \alpha + \frac{f Q^2 v^2}{2 g_c P D A^2} = 0 \quad 5.3.4.1$$

En donde  $L_1$  corresponde a la ecuación 5.2.2.2 y  $L_2$  a la ecuación 5.2.1.10 . Dos valores reales, distintos, de  $\lambda$  producen dos ecuaciones equivalentes a las ecuaciones 5.2.2.2 y 5.2.1.10.

Si tomamos dos valores en particular de  $\lambda$  y si se cumple que:

$$\frac{dx}{dt} = \lambda v^2 = \frac{1}{\lambda} \quad 5.3.4.2$$

Entonces las cantidades entre paréntesis de la ecuación 5.3.4.1 se convierten en diferenciales totales, de la forma:

$$L = \frac{1}{A g_c} \frac{dQ}{dt} + \lambda \frac{dP}{dt} + \frac{P g_c \text{sen } \alpha}{v^2} + \frac{f Q^2 v^2}{2 g_c P D A^2} = 0 \quad 5.3.4.3$$

Y resolviendo la ecuación 5.3.4.2 para  $\lambda$  tendremos :

$$\lambda = \pm \frac{1}{v} \quad 5.3.4.4$$

Las ecuaciones de control para el método de las características, toman entonces la forma:

$$C^+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{A g_c} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{v} \frac{dP}{dt} + \frac{P g_c \text{sen } \alpha}{v^2} + \frac{f v^2 Q^2}{2 D A^2 P} = 0 \\ \vdots \end{array} \right. \quad 5.3.4.5$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \frac{dx}{dt} = v \quad 5.3.4.6$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \frac{1}{A} \frac{dQ}{g dt} - \frac{1}{V} \frac{dP}{dt} + \frac{P}{V^2} \frac{g \sin \alpha}{V^2} + \frac{f V^2 Q^2}{2D A^2 P} = 0 \quad 5.3.4.7$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \frac{dx}{dt} = -v \quad 5.3.4.8$$

La ecuación 5.3.4.5 es válida solo si la ecuación 5.3.4.6 es satisfecha y la ecuación 5.3.4.7 también será válida si la igualdad 5.3.4.8 se cumple.

La aplicación de este método la podemos ver en el siguiente diagrama de X contra T.

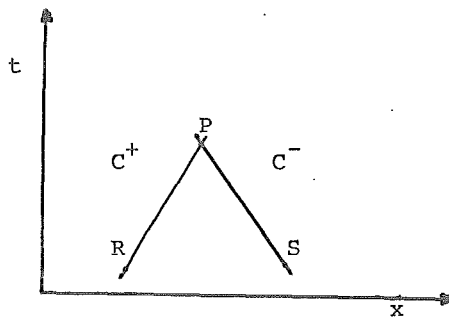


fig. 5.2

Si R y S son puntos conocidos y si intersectamos la línea característica de C+ que es  $dx/dt = V$  y la línea característica C- que es  $dx/dt = -V$  obtendremos el punto P, no conocido. Esta inter

sección es en una X y una T distintas a los puntos originales R y S. Por lo tanto las ecuaciones 5.3.4.5 y 5.3.4.7 deben ser resueltas simultáneamente .

Las ecuaciones 5.3.4.5 y 5.3.4.7 pueden ser resueltas por medio de las diferencias finitas, como se indica a continuación.

Al aplicar este método en el intervalo entre el punto R y el punto P, la ecuación 5.3.4.5 queda como:

$$C^+ : P_P - P_R + \frac{V}{gC} \frac{V}{A} (Q_P - Q_R) + \left( \frac{pg \operatorname{sen}}{V^2} + \frac{fV^2 Q^2}{gc2DA^2 P} \right) dx = 0 \quad 5.3.4.9$$

En esta ecuación el término  $Vdt$  ha sido remplazado por  $dx$ .

Si integramos a esta relación de acuerdo a la forma de estado estable tendremos:

$$C^+ : P_P - P_R + \frac{V}{A} \frac{V}{gC} (Q_P - Q_R) + \frac{f V^2 \Delta x}{2 D A^2 gC (P_P + P_R)}$$

$$(Q_P | Q_P| + Q_R | Q_R|) \frac{e^S - 1}{S} - \frac{P_S^2}{(P_P + P_R)} (e^S - 1) = 0 \quad 5.3.4.10$$

Similarmente para la ecuación 5.3.4.7 , entre los puntos P y S tendremos :

$$C^- : P_P - P_S - \frac{V}{A} \frac{V}{gC} (Q_P - Q_S) - \frac{f V^2 \Delta x}{2 D A^2 gC (P_P + P_S)}$$

$$(Q_P | Q_P| + Q_S | Q_S|) \frac{e^S - 1}{S} - \frac{P_S^2}{(P_P + P_S)} (e^S - 1) = 0 \quad 5.3.4.11$$

En estas dos últimas igualdades se utilizó el término  $Q / Q / pa$



ra poder indicar el signo que tiene el flujo y poder saber el sentido de éste ( flujo reversible).

Las ecuaciones 5.3.4.10 y 5.3.4.11 se reducen a estado estable cuando se cumple que  $Q_P = Q_S = Q_R$ .

Para tuberías horizontales tendremos que  $(e^S - 1)/S$  será igual a uno y el término  $(e^S - 1)$  valdrá cero.

Para eliminar nuevamente la indeterminación que puede causar el término de presión como divisor, las ecuaciones 5.3.4.10 y 5.3.4.11 pueden reescribirse como :

$$C^+ : P_P^2 - P_R^2 + \frac{V}{A \text{ gc}} (P_P + P_R) (Q_P - Q_R) + \frac{f V^2 \Delta x}{2 D A^2 \text{ gc}}$$

$$(Q_P | Q_P + Q_R | Q_R) \frac{e^S - 1}{S} + P_P^2 (e^S - 1) = 0$$

5.3.4.12

Y

$$C^- : P_P^2 - P_S^2 - \frac{V}{A \text{ gc}} (P_P + P_S) (Q_P - Q_S) - \frac{f V^2 \Delta x}{2 D A^2 \text{ gc}}$$

$$(Q_P | Q_P + Q_S | Q_S) \frac{e^S - 1}{S} - P_S^2 (e^S - 1) = 0$$

5.3.4.13

La ecuación 5.3.4.12 se usará con las condiciones de frontera de corriente abajo y la ecuación 5.3.4.13 con las condiciones de frontera de corriente arriba.

Las ecuaciones pueden ser resueltas de forma iterativa, para esto se recomienda el mencionado método de Newton-Raphson.

Por razones de estabilidad de las ecuaciones, es recomendable que los incrementos de tiempo sean de la forma:

$$\Delta T = \Delta X / V$$

### 5.3.5. Método de Goacher.

P.S.Goacher en el programa Steady and Transient Analysis of Gas Flow in Networks (SATAN) (32), propone las siguientes relaciones simplificadas:

$$dP / dT = K_1' dQ / dX \quad \dots\dots a$$

$$dP^2 / dX = K_2' Q^n \quad \dots\dots b$$

En las que se hacen las siguientes consideraciones:

- a.- Los términos de energía cinética son despreciables.
- b.- Las variaciones debidas a la altura son también despreciables.
- c.- La temperatura y el factor de compresibilidad son constantes.

Además tambien se toma en cuenta que:

- 1.- El cambio de presión en una sección de tubería es proporcional al cambio neto de masa en ese volumen. Este se hace comparable con una capacitancia en una red eléctrica.
- 11.-La caída de presión se realiza en una longitud lo suficientemente pequeña para que esto pueda ser calculado con una ecuación de estado estable.

La fórmula b se hace comparar con una resistencia en una red eléctrica.

De esta forma las constantes  $K_1'$  y  $K_2'$  son términos que dependen de las características físicas de la tubería y el gas.

De acuerdo a lo anterior, la resolución de las ecuaciones se hace de la misma forma en que se simula una red eléctrica.

#### 5.4 Análisis de los nodos.

Como se dijo antes, los nodos son, puntos de union de dos o más tramos simples de tubería.

Los más comunes son la union de dos y tres tuberías de la forma:



nodo union de dos tuberías

fig. 5.3



nodo union de tres tuberías

fig. 5.4

En el caso de tener algún nodo que uniera mas de tres tuberías es posible separarlos en nodos mas simples de la forma:

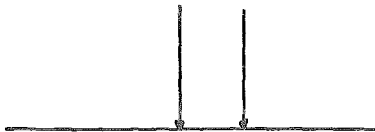


fig.5.5

En los nodos es posible efectuar un balance de materia de la siguiente manera:

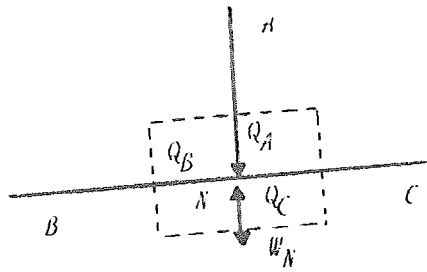


fig.5.6

Si se toma la convención de que el gasto entrante al nodo tiene signo positivo y el gasto saliente del nodo tiene signo negativo y si  $Q_A, Q_B$  y  $Q_C$  son gastos que van por las tuberías y  $W_N$  es el gasto que entra o sale del sistema en general por el nodo N, entonces un balance de materia nos dará:

$$W_N + Q_A + Q_B + Q_C = 0 \quad 5.4.1$$

5.5 Análisis de la red de tubería.

Analizaremos ahora una red simple de tubería de la forma:

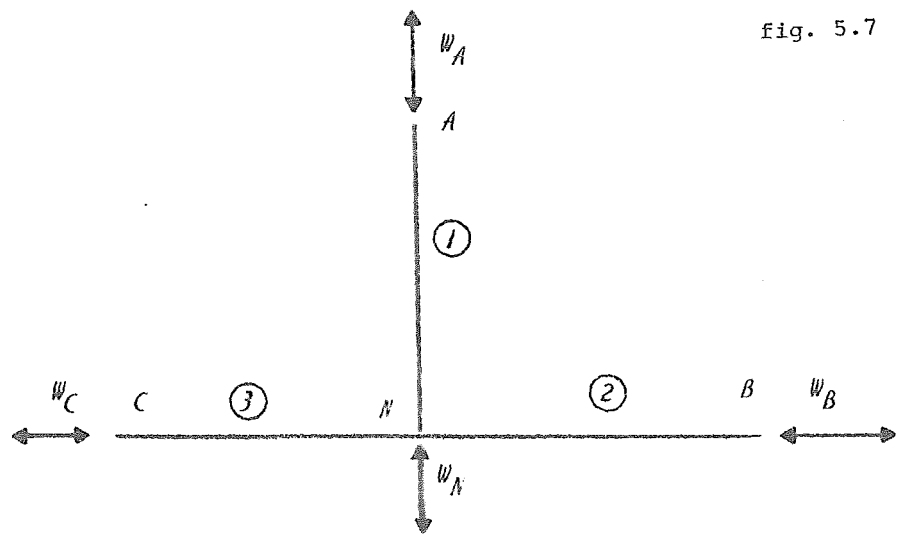


fig. 5.7

Las variables a régimen permanente serán:

Tubería	Longitud	Diámetro	Gasto	Presión inicial	Pres. final
1	$L_1$	$D_1$	$Q_1$	$PI_1$	$PF_1$
2	$L_2$	$D_2$	$Q_2$	$PI_2$	$PF_2$
3	$L_3$	$D_3$	$Q_3$	$PI_3$	$PF_3$

En este caso en especial se tendrá que:

$$Q_1 = W_A \quad , \quad Q_2 = W_B \quad , \quad Q_3 = W_C$$

Y por lo tanto:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + W_N = 0$$

Y las presiones de todas las tuberías en el nodo N serán iguales.

Vemos ahora la misma red pero a régimen no permanente:

Para el tiempo  $T_0$  :

Llamaremos  $P_A, P_B, P_C$  a las presiones iniciales de las tuberías 1,2,3 respectivamente, de la misma forma  $Q_A, Q_B, Q_C$  son los gastos iniciales de las tuberías. Los diámetros y las longitudes son  $D_1, D_2, D_3$  y  $L_1, L_2, L_3$  que no cambiarán con respecto al tiempo.

Las presiones en el nodo N por cada tubería serán  $P_{N1}, P_{N2}, P_{N3}$  y los gastos en este nodo serán  $Q_{N1}, Q_{N2}, Q_{N3}$ .

Es necesario hacer notar que por ser régimen no permanente su-

cede que:

$$Q_A \neq Q_{N1} \quad , \quad Q_B \neq Q_{N2} \quad , \quad Q_C \neq Q_{N3}$$

En este caso se sigue cumpliendo la relación:

$$Q_A + Q_B + Q_C + W_N = 0 \quad \dots\dots \quad a$$

Además

$$P_{N1} = P_{N2} = P_{N3} \quad \dots\dots \quad b$$

Como nos encontramos en un régimen no permanente es necesario considerar las variables en el tiempo  $T_0 + \Delta T$ .

Para denominar el cambio en el tiempo se utilizará una coma en la parte superior de la variable, de la forma:

Presiones en el tiempo  $T_0 + \Delta T$ :

$$P'_A \quad , \quad P'_B \quad , \quad P'_C \quad , \quad P'_{N1} \quad , \quad P'_{N2} \quad , \quad P'_{N3} \quad ,$$

Los gastos en el tiempo  $T_0 + \Delta T$  serán:

$$Q'_A \quad , \quad Q'_B \quad , \quad Q'_C \quad , \quad Q'_{N1} \quad , \quad Q'_{N2} \quad , \quad Q'_{N3} \quad ,$$

Para este tiempo se seguirán cumpliendo las relaciones a y b pero cambiando las variables del tiempo  $T_0$  por las variables del tiempo  $T_0 + \Delta T$ .

Poniendo todas estas incógnitas en una gráfica de la forma:

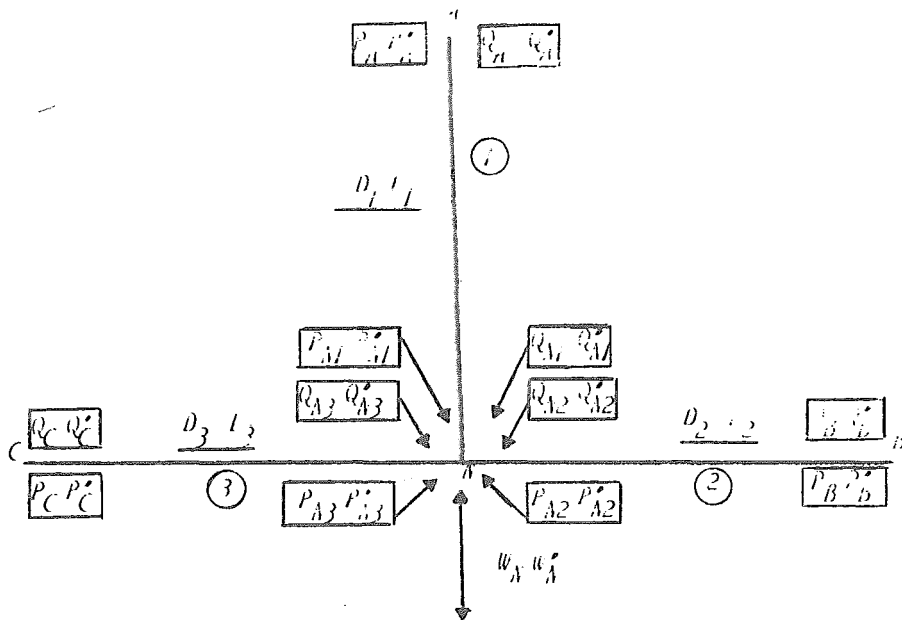


fig. 5.8

Esto hace que se tengan diez variables por cada tramo y dos mas en el nodo. De esta forma en este caso se tienen 32 variables. Si las variables en el tiempo  $T_0$  están definidas así como los diámetros y longitudes, tendremos entonces únicamente cuatro variables por cada tubería y una por el nodo, un total de trece variables para este caso.

La relación b antes vista nos fija dos variables y la relación a nos fija otra variable más.

De acuerdo a las ecuaciones de continuidad y conservación de energía ( vistas en las secciones anteriores) es posible plante-

ar dos ecuaciones de este tipo por cada tramo de tubería, lo cual nos fija en este caso seis variables más.

Quedan entonces cuatro variables independientes, o sea que en este caso, el número de grados de libertad del sistema es cuatro.

Para este tipo de redes ( en las que no se consideran las entradas al sistema como nodos) el número de grados de libertad estará dado por: número de tuberías más número de nodos.

En este tipo de redes abiertas el gasto entrante al sistema no es en el punto de union de las tuberías, generalmente, sino que únicamente entra gas por los inicios de las secciones de las tuberías, esto es  $W_N = W_N^I = 0$  lo cual para el caso que se tiene nos fijaría una incógnita más por lo tanto ahora el número de grados de libertad del sistema es igual al número de tuberías o sea tres.

Esto quiere decir que si fijamos tres variables en el tiempo  $T_0 + \Delta T$  todo el sistema estará definido y podrá ser conocido.

La red que se vió anteriormente correspondió a una red abierta veamos ahora el análisis de una red cerrada de la forma:

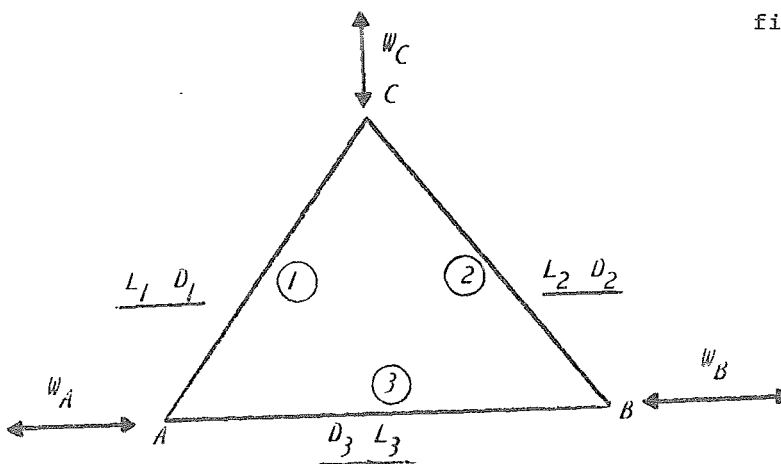


fig. 5.9



Las variables generales en este caso son:

$$L_1, L_2, L_3, D_1, D_2, D_3.$$

Para el tiempo  $T_0$  son:

$$P_{A3}, P_{B3}, P_{A1}, P_{C1}, P_{C2}, P_{B2}, Q_{A3}, Q_{B3}, Q_{A1}, Q_{C1}, Q_{C2}, \\ Q_{B2}, W_A, W_B, W_C.$$

Y para el tiempo  $T_0 + \Delta T$  tendremos:

$$P'_{A3}, P'_{B3}, P'_{A1}, P'_{C1}, P'_{C2}, P'_{B2}, Q'_{A3}, Q'_{B3}, Q'_{A1}, Q'_{C1}, Q'_{C2}, \\ Q'_{B2}, W'_A, W'_B, W'_C.$$

Si nuevamente suponemos que las variables generales y las variables al tiempo  $T_0$  están ya definidas, entonces nos quedarán quince variables por definir.

Nuevamente las relaciones en los nodos:

$$P'_{A3} = P'_{A1}, \quad P'_{C1} = P'_{C2}, \quad P'_{B2} = P'_{B3}$$

Nos fijan tres variables.

Los balances de materia en los nodos:

$$W_A + Q_{A3} + Q_{A1} = 0, \quad W_B + Q_{B3} + Q_{B2} = 0$$

$$W_C + Q_{C2} + Q_{C1} = 0$$

Es necesario hacer notar que en este caso por ser un estado inestable o no permanente no necesariamente debe cumplirse la relación:

$$W'_A + W'_B + W'_C = 0$$

Por lo tanto esta no nos sirve para fijar otras variables.

Tendremos además dos ecuaciones ( una de continuidad y otra de conservación de energía) por cada tramo de tubería, en este caso, seis ecuaciones, lo cual nos fija seis variables más.

De esta forma están fijadas doce variables por las distintas relaciones que se tienen y solo quedan por fijar tres variables en el caso que tenemos, a las cuales será necesario determinar de alguna forma ( con valores constantes o mediante algún tipo de relación), de esta forma, el número de grados de libertad de este sistema serán tres.

En general para todo tipo de red sometida a un régimen no permanente si  $n$  es el número de nodos y  $m$  es el número de tuberías, habrá  $2(m+n)$  incógnitas libres y se tendrán  $2m+n$  ecuaciones, por lo que el número de grados de libertad será igual al número de nodos ( $n$ ).

#### 5.6 Solución a la red.

Para resolver la red utilizaremos el método de Stoner (28) en el cual es necesario conocer los grados de libertad del sistema. Con esto será necesario plantear dos ecuaciones ( una de continuidad y una de conservación de energía) por cada tramo de tubería que se tenga y hacer un balance de materia por cada nodo.

Una vez planteadas las ecuaciones, el número de incógnitas debe corresponder al número de ecuaciones, por lo que será necesario fijar de alguna manera las restantes ( que corresponden a los grados de libertad).

Utilizando el método de Newton Raphson, visto en la sección 3.3.1

para estas  $n$  incógnitas, se podrá obtener para cada tiempo la matriz jacobiana y por lo tanto los valores de las incógnitas. Es necesario, por lo tanto, conocer el valor de las variables en el tiempo  $T_0$  y el valor de las variables fijadas en el tiempo  $T_0 + \Delta T$  para poder conocer el resto de las incógnitas. Para el siguiente intervalo se tendrá, que las variables que antes correspondían al tiempo  $T_0 + \Delta T$  ahora equivaldrán a los valores iniciales para poder conocer las variables en el tiempo  $T_0 + 2 \Delta T$ .

### 5.7 Programa de computadora.

Para poder mostrar de una manera mas eficiente lo visto anteriormente, se ha implementado un programa de computadora en lenguaje Fortran el cual fue corrido en una máquina computadora UNIVAC 1106 . Este programa solo puede resolver redes simples.

Un listado del programa se muestra en el anexo IV el cual consta de 170 instrucciones y una subrutina inversora de matrices.

Los datos que es necesario proporcionar al programa son:

Tarjeta 1 ( datos separados por comas )

DT incrementos de tiempo en segundos

PC Presión crítica del gas en PSIA

TC Temperatura crítica del gas en grados Rankin

PM Peso molecular del gas

Tem Temperatura del gas en °R

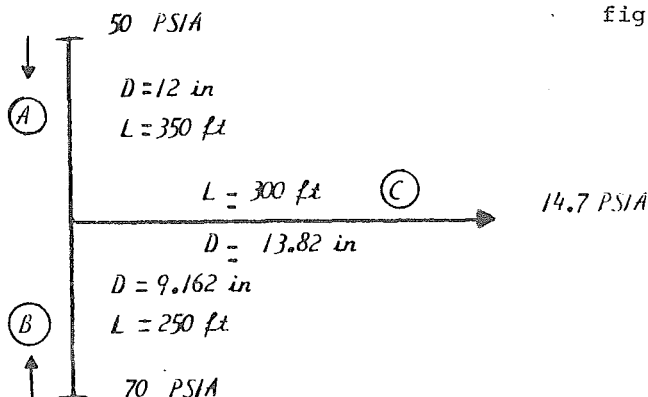
Tarjeta 2 ( datos separados por comas)  
 DX Incrementos de longitud en pies  
 FF Factor de fricción a estado estable.  
 DIAM Diámetro interno en pulgadas  
 PA Presión inicial en PSIA  
 PB Presión final en PSIA

Tarjeta 3 ( datos separados por comas)  
 QA Gasto inicial en lb/ seg  
 QB Gasto final en lb/ seg

Nota: Las tarjetas dos y tres se repiten para cada tramo.  
 El programa proporcionará una lista con los resultados en cada tiempo dando los valores de gasto y presión al inicio y al final de la tubería, entendiendo que una R adelante de la variable corresponde a la coma que se usó como convención para indicar el tiempo  $T_0 + \Delta T$ .

### 5.8 Ejemplo de cálculo

Se resolverá por medio de este programa de computadora una red sujeta a un estado transitorio, de la forma:



Las condiciones a estado estables son:

Linea	Gasto ( lb/ min)	Presión inicial en PSIA
A	50	50
B	60	70
C	110	39.86

La presión al final de la red es: 14.7 PSIA

Por las tuberías fluye etileno a 200°F.

Las presiones fijas varían de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$P_{ai} = P_{ai-1} + 5 \times \text{sen} (t + \epsilon)$$

$$P_{bi} = P_{bi-1} + 8 \times \text{sen} (t + \epsilon)$$

$$P_{fin,i} = P_{fin,i-1} + 3 \times \text{sen} (t + \epsilon)$$

Los resultados en los que se muestran los gastos correspondientes a cada punto, así como la presión en el nodo uno en cada tiempo se muestran al final del anexo IV

#### INDICE DE VARIABLES

- A Sección transversal de la tubería
- D Diámetro de la tubería
- f Factor de fricción Darcy
- gc Aceleración de la gravedad
- h altura
- MW Peso molecular del gas
- P Presión

Q	Gasto másico o en base masa
R	Constante de los gases
t	tiempo
$\Theta$	temperatura
V	Velocidad sónica
X	Distancia, longitud
Z	,Factor de compresibilidad
$\rho$	Densidad



CAPITULO VI

'Transiente de Temperatura en una linea de tuberia'





## TRANSIFNTE DE TEMPERATURA

### 1.- Objetivo:

El objetivo a perseguir en este capítulo, es el de efectuar un análisis de la variable temperatura como una función del tiempo.

En los capítulos anteriores mantuvimos a la temperatura como constante, y esto nos llevó a que variables como: densidad, y velocidad fueran función de la presión.

### 2.- Posibles cambios de la temperatura.

Si consideramos a la temperatura como una función del tiempo y la longitud, podemos entonces decir que 3 son los posibles cambios que puede tener esta variable, los casos son:

- a).- Cambio de la temperatura por pérdidas de calor a la atmósfera.
- b).- Cambios de la temperatura por efectos de la expansión del gas dentro de la tubería.
- c).- Cambios de la temperatura por efecto del mezclado con gas a distinta temperatura.

En los 2 primeros casos el efecto será mayor conforme aumenta la longitud, pero la presión también cambia con respecto al tiempo, también será función de este. El último caso nos lleva a pensar en un fenómeno casi puramente transicional pues al lograrse un mezclado completo a lo largo de la tubería, esta ya no cambiaría debido a este efecto, con respecto al tiempo, aunque cambie la presión, salvo en el caso de que la temperatura inicial volvería a cambiar.

### 3.- Cambio de la temperatura por pérdidas de calor a la atmós-

fera.

En este caso debemos considerar 3 coeficientes por separado.

- a).- Coeficiente de película del gas.
- b).- Coeficiente debido a la transmisión del calor por conducción.
- c).- Coeficiente debido a la transmisión del calor por conducción del aire.

Al final consideramos el coeficiente total de transmisión de calor  $U$  como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_k} + \frac{1}{h_c}} \quad 6.3.1$$

En donde  $h_g$  es el coeficiente de película del gas,  $h_k$  el coeficiente de conducción y  $h_c$  el coeficiente por convección. Las unidades de estos coeficientes son  $\text{BTU}/\text{h ft}^{20}\text{F}$ , el calor total perdido se puede obtener de :

$$Q = U \times A \times \Delta T_m \quad 6.3.2$$

En donde  $A$  es el área de transmisión en  $\text{ft}^2$  y  $T_m$  será la diferencia de temperaturas entre el gas y la atmósfera.

En el caso mas riguroso debemos considerar un  $\Delta T_{m1}$ , o sea una diferencia media logarítmica de temperaturas entre la temperatura del exterior y las temperaturas iniciales y finales del gas.

Pero si suponemos que en el tramo  $\Delta X$  no es mas grande el cambio de temperatura, podría ser una diferencia entre la temperatura inicial del gas y la temperatura ambiente en  $^{\circ}F$ . Para el cálculo de los coeficientes tendremos:

a).-Cálculo del coeficiente de película; Charles D. Haynes propone la siguiente ecuación:

$$h_g = 16.6 C_p \frac{(\rho_a V_a)^{0.8}}{D^{0.2}} \quad 6.3.3.$$

En donde:

$C_p$ .- Calor específico del gas a presión constante.

$D$  .- Diámetro de la tubería en ft.

$a$  .- Densidad el gas en  $lb/ft^2$ , estimada a una presión y temperatura en la tubería.

$V_a$ .- Velocidad en ft/ seg, estimada a presión y temperatura en la tubería.

$b$  .- Cálculo el coeficiente debido a la conducción.

En este no utilizaremos una ecuación, sino que será leído en tablas los datos de conductividad de distintos metales como por ejemplo la siguiente tabla:

TABLA 6.3.1

$$h_c = \text{BTU} / \text{hr Ft}^{20}\text{F}$$

Hierro puro	212	36.6
Hierro	212	34.6
Hierro dulce	216	26.8
Acero ( 1% de C)	212	25.9
Acero ( 1% de C)	64	26.2
Magnesio	32.212	92
Metal	<sup>o</sup> F	h <sub>c</sub>

c).- Cálculo del coeficiente de convección del aire. William A. Mc.Adams propone para el caso de convección natural la ecuación simplificada para aire

$$H_c = 0.27 (\Delta T / D_o)^{0.25}$$

En donde T será la diferencia de temperaturas entre la pared del tubo y el aire y D<sub>o</sub> será el diámetro externo de la tubería. Una vez conocido el calor perdido en el tramo de tubería, el cálculo de la temperatura final de la tubería será :

$$T_2 = T_1 - \frac{Q}{W_{cp}} \tag{6.3.4}$$

En donde  $W$  es el gasto en lb/ hr

Aquí se presenta el caso de que el gasto puede no ser el mismo al inicio de la tubería que al final de ésta, considerando por lo tanto un gasto promedio, o una cantidad promedio de gas que perdería este calor.

4.- Cambio de la temperatura por efecto de la expansión del gas dentro de la tubería.

Cuando un gas se expande modifica su energía interna, si la expansión es isoentálpica el cambio de la energía interna de un gas se manifestará en un cambio en la temperatura de éste. Esto es conocido como efecto de JOULE-THOMSON y la temperatura final se puede calcular por:

$$T_2 = T_1 - \mu (P_2 - P_1) \quad \dots \quad 6.4.1$$

En donde  $P_1$  y  $P_2$  son las presiones en lb/in<sup>2</sup> y  $\mu$  es el coeficiente JOULE-THOMSON.

Para el cálculo de este coeficiente propone la ecuación.

$$\mu = \frac{1}{C_p} \left( \frac{2a}{RT} - b \right) \quad 6.4.2$$

En el que las constantes  $a$  y  $b$  son constantes de "Van der Waals" y pueden ser obtenidas resolviendo ecuaciones simultáneas.

$$T_c = \frac{8a}{27 Rb} \quad P_c = \frac{a}{27b^2}$$

$$b = \frac{T_c \times P}{\epsilon P_c}$$

$$a = \frac{27P^2 T^2}{64P_c} \quad 4.4.3$$

Un aspecto importante es el que ésta ecuación se debe tomar con ciertas reservas pues para algunos gases como el Etileno puede presentar desviaciones peligrosas y llevarnos a resultados falsos. En estos casos será necesario utilizar la ecuación:

$$\mu = \frac{1}{C_p} \left[ T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V \right] \quad 6.4.4.$$

En el que V es el volúmen y  $\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$  es el coeficiente de expansión térmica.

5.- Cambios de la temperatura por efecto del mezclado de un gas a distintas temperatura.

Cuando dos gases con distinta cantidad energética se mezclan se debe de alcanzar una temperatura de equilibrio entre ambos. Si la cantidad de calor que cede uno es :

$$Q = m_1 C_{p1} (T_1 - T_c) \quad 6.5.1$$

Y la cantidad de calor que gana el otro es :

$$Q = -m_2 C_{p2} (T_2 - T_c) \quad 6.5.2$$

Si igualamos 6.5.1 con 6.5.2 tendremos que:

$$m_1 C_{p1} (T_1 - T_c) = -m_2 C_{p2} (T_2 - T_c)$$

$$m_1 C_{p1} T_1 - m_1 C_{p1} T_c = -m_2 C_{p2} T_2 + m_2 C_{p2} T_c$$

$$m_1 C_{p1} T_1 + m_2 C_{p2} T_2 = m_2 C_{p2} T_c + m_1 C_{p1} T_c$$

$$m_1 C_{p1} T_1 + m_2 C_{p2} T_2 = (m_2 C_{p2} + m_1 C_{p1}) T_c$$

$$T_c = \frac{m_1 C_{p1} T_1 + m_2 C_{p2} T_2}{m_2 C_{p2} + m_1 C_{p1}} \quad 6.5.3$$

### 6.- Análisis de una sección de tubería.

Si analizamos una sección de tubería de longitud  $\Delta X$  tenemos:

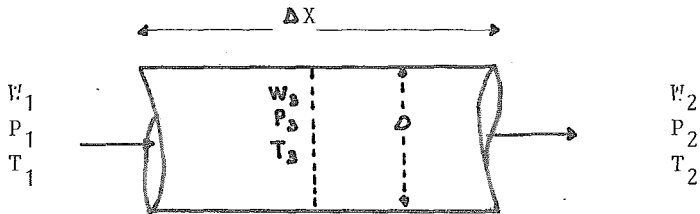


Fig 6.1

El gasto entrante es  $W_1$  y el gasto saliente es  $W_2$

El gasto que pierde calor a la atmósfera será  $W_1 + W_3 - W_2$

Los gastos a mezclarse son  $(W_1)$  y  $(W_3 - W_2)$

La tubería es de diámetro constante.

Si consideramos un intervalo de tiempo  $\Delta \theta$  tendremos que las pérdidas de calor a la atmósfera durante ese intervalo serán:

$$Q = U \times A \times T_m \times \Delta \theta$$

El área estará dada por:



$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

La U por la ecuación 6.3.1 y dentro de ésta hc por la tabla 6.3.1 el valor de  $h_c$  será:

$$h_c = 0.27 (\Delta T / D_o)^{0.25}$$

En donde  $\Delta T = T_{sup.} - T_{ambiente}$

Por último el cálculo de  $h_s$  dado por la ecuación 6.3.3 será necesario calcular  $C_p$ ,  $P_a$ ,  $V$  a las condiciones promedio de temperatura, esto es a  $T_3$  tendremos:

$$\rho_a = \frac{P_3 \times PM}{10.72 \times T_3} \quad 6.6.1$$

En donde PM es el peso molecular, con esto tenemos que

$$V_a = \frac{W_3}{A \times \rho_a} \quad 6.6.2$$

El cálculo de pérdidas de calor por expansión será

$$T_2 = T_1 \times \mu (P_2 - P_1)$$

Peró  $\mu$  debe evaluarse a  $P_3$  y  $T_3$

La temperatura de mezclado la obtendríamos por la fórmula

6.5.3. cambiando los subíndices por

$$T_c = \frac{m_1 C_{p1} T_1 + m_{3-2} C_{p3} T_3}{m_1 C_{p1} + m_{3-2} C_{p3}}$$

7.- Cálculo de propiedades:

Para poder evaluar a las condiciones 1 y 2 de la tubería, es necesario conocer los valores de T, P, y W. Esto puede ser evaluado mediante el modelo de cálculo que se discutió en el capítulo de una línea sometida a un transiente de presión.

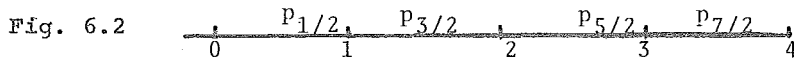
Las ecuaciones nos indican:

$$C_1 = \frac{13.6608 \times Z^2 \times T}{D^2 (PM)}$$

$$C_2 = \frac{1.04383 \times 10^{-6} \times \rho \times Z \times T}{PM \times D^5}$$

Estas dos constantes se calcularán antes al inicio de una línea y una sola vez, ahora será necesario calcularlas para cada tramo y en cada incremento de tiempo.

Si tenemos un modelo dividido en 4 celdas tendremos entonces que



$$Q_0^2 = 8 \times (P_0^2 - P_{1/2}^2) / C_2$$

$$Q_1^2 = 4 \times (P_{1/2}^2 - P_{3/2}^2) / C_2$$

$$Q_2^2 = 4 \times (P_{3/2}^2 - P_{5/2}^2) / C_2$$

$$Q_3^2 = 4 \times (P_{5/2}^2 - P_{7/2}^2) / C_2$$

$$Q_4^2 = 8 \times (P_{7/2}^2 - P_4^2) / C_2$$

Esto nos establece una diferencia en gastos y el cambio de las presiones con respecto al tiempo será:

$$\frac{dP_{1/2}}{dt} = -\frac{C_1}{L} (Q_1 - Q_0)$$

Las presiones medias se pueden calcular como

$$P_{1/2} = \sqrt{\frac{P_0^2 + P_1^2}{2}}$$

### 8.- Ejemplo de cálculo.

Se tiene una tubería de 1200 ft de longitud que se encuentra a una presión de 14,7 Psia con Etano a 77°F. Esta línea tiene un diámetro de 8 pulgadas y la temperatura ambiente es de 66°F, al tiempo t= 0.1 seg se abre una válvula que descarga etano a una presión de 80 pisa y una temperatura de 200°F.

Se establece entonces un transiente de presión y de temperatura. Para este cálculo emplearemos los modelos descritos en ese capítulo.

#### 8.1 División de la línea.

Se utilizará un módulo de 4 celdas, por lo tanto la tubería quedará dividida en 4 tramos de 300 ft cada uno.

Fig. 6.3



## 8.2 Datos necesarios.

Los datos que requiere el cálculo son:

Pc= Presión crítica = 708 PSI

Tc= Temperatura crítica = 549.7<sup>o</sup>R

PM= Peso molecular = 30.07

$\mu$ = Coeficiente JOULE THOMSON = 0.05 ( por diagrama Mollier)

Cp= Capacidad calorífica = 0.68 BTU/ lb<sup>o</sup>F

Z = Factor de compresibilidad que se calculará como:

$$Z = 1 + \frac{0.257}{P_c} \times \frac{P}{T} - 0.533 \frac{T_c}{P_c} \times \frac{P}{T} \quad 6.8.2.1$$

$\Delta\theta$  = Incremento de tiempo = 0.1 seg

## 8.3 Cálculos en el primer tramo a 0.1 seg

Z = 0.957

a P= 80 psia y T= 660<sup>o</sup>R

Constantes C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>

$$C_1 = \frac{13.6608 \times Z^2 \times T}{D^2 \times PM} = \frac{13.6608 \times (0.957)^2 \times 660}{0.444 \times 30.07}$$

C<sub>1</sub> = 617.86

El factor de fricción es de 0.014

$$C_2 = \frac{1.04383 \times 10^{-6} \times F \times Z \times T}{PM \times D^5} = \frac{1.04383 \times 10^{-6} \times 0.014 \times 0.957 \times 660}{30.7 \times 0.131687}$$

C<sub>2</sub> = 2.3309 x 10<sup>-6</sup>

Cálculo de la presión media.

$$P_{1/2} = \sqrt{\frac{P_o^2 + P_1^2}{2}} = \sqrt{\frac{(80)^2 + (14.7)^2}{2}} = 57.51$$

Cálculo del gasto inicial

$$Q_o^2 = 8 \times (P_o^2 - P_{1/2}^2) / C_2 L = 8 \times (80^2 - 57.51^2) / 2.3309 \times 10^{-6} \times 1200$$

$$Q_o = 2974 \text{ lb/min} = 49.56 \text{ lb/seg}$$

$$\text{En este caso } P_{3/2} = 14.7$$

Gasto en el nodo 1

$$Q_1^2 = 4 \times (P_{1/2}^2 - P_{3/2}^2) / C_2 L = 4 \times (57.51^2 - 14.7^2) / 2.3309 \times 10^{-6} \times 1200$$

$$Q_1 = 2102.5 \text{ lb/min} = 35.04 \text{ lb/seg}$$

Si se considera el  $C_p$  a  $77^\circ\text{F}$  como  $0.47 \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$

$$T_c = \frac{m_1 C_{p1} T_1 + m_2 C_{p2} T_2}{m_1 C_{p1} + m_2 C_{p2}}$$

$$m_1 = W_o \times T = 49.56 \text{ lb}$$

Masa en el volumen de  $\Delta X$

Volúmen del cilindro

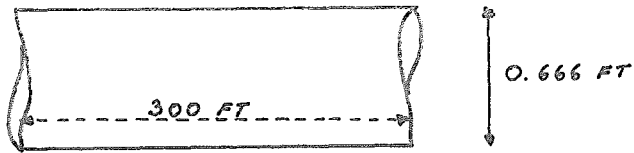


Fig. 6.4

$$\text{Area} = \frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{\pi}{4} \times 0.666^2 = 0.349 \text{ ft}^2$$

$$\text{Vol.} = \text{Area} \times \Delta X = 0.349 \times 300 = 104.71 \text{ ft}^3$$

Densidad a 14.7 lb ( que era la que había antes de abrir la válvula)

$$\rho = \frac{14.7 \times 30.07}{10.72 \times 537} = 0.07678 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{Masa en el cilindro } \rho \times \text{Vol} = 0.07678 \times 104.71 = 8.04 \text{ lb}$$

Gasto en el punto 1

$$m = W_1 \times 0.1 = 35.04 \times 0.1 = 3.504$$

Masa total al mezclar:

$$m_2 = 8.04 - 3.504 = 4.536 \text{ lb}$$

Temperatura de equilibrio.

$$T_e = \frac{(4.956 \times 200 \times 0.68) + (5.536 \times 77 \times 0.47)}{(4.96 \times 0.68) + (4.536 \times 0.47)} = 152.33^\circ\text{F}$$

Caída de temperatura por efecto de expansión.

$$\Delta T = \mu (P_0 - P_{1/2}) = 0.05 (80 - 57.51) = 1.1245^\circ\text{F}$$

Caída de temperatura por pérdida de calor

$$h_c = 0.27 (\Delta T/D)^{0.25} = 0.27 (77.66/0.666)^{0.25}$$

$$h_c = 0.5175$$

$$h_k = \text{de tablas} = 26.2$$

$$h_s = 16.6 \text{ Cp} \frac{(\rho_a V_a)^{0.8}}{D^{0.2}}$$

$$\text{Si } V_a = V_{1/2} \times \frac{1}{\rho_a} \times \frac{1}{\text{Area}}$$

$$\text{Entonces } \rho_a V_a = \frac{W_{1/2}}{\text{Area}}$$

$$W_{1/2} = \frac{W_o + W_1}{2} = \frac{49.56 + 35.04}{2} = 33.54$$

$$h_s = 16.6 \times 0.47 \times \left( \frac{33.54}{0.349} \right)^{0.8} / (0.666)^{0.2} = 326.29$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_k}} = \frac{1}{\frac{1}{326.24} + \frac{1}{0.5171} + \frac{1}{26.2}} = 0.507$$

$$Q = U \times A \Delta T = 0.507 \times 0.349 \times (77.66) = 1.9463 \text{ BTU/seg}$$

$$Q_{\text{total}} = Q \times \Delta T = 1.9463 \times 0.1 = 0.1946 \text{ BTU}$$

$$\Delta T_1 = \frac{0.1946}{8.04 \times 0.47} = 0.05^\circ\text{F}$$

Temperatura final será la  $T_c - \Delta T_E - \Delta T_1$

$$T = 152.33 - 1.1245 - 0.05 = 151.15^\circ\text{F}$$

Cálculo de la nueva presión media.

$$\Delta P_{1/2} = -\frac{C_1}{L} (Q_1 - Q_o) \Delta T = -\frac{617.86}{1200} (35.04 - 49.46) \times 0.1$$

$$\Delta P_{1/2} = -0.7476$$

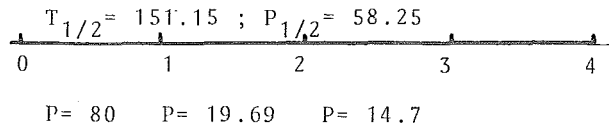
$$P_{1/2} = 57.51 + 0.7476 = 58.25$$

Cálculo de  $P_1$

$$P_1 ( P_{1/2}^2 \times 2 ) - P_0^2 = [ ( 58.25 )^2 \times 2 ] - ( 80 )^2$$

$$P_1 = 19.69$$

Nuestra línea queda ahora como:



Calcularemos ahora para un aumento mas de tiempo

Para tiempo = 0.2 seg

Si para el primer tramo las constantes son:

$$C_1 = 617.8$$

$$C_2 = 2.3642 \times 10^{-6}$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{8}{2.3642 \times 10^{-6} \times 1200}} \left( \sqrt{80^2 - 58.25^2} \right) = 2911.88 \text{ lb/min} = 48.53 \text{ lb/seg}$$

$$W_1 = \sqrt{\frac{4}{2.3642 \times 10^{-6} \times 1200}} \left( \sqrt{58.25^2 - 17.37^2} \right) = 2087.71 \text{ lb/min} = 34.79 \text{ lb/seg}$$

$$P_{3/2} = 17.37$$



La densidad a 57.51 PSI

$$\rho = 0.272 \text{ lb/ft}^3$$

$$\text{Masa en el cilindro} = 104.71 \times 0.277 = 28.48 \text{ lb}$$

$$\text{Masa salida} = 34.79 \times 0.1 = 3.479$$

$$\text{Masa total } m_2 = 28.48 - 3.479 = 25.00$$

$$\text{Cp a } 151.5^\circ\text{F} = 0.55$$

$$T_e = \frac{4.853 \times 200 \times 0.68 + 25 \times 0.55 \times 151.5}{4.85 \times 0.68 + 25 \times 0.55}$$

$$T_e = 160.88^\circ\text{F}$$

Por expansión

$$\Delta T_e = (80 - 58.25) \times 0.05 = 1.08$$

Por pérdidas de calor

$$h_c = 0.27 (151.5 - 66) / 0.666^{0.25} = 0.908$$

$$h_k = 26.2$$

$$h_s = 16.6 \times 0.55 \frac{\left[ \frac{48.53 + 34.79}{2} / 0.349 \right]}{(0.666)^2} = 454.15$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{454.55} + \frac{1}{26.2} + \frac{1}{0.908}}$$

$$U = 0.8758$$

Calor total

$$Q = 0.8758 \times 0.349 \times (151.5 - 66) = 26.15 \text{ Btu/seg}$$

Calor total en 0.1 seg

$$Q = 2.613 \text{ Btu}$$

$$T = \frac{2.613}{25.55} = 0.19 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\text{Temperatura total} = 160.88 - 0.908 = 158.89$$

Para el segundo tramo, la temperatura habrá cambiado por la expansión.

$$T_1 = 151.5 - (58.25 - 19.69) 0.5 = 149.57$$

Con estas condiciones las constantes son:

$$C_1 = 604.51$$

$$C_2 = 2.382 \times 10^{-6} \text{ con } F = 0.0152$$

$$\text{La } \rho = 0.08139 \text{ lb/ft}^3$$

Así

$$Q_2 = \sqrt{\frac{4}{2.382 \times 10^{-6} \times 1200} (17.37^2 - 14.7^4)} = 346.15 \text{ lb/min}$$

$$Q_2 = 5.769 \text{ lb/seg}$$

Si la masa en la tubería es 8.5222 y en este tiempo se van 0.5769 lb quedan 7.9432 lb.

La masa que entra en ese tiempo es el gasto  $W_1$  calculado anteriormente  $W_1 = 3.479$

Entonces la temperatura de equilibrio es :

$$T_e = \frac{3.479 \times 0.55 \times 151.5 + 7.9432 \times 0.47 \times 77}{3.479 \times 0.55 + 7.9432 \times 0.47}$$

$$T_e = 102.24^{\circ}\text{F}$$

Por expansión:

$$\Delta T = 0.13^{\circ}\text{F}$$

Por pérdidas de calor

$$h_c = 0.27 (77.66) / 0.666^{0.25} = 0.544$$

$$h_s = 351.95$$

$$h_k = 26.2$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{351.95} + \frac{1}{0.544} + \frac{1}{26.2}} = 0.5321$$

$$Q = 0.5321 \times 0.349 \times (77-66) = 2.042$$

$$T = \frac{0.2042}{8.522 \times 0.47} = 0.05$$

$$T_{\text{final}} = 102.24 - 0.13 - 0.05 = 102.06^{\circ}\text{F}$$

De esta forma se puede seguir haciendo el cálculo para cada uno de los siguientes tramos y para cada intervalo de tiempo.

Solo se trata de mostrar someramente el método que se propuso y las ecuaciones dadas, conociendo que el problema es mucho mas complicado.

C A P I T U L O V I I

" Cálculo del tiempo de desfogue de un sistema cerrado"



### 7.1.- Objetivos y alcances.

La idea principal de este capítulo es la de calcular el tiempo de relevo de un sistema cerrado, mostrando como varia la presión y el gasto con respecto al tiempo.

### 7.2.- Cálculo del tiempo de relevo en un sistema cerrado.

Si tenemos el caso especial de un recipiente cerrado en el que unicamente existe gas, y este se encuentra sometido a una sobrepresión suficiente para abrir una válvula de relevo, entonces se pueden hacer las siguientes - consideraciones.

Al abrir una válvula de seguridad en un sistema sometido a una sobrepresión, esta empieza a disminuir hasta que se alcanza otra vez la presión de ajuste de la válvula, en este momento cierra nuevamente.

Es necesario hacer incapie que la válvula abre y cierra instantaneamente, ó el tiempo en el que sucede esto puede ser despreciable.

Esta disminución de presión del sistema en el idioma ingles se le denomina como "BLOWDOWN", no siendo exacta la descripción que tenemos de ella en el español, podriamos pues utilizar la palabra "DESCARGA" como una aproximación no muy exacta, ya que la descarga de un tanque corresponde al gasto que sale del sistema mientras que la idea del blowdown es el intervalo entre la presión en que la válvula se abre y la presión en que se cierra (se discutió en el capítulo I que la válvula abre a una presión mayor que la de ajuste y cierra a una presión menor que está) en un tiempo dado, por lo tanto se utilizara esta palabra para mayor exactitud conceptual.

Llamaremos tiempo de Blowdown, al tiempo requerido por el sistema para pasar de una sobrepresión a una presión menor o igual a la presión de ajuste

de la válvula.

En la derivación que vamos a utilizar es necesario conocer el volúmen de gas a relevar, por eso es necesario que sea un sistema cerrado en el que se conozca su tamaño y por lo tanto se pueda saber el volúmen, y además al no tener una entrada de gas al sistema, la presión será función únicamente de el gasto saliente del sistema.

En este caso se escogió como sistema cerrado un tanque de almacenamiento de gas, que es sometido a un calentamiento y por lo tanto dentro del tanque se produce una sobrepresión que hace abrir a la válvula de relevo que contiene y por lo tanto se produce una baja de presión en el sistema.

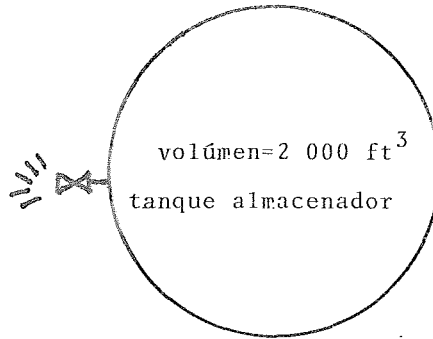
En el caso de no ser un solo tanque tendríamos que conocer el volúmen que ocupa el gas a la presión de relevo.

Hemos escogido también un sistema que solo contiene gas, pues si se tiene una vaporización en el sistema, la situación se complica pues esa será función de la presión y a su vez la presión será función de la cantidad de vapor presente en el sistema y en la derivación posterior de las ecuaciones no será posible hacer las consideraciones que en este caso se llevarán a cabo.

Nuestro caso, entonces se reduce a un solo tanque que contiene gas y se encuentra completamente cerrado a excepción de una válvula de seguridad en la que se conoce su presión de ajuste. Este tanque es sometido a un calentamiento y por lo tanto la válvula de seguridad abrirá debido a la sobrepresión. En la fig. 7.1.1 se muestra esquemáticamente el tanque al que nos

referimos.

Fig. 7.1



Aquí se presentará una derivación simple para poder obtener el perfil de tiempo contra la presión del sistema.

Utilizaremos el método propuesto por S.H. Grote (59), siguiendo los pasos que dió uno a uno y tratando de explicar y justificar la mayor parte de éstos y además por medio de la ecuación propuesta por Wayne C., Edmister y Milton Ludwig (52) que fué dada para obtener el gasto de gas que pasa a travez de un orificio, podremos llegar a una ecuación similar.

#### 7.2.1 Método de S.H.Grote (59)

Se inicia a partir de la ecuación para obtener el gasto má - sico en una tubería si se conoce la densidad, el área y la ve locidad en una parte de la tubería es:

$$W = \rho A v \quad 7.2.1$$

Si sustituímos la densidad por la ecuación de estado:

$$\rho = \frac{PM}{ZRT} \quad 7.2.2$$



Que es la ecuación de gas ideal corregida por medio del factor de compresibilidad del gas (Z).

Llegaremos a la ecuación 7.2.1 se puede convertir en:

$$W = \frac{A v P M}{Z R T} \quad \dots\dots 7.2.3$$

En este caso hay que considerar el flujo a travez del orificio de la válvula, asi que nuestra derivación la encaminaremos hacia esta sección. En un orificio podemos alcanzar el flujo sónico y en este caso se tendrán que evaluar las propiedades del gas a esas condiciones.

Para marcar que las propiedades estan a condiciones de flujo sónico les pondremos el subíndice s.

Es necesario agregar un factor de corrección para hacer el área de flujo como " Area efectiva de flujo" ya que a travez de un orificio la corrección está dada por el coeficiente de descarga, este coeficiente es adimensional y lo llamaremos Cv.

$$W = \frac{A_v C_N P_S V_S M}{Z_S P T_S} \quad \dots\dots 7.2.4$$

Si además tenemos que la velocidad sónica de un gas está dada como:

$$V_S = \sqrt{\frac{g_c K Z_S R T_S}{M}} \quad \dots\dots 7.2.5$$

Y si sustituimos la ecuación 7.2.5 en la ecuación 7.2.4 tendremos que el gasto másico del sistema estará dado por la e-

ecuación siguiente:

$$W = A_n C_n P_s \sqrt{\frac{g_c K M}{Z_s R T_s}} \quad \dots \quad 7.2.6.$$

Si además tenemos que para flujo sónico la relación de temperatura factor de compresibilidad es :

$$Z_s T_s = Z T \left( \frac{2}{K + 1} \right) \quad \dots \quad 7.2.7$$

Si sustituimos la ecuación 7.2.7 en la ecuación 7.2.6 para eliminar los valores de el factor de compresibilidad y la temperatura a condiciones sónicas, tendremos que:

$$W = A_N C_V P_s \sqrt{\frac{g_c K M}{Z P T}} \left( \frac{2}{K + 1} \right)^{-1} \quad \dots \quad 7.2.8$$

Si la presión sónica también puede ser definida en base a la presión del sistema y el valor de Cp/Cv dado por K de la forma:

$$P_s = P \left( \frac{2}{K + 1} \right)^{K/(K-1)} \quad \dots \quad 7.2.9$$

Si sustituimos entonces esta presión sónica en la ecuación 7.2.8 tendremos que:

$$W = A_V C_V P \sqrt{\frac{g_c K M}{Z P T}} \left( \frac{2}{K + 1} \right)^{-1} \left( \frac{2}{K + 1} \right)^{K/(K-1)} \quad 7.2.10$$

Si rearrreglamos la ecuación 7.2.10 tendremos que juntar los términos pertenecientes al Cp/Cv en uno solo de la manera si-

guiente:

$$W = A_V C_V P \sqrt{\frac{g_c K M}{Z R T}} \left[ \frac{2}{K + 1} \right]^{(K + 1) / 2(K - 1)} \quad \dots \quad 7.2.11$$

Si tenemos además que el cambio de la densidad con respecto al tiempo está dada por la ecuación diferencial:

$$dp/dt = W / V \quad \dots \quad 7.2.12$$

El gasto másico es también una función del tiempo y por lo tanto no puede ser evaluada esta ecuación diferencial mientras no se conozca como cambia el gasto con respecto al tiempo.

Por lo tanto empezaremos a sustituir una ecuación de estado de la forma siguiente:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{Z P T}{144 P M} \quad \dots \quad 7.2.13$$

Para poder calcular la densidad.

Si se separan las variables en la ecuación 7.2.12 y además sustituimos la ecuación 7.2.13 en lugar de la densidad de la ecuación 7.2.12 tendremos que:

$$dt = \frac{144 \times V \times M}{W Z R T} dp \quad \dots \quad 7.2.14$$

Ahora el tiempo es una función de la presión y si nos fijamos en la ecuación 7.2.11 notaremos que el gasto es también una función de la presión.

Volvamos pues a trabajar entonces sobre la ecuación por ZRT/

144x H y obtendremos:

$$\frac{WZPT}{144 M} = \frac{PCd}{144} Av \sqrt{\frac{gc K Z P T}{M}} \left[ \frac{2}{K+1} \right]^{(K+1)/2(K-1)} \dots 7.2.15$$

Las variables de factor de compresibilidad,  $C_p/C_v$  y temperatura son valores puntuales y sería necesario obtener una función de la presión para las tres, pero esto nos llevaría a una ecuación difícil de evaluar así que será necesario obtener una función en que estas variables no cambien lo suficiente como para considerarlos constantes.

Sabemos que un gas al expandirse disminuye normalmente su temperatura si es que no le entra calor del exterior, este cambio lo hará en base a su energía interna. A esto se le llama efecto Joule Thomson. En cambio el factor de compresibilidad generalmente aumenta un poco cuando disminuye la presión del sistema durante el Blowdown, así que si evaluamos el factor de compresibilidad a las condiciones iniciales podremos obtener el valor menor de esta.

Si también utilizamos el valor inicial de la temperatura y obtendremos el producto  $ZT$  notaremos que este varía muy poco durante el proceso en tal forma que podemos considerarlo como constante.

Le llamaremos  $Z'$  al menor valor del factor de compresibilidad calculado y  $T_1$  a la temperatura inicial del sistema.

El valor de  $K$  podemos tomarlo como promedio para poderlo considerar como constante, tomaremos pues un valor de 1.3 que se

puede considerar un buen valor y se acerca generalmente a la realidad.

Ahora podemos definir una ecuación asociada a una variable -llamada  $x_1$  de la siguiente manera:

$$x_1 = \frac{Cd A_N}{144} \sqrt{\frac{gc K Z^2 T_1}{M}} \left[ \frac{2}{K+1} \right]^{(K+1)/2(K-1)} \quad 7.2.16$$

Si evaluamos los términos constantes en la ecuación 7.2.16 tendremos que :

$$x_1 = 1.0335 Cd A_N \sqrt{\frac{Z^2 T_1}{M}} \quad \dots 7.2.17$$

Si ahora sustituimos el valor de  $x_1$  en la ecuación 7.2.14 podremos obtener que esta se reduce a :

$$dt = \frac{V}{x_1} \frac{dp}{p} \quad \dots 7.2.19$$

Ahora es posible integrar esta ecuación por ambos lados y podremos obtener que:

$$\int_0^t dt = \int_{p_1}^{p_2} \frac{V}{x_1} \frac{dp}{p} \quad \dots 7.2.20$$

Como ahora  $V$  y  $x_1$  son términos constantes el valor de la integración queda como:

$$t = \frac{V}{x_1} \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \quad \dots 7.2.21$$

Si ahora volvemos a sustituir el valor de  $X_1$  en la ecuación anterior llegaremos a :

$$t = \frac{V}{1.0335 \text{ Cd} A_N} \sqrt{\frac{M}{Z T_1}} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \dots 7.2.22$$

Y si esa ecuación la rearmamos nos quedará como:

$$t = \frac{0.9676 \text{ V}}{\text{Cd} A_N} \sqrt{\frac{M}{Z T_1}} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \dots 7.2.23$$

Con esto hemos conseguido una ecuación que nos da un perfil de presiones contra el tiempo y esto nos permite calcular el tiempo que tarda el sistema en pasar de una presión inicial a una presión final o bien, en un cierto tiempo dado que presión tenemos en el sistema.

7.2.2. Perfil de presiones a partir de las ecuaciones generales propuestas por W. Ed Mister y M. Ludwig (52).

Vemos el problema ahora desde otro punto de vista que son las ecuaciones propuestas por Ed Mister y Ludwig (52) para el cálculo del gasto másico que pasa a través de un orificio como el de una válvula de control o una válvula de relevo.

Para el cálculo del gasto másico a través de un orificio se propone la siguiente ecuación:

$$W = C \text{ Cd} A_N \rho \sqrt{\frac{M}{Z T}} \quad \dots 7.2.24$$

En donde la constante C la podemos definir de la siguiente ma-

nera:

$$C = 520 \sqrt{K \left[ \frac{2}{K+1} \right]^{(K+1)/(K-1)}} \quad \dots \quad 7.2.25$$

La ecuación 7.2.24 nos daría un gasto másico en lb/ hr por lo tanto es necesario dividirla entre 3600 para transformarla a lb/seg.

La ecuación 7.2.24 nos coloca en la misma posición que teníamos con la ecuación 7.2.11 habiendo partido de una ecuación un poco diferente, el procedimiento que se hará a continuación será similar al que se hizo anteriormente. Es necesario hacer notar que ambas ecuaciones no son iguales sino equivalentes. Multipliquemos la ecuación 7.2.24 por  $(ZRT/144 M)$  y tendremos:

$$\frac{WZRT}{144 M} = \frac{C Cd A_N P}{144 \times 3699} \sqrt{\frac{ZT}{M}} R \quad \dots \quad 7.2.26$$

Nuevamente Z y T son valores puntuales pero el producto  $Z \cdot T_1$  es mas o menos constante, por lo tanto se podrá sustituir en la ecuación 7.2.26 y si nuevamente llamamos  $X_1$  a la parte constante tendremos :

$$X_1 = \frac{C Cd A_N}{144 \times 3600} \sqrt{\frac{Z \cdot T_1}{M}} R \quad \dots \quad 7.2.27$$

Si reducimos las constantes numéricas a una sola tendremos:

$$X_1 = 0.00298 C Cd A_N \sqrt{\frac{Z \cdot T_1}{M}} R \quad \dots \quad 7.2.28$$

Si sustituimos la ecuación 7.2.28 en la ecuación 7.2.26 tendremos la ecuación:

$$\frac{W Z P T}{144 H} = P X_1 \quad \dots 7.2.29$$

Notamos que la ecuación 7.2.29 es similar a la ecuación 7.2.18 aunque los valores de  $X_1$  son distintos en ambas ecuaciones, pero el procedimiento de integración es similar y no tiene caso repetirlo pues el resultado será el mismo que en el caso anterior y la ecuación a la que llegaremos será:

$$t = \frac{V}{X_1} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \dots 7.2.21$$

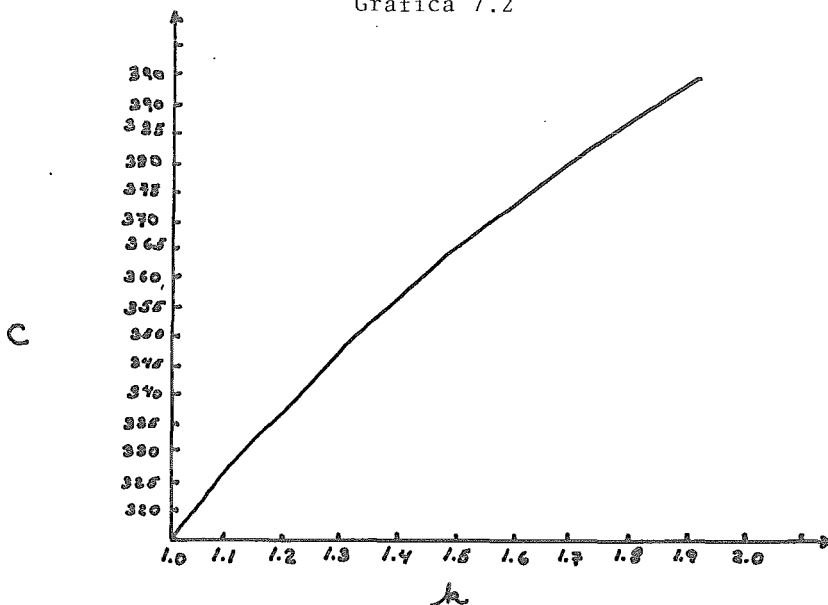
Sustituyendo el valor de  $X_1$  en esta ecuación tendremos que:

$$t = \frac{334.534 \times V}{C_d A_N C} \sqrt{\frac{M}{Z T_1}} \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \dots 7.2.30$$

Para obtener los valores de C como una función de K se puede usar la gráfica 7.2.1



Gráfica 7.2



Comparando la ecuación 7.2.30 con la ecuación 7.2.21 encontramos que son similares en todo excepto en el valor de las constantes. Veamos que tanto se aproximan estas:

Si  $k$  es igual a 1.3 el valor de la constante  $C$  será de 346.97 entonces el valor de las constantes numéricas en la ecuación 7.2.30 será de 0.9670 contra el valor de 0.9676 de la ecuación 7.2.21 por lo tanto darán los mismos valores de presión contra gasto, pero la ecuación 7.2.30 es superior debido a que en esta ecuación podemos tener distintos valores de  $k$  y no solamente el valor de 1.3 de la ecuación 7.2.21. Por lo tanto partiendo de una ecuación de cálculo de un orificio pudimos superar a la ecuación propuesta por S.H. grote y ahora estamos en posibilidad de calcular un perfil de presiones contra el tiempo. En el ejemplo siguiente mostraremos como se puede obtener este perfil.

### 7.2.3 Ejemplo de cálculo.

Un ejemplo sencillo es el siguiente:

Se tiene un gas a presión de 250 Psia y una temperatura de 200°F con un peso molecular de 30 y un factor de compresibilidad de 0.98 a esas condiciones y una K de 1.2 en un volumen de 500 ft<sup>3</sup>. Se trata de calcular el perfil de presiones vs tiempo, si el tanque se despresuriza hasta la presión atmosférica por que se abre una válvula con un orificio de 2 in (area=0.02181 ft<sup>2</sup>). Un buen valor de Cd se puede tomar como 0.95

Sustituyendo los valores en la ecuación 7.2.25 para obtener el valor de C tendremos que:

$$C = 520 \sqrt{1.2 \cdot \left[ \frac{2}{1.2+1} \right]^{1.2+1} / 1.2 - 1} = 337.23$$

Sustituyendo en la ecuación 7.2.30 tenemos

$$t = \frac{335.534 \times 500}{0.02181 \times 0.95 \times 337.23} \sqrt{\frac{250}{0.98 \times 660}} \ln \left( \frac{250}{P_2} \right)$$

Efectuando las operaciones llegamos a

$$t = 5171.025 \ln \left( \frac{250}{P_2} \right)$$

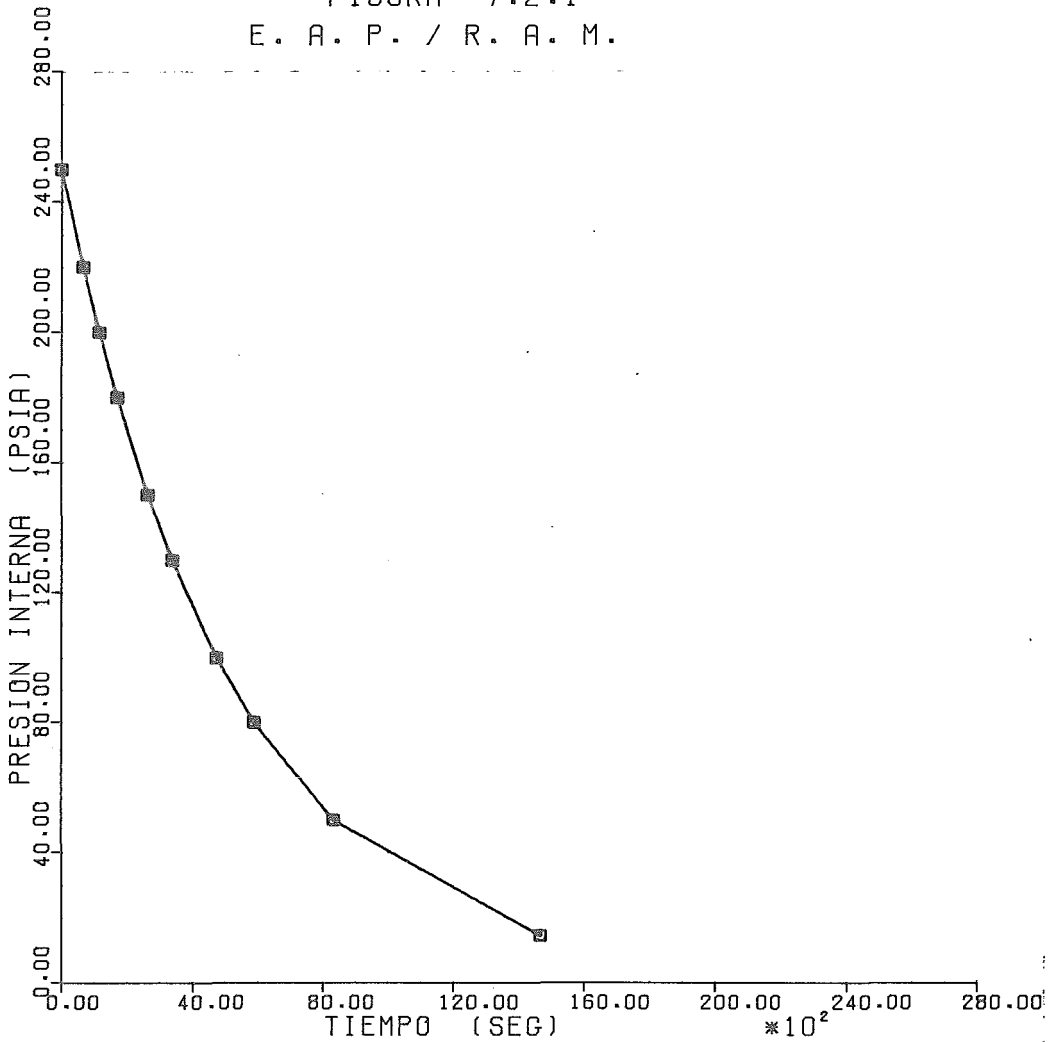
Ahora solamente será necesario sustituir los valores de presión para obtener el tiempo en el que se producen estos.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.2.1

PERFIL DE PRESIONES VS TIEMPO

FIGURA 7.2.1

E. A. P. / R. A. M.



□ VALORES DE PRESION

TESIS PROFESIONAL  
FACULTAD DE QUIMICA

tabla 7.2.1

Presion ( psia)	tiempo (seg)
200	1153.88
150	2641.49
100	4738.16
50	8322.44
25	11906.72
20	13060.60
15	14548.21
14.7	14652.68

En la fig. 7.2.1 se muestra la gráfica del perfil de presiones contra tiempo.

Notamos que el tanque tardaría 4.07 horas en alcanzar la presión atmosférica.

DIRECTORIO DE VARIABLES

- A Area transversal de la tubería
- Cu Coeficiente de descarga del orificio
- gc Aceleración de la gravedad
- K Coeficiente isoentrópico
- M Peso molecular del gas
- T Temperatura absoluta
- t Tiempo
- P Presión
- R Constante de los gases
- v Velocidad

W Gasto másico

$\rho$  Densidad

El subíndice s significa condiciones sónicas del gas.

C A P I T U L O V I I I

" Análisis de la estabilidad de las ecuaciones en  
base a un multiplicador inercial'



### 8.1 Objetivo.

En los distintos métodos utilizados en los capítulos anteriores como son: el método de Pipertran ( 30, 31 ) así como los métodos de Goacher (32), Streeter ( 34,35) y Rachford (36) se hace la suposición de que el término de energía cinética en la ecuación de balance de energía es despreciable con respecto a los otros términos de la ecuación (energía potencial perdida debido a la fricción), con el objeto de facilitar la integración de las ecuaciones diferenciales parciales. Esto si no es totalmente cierto, en la mayoría de los casos no conduce a un error apreciable, pero cuando los cambios en la energía cinética del gas son considerables, entonces, el eliminar este término nos puede conducir a graves errores.

W. Yow (29) propone el uso de un multiplicador inercial para darle una mayor importancia a el término de energía cinética además muestra un diagrama de error para tratar de disminuir la inestabilidad de las ecuaciones al combinar el cálculo del multiplicador inercial con los máximos incrementos de tiempo que es posible tomar. En este capítulo analizaremos este método del cual es necesario hacer notar que usa el método de las características visto en el capítulo V para resolver las ecuaciones diferenciales parciales.

### 8.2 Método de W.Yow (29)

Las técnicas de métodos numéricos que se utilizan para el cálculo de transiente de presión, principalmente el de las diferencias finitas, presentan el problema de la truncación o rompimiento debido a la discretización en las variables ya sea



en un método implícito o explícito, que en algunos casos aquí valdría a despreciarlos.

Si tenemos la ecuación de balance de energía vista en otros capítulos como:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{1}{g_c A} + \frac{P g_c \sin \theta}{v^2} + \frac{f v^2 Q^2}{g_c^2 2DA^2} = 0 \quad \dots \quad 8.2.1$$

Y la ecuación de continuidad, también es discutida en los capítulos anteriores:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{v^2}{g_c A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots \quad 8.2.2$$

Cuando se toman  $\Delta X$  y  $\Delta T$  muy grandes, las ecuaciones pierden estabilidad y el error aumenta, pero si se toman demasiado pequeños, el número de cálculos es el que aumenta y aún con el uso de una computadora el tiempo de cálculo puede ser prohibitivo.

El método implícito de cálculo de una red de tubería, o sea el calcular toda la red de tubería en una sola vez (este se discutió en el capítulo V), no presenta el problema del tiempo en una forma tan crítica como el método explícito, aunque ocupa más área de memoria y el problema de la inestabilidad se acentúa aun más debido a la unión de una línea con las otras. El método explícito o sea calcular línea por línea en una red de tubería (explicado en el capítulo IV), no presenta el problema de área de memoria debido a que hasta que se ha calculado una línea se procede a calcular la otra y no hay que almacenar

los datos de todas pero si presenta un problema serio de tiempo de cálculo sobre todo si se tiene una red grande de tuberías. ¿ Hasta donde podemos aumentar los valores de  $\Delta X$  y  $\Delta T$  ?

Para poder contestar a esto es necesario introducir un multiplicador inercial  $\alpha$  que nos va a intervenir en el término de energía cinética en la ecuación de balance de energía que en algunos casos se ha despreciado, como en el capítulo IV, o no se le ha tomado como una parte importante en los cálculos.

Si en lugar de eliminar el término  $\partial Q / \partial t$  lo vamos a multiplicar por el multiplicador inercial elevado al cuadrado, que en algunos casos equivaldría a despreciarlo tendríamos que la ecuación de balance de energía se convertiría en :

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\alpha^2}{g_c} \frac{\partial Q}{A \partial t} + \frac{P g_c \text{ sen } \theta}{v^2} + \frac{f v^2 Q^2}{g_c^2 2 D A^2} = 0 \quad \dots \quad 8.2.3$$

Un método para solucionar las ecuaciones diferenciales parciales que tenemos es convertirlas en dos pares de ecuaciones diferenciales totales ordinarias llamadas  $C^+$  y  $C^-$

$$C^+ \left\{ \begin{array}{l} \frac{\alpha}{v} \frac{dP^2}{dt} + \frac{2}{g_c} \frac{P^2}{A} \frac{dQ}{dt} + 2 \frac{P^2 g \text{ sen } \theta}{v^2} + \frac{f v^2 Q^2}{D A^2 g_c^2} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = \frac{v}{\alpha} \\ \vdots \end{array} \right.$$

$$C^- \left\{ \begin{array}{l} \frac{\alpha}{v} \frac{dP^2}{dt} - \frac{2}{g_c} \frac{P^2}{A} P \frac{dQ}{dt} - \frac{2 P^2 g \sin \theta}{v^2} - \frac{f v^2 Q^2}{D A^2 g_c^2} \\ \frac{dx}{dt} = - \frac{v}{\alpha} \end{array} \right.$$

De estas ecuaciones obtenemos que  $\Delta t = \alpha \Delta x / v$

Si en la solución de un problema  $\Delta X \rightarrow 0$  y  $\alpha \rightarrow 1$  entonces el error posible solo se debe a  $\Delta T$ . La solución envuelve un complejo problema aritmético pero en base a la experimentación hecha por W.Yow (29) se obtiene un diagrama de error que cumple con la relación.

$$\Psi \sqrt{P_d (1 + \sigma^2 m^2 \omega^2)} / m \omega \Delta Q = f(\alpha, \sigma m h / \sqrt{P_d}) \quad \dots \quad 8.2.4$$

Los parámetros adimensionales están definidos como:

$$\sigma = \frac{f L}{2 D} \qquad m = \frac{v Q_0}{g_c A P_0}$$

$$\Delta q = \frac{Q}{Q_0} \qquad h = \frac{x}{L}$$

Las variables  $\Delta Q$ ,  $Q_0$  y  $\omega$  se obtienen de la variación del gasto según la relación.

$$Q(L, t) = Q_0 + \Delta Q \sin \omega t$$

El término  $\Psi$  es el error en la presión y  $P_d$  es la presión inicial a estado estable en forma adimensional.

Mediante el siguiente diagrama de error es posible calcular los valores de  $\Delta X$  y  $\Delta T$  que se van a utilizar en un problema de terminado.

$$\frac{\Psi \sqrt{P_d (1 + \sigma^2 m^2 \omega^2)}}{m \omega \Delta Q}$$

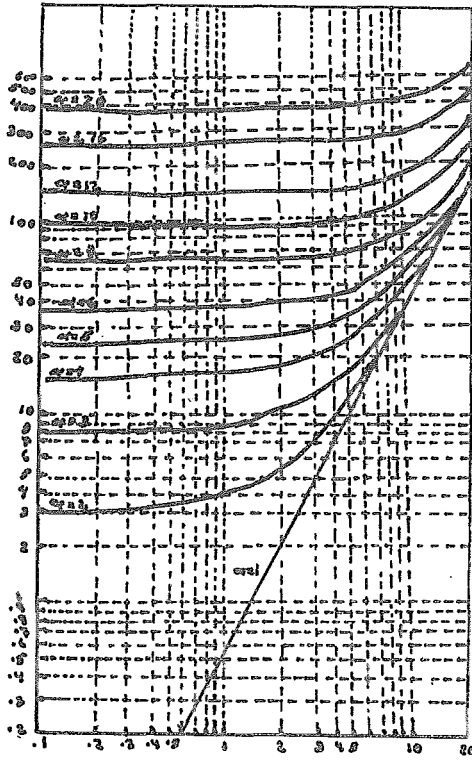


Fig. 8.1

ref. 29

$$\frac{\sigma m h}{\sqrt{P_d}}$$

Diagrama de error

El procedimiento es como sigue:

Se calculan las constantes adimensionales. Se supone un valor de  $h$ , con este se obtiene un valor de  $\sigma$  de la figura y este nos da un valor de  $\Delta T$ . Se sigue este procedimiento por ensayo y error hasta obtener el mayor valor de  $\Delta T$ , ( el valor de  $\Delta X$  se obtie-

ne del valor de h).

Un ejemplo simple sería:

Un sistema a una presión de entrada de 500 psias y un gasto variable según la relación.

$$Q_0(t,0) = ( 80 + 20 \text{ sen } (2\pi/60 t) )$$

Los parámetros son:

$$L = 12 \text{ millas}$$

$$P = 0.012$$

$$D = 1.2 \text{ Ft}$$

$$V = 1190 \text{ FPS}$$

Los parámetros adimensionales fueron calculados como

$$\sigma = 316.8$$

$$q = 0.25$$

$$P_d = 0.874$$

$$m = 0.019$$

$$\omega = 0.092$$

Si el valor de  $\Psi$  es entonces : 0.01

$$\Psi \sqrt{P_d (1 + \sigma^2 m^2 \omega^2)} / m \omega \Delta Q = 25$$

$$h \sigma m / \sqrt{P_d} = 6.54$$

Si  $h = 0.5$  entonces del diagrama de error  $\alpha = 4.5$

$$\Delta X = 0.5 \times 12 = 6 \text{ millas}$$

$$\Delta t = \frac{4.5 \times 6}{0.2254} = 119.77 \text{ seg}$$

Si  $h = 1.5$  entonces  $\omega = 0.9$

$$\Delta X = 12 \times 1.5 = 18 \text{ millas}$$

$$\Delta t = \frac{0.9 \times 18}{0.2254} = 71.87 \text{ seg}$$

Si  $h = 1$  entonces  $\omega = 3$

$$\Delta X = 12 \times 1 = 12 \text{ millas.}$$

$$\Delta t = \frac{3 \times 12}{0.2254} = 160 \text{ seg}$$

Por lo tanto el mayor valor es para  $\omega = 3$  en donde

$$\Delta X = 12 \text{ millas}$$

$$\Delta t = 160 \text{ seg.}$$

#### Directorio de Variables.

- A Area transversal de la tubería
- D Diámetro de la tubería
- F Factor de Fricción
- gc Aceleración de la gravedad
- h Parámetro adimensional
- m Parámetro adimensional
- $P_D$  Presión inicial a estado estable
- P Presión
- Q Gasto másico
- $\omega$  Parámetro adimensional
- X Distancia

t tiempo

$v$  Velocidad

$\theta$  Angulo con respecto a la horizontal

$\delta$  Error en el término de la presión

$\alpha$  Parámetro adimensional.

## C O N C L U S I O N E S





En base a los resultados obtenidos en la presente tesis, al analizar los diversos métodos de cálculo y apoyados en los resultados que arrojan los programas de computadora creados y las gráficas mostradas en el anexo cinco llegamos a las siguientes conclusiones:

Existen dos tipos de estados transitorios de presión y gasto másico que son: transientes rápidos y transientes lentos.

Un transiente rápido es aquél en el que las variaciones ocurren en unos cuantos segundos o a lo mas en unos cuantos minutos, esto ocurre cuando las longitudes de tubería recta son pequeñas o gastos másicos y diferencias de presiones muy significativas para la línea. A diferencia el transiente lento es aquél en que los cambios de presión y/o gasto másico ocurre durante varias horas e incluso días debido a las longitudes grandes de tubo recto.

La mayoría de los algoritmos de cálculo para el estado transitorio corresponden a transientes lentos.

El estado transitorio que se presenta durante el desfoque correspondiente a una falla en una planta industrial, en las válvulas de seguridad sobre el cabezal, corresponde definitivamente a un transiente rápido ya que la diferencia entre las presiones de relevo y las contrapresiones en el cabezal es muy significativa, además, las longitudes de tubería recta, por lo general, no sobrepasan los mil pies y como se pudo comprobar, de acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo cuatro correspondientes a un transiente de presión en una línea de tubería y tal como se puede observar en las figuras II-V y III-V del anexo V el régimen

permanente de flujo se alcanza en unos cuantos segundos y aun considerando toda la red, el tiempo en que se alcanza este régimen está entre uno y cinco minutos dependiendo del sistema. Uno de los principales objetivos de este estudio, era el de comprobar si la consideración de flujo a régimen permanente en el diseño de los sistemas de relevo de presión, era correcta o si el sistema quedaba sobredimensionado debido a que en el tiempo normal de la falla ( de 20 a 30 minutos segun consta en el API rp 520 (47)) no se alcanzarán las presiones correspondientes al estado estables.

De acuerdo a lo que se escribió al inicio de estas conclusiones, el que en un sistema de relevo de presión se tenga un transiente rápido y debido a que el tiempo de alcance del régimen permanente, en estos sistemas, es significativamente inferior al tiempo normal de la falla, deducimos que el calcular el sistema de relevo de presión haciendo la suposición de que el estado estable es alcanzado instantáneamente nos lleva a resultados seguros y correctos sin que el equipo quede sobrediseñado. Por lo que vemos que resultaría poco práctico el continuar enfocando el estudio de transiente de presión hacia este tipo de sistemas, por lo que el enfoque final que se le dió a este estudio tendió mas hacia la descripción general de los transientes de presión y sus formas de resolverse.

Se pudo comprobar que los principales métodos de resolución de las ecuaciones básicas de transiente están encaminadas hacia los transientes lentos y oscilatorios ( esto último, tal como fué explicado en el capítulo III, se presentará el estado

transitorio en los tiempos intermedios en que dure este, pero al concluir o al obtener un valor promedio, el régimen se podrá considerar como permanente), por lo tanto fué necesario adaptar los modelos hacia los casos que se tenían, con el consiguiente aumento en la inestabilidad de las ecuaciones.

De los métodos de resolución, de las ecuaciones básicas, observados y aplicados, se pudo comprobar, que el algoritmo mas estable es el que corresponde al programa de Pipertran (31) visto en el capítulo IV, que además es el mas usado actualmente, sin embargo también puede presentar problemas de inestabilidad, como se puede observar en la figura X - V del anexo V en el que para obtener un perfil de presiones se presentan brincos en forma de escalera.

En otros métodos como el de las diferencias finitas presentado por Stoner (28) para la resolución de las ecuaciones básicas, el problema de inestabilidad fue mucho mas grave como se puede ver en la figura XI - V del anexo V, en el que se pretende llegar a un valor de estado estable, sin embargo la solución quedando saltos alrededor del valor esperado sin llegar nunca a alcanzarlo.

También se presentaron problemas serios de convergencia cuando se utilizó el método de Newton-Raphson pero estos fueron solucionados al rearrreglar las ecuaciones para quitar las posibles indeterminaciones.

La inestabilidad de las ecuaciones se puede reducir si se disminuyen los incrementos de tiempo y distancia, pero esto puede hacer aumentar peligrosamente el tiempo de cálculo.

Puede ser utilizado también el método de las características, visto en el capítulo V, y presentado por W Yow (29) y por V.L. Streeter (35) para disminuir los problemas de inestabilidad. En un análisis final de resultados, se puede observar que en el capítulo II se obtuvo una comparación de varias ecuaciones de flujo a estado estable lo que nos permitió crear un programa de computadora que efectúa el cálculo de los sistemas de relevo de presión de una manera mas eficiente, usando la ecuación adiabática, y tal como se concluyó anteriormente de una forma segura.

El capítulo III fué utilizado para explicar las ecuaciones básicas en el transiente de presión y gasto másico, viendo su deducción, lo que nos llevó a poder obtener soluciones que se presentaron en los capítulos IV y V en los que se comparó primero una red simple de tubería y después una red simple y de ésta forma tener una idea de lo que sucede al desfogar las válvulas en un sistema de relevo.

El capítulo VI mostró solamente un esbozo de algo que puede ser tratado mas ampliamente que es el análisis del transiente de temperatura en una línea que conduce gas.

El capítulo VII nos mostró el caso especial de un tanque cerrado sujeto a una salida de gas al abrir una válvula, pudiéndose calcular el tiempo en que se iguala la presión del tanque con la exterior ( esto puede ser aplicado a una tubería cerrada), además se vió la forma de minimizar el error y la inestabilidad de las ecuaciones básicas cuando se usa algun método numérico en su resolución, esto último en el capítulo VIII.

Creemos sinceramente que queda abierto un gran campo por estudiar en los sistemas sujetos a un transiente de presión y gasto, y no solo ya en una fase sino en dos fases o con flujos no newtonianos, principalmente en aquéllos sistemas sometidos a transientes lentos, como en las redes de distribución de gas y que a medida que se vayan descubriendo algoritmos de cálculo que presenten menores problemas de inestabilidad y mayor exactitud va a ser posible predecir las acciones a tomar en este tipo de redes desde una computadora y adelantándose a los sucesos.

Consideramos en general, que los dos objetivos principales que nos habíamos propuestos eran: el someter a los sistemas de relevo de presión a un estudio desde el punto de vista transiente y poder observar su comportamiento y el dar una idea general sobre un tema poco conocido como es el régimen no permanente de flujo, creemos que fueron cumplidos, sino de una forma total debido a nuestras propias limitaciones, si de una forma satisfactoria.

Dejamos pues abierto el estudio para soluciones aun mas complejas de las que se vieron aquí y métodos de cálculo mas sofisticados que proporcionen una mayor confiabilidad en los resultados.



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





## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Pressure-relief valves for process plants  
Robert Kern, Hoffman-La Roche Inc.  
Chemical Engineering, Febrero 28 de 1977 pag. 187
- 2.- How to side Vapor-Relief systems-1  
Joseph conison.  
The oil and Gas Journal, Marzo 8 de 1954 pag 119
- 3.- How to side Vapor-relief systems-2  
Joseph conison.  
The oil and Gas Journal, Marzo 15 de 1954 pag. 155
- 4.- Design of Gas Pipeline Blowdowns  
H.A. Altorfer  
The oil and Gas Journal,
- 5.- Good Procedures Save Lives, Money  
Charles j. Leeah, The Litwin corp. Houston  
Hydrocarbon Processing, Enero de 1969 vol. 48 No 1 pag. 149
- 6.- Pressure-relief Systems  
Marx Issacs, Flour Corp.  
Chemical Engineering, Febrero 22 de 1971 pag. 113
- 7.- New relief valve Gas ecuations  
I.L. Wissmiller, Chicago Bridge & Iron Co., Oak Brook, 111  
Hydrocarbon Processing Mayo de 1970 pg. 123
- 8.- Relief System Optimization  
H. Simons, and S.J. Thomson, Fluor Corp., Los Angeles, Calif.  
Chemical Engineering Progress Vol. 68 No 5 Mayo de 1972 pag.52
- 9.- Halting Products Loss Through Safety relief valves

- G.F. Bright, Anderson, Greenwood & Co. Bellaire, Tex.  
Chemical Engineering Progress Vol 68 No 5 Mayo de 1972 pag.59
- 10.-Reduce relief Systems costs  
T.W. Whelan y S.J., Thomson, Fluor Engineers  
Hydrocarbon Processing Agosto de 1975 pag. 83
- 11.-Size Rupture Discs by Nomograph  
Corrado Alba, Montedison, Milan, Italy
- 12.-Rupture Discs Selection  
D.S. Kayser, Crawford & Russell Inc. Houston Tex.  
Chemical Engineering Progress Vol 68 No. 5 Mayo de 1972 pag 64
- 13.-Safety & Instrumentation Systems.  
A.H. Hix, Union Carbide Corp., South Charleston W. Va.  
Chemical Engineering Progress Vol 68 No. 5 Mayo de 1972 pag. 43
- 14.-How to size vapor-relieving systems 3  
Joseph Conison  
The oil and gas journal, marzo 29 de 1954 pag. 123
- 15.-How to size relief-valve Discharge Headers -1  
Nicholas Steskko  
The oil and Gas Journal febrero 13 de 1956 pag. 141
- 16.-Análisis de una red de distribución de gas en régimen variable  
F. Sanchez A. Subdirección de tecnología de explotación IMP  
Revista del instituto Mexicano del petróleo Julio de 1977 pag. 20
- 17.-Pressure Drop in Vapor-Relief Systems  
R.W. Hissen, polimer Corp, Ltd.  
Chemical Engineering Octubre 29 de 1962 pag. 101
- 18.-New Method speeds Pressure relief manifold design  
Henry Y. Mak, Fluor Canadá Ltd

- The oil and Gas Journal Noviembre 20 de 1978 pag. 166
- 19.-Calculate Z's for sour gases  
E. Wichert, K. Aziz  
Hydrocarbon Processing mayo de 1972 pag. 119
- 20.-How to Compute Pipe Size  
Robert Kern-La Roche Inc.  
Chemical Engineering Enero de 1975 pag. 115
- 21.-How to size Piping and Components as Gas Expands at flow conditions  
Robert Kern, Hoffman-La Roche Inc.  
Chemical Engineering Octubre 13 de 1975 pag. 125
- 22.-Pipe Systems for Process Plants  
Robert Kern-Hoffman-La Roche Inc.  
Chemical Engineering Noviembre 10 de 1975 pag. 209
- 23.-Friction-Factor equation spans all fluid-flow regimens  
Stuarts W. Churchill, University of Pennsylvania  
Chemical Engineering Noviembre 7 de 1977 pag. 91
- 24.-Preliminary Pipeline sizing  
George R. Kent, Consultant.  
Chemical Engineering Septiembre 25 de 1978 pag. 119
- 25.-Pressure Drop in long Viscous-Fluid Pipelines  
Klaus Lothholz W., Empresa Nacional del Petróleo, Chile.  
Chemical Engineering Enero 7 de 1963 pag. 89
- 26.-Sizing Piping for Process Plants  
Larry L. Simpson, Union Carbide Corp.  
Chemical Engineering Junio 17 de 1968 pag. 192
- 27.-Simulating The Operatio of natural gas Distribution System W.linear.  
flow model, G.E. Slater, J.C. Erdle, D.L. Raphael

- The Journal of Canadian Petroleum, Technology , Octubre 1977 pag.57
- 28.-Network System Transient Calculations by implicit method  
E. Benjamin Wylie, Michael A. Stoner, Victor L. Streeter.  
Society of Petroleum Engineers Journal Diciembre de 1971 pag. 357
- 29.-Numerical Error on Natural Gas Transient Calculations  
W.Yow, Bechtel Incorporated, San Francisco Calif.  
Transactions of the ASME Junio de 1972 pag. 422
- 30.-PIPERTRAN IV : a useful tool in transient flow studies part 1  
G. Paul Distefano, Computer Complex Inc.  
The oil and Gas Journal, enero 11 de 1971 pag. 68
- 31.-PIPERTRAN IV permits faster transient flow calculations part 2  
G. Paul Distefano , computer complex Inc.  
The oil and Gas Journal, Febrero 1 de 1971 pag. 88
- 32.-Steady and transient Analysis of gas flow in Networks  
P.S. Goacher, London Research Station, The gas Council  
I.G.E. Journal, abril de 1970 pag. 242
- 33.-Transient Flow in Gas Transmission Lines  
R.H. Olds, B.H. sage  
Petroleum Transactions, AIME vol, 192, 1951 pag. 217
- 34.-Unsteady State Natural Gas Calculation in complex pipe systems  
E.B. Wylie, V.L. Streeter, M.A. Stoner  
Society of petroleum engineers journal, febrero 1974 pag. 35
- 35.-Natural Gas Pipeline transient  
V.L. Streeter, E.B. Wylie  
Society of petroleum engineers journal, diciembre 1970 pag. 357
- 36.-A fast, Higly Accurate Means of Modeling Transient Flow in G. pipelin  
Systems by Variational Methods

- H.H. Rachford, jr. Told Dupont  
Society of petroleum engineers journal, abril 1974 pag. 165
- 37.-Simplified Flare System Sizing  
Soen H.Tan  
Hydrocarbon Processing octubre 1967 Vol. 46 No.10 pag. 149
- 38.-Flare System Design Simplified  
Soen H. Tan  
Hydrocarbon Processing, Enero 1967 Vol. 46 No.1 pag. 173
- 39.-Chemical Engineers Handbook  
Robert E. Perry , Cecil H. Chilton  
McGraw-Hill Book Company, quinta edición.
- 40.-Flow of Fluids Through valves, fittings and pipe  
Crane Co.  
Technical Paper No. 410
- 41.-Equation for fluid friction factor  
Jude T. Sommerfeld  
Hydrocarbon Processing Julio 1967 pag. 135
- 42.-Computer Program Sizes Pipe  
Davied L.Deslesdernier , Jude T. Sommerfeld  
Hydrocarbon Processing Marzo 1972 pag.112
- 43.-Friction Factors for Pipe Flow  
Lewis F. Moody  
Transactions of de A.S.M.E., Noviembre 1944 pag. 671
- 44.-Generalized Methods for AP calculations  
Jairo Giraldo  
Hydrocarbon Processing, Noviembre 1968 pag. 221
- 45.-Accidents Caused by reverse Flow

Trevor A. Klets.

Hydrocarbon Processing , Marzo 1976 pag. 187

46.- Equilibrium Constants from a Modified Redlich\_Kwong e.of State  
Giorgio Soave.

Chemical Engineers SCI 1972 pag. 1197

47.-Recommended Practice for the Design and Installation of Pressure  
Relieving Systems in Refineries

API rp 520

48.-Guide for Pressure Relief and Depressuring System

API rp 521

49.-Flanged Steel Safety Relief Valves

API standar 526

50.-Transient Flow in Natural Gas Transmission Systems

J.F. Wilkinson, D.V. Holliday

American Gas Association, Inc. New York, New York.

51.-Transient Flow of Gas

H.A. Hannah

American Gas Association, Inc. ,New York, New York

52.-Applied Hydrocarbon Thermodynamics

Flow Calculations for Gases and Gas-Liquid Mixtures

Wayne C.Edmister.

Petroleum Refiner, Julio 1959 pag. 161

53.-Applied Hydrocarbon Thermodynamics

Effect of Pressure on Heat Capacity and Joule Thomson Coefficients

Wayne C. Edmister.

Hydrocarbon Processing, Mayo de 1967 pag. 187

- 54.-Applied Hydrocarbon Thermodynamics  
Isoentropic Exponents and Critical Flow Metering  
Hydrocarbon Processing, Julio 1967 pag. 139
- 55.-Applied Hydrocarbon Thermodynamics  
Compressibility Factors and Fugacity Coefficients from the  
Redlich Kwong equation of state. Wayne C.Edmister.  
Hydrocarbon Processing, Septiembre 1968 pag. 239
- 56.-Flowing Temperatures in gas Pipeline.  
Charles E. Schorre  
Pipeline Industry, Julio 1954 pag. 95
- 57.-Dynamics and Thermodynamics of Compressible fluid  
A.H. Shapiro  
The Ronald Press Co. Vol. 2 New York, New York 1953
- 58.-Review of Potential Applications of Pulsating flow in pipes  
M.F. Edwards  
Trans. Instn. Chem. Engrs. Vol . 49 1971 pag. 85
- 59.-Calculating Pressure Release Times  
S.H. Grote  
Chemical Engineerins , Julio 1967 pag. 203
- 60.-Transient Gas Flow in pipelines.  
J.F. Wilkinson , D.V. Holliday  
The oil and Gas Journal, Enero 11 1965 pag. 94





I N D I C E



## INDICE

CAPITULO I "Descripción de los sistemas de relevo de presión"	5
1.1 Objetivo del capítulo	7
1.2 Causas comunes de exceso de presión.	7
1.3 Generalidades sobre el sistema de relevo de presión	11
1.4 Generalidades sobre válvulas de relevo de presión	12
1.4.1 Materiales de construcción	14
1.4.2 Cálculo de válvulas de seguridad	18
1.4.3 Selección de válvulas	24
1.5 Red de tubería o cabezal de desfogue	25
1.6 Discos de Ruptura	26
1.7 Tanque separador de líquido	27
1.8 Sello	27
1.9 Quemador.	27
CAPITULO II "Descripción del cálculo del cabezal de desfogue a régimen permanente"	
2.1 Objetivo	31
2.2 Caída de presión en una línea simple	31
2.2.1 Cálculo de densidades de gases	37
2.2.2 Cálculo de viscosidades	39
2.3 Ecuaciones para fluidos compresibles	40
2.3.1 Conclusiones sobre las ecuaciones	51

2.4	Velocidad sónica	51
2.5	Temperatura de salida de una válvula	53
2.6	Cálculo de un sistema de desfogue	54
2.7	Programa de computadora	58
2.8	Ejemplo de cálculo	61

CAPITULO III "Descripción general de un transiente de presión y gasto, y la deducción de sus ecuaciones básicas"

3.1	Objetivo	67
3.2	Definición de transiente	67
3.3	Ecuaciones básicas	69
3.3.1	Ecuaciones de conservación de masa	70
3.3.2	Ecuaciones de conservación de momento	72
3.3.3	Ecuación de estado	76
3.3.4	Incorporación del perfil de temperaturas dentro de la ecuación de momento.	76
3.5	Condiciones a la frontera y condiciones iniciales.	77

CAPITULO IV "Cálculo de una línea simple de tubería sometida a un transiente de presión y gasto"

4.1	Objetivo	81
4.2	Ecuaciones iniciales	83
4.3	Resolución del modelo matemático	92
4.4	Procedimiento de cálculo	100

CAPITULO V "Descripción general de redes de tuberías y su solución a régimen no permanente"

5.1	Objetivo	106
5.2	Ecuaciones fundamentales	107
5.2.1	Ecuaciones de continuidad	107
5.2.2	Ecuaciones de conservación de energía	109
5.3	Resolución de las ecuaciones	111
5.3.1	Ecuaciones diferenciales parciales	112
5.3.2	Método de las diferencias finitas	113
5.3.3	Ecuaciones finales	114
5.3.3.1	Método de Newton Raphson	116
5.3.3.2	Análisis de las ecuaciones	120
5.3.4	Método de las características	121
5.3.5	Método de Coacher	126
5.4	Análisis de los nodos	127
5.5	Análisis de la red de tubería	128
5.6	Solución a la red	134
5.7	Programa de computadora	135
5.8	Ejemplo de cálculo	136

CAPITULO VI " Transiente de temperatura en una línea de tubería "

6.1	Objetivo	140
6.2	Posibles cambios de la temperatura	140
6.3	Cambio de temperatura por pérdidas de calor a la atmósfera	140
6.4	Cambio de temperatura por efecto de la expansión del gas dentro de la tubería.	144

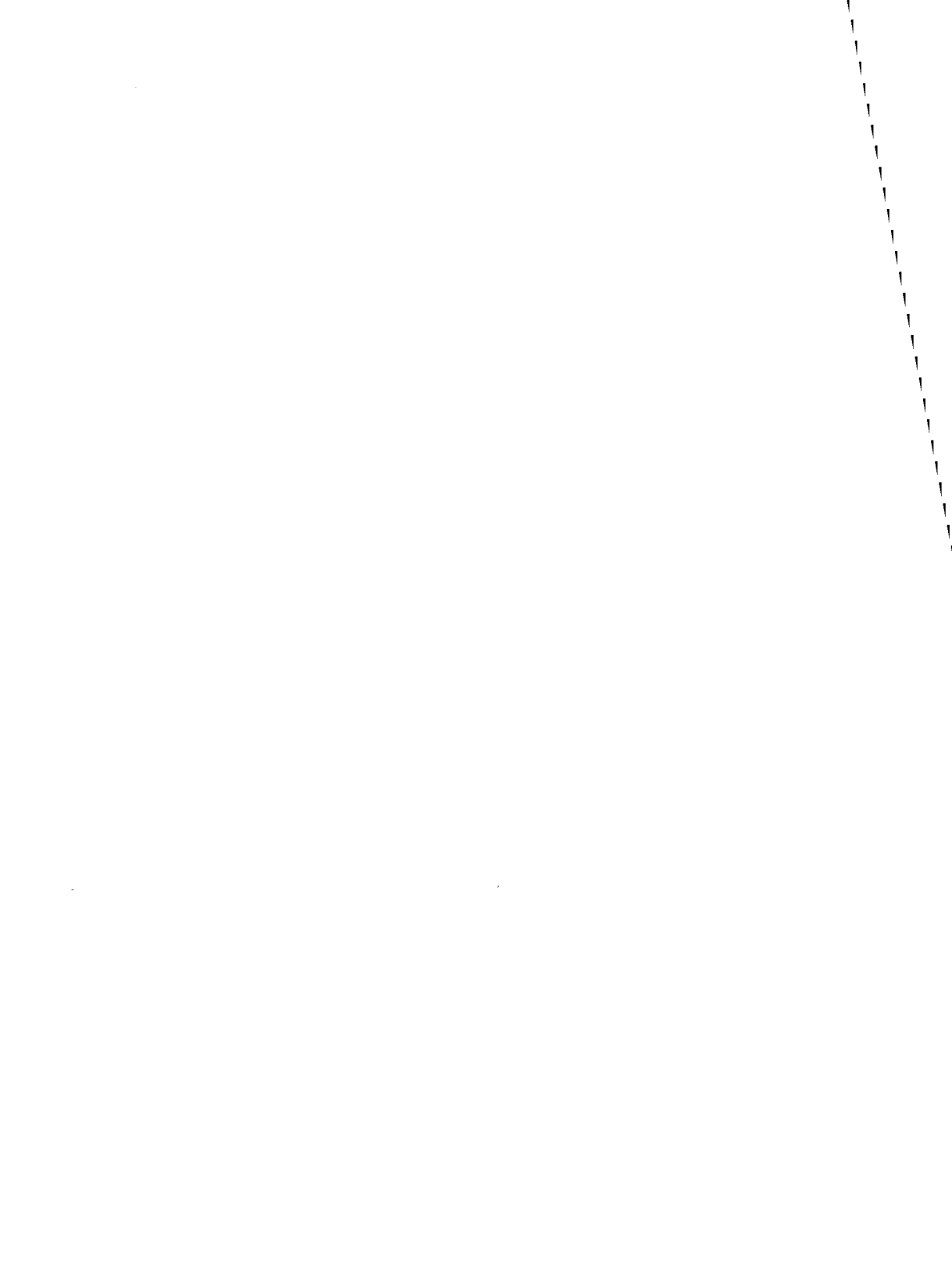
6.5 Cambios de temperatura por efecto del mezclado de un gas a distintas temperaturas.	145
6.6 Análisis de una sección de tubería	146
6.7 Cálculo de propiedades	148
6.8 Ejemplo de cálculo	149
6.8.1 División de la línea	149
6.8.2 Datos necesarios	150
6.8.3 Cálculo en el primer tramo	150
6.8.4 Solución final	157
CAPITULO VII " Cálculo del tiempo de desfogue de un sistema cerrado"	
7.1 Objetivo	159
7.2 Cálculo del tiempo de relevo en un sistema cerrado	159
7.2.1 Método de S.H.Grote	161
7.2.2. Perfil de presiones a partir de las ecuaciones generales propuestas por Ed. Mister	167
7.2.3 Ejemplo de cálculo	171
CAPITULO VIII " Análisis de la estabilidad de las ecuaciones en base a un multiplicador inercial"	
8.1 Objetivo	175
8.2 Método de W. Yow	175
CONCLUSIONES	183
BIBLIOGRAFIA	189

- ANEXO I-A Programa para comparar las ecuaciones de estado estable. Resultados.
- ANEXO I-B Programa para dimensionar los sistemas de relevo a estado estable. Resultados.
- ANEXO II Programa para el cálculo de una línea simple de tubería de desfogue sujeta a régimen no permanente. Resultados.
- ANEXO III Programa para el cálculo de una línea simple de tubería sujeta a un transiente oscilatorio. Resultados.
- ANEXO IV Programa para el cálculo de una red de tubería sujeta a régimen no permanente. Resultados.
- ANEXO V Gráficas de resultados.





ANEXO 1 - A



```

ES=RGNEAP(1),CONISO;
1  *FOR, IS TPFS,MAIN,MAIN
2  DIMENSION VAR(4),(CAM(2,4),NOM(2),CAM1(2,3),ME(3)
3  C 1 = PRESION 2 , 2 = VISCOSIDAD , 3 = LONGITUD , 4 = DIAMETRO
4  DATA ((CAM(I,J),I=1,2),J=1,4)/PRESIO',N 2 ',VISCOS',IDAD ',
5  1'LONGIT',UD ',DIAMET',RO '/GASTO /1000./
6  DATA M,'BAJA','MEDIA','ALTA'/
7  1 FORMAT ( )
8  2 FORMAT(2A6)
9  3 FORMAT(4H1. /,10X,'** PRUEBA COMPARATIVA DE LAS ECUACIONES PARA FL
10  1UJO JE FLUIDOS COMPRESIBLES **'//)
11  4 FORMAT(/,T75,'** P R E S I O N 1 (LB/FT**2) **',/1X,'ITFRACI
12  10H PRESION 2 LONGITUD VISCOSIDAD DIAMETRO DENSIDAD F.FRIC. FCUAC
13  2ION ECUACION ECUACION ECUACION ECUACION',/T13,'LB/FT**2',T25,'FT'
14  3,T33,'CP',T40,'IN',T54,'LB/FT3',T70,'CONISON ADIABATIC DARCY
15  4.HISSEH MAK',/)
16  5 FORMAT( 10X,'** GASTO = ',F12.2,2X,'LB/HR **', /10X,'** CONDICI
17  1ONES ',A6,' DE PRESION **', /10X,'SE MANTIENEN CONSTANTES ',3( ',
18  2 ',2A6),2X,'**',/10X,'CAMBIA ',2A6,5X,'CON VARIACION = ',F10.5)
19  6 FORMAT(3X,I3,T13,=7.2,T23,F8.2,T34=FB.4,T45,F7.3,T54,F7.4,T62=F7.5
20  1,T71=F7.2,1X,F7.2,3X,F8.2,1X,F8.2,2X,FB.2)
21  7 FORMAT(10X,'** COMPUESTO = ',2A6,10X,'TEMPERATURA =',F10.2,' GF*)
22  READ(5,1)PC,TC,TEM,K,PM
23  TEF=TEM-460.
24  READ(5,2)NOM
25  10 READ(5,1,END=10U,FRR=100)K,VAR,RET
26  GUAR=VAR(K)
27  M1=1
28  DO 99 M=1,4
29  IF(M.EQ.K)GO TO 99
30  DO 90 N=1,2
31  98 CAM1(N,M1)=CAM(N,M)
32  M1=M1+1
33  99 CONTINUE
34  DO 55 J=1,3
35  VAR(K)=GUAR
36  *WRITE(6,3)
37  *WRITE(6,7)NOM,TEF
38  K=J
39  GAS=GAS*10**(X)
40  *WRITE(6,5)GAS,ME(J),((CAM1(N,M),N=1,2),M=1,3),(CAM(N,K),N=1,2)*RET
41  *WRITE(6,4)
42  DO 50 I=1,45
43  CALL CUNI(PC,TC,T=M,K,PM,GAS,FF,RO,PIC,P1A,P1D,P1M,P1K,VAR(1),
44  1VAR(2),VAR(3),VAR(4))
45  *WRITE(6,6)I,VAR(1),VAR(3),VAR(2),VAR(4),RO,FF,PIC,P1A,P1D,P1M,P1K
46  50 VAR(K)=VAR(K)+RET
47  55 CONTINUE
48  GO TO 10
49  100 STOP
50  END
51  *FOR, IS TPFS,CUNI,CUNI
52  SUBROUTINE CUNI(PC,TC,TEM,K,PM,WT,FF,RO,PIC,P1A,P1C,P1M,P1K,P2,
53  1VIS,LON,LI)
54  REAL K,KF,LON,MAX
55  Z2=1.0+0.257*P2/PC=0.533*TC*P2/(TEM*PC)
56  RO=P2*PM/(TEM*Z2*10.729)
57  DIP=J/12.
58  AREA=DIP**2*3.1416/4.0
59  VEL=WT/(RO*AREA*3600.0)
60  C ** CALCULO DEL FACTOR DE FRICCION ***

```

```

01      RL=123.9*01*VEL*RC/V15
02      IF(RL<210.)12,12,15
03      FF=04.U/RE
04      GO TO 70
05      A=12.*U.C0010/(3.7*01)
06      B=2.01/RL
07      X=-2.0*ALOG10(A+1.0E-12)
08      14 Y=X+2.*U.LOG10(A+B*X)
09      IF(ABS(Y)-1.0E-0)30*30*20
10      20 YPRIM=1.0+(0.43429448*2.0*B)/(A+B*X)
11      X=X-Y/YPRIM
12      GO TO 14
13      30 FF=1.0/(X**2)
14      70 ALFA=(FF*LON*RO*VCL**2*P2*144.)/(32.2*DIP)
15      DELTA=(P2*144)**2
16      GAMMA=2*VLL**2*RO*02*144/32.2
17      C *** CALCULO ITERATIVO DE P1 POR CONISON **
18      P1=SQRT(ALFA+DELTA+GAMMA)
19      Z1=1.0+0.257*P1/(PC*144.)-0.533*TC*P1/(TEM*PC*144.)
20      R01=P1*PM/(TC*Z1*1545.)
21      VLL=PI/(R01*AMEA*3600.)
22      IF((VLL/VLL1).LE.0.1)GO TO 19
23      JLLTA=ALOG(VLL/VLL1)
24      PIC=JNT(ALFA+DELTA+GAMMA+JLLTA)
25      IF(ABS(PIC-P1).LT.0.01)GO TO 19
26      P1=PIC
27      GO TO 18
28      C *** CALCULO DE DP POR ECUACION ADIABATICA ***
29      KF=FF*LON/DIP
30      P1A=(P2**((K+1)/K)+5.5985127E-7*WT**2*02**((1./K)/(DI**4*RO))
31      1+((K+1./K)*KF/2.)*K/(K+1)
32      600 P1AC=(P2**((K+1)/K)+5.5985127E-7*WT**2*P2**((1./K)/(DI**4*RO))
33      1+((K+1./K)*KF/2.+ALOG(P1A/P2)/K)**K/(K+1)
34      IF(ABS(P1AC-P1A).LT.0.01)GO TO 601
35      IF((P1A/P2).LE.0.160)GO TO 001
36      P1A=P1AC
37      GO TO 000
38      601 DPCR=3.36E-5*FF*LON*WT**2/(RO*DI**5)
39      P1C=P2 + DPCR
40      PIC=P1C/144.
41      DPC=0PL/144.
42      V2Z=((WT/RO*0.1)/AMEA)**2
43      FAL=FF*LON*P2*144./(RO*32.2*DIP)
44      F1=2*02*P2*144./(32.2*00)
45      P1M=(FA+(P2*144.)*K)**0.5
46      201 P1MC=(F1+ALOG(P1M/(F2*144.))+FA*(P2*144.))**0.5
47      IF(ABS(P1MC-P1M).LT.0.01)GO TO 205
48      P1M=P1MC
49      GO TO 201
50      205 P1M=P1M/144.
51      MAK=1.336E-5*WT/(22*AR*A**2)*(22*TEM/PM)**0.5
52      FAL=FF*LON/DIP
53      P1K=SQRT((FAL*MAK)+1)*P2**2)
54      301 P1K1=P2*SQRT((FAL+ALOG(P1K/P2)**2))*MAK**2+1.)
55      IF(ABS(P1K1-P1K).LT.0.01)GO TO 305
56      P1K=P1K1
57      GO TO 301
58      305 RETURN
59      END
60      *MAP *RGNCTRL*CONISCN
61      IN TPFS*CONI

```

\*\* PRUEBA COMPARATIVA DE LAS ECUACIONES PARA FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES \*\*

\*\* COMPUESTO = ETILENO TEMPERATURA = 211.40 GF  
 \*\* GASTO = 1000000.00 LB/HR \*\*  
 \*\* CONDICIONES ALTA DE PRESION \*\*  
 SE MANTIENEN CONSTANTES , VISCOSIDAD , LONGITUD , DIAMETRO \*\*\*  
 CAMBIA PRESION 2 CON VARIACION = 15.00000

ITERACION	PRESION 2 LB/FT**2	LONGITUD FT	VISCOSIDAD CP	DIAMETRO IN	DENSIDAD LB/FT3	F.FRIC.	*** P R E S I O N 1 (LB/FT**2) ***				
							ECUACION COMISON	ECUACION ADTARATIC	ECUACION DARCY	ECUACION W. WISSER MAK	
1	15.00	500.00	.0100	10.000	.0586	.01346	465.84	462.92	3874.56	462.73	883.93
2	30.00	500.00	.0100	10.000	.1175	.01346	442.17	439.35	1954.01	439.16	841.69
3	45.00	500.00	.0100	10.000	.1769	.01346	428.29	425.57	1323.82	425.49	815.89
4	60.00	500.00	.0100	10.000	.2365	.01346	418.96	416.36	1016.23	416.18	797.24
5	75.00	500.00	.0100	10.000	.2965	.01346	412.49	410.01	837.68	409.94	789.78
6	90.00	500.00	.0100	10.000	.3568	.01346	408.13	405.77	723.64	405.60	771.15
7	105.00	500.00	.0100	10.000	.4176	.01346	405.45	403.22	646.47	403.05	761.62
8	120.00	500.00	.0100	10.000	.4787	.01346	404.19	402.08	592.34	401.72	753.76
9	135.00	500.00	.0100	10.000	.5402	.01346	404.18	402.19	553.58	402.03	747.26
10	150.00	500.00	.0100	10.000	.6021	.01346	405.28	403.41	525.56	403.25	741.95
11	165.00	500.00	.0100	10.000	.6643	.01346	407.39	405.63	505.37	405.48	737.66
12	180.00	500.00	.0100	10.000	.7269	.01346	410.41	408.76	491.05	408.62	734.27
13	195.00	500.00	.0100	10.000	.7900	.01346	414.28	412.73	481.23	412.59	731.78
14	210.00	500.00	.0100	10.000	.8534	.01346	418.02	417.48	474.96	417.34	730.04
15	225.00	500.00	.0100	10.000	.9172	.01346	424.28	422.92	471.53	422.79	729.02
16	240.00	500.00	.0100	10.000	.9814	.01346	430.30	429.02	470.40	429.90	729.67
17	255.00	500.00	.0100	10.000	1.0460	.01346	436.92	435.73	471.17	435.61	729.97
18	270.00	500.00	.0100	10.000	1.1110	.01346	444.10	442.99	473.51	442.87	729.86
19	285.00	500.00	.0100	10.000	1.1765	.01346	451.79	450.75	477.20	450.64	731.32
20	300.00	500.00	.0100	10.000	1.2423	.01346	459.96	459.09	482.01	459.48	733.32
21	315.00	500.00	.0100	10.000	1.3086	.01346	468.56	467.66	487.79	467.45	735.84
22	330.00	500.00	.0100	10.000	1.3753	.01346	477.57	476.72	494.41	476.22	738.89
23	345.00	500.00	.0100	10.000	1.4424	.01346	486.95	486.15	501.76	486.05	742.33
24	360.00	500.00	.0100	10.000	1.5099	.01346	496.67	495.92	509.75	495.92	746.26
25	375.00	500.00	.0100	10.000	1.5779	.01346	506.70	506.01	518.30	505.91	750.62
26	390.00	500.00	.0100	10.000	1.6463	.01346	517.03	516.37	527.34	516.28	755.39
27	405.00	500.00	.0100	10.000	1.7152	.01346	527.62	527.01	536.83	526.92	760.55
28	420.00	500.00	.0100	10.000	1.7845	.01346	538.47	537.99	546.71	537.00	766.09
29	435.00	500.00	.0100	10.000	1.8543	.01346	549.54	549.00	556.96	548.01	771.99
30	450.00	500.00	.0100	10.000	1.9245	.01346	560.83	560.31	567.40	560.23	778.23
31	465.00	500.00	.0100	10.000	1.9952	.01346	572.31	571.82	578.33	571.75	784.80
32	480.00	500.00	.0100	10.000	2.0663	.01346	583.98	583.52	589.43	583.44	791.63
33	495.00	500.00	.0100	10.000	2.1380	.01346	595.82	595.38	600.74	595.31	798.86
34	510.00	500.00	.0100	10.000	2.2101	.01346	607.81	607.40	612.31	607.33	806.33
35	525.00	500.00	.0100	10.000	2.2826	.01346	619.96	619.57	624.06	619.20	814.09
36	540.00	500.00	.0100	10.000	2.3557	.01346	632.24	631.87	635.99	631.01	822.08
37	555.00	500.00	.0100	10.000	2.4293	.01346	644.65	644.30	648.08	644.24	830.34
38	570.00	500.00	.0100	10.000	2.5033	.01346	657.18	656.85	660.32	656.79	838.89
39	585.00	500.00	.0100	10.000	2.5779	.01346	669.82	669.51	672.71	669.45	847.57
40	600.00	500.00	.0100	10.000	2.6529	.01346	682.57	682.28	685.23	682.21	856.51
41	615.00	500.00	.0100	10.000	2.7285	.01346	695.42	695.14	697.87	695.08	865.67
42	630.00	500.00	.0100	10.000	2.8046	.01346	708.36	708.09	710.62	708.03	875.03
43	645.00	500.00	.0100	10.000	2.8812	.01346	721.39	721.13	723.48	723.48	884.57
44	660.00	500.00	.0100	10.000	2.9583	.01346	734.49	734.25	736.43	736.43	894.30
45	675.00	500.00	.0100	10.000	3.0359	.01346	747.68	747.45	749.48	749.48	904.21

\*\* PRUEBA COMPARATIVA DE LAS ECUACIONES PARA FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES \*\*

\*\* COMPUESTO = ETILENO TEMPERATURA = 211.40 GF  
 \*\* GASTO = 1000000.00 LB/HR \*\*  
 \*\* CONDICIONES ALTA DE PRESION \*\*  
 SE MANTIENEN CONSTANTES , PRESION 2 , LONGITUD , DIAMETRO \*\*\*  
 CAMBIA VISCOSIDAD CON VARIACION = .00050

ITERACION	PRESION 2 LB/FT**2	LONGITUD FT	VISCOSIDAD CP	DIAMETRO IN	DENSIDAD LB/FT <sup>3</sup>	F.FRICT.	*** P R E S Y O N 1 (LB/FT**2) **				
							ECUACION CONISON	ECUACION ADIABATIC	ECUACION DARCY	ECUACION WALFISSEN	ECUACION MAX
1	50.00	500.00	.0081	10.000	.1907	.01344	424.58	421.90	1198.18	421.72	808.72
2	50.00	500.00	.0080	10.000	.1907	.01344	424.59	421.91	1198.26	421.73	808.74
3	50.00	500.00	.0011	10.000	.1907	.01344	424.60	421.92	1198.34	421.74	808.75
4	50.00	500.00	.0010	10.000	.1907	.01344	424.61	421.93	1198.42	421.75	808.77
5	50.00	500.00	.0021	10.000	.1907	.01344	424.62	421.94	1198.50	421.76	808.79
6	50.00	500.00	.0020	10.000	.1907	.01344	424.63	421.95	1198.58	421.77	808.81
7	50.00	500.00	.0031	10.000	.1907	.01345	424.64	421.97	1198.67	421.79	808.83
8	50.00	500.00	.0030	10.000	.1907	.01345	424.65	421.98	1198.75	421.80	808.85
9	50.00	500.00	.0041	10.000	.1907	.01345	424.66	421.99	1198.83	421.81	808.86
10	50.00	500.00	.0040	10.000	.1907	.01345	424.67	422.00	1198.91	421.82	808.88
11	50.00	500.00	.0051	10.000	.1907	.01345	424.68	422.01	1199.00	421.83	808.90
12	50.00	500.00	.0050	10.000	.1907	.01345	424.69	422.02	1199.08	421.84	808.92
13	50.00	500.00	.0061	10.000	.1907	.01345	424.70	422.03	1199.17	421.85	808.94
14	50.00	500.00	.0060	10.000	.1907	.01345	424.71	422.04	1199.25	421.86	808.95
15	50.00	500.00	.0071	10.000	.1907	.01345	424.72	422.05	1199.33	421.87	808.97
16	50.00	500.00	.0070	10.000	.1907	.01345	424.73	422.06	1199.42	421.88	808.99
17	50.00	500.00	.0081	10.000	.1907	.01346	424.74	422.07	1199.50	421.89	809.01
18	50.00	500.00	.0080	10.000	.1907	.01346	424.76	422.08	1199.58	421.90	809.03
19	50.00	500.00	.0091	10.000	.1907	.01346	424.77	422.09	1199.67	421.91	809.05
20	50.00	500.00	.0090	10.000	.1907	.01346	424.78	422.10	1199.75	421.92	809.06
21	50.00	500.00	.0101	10.000	.1907	.01346	424.79	422.11	1199.84	421.93	809.08
22	50.00	500.00	.0100	10.000	.1907	.01346	424.80	422.12	1199.92	421.94	809.10
23	50.00	500.00	.0111	10.000	.1907	.01346	424.81	422.13	1199.99	421.95	809.12
24	50.00	500.00	.0110	10.000	.1907	.01346	424.82	422.14	1200.08	421.96	809.14
25	50.00	500.00	.0121	10.000	.1907	.01346	424.83	422.15	1200.17	421.97	809.15
26	50.00	500.00	.0120	10.000	.1907	.01346	424.84	422.16	1200.25	421.98	809.17
27	50.00	500.00	.0131	10.000	.1907	.01347	424.85	422.17	1200.33	421.99	809.19
28	50.00	500.00	.0130	10.000	.1907	.01347	424.86	422.18	1200.42	422.00	809.21
29	50.00	500.00	.0141	10.000	.1907	.01347	424.87	422.19	1200.50	422.01	809.23
30	50.00	500.00	.0140	10.000	.1907	.01347	424.88	422.21	1200.58	422.02	809.25
31	50.00	500.00	.0151	10.000	.1907	.01347	424.89	422.22	1200.67	422.03	809.26
32	50.00	500.00	.0150	10.000	.1907	.01347	424.90	422.23	1200.75	422.04	809.28
33	50.00	500.00	.0161	10.000	.1907	.01347	424.91	422.24	1200.83	422.06	809.30
34	50.00	500.00	.0160	10.000	.1907	.01347	424.92	422.25	1200.92	422.07	809.32
35	50.00	500.00	.0171	10.000	.1907	.01347	424.93	422.26	1201.00	422.08	809.33
36	50.00	500.00	.0170	10.000	.1907	.01347	424.94	422.27	1201.08	422.09	809.35
37	50.00	500.00	.0181	10.000	.1907	.01347	424.95	422.28	1201.16	422.10	809.37
38	50.00	500.00	.0180	10.000	.1907	.01348	424.96	422.29	1201.18	422.11	809.39
39	50.00	500.00	.0191	10.000	.1907	.01348	424.97	422.30	1201.26	422.12	809.41
40	50.00	500.00	.0190	10.000	.1907	.01348	424.98	422.31	1201.34	422.13	809.42
41	50.00	500.00	.0201	10.000	.1907	.01348	424.99	422.32	1201.42	422.14	809.44
42	50.00	500.00	.0200	10.000	.1907	.01348	425.00	422.33	1201.50	422.15	809.46
43	50.00	500.00	.0211	10.000	.1907	.01348	425.02	422.34	1201.58	422.16	809.48
44	50.00	500.00	.0210	10.000	.1907	.01348	425.03	422.35	1201.66	422.17	809.50
45	50.00	500.00	.0221	10.000	.1907	.01348	425.04	422.36	1201.74	422.18	809.51

\*\* PRUEBA COMPARATIVA DE LAS ECUACIONES PARA FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES \*

\*\* COMPUESTO = ETILENO      TEMPERATURA = 211,40 GF  
 \*\* GASTO = 100000.00 LB/HR \*\*  
 \*\* CONDICIONES MEDIA DE PRESION \*\*  
 SE MANTIENEN CONSTANTES , PRESION 2 , VISCOSIDAD , DIAMETRO \*\*\*  
 CAMBIA LONGITUD      CON VARIACION = 2.00000

ITERACION	PRESION 2 LB/FT**2	LONGITUD FT	VISCOSIDAD CP	DIAMETRO IN	DENSIDAD LB/FT3	F. FRIC.	*** P R E S T O N 1 (LR/FT**2) ***				
							ECUACION CONISON	ECUACION ADIARATIC	ECUACION DARCY	ECUACION W. VISSSEN	ECUACION MAK
1	50.00	1.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.02	50.02	50.02	50.02	50.10
2	50.00	3.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.07	50.07	50.07	50.07	50.30
3	50.00	5.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.12	50.12	50.12	50.12	50.48
4	50.00	7.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.17	50.16	50.16	50.17	50.67
5	50.00	9.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.22	50.22	50.21	50.22	50.86
6	50.00	11.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.27	50.27	50.26	50.27	51.05
7	50.00	13.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.32	50.32	50.30	50.32	51.24
8	50.00	15.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.37	50.37	50.35	50.37	51.43
9	50.00	17.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.42	50.42	50.40	50.42	51.61
10	50.00	19.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.47	50.46	50.44	50.47	51.80
11	50.00	21.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.52	50.51	50.49	50.51	51.98
12	50.00	23.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.56	50.56	50.54	50.56	52.16
13	50.00	25.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.61	50.61	50.59	50.61	52.35
14	50.00	27.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.66	50.66	50.63	50.66	52.53
15	50.00	29.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.71	50.71	50.68	50.71	52.71
16	50.00	31.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.76	50.76	50.72	50.76	52.89
17	50.00	33.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.81	50.80	50.77	50.81	53.06
18	50.00	35.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.86	50.85	50.81	50.85	53.23
19	50.00	37.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.90	50.90	50.86	50.90	53.41
20	50.00	39.00	.0100	10.000	.1967	.01363	50.95	50.95	50.91	50.95	53.58
21	50.00	41.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.00	51.00	50.95	51.00	53.76
22	50.00	43.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.05	51.05	51.00	51.05	53.93
23	50.00	45.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.10	51.09	51.05	51.10	54.10
24	50.00	47.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.14	51.14	51.09	51.14	54.28
25	50.00	49.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.19	51.19	51.14	51.19	54.45
26	50.00	51.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.24	51.24	51.19	51.24	54.62
27	50.00	53.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.29	51.29	51.23	51.29	54.79
28	50.00	55.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.34	51.33	51.28	51.34	54.96
29	50.00	57.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.38	51.38	51.33	51.38	55.13
30	50.00	59.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.43	51.43	51.37	51.43	55.30
31	50.00	61.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.48	51.48	51.42	51.48	55.46
32	50.00	63.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.53	51.52	51.47	51.53	55.63
33	50.00	65.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.58	51.57	51.51	51.57	55.79
34	50.00	67.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.62	51.62	51.56	51.62	55.96
35	50.00	69.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.67	51.67	51.61	51.67	56.12
36	50.00	71.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.72	51.71	51.65	51.72	56.29
37	50.00	73.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.77	51.76	51.70	51.77	56.45
38	50.00	75.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.81	51.81	51.75	51.81	56.61
39	50.00	77.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.86	51.86	51.79	51.86	56.78
40	50.00	79.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.91	51.90	51.84	51.91	56.94
41	50.00	81.00	.0100	10.000	.1967	.01363	51.96	51.95	51.89	51.95	57.10
42	50.00	83.00	.0100	10.000	.1967	.01363	52.00	52.00	51.93	52.00	57.26
43	50.00	85.00	.0100	10.000	.1967	.01363	52.05	52.04	51.98	52.05	57.42
44	50.00	87.00	.0100	10.000	.1967	.01363	52.10	52.09	52.03	52.10	57.58
45	50.00	89.00	.0100	10.000	.1967	.01363	52.14	52.14	52.07	52.14	57.73





\*\* PRUEBA COMPARATIVA DE LAS ECUACIONES PARA FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES \*\*

\*\* COMPUESTO = ETILENO TEMPERATURA = 211.40 GF  
 \*\* GASTO = 1000000.00 LB/HR \*\*  
 \*\* CONDICIONES ALTA DE PRESION \*\*  
 SE MANTIENEN CONSTANTES PRESION 2 , VISCOSIDAD , DIAMETRO \*\*\*  
 CAMBIA LONGITUD CON VARIACION = 50.0000

ITERACION	PRESION 2 LB/FT**2	LONGITUD FT	VISCOSIDAD CP	DIAMETRO IN	DENSIDAD LB/FT3	F. FRIC.	*** P R E S T O N 1 (LB/FT**2) ***				
							ECUACION CONISON	ECUACION ADIABATIC.	ECUACION DARCY	ECUACION W. WISSEN	ECUACION MAK
1	50.00	50.00	.0100	10.000	.1967	.01346	245.22	242.87	164.92	242.76	513.59
2	50.00	100.00	.0100	10.000	.1967	.01346	274.21	271.37	279.96	271.24	556.88
3	50.00	150.00	.0100	10.000	.1967	.01346	298.77	295.99	304.94	295.85	595.98
4	50.00	200.00	.0100	10.000	.1967	.01346	320.79	318.04	309.91	317.90	631.98
5	50.00	250.00	.0100	10.000	.1967	.01346	340.95	338.22	324.89	337.07	665.54
6	50.00	300.00	.0100	10.000	.1967	.01346	359.68	356.97	339.87	356.81	697.11
7	50.00	350.00	.0100	10.000	.1967	.01346	377.25	374.54	354.85	374.39	727.94
8	50.00	400.00	.0100	10.000	.1967	.01346	393.67	391.17	369.83	391.01	758.56
9	50.00	450.00	.0100	10.000	.1967	.01346	409.67	406.99	384.81	406.82	789.85
10	50.00	500.00	.0100	10.000	.1967	.01346	424.78	422.11	399.79	421.93	821.93
11	50.00	550.00	.0100	10.000	.1967	.01346	439.29	436.62	414.76	436.43	854.95
12	50.00	600.00	.0100	10.000	.1967	.01346	453.25	450.58	429.74	450.39	888.78
13	50.00	650.00	.0100	10.000	.1967	.01346	466.73	464.07	444.72	463.87	922.44
14	50.00	700.00	.0100	10.000	.1967	.01346	479.78	477.12	459.70	476.92	956.39
15	50.00	750.00	.0100	10.000	.1967	.01346	492.44	489.78	474.68	489.57	990.72
16	50.00	800.00	.0100	10.000	.1967	.01346	504.74	502.08	489.66	501.87	1025.46
17	50.00	850.00	.0100	10.000	.1967	.01346	516.71	514.05	504.64	513.84	1060.57
18	50.00	900.00	.0100	10.000	.1967	.01346	528.38	525.72	519.61	525.90	1096.37
19	50.00	950.00	.0100	10.000	.1967	.01346	539.76	537.11	534.59	536.99	1132.90
20	50.00	1000.00	.0100	10.000	.1967	.01346	550.99	548.24	549.57	549.01	1169.40
21	50.00	1050.00	.0100	10.000	.1967	.01346	561.78	559.12	564.55	558.89	1206.40
22	50.00	1100.00	.0100	10.000	.1967	.01346	572.43	569.78	579.53	569.55	1243.81
23	50.00	1150.00	.0100	10.000	.1967	.01346	582.98	580.23	594.51	579.99	1281.46
24	50.00	1200.00	.0100	10.000	.1967	.01346	593.12	590.47	609.49	590.23	1319.47
25	50.00	1250.00	.0100	10.000	.1967	.01346	603.18	600.53	624.47	600.28	1357.75
26	50.00	1300.00	.0100	10.000	.1967	.01346	613.05	610.40	639.44	610.15	1396.34
27	50.00	1350.00	.0100	10.000	.1967	.01346	622.76	620.11	654.42	619.85	1435.23
28	50.00	1400.00	.0100	10.000	.1967	.01346	632.30	629.66	669.40	629.40	1474.45
29	50.00	1450.00	.0100	10.000	.1967	.01346	641.70	639.05	684.38	639.78	1513.90
30	50.00	1500.00	.0100	10.000	.1967	.01346	650.94	648.30	699.36	649.03	1553.61
31	50.00	1550.00	.0100	10.000	.1967	.01346	660.05	657.40	714.34	657.13	1593.67
32	50.00	1600.00	.0100	10.000	.1967	.01346	669.02	666.38	729.32	666.10	1634.00
33	50.00	1650.00	.0100	10.000	.1967	.01346	677.87	675.23	744.29	674.95	1674.62
34	50.00	1700.00	.0100	10.000	.1967	.01346	686.60	683.95	759.27	683.67	1715.52
35	50.00	1750.00	.0100	10.000	.1967	.01346	695.21	692.56	774.25	692.24	1756.83
36	50.00	1800.00	.0100	10.000	.1967	.01346	703.70	701.06	789.23	700.77	1798.53
37	50.00	1850.00	.0100	10.000	.1967	.01346	712.09	709.45	804.21	709.16	1840.65
38	50.00	1900.00	.0100	10.000	.1967	.01346	720.38	717.74	819.19	717.44	1883.59
39	50.00	1950.00	.0100	10.000	.1967	.01346	728.57	725.92	834.17	725.62	1926.15
40	50.00	2000.00	.0100	10.000	.1967	.01346	736.66	734.01	849.15	734.01	1969.43
41	50.00	2050.00	.0100	10.000	.1967	.01346	744.66	742.02	864.13	742.02	2013.43
42	50.00	2100.00	.0100	10.000	.1967	.01346	752.56	749.97	879.11	749.97	2058.16
43	50.00	2150.00	.0100	10.000	.1967	.01346	760.38	757.74	894.09	757.42	2103.66
44	50.00	2200.00	.0100	10.000	.1967	.01346	768.12	765.47	909.06	765.16	2149.93
45	50.00	2250.00	.0100	10.000	.1967	.01346	775.77	773.13	924.04	772.81	2196.99

\*\* PRUEBA COMPARATIVA DE LAS ECUACIONES PARA FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES \*\*

\*\* COMPUESTO = ETILENO TEMPERATURA = 211,40 GF  
 \*\* GASTO = 1000000.00 LB/HR \*\*  
 \*\* CONDICIONES ALTA DE PRESION \*\*  
 SE MANTIENEN CONSTANTES , PRESION 2 , VISCOSIDAD , LONGITUD \*\*\*  
 CAMBIA DIAMETRO CON VARIACION = 1.00000

ITERACION	PRESION 2		VISCOSIDAD CP	DIAMETRO IN	DENSIDAD LB/FT3	F.FRIC.	*** P R E S T O N 1 (LP/FT**2) ***					
	LB/FT**2	LONGITUD FT					ECUACION CONISON	ECUACION ADIABATIC.	ECUACION DARCY	ECUACION WILCOX	ECUACION MAX	
1	50.00	500.00	.0100	1.000	.1967	.02278	.35	*****	*****	*****	*****	*****
2	50.00	500.00	.0100	2.000	.1967	.01914	.00	*****	*****	24018.29	*****	*****
3	50.00	500.00	.0100	3.000	.1967	.01741	.00	8910.46	*****	8006.76	*****	*****
4	50.00	500.00	.0100	4.000	.1967	.01631	4629.80	4308.77	*****	4706.97	52921.95	*****
5	50.00	500.00	.0100	5.000	.1967	.01554	2518.13	2454.09	*****	42526.75	2453.05	19377.94
6	50.00	500.00	.0100	6.000	.1967	.01494	1574.22	1548.57	*****	16468.62	1547.91	8470.05
7	50.00	500.00	.0100	7.000	.1967	.01447	1061.16	1048.13	*****	7405.02	1047.62	4109.19
8	50.00	500.00	.0100	8.000	.1967	.01408	753.73	746.54	*****	3720.17	746.22	2277.37
9	50.00	500.00	.0100	9.000	.1967	.01375	557.06	552.79	*****	2038.62	552.55	1321.83
10	50.00	500.00	.0100	10.000	.1967	.01346	424.78	422.11	*****	1100.70	421.93	800.08
11	50.00	500.00	.0100	11.000	.1967	.01321	332.29	330.56	*****	750.62	330.42	517.03
12	50.00	500.00	.0100	12.000	.1967	.01299	265.62	264.46	*****	495.84	264.35	342.74
13	50.00	500.00	.0100	13.000	.1967	.01279	216.38	215.59	*****	344.22	215.50	234.98
14	50.00	500.00	.0100	14.000	.1967	.01261	179.33	178.78	*****	250.27	178.71	166.73
15	50.00	500.00	.0100	15.000	.1967	.01245	151.04	150.66	*****	190.00	150.60	123.06
16	50.00	500.00	.0100	16.000	.1967	.01230	129.22	128.96	*****	150.14	128.71	95.22
17	50.00	500.00	.0100	17.000	.1967	.01216	112.28	112.10	*****	123.17	112.06	77.76
18	50.00	500.00	.0100	18.000	.1967	.01203	99.07	98.94	*****	104.41	98.91	67.04
19	50.00	500.00	.0100	19.000	.1967	.01192	88.75	88.67	*****	91.12	88.64	60.56
20	50.00	500.00	.0100	20.000	.1967	.01181	80.69	80.63	*****	81.53	80.61	56.64
21	50.00	500.00	.0100	21.000	.1967	.01171	74.40	74.35	*****	74.40	74.34	54.25
22	50.00	500.00	.0100	22.000	.1967	.01161	69.48	69.45	*****	69.45	69.44	52.78
23	50.00	500.00	.0100	23.000	.1967	.01152	65.63	65.62	*****	65.30	65.31	51.85
24	50.00	500.00	.0100	24.000	.1967	.01144	62.62	62.61	*****	62.28	62.30	51.25
25	50.00	500.00	.0100	25.000	.1967	.01136	60.25	60.25	*****	59.94	60.24	50.86
26	50.00	500.00	.0100	26.000	.1967	.01129	58.38	58.37	*****	58.12	58.17	50.60
27	50.00	500.00	.0100	27.000	.1967	.01122	56.90	56.89	*****	56.68	56.69	50.42
28	50.00	500.00	.0100	28.000	.1967	.01115	55.71	55.71	*****	55.54	55.70	50.30
29	50.00	500.00	.0100	29.000	.1967	.01109	54.76	54.76	*****	54.62	54.75	50.22
30	50.00	500.00	.0100	30.000	.1967	.01103	53.99	53.99	*****	53.88	53.98	50.17
31	50.00	500.00	.0100	31.000	.1967	.01097	53.36	53.35	*****	53.27	53.36	50.12
32	50.00	500.00	.0100	32.000	.1967	.01092	52.85	52.84	*****	52.78	52.85	50.09
33	50.00	500.00	.0100	33.000	.1967	.01087	52.43	52.42	*****	52.37	52.42	50.07
34	50.00	500.00	.0100	34.000	.1967	.01082	52.08	52.07	*****	52.03	52.08	50.05
35	50.00	500.00	.0100	35.000	.1967	.01077	51.79	51.78	*****	51.75	51.79	50.04
36	50.00	500.00	.0100	36.000	.1967	.01073	51.54	51.54	*****	51.52	51.54	50.03
37	50.00	500.00	.0100	37.000	.1967	.01069	51.34	51.34	*****	51.32	51.34	50.02
38	50.00	500.00	.0100	38.000	.1967	.01065	51.16	51.16	*****	51.15	51.16	50.02
39	50.00	500.00	.0100	39.000	.1967	.01061	51.02	51.02	*****	51.00	51.02	50.01
40	50.00	500.00	.0100	40.000	.1967	.01057	50.89	50.89	*****	50.88	50.89	50.01
41	50.00	500.00	.0100	41.000	.1967	.01054	50.79	50.79	*****	50.78	50.79	50.01
42	50.00	500.00	.0100	42.000	.1967	.01050	50.69	50.69	*****	50.69	50.69	50.01
43	50.00	500.00	.0100	43.000	.1967	.01047	50.61	50.60	*****	50.61	50.61	50.01
44	50.00	500.00	.0100	44.000	.1967	.01044	50.55	50.54	*****	50.54	50.55	50.00
45	50.00	500.00	.0100	45.000	.1967	.01041	50.49	50.48	*****	50.48	50.49	50.00

ANEXO I - B



```

*RFOR,IS TPFS,MAIN,MAIN
0001 5.1 10/10-20:05-(0)
0002 C
0003 C *****
0004 C PROGRAMA PARA EL DIMENSIONAMIENTO
0005 C DE LOS SISTEMAS DE REFLEVO DE
0006 C PRESION A REGIMEN PERMANENTE
0007 C
0008 C TESIS PROFESIONAL EAP/AM
0009 C
0010 C NOMBRE DEL PROGRAMA DESFOGUE/TESES .....
0011 C
0012 C PARA MAYOR NUMERO DE SISTEMAS CAMBIAR EL VALOR DE IS FN
0013 C EL PARAMETER * PARA MAYOR NUMERO DE VALVULAS CAMBIAR IV
0014 C EN LA MISMA INSTRUCCION PARAMETER ****
0015 0101: PARAMETER IS=0,IV=30
0016 0102: INTEGER ORCAL
0017 0103: COMMON /DUN/DIAM,ODDN
0018 0104: COMMON /MAS/IAS
0019 0105: DIMENSION LEL(12),DIAM(3),ISIS(15,7),SIST(15,6),NOFA(13),ORCAL(I
0020 1),DATA(IV,6),NID(1),ORCA(IV,4),IGUR(3),IVAL(15,IV),PEM(20,N7(2),
0021 3),IACC(15,10),IUF(IV)
0022 0106: NAMELIST /OPLION/ IOP,XYDIAM,IOPC,PF1JA,IPAS,PATM,TOLER,IPAS
0023 0107: DATA DIAM/0.84,1.049,1.61,2.067,2.469,3.060,4.026,6.025,7.981,
0024 110.02,11.938,13.124,15.016,16.875,18.814,22.623,25.31,27.31,29.312,
0025 291.0,12.35,313,35,313,41,25,44,0,48,0,50,0,52,0,54,0,56,0,58,0,60,
0026 0110: DATA YDIAM /2.7 *TOLER /0.9/ ,PF1JA /14.7/ ,PATM /14.7/
0027 C *** LECTURA DE VARIABLES ***
0028 C
0029 0111: READ(5,15)LEI
0030 0112: 15 FORMAT(12A6)
0031 0113: READ(5,ORCAL)
0032 0114: WRITE(6,2)LEI
0033 0115: 2 FORMAT(11H1,/,T40,'TESIS PROFESIONAL E A P/R A M',/,T20,'PROGRA
0034 1MA PARA EL CALCULO DE SISTEMAS DE DESFOGUE',/,T30,12A6,/)
0035 0116: 1 FORMAT( )
0036 0117: WRITE(6,3)
0037 0120: 3 FORMAT(/,3H,*,* DATOS DE CONFIGURACION **/,/,1X,'SISTEMAS',T12,
0038 1,'CLASE',T20,1,'NOS',T10,1,'T40',T10,1,'TRO',T65,'DESCARGA AL',/,T28,1,'FT
0039 2',T44,1,'INT',T60,1,'NUMERO',/)
0040 C *****
0041 C
0042 C LECTURA DE DATOS DE CONFIGURACION
0043 C
0044 0121: NTS=1
0045 0122: 52 READ(5,4,ERR=4,END=5)I1,ISIS(NTS,1),I=1,3)*(SIST(NTS,1),I=1,2),
0046 1,ISIS(NTS,7),I1,4,NTS,1),I=1,10),NZ
0047 0123: CLASE='SISTEM'
0048 0124: IF(I1)NTS=2,/,/,CLASE='VALVUL'
0049 0125: WRITE(6,5)ISIS(NTS,1),CLASE,(SIST(NTS,1),T=1,2),ISIS(NTS,3),NZ
0050 0126: 4 FORMAT(13,1X,I1,1X,I3,2X,F7.0,2X,F7.0,2X,I3,2X,10J2,T60,2A6)
0051 0127: 5 FORMAT(3X,I3,T12,40,T20,F7.1,T40,F7.3,T70,I3,T100,2A6)
0052 0130: NTS=NTS+1
0053 0131: GO TO 52
0054 0132: 54 NTS=NTS-1
0055 C *****
0056 C
0057 C LECTURA DE DATOS DE VALVULAS DE LA FALLA
0058 C
0059 0133: PF1JA2=PF1JA

```

```

0000 0134: 56 READ(5,6,END=103)NOFA
0001 0135: IF(PFIJA.NE.PFIJA2)PFIJA=PFIJA2
0002 0136: 6 FORMAT(13A6)
0003 0137: NTV=1
0004 0140: WRITE(6,2)LET
0005 0141: WRITE(6,8)NOFA
0006 0142: 8 FORMAT(//,10X,13A6,/,30X,/** DATOS DE VALVULAS **/,/43X,
0007 1:CON PROPIEDADES MEDIAS **/,/2X,VALVULA,T15,SISTEMA,
0008 2T28,DESCARGA,T42,TEMPERATURA,T57,PRES.DE REL.,T75,DIAMETRO,
0009 1,T90,MAX.CONTR. PHE5,/,3X,NUMERO,T16,NUMERO,T28,LR/HR,T47,
0010 2,G.F.,T57,PSI,T76,IN,T96,PSI,/)
0011 0143: 58 READ(5,1,ERR=57,END=57)NIS(NTV),(DATVA(NTV,I),I=1,5),
0012 1(PRM(NTV,I),I=1,6)
0013 0144: WRITE(6,7)NTV,NIS(NTV),(DATVA(NTV,I),I=1,5)
0014 0145: DATVA(NTV,2)=DATVA(NTV,2)+460
0015 0146: 7 FORMAT(4X,I3,T17,I3,T28,F10.1,T43,F10.2,T58,F10.3,T72,F10.3,T91,
0016 1F10.3)
0017 0147: NTV=NTV+1
0018 0150: GO TO 58
0019 0151: 57 NTV=NTV-1
0020 0152: IF(IHAS.NE.1)GO TO 324
0021 0153: WRITE(6,2)LET
0022 0154: WRITE(6,301)NOFA
0023 0155: DO 302 M=1,NTV
0024 0156: 302 WRITE(6,303)M,(PRM(M,L),L=1,6)
0025 0157: 301 FORMAT(//,30X,/** RASTRO DE PROPIEDADES DE VALVULAS PARA .../,
0026 1/,10X,13A6,/**/,/3X,VALVULA,T19,CP,T31,CP/CV,T42,VISCO,
0027 A,T58,JOUL,T76,Z,T88,PM,/,T33,K,T44,CP,T57,THOMSON,/)
0028 0160: 303 FORMAT(5X,I3,T16,F9.4,T31,F5.2,T42,F7.3,T57,F7.3,T73,F7.3,T86,F7.2
0029 1)
0030 C
0031 C *****
0032 C
0033 C *** SE DEFINEN LAS VALVULAS QUE DESCARGAN A CADA SISTEMA
0034 C Y SE ENCIENDE EL USO DEL SISTEMA ***
0035 C
0036 0161: 324 DO 325 I=1,NTS
0037 01 0162: SIST(I,3)=0.0
0038 01 0163: ISIS(I,4)=0
0039 01 0164: 325 ISIS(I,5)=0
0040 0165: DO 59 I=1,NTV
0041 01 0166: K=NIS(I)
0042 01 0167: ISIS(K,5)=1
0043 01 0170: IVAL(K,1)=I
0044 01 0171: ISIS(K,4)=1
0045 01 0172: 60 J=ISIS(K,3)
0046 01 0173: IF(J.EQ.0)GO TO 700
0047 01 0174: ISIS(J,4)=ISIS(J,4)+1
0048 01 0175: M=ISIS(J,4)
0049 01 0176: IVAL(J,M)=I
0050 01 0177: ISIS(J,5)=1
0051 01 0200: IF(J.EQ.1)GO TO 59
0052 01 0201: K=J
0053 01 0202: GO TO 60
0054 01 0203: 59 CONTINUE
0055 C
0056 C *****
0057 C
0058 C *** ESTABLECIMIENTO DE LA ORDEN DE CALCULO ***
0059 C
0060 0204: M=1

```

10

```

0121      0205:      NPEN=0
0122      0206:      K=1
0123      0207:      65 ORCAL(M)=K
0124      0210:      INU=0
0125      0211:      N=0
0126      0212:      DO 61 I=1,NTS
0127      01 0213:      IF(I5+5(I+3)*.NF.K)GO TO 61
0128      01 0214:      IF(I5+5(I+5)*.NF.1)GO TO 61
0129      01 0215:      INU=1
0130      01 0216:      IF(I5+5(I+2)*.NF.2)GO TO 62
0131      01 0217:      MEM=1
0132      01 0220:      ORCAL(M)=I
0133      01 0221:      GO TO 61
0134      01 0222:      62 N=N+1
0135      01 0223:      IGUR(I)=I
0136      01 0224:      61 CONTINUE
0137      0225:      IF(N.FQ.0.AND.INU.LG.0)GO TO 70U
0138      0226:      IF(N.FQ.0.AND.INU.LG.1)GO TO 63
0139      0227:      K=IGUR(1)
0140      0230:      N=N-1
0141      0231:      IF(N.FQ.0)GO TO 67
0142      0232:      DO 66 I=1,N
0143      01 0233:      NPEN=NPEN+1
0144      01 0234:      66 PFN(NPEN)=IGUR(I+1)
0145      0235:      67 M=M+1
0146      0236:      GO TO 65
0147      0237:      63 IF(M.PFN.EQ.0)GO TO 70
0148      0240:      K=PFN(NPEN)
0149      0241:      NPEN=NPEN-1
0150      0242:      GO TO 67
0151      0243:      70 NTSF=M
0152      0244:      WRITE(6,79)INTF,ORCAL(I4),I4=1,NTSF)
0153      0245:      79 FORMAT(//,10X,*** PARA //,13,X,SISTEMAS DE ARUME LA *,
0154      0155:      0246:      DO 71 I=1,NTV
0156      01 0247:      IF(DATVA(I,5).EQ.0.)DATVA(I,5)=DATVA(I,3)*0.3
0157      01 0250:      71 DATVA(I,5)=DATVA(I,5)+PATM
0158      C
0159      C
0160      C ** SE ENCUENTRA LA CONTRAPRESION MINIMA DE CADA SISTEMA Y
0161      C SU GASTO EN LB/HR ***
0162      C
0163      C
0164      0251:      DO 72 I=1,NTSF
0165      01 0252:      J=ORCAL(I)
0166      01 0253:      M=ISIT(J,M)
0167      01 0254:      K=IVAL(J,1)
0168      01 0255:      PMIN=DATVA(K,5)
0169      01 0256:      W=0.
0170      01 0257:      DO 73 N=1,M
0171      02 0260:      K=IVAL(J,N)
0172      02 0261:      W=W+DATVA(K,1)
0173      02 0262:      IF(PMIN.LE.DATVA(K,5))GO TO 73
0174      02 0263:      PMIN=DATVA(K,5)
0175      02 0264:      73 CONTINUE
0176      01 0265:      SIST(J,3)=W
0177      01 0266:      72 SIST(J,4)=PMIN
0178      C
0179      C *****
0180      C
0181      C SE INICIA EL CALCULO DE LOS SISTEMAS

```



```

0182 C
0183 C SE CALCULARA LA TEMPERATURA DE SALIDA DE LAS VALVULAS
0184 C SUPONIENDO QUE EL GAS SE EXPANDE HASTA SU MAXIMA CONTRA-
0185 C PRESION PERMITIDA
0186 C
0187 C
0188 C
0189 0267: IF(LRAS.NE.1)GO TO 173
0190 0270: WRITE(6,2)LET
0191 0271: WRITE(6,177)NOFA
0192 0272: ,77 FORMAT(//,20X,*,** TEMPERATURAS DE SALIDA DE LAS VALVULAS PARA **,
0193 1',//,10X,13A6,//,5X,*,VALVULA',T20,'PRESION',T35,'PRESION',T55,
0194 2',TEMPERATURA',T80,'TEMPERATURA',//,7X,'NUM',T20,'INICIAL',T35,
0195 3',FINAL',T55,'INICIAL',T80,'FINAL',//,T22,'PSIA',T37,'PSIA',T59,
0196 4',G.R.',T83,'G.R.',/)
0197 0273: 176 FORMAT(7X,I3,T20,F8.2,T35,F8.2,T57,F9.2,T82,F9.2)
0198 0274: 173 DO 172 K=1,NIV
0199 0275: CALL TVAL(IOPC,DATVA(K,2),DATVA(K,3),DATVA(K,5),DATVA(K,6),
0200 1PRM(K,2),PRM(K,4))
0201 01 027b: 172 IF(LRAS.EQ.1)WRITE(6,176)K,DATVA(K,3),DATVA(K,5),DATVA(K,2),
0202 1,DATVA(K,6)
0203 0277: 530 NOT=ISIS(1,4)
0204 0300: DO 175 I=1,NOT
0205 01 0301: 175 IVE(I)=IVAL(1,I)
0206 C
0207 C SE EFECTUA EL CALCULO DE PROPIEDADES MEDIAS Y CONTRAPRESIONES
0208 C SOLO PARA EL SISTEMA 1
0209 C
0210 C
0211 0302: CALL PROPME(NOT,IVE,SIST(1,3),PM1,XK1,TEM1,RO1,VIS1,PFIJA,IV,DATVA
0212 1,PRM)
0213 0303: IF(IJIM.EQ.2)PS=SIST(1,3)*(1545.*TEM1/(XK1*PM1*(XK1+1.)),**0.5/
0214 1(SIST(1,2)**2+11400.)
0215 0304: IF(IJIM.EQ.2.AND.PS.GT.PFIJA)WRITE(6,397)PS
0216 0305: IF(IJIM.EQ.2.AND.PS.GT.PFIJA)PFIJA=PS
0217 0306: 397 FORMAT(//,5X,*,** CAMBIA LA PRESION FIJA A ',F10.3,' PS,A',
0218 1' PARA EVITAR EL FLUJO SONICO ***)
0219 0307: IF(IJIM.EQ.2)GO TO 78
0220 0310: CALL SONIC(PM1,TEM1,PFIJA,XK1,SIST(1,3),1,ISIS(1,6))
0221 0311: 75 IND=ISIS(1,6)
0222 0312: 78 IF(IJIM.EQ.2)D=SIST(1,2)
0223 0313: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,415)NRAS
0224 0314: 415 FORMAT(//,10X,*,** SISTEMA = ',I4,*,***)
0225 0315: IF(IJIM.NE.2)D=DIAM(IND)
0226 0316: CALL CONTP(L=20,L=20,VIS1,SIST(1,3),PFIJA,SIST(1,5),SIST(1,6),
0227 1,ISIS(1,7),1,ACC)
0228 0317: IF(IJIM.EQ.2)GO TO 74
0229 0320: IF(SIST(1,5).LT.SIST(1,4))GO TO 74
0230 0321: 77 ISIS(1,6)=ISIS(1,6)+1
0231 0322: IF(ISIS(1,6).GT.31)GO TO 701
0232 0323: GO TO 75
0233 C
0234 C *****
0235 C
0236 C SE INICIA EL CALCULO DE LOS OTROS SISTEMA PARTIENDO DEL SEGUNDO QUE
0237 C SE ENCUENTRA EN LA ORDEN DE CALCULO ORCAL
0238 C
0239 C SE CALCULAN LAS CONDICIONES MEDIAS Y LAS CONTRAPRESIONES
0240 C
0241 0324: 74 I=2
0242 0325: 80 J=ORCAL(I)

```

```

0243      0326:      IF(IJIM.EQ.2)K=ISIS(J,3)
0244      0327:      IF(IJIM.EQ.2)GO TO 199
0245      0330:      NOT1=ISIS(J,4)
0246      0331:      DO 179 KAL=1,NOT1
0247      01 0332:      179 IVE(KAL)=IVAL(J,KAL)
0248      0333:      K2=ISIS(J,3)
0249      0334:      CALL PROPME(NOT1,IVE,SIST(J,3),PM,XK,TEM,RO,VIS,SIST(K2,5),IV,
0250      LUATVA,PRM)
0251      0335:      CALL SONIC(PM,TEM,SIST(K2,5),XK,SIST(J,3),J,ISIS(J,6))
0252      0336:      KON1=1
0253      0337:      86 IND=ISIS(J,6)
0254      0340:      IF(ISIS(J,2).NE.2)GO TO 81
0255      0341:      K=IVAL(J,1)
0256      0342:      S=XJIM*DATVA(K,4)
0257      0343:      IF(UIAM(IND).GT.S.AND.KONT.EQ.1)WRITE(6,89)J,K,DIAM(IND),S
0258      0344:      89 FORMAT(5X,'** PRECAUCION EN EL SISTEMA = ',I2,' VALVULA = ',I2,
0259      ' EL DIAMETRO SONICO=',F10.3,' ES MAYOR QUE EL PERMITIDO = ',F10.3)
0260      0345:      KONT=0
0261      0346:      IF(DIAM(IND).GT.(XDIAM*DATVA(K,4)))GO TO 82
0262      0347:      81 K=ISIS(J,3)
0263      0350:      M=ISIS(K,5)
0264      0351:      IF(DIAM(IND).GT.DIAM(V))GO TO 82
0265      0352:      199 NOT3=ISIS(J,4)
0266      0353:      DO 198 KEL=1,NOT3
0267      01 0354:      198 IVE(KEL)=IVAL(J,KEL)
0268      0355:      CALL PROPME(NOT3,IVE,SIST(J,3),PM,XK,TEM,RO,VIS,SIST(K,5),IV,
0269      LUATVA,PRM)
0270      0356:      IF(IJIM.EQ.2)S=SIST(J,2)
0271      0357:      IF(IJIM.NE.2)D=DIAM(IND)
0272      0360:      IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,415)J
0273      0361:      CALL CONTP(U,RO,IS,VIS,SIST(J,3),SIST(K,5),SIST(J,5),SIST(J,1),
0274      ISIS(J,7),J,IACC)
0275      0362:      IF(IJIM.EQ.2)GO TO 85
0276      0363:      IF(SIST(J,5).LE.SIST(J,4))GO TO 85
0277      0364:      88 ISIS(J,6)=ISIS(J,6)+1
0278      0365:      GO TO 86
0279      0366:      85 I=I+1
0280      0367:      IF(I.GT.NTSF)GO TO 100
0281      0370:      GO TO 80
0282      0371:      82 IF(ISIS(J,3).EQ.1)GO TO 77
0283      0372:      K=ISIS(J,3)
0284      0373:      DO 84 M=2,I
0285      01 0374:      84 IF(K.EQ.ORCAL(M))GO TO 87
0286      0375:      WRITE(6,705)I,J,K
0287      0376:      705 FORMAT(1,5X,'** ERROR PARA LOS PRIMEROS ',I3,' SISTEMAS',
0288      ' NO SE ENCUENTRA PARA EL SISTEMA ',I3,' SU ANTESOR',I3,
0289      1/,15X,'** FIN DE PROGRAMA ***)
0290      0377:      STOP
0291      0400:      87 J=K
0292      0401:      I=M
0293      0402:      GO TO 88
0294      0403:      100 IRET=0
0295      0404:      DO 520 I=1,NTV
0296      01 0405:      J=NIS(I)

```

C  
C  
C  
C

SE RECALCULAN LAS TEMPERATURAS DE SALIDA DE LAS VALVULAS  
CON LAS CONTRAPRESIONES CALCULADAS, EN EL CASO DE QUE EL  
CAMBIO DE ESTAS SEA MAYOR QUE UNA TOLERANCIA DADA SE  
RECALCULARAN TAMBIEN LAS CONTRAPRESIONES ...

```

0304
0305 01 0406: CALL TVAL(IOPC,DATVA(I,2),DATVA(I,3),SIST(J,5),T2,PRM(I,2),
0306 1PRM(I,4))
0307 01 0407: IF((T2/DATVA(I,6)).LT.TOLER)IRET=1
0308 01 0410: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,1)IREY,T2,(DATVA(I,K),K=2,6),SIST(J,5),TOLER
0309 01 0411: 420 DATVA(I,6)=T2
0310 0412: IF(IRET.EQ.1)WRITE(6,521)
0311 0413: 521 FORMAT(///,20X,'* SE REAJUSTA TEMPERATURA DE SALIDA DE VALVULAS *'
0312 1,///,20X,'(LEANSE ESTAS TEMPERATURAS EN LOS RESULTADOS FI,ALES)',/)
0313 0414: IF(IRET=1)525,530,525
0314 0415: 550 FORMAT(//,T47,'*** RESULTADOS ***',/)
0315 0416: 551 FORMAT(//,T16,'** SE CALCULARON LOS DIAMETRO',
0316 1' ROS DEL SISTEMA **',/)
0317 0417: 552 FORMAT(//,T12,'** UNICAMENTE SE CALCULARON',
0318 1' LAS CONTRAPRESIONES **',/)
0319 0420: 553 FORMAT(//,T54,'*** FINALES ***',T86,'(FINAL)',T109,'MAXIMA',
0320 1,/,I,SIST, CONTRAPRESION DIAMETRO',T36,'DIAMETRO SONI',O',T53,
0321 2,VELOCIDAD VELOCIDAD SONICA TEMPERATURA VALVULA O CONTRAPR
0322 3,SION',/,2X,'NUM',T14,'PSIA',T27,'IN',T43,'IN',T54,'FT/S',6',T71,
0323 4,'FT/SEG',T86,'GF',T99,'SISTEMA',T112,'PSIA',/)
0324 U421: 554 FORMAT(2X,I3,T12,F10.4,T25,F7.3,T40,F8.3,T53,F9.2,T69,F11.2,T84,
0325 1FB.2,T100,A6)
0326 U422: 525 WRITE(6,2)LET
0327 0423: WRITE(6,19)NOFA
0328 0424: 19 FORMAT(10X,13A6,' ***')
0329 0425: WRITE(6,550)
0330 0426: IF(IJM.EQ.2)WRITE(6,552)
0331 0427: IF(IJM.NE.2)WRITE(6,551)
0332 0430: 104 FORMAT(1H,T111,F9.3)
0333 0431: WRITE(6,553)
0334
0335 C
0336 C
0337 C
0338 C
0339 C
0340 C
0341 C
0342 C
0343 C
0344 C
0345 C
0346 C
0347 C
0348 C
0349 C
0350 C
0351 C
0352 C
0353 C
0354 C
0355 C
0356 C
0357 C
0358 C
0359 C
0360 C
0361 C
0362 C
0363 C
0364 C
01 0432: DO 101 I=1,NTSF
0365 0433: J=ORCAL(I)
0366 01 0434: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,415)J
0367 01 0435: M=ISIS(J,6)
0368 01 0436: NOT=ISIS(J,4)
0369 01 0437: JO 215 KAL=1,NOT
0370 02 0440: 215 IVE(KAL)=IVAL(J,KAL)
0371 01 0441: K=ISIS(J,3)
0372 01 0442: IF(J.NE.1)P=IST(K,5)
0373 01 0443: IF(J.EQ.1)P=PFIJA
0374 01 0444: CALL PROPME(IGT,IVE,SIST(J,3),PM,XK,TEM,RO,VIS,P,IV,DATV,PRM)
0375 01 0445: CALL SONIC(PM,TEM,P,XK,SIST(J,3),J,N)
0376 01 0446: IF(IJM.EQ.2)D=SIST(J,2)
0377 01 0447: IF(IJM.NE.2)D=DIAM(M)
0378 01 0450: G=IST(J,3)*0.0509295818/RO
0379 01 0451: VEL=GD**2
0380 01 0452: VELS=G/OSON**2
0381 01 0453: IF(IST(J,2).EQ.2)CLASE='VALVUL'
0382 01 0454: IF(IST(J,2).NE.2)CLASE='SISTEM'
0383 01 0455: TEM=TEM-460.
0384 01 0456: WRITE(6,554)J,SIST(J,5),D,OSC,V,VEL,VELS,TEM,CLASE

```

```

0365      01 0457:      .01 IF(1-SIST(J,2)-EQ.2)WRITE(6,104)SIST(J,4)
0366      0460:          WRITE(6,173)P*PM*PFIJA
0367      0461:          1,73 FORMAT(/,10X,*** PRESION ATMOSFERICA = ',F10.3,' PSIA',1,0X,
0368      0366:          1*PHL*SION FIJA (FINAL DEL SISTEMA UNO) = ',F10.3,' PSIA *4**')
0369      0462:          IF(IOPC-NE.2)WRITE(6,1777)
0370      0463:          IF(IOPC-EQ.2)WRITE(6,1778)
0371      0464:          1777 FORMAT(/,30X,**** EXPANSION ISOENTROPICA EN VALVULAS ***,)
0372      0465:          1778 FORMAT(/,30X,**** EXPANSION ISOENTALPICA EN VALVULAS ***,)
0373      0466:          WRITE(6,1779)
0374      0467:          1779 FORMAT(/,30X,**** SE CONSIDERO CAIDA DE PRESION ISOTERMI,A ****)
0375      C
0376      C      REGRESO A CALCULAR OTRA FALLA
0377      C
0378      0470:          GO TO 56
0379      0471:          700 WRITE(6,12)
0380      0472:          12 FORMAT(/,5X,*** ERROR FIN DE PROGRAMA ***)
0381      0473:          103 STOP
0382      0474:          701 WRITE(6,13)NOFA
0383      0475:          13 FORMAT(/,5X,* PARA ',13A6,/,5X,'LOS DIAMETROS NO ACANZAN **')
0384      0476:          STOP
0385      0477:          END

```

```

MFOR,IS TPFs,CONT,CONT
RFOR 5.1 10/18-20:07-(0)
0001 C
0002 C
0003 C SUBROUTINA CONTP
0004 C
0005 C LA FUNCION DE ESTA SUBROUTINA ES EL CALCULAR LAS CONTRAPRESIONES
0006 C PARA UNA LINEA DADA
0007 C
0008 C
0009 0101: SUBROUTINE CONTP(DI,RO,IS,VIS,WT,P2,P1,XLONGR,NACC,K,IACC)
0010 0102: REAL LET,LE
0011 0103: COMMON /RAS/HRAS
0012 0104: DIMENSION IACC(IS,10)
0013 0105: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,71)
0014 0106: 71 FORMAT(/,10X,'RASTREO DE CONTP')
0015 0107: 72 FORMAT( )
0016 0110: 73 FORMAT(/,10X,'SALIDA DE CONTP')
0017 0111: RE=6.31*WT/(VIS*DI)
0018 0112: LET=0.0
0019 0113: IF(NACC.EQ.0)GO TO 95
0020 C
0021 C
0022 C SE CALCULA LA LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS Y LA
0023 C LONGITUD EQUIVALENTE TOTAL
0024 C
0025 C
0026 0114: DO 50 I=1,NACC
0027 01 0115: J=IACC(K,I)
0028 01 0116: GO TO(31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42),J
0029 01 0117: 31 LE=1.973*DI**1.03
0030 01 0120: GO TO 50
0031 01 0121: 32 LE=0.416*DI**1.06
0032 01 0122: GO TO 50
0033 01 0123: 33 LE=0.118*DI*(1.36*DI*(3.72E-4*DI*(-1.11E-5*DI*(1.18E-8)))
0034 01 0124: GO TO 50
0035 01 0125: 34 LE=-0.257+5.03*DI
0036 01 0126: GO TO 50
0037 01 0127: 35 LE=33.69*DI**0.99
0038 01 0130: GO TO 50
0039 01 0131: 36 LE=0.936*DI**0.97
0040 01 0132: GO TO 50
0041 01 0133: 37 LE=1.5*DI
0042 01 0134: GO TO 50
0043 01 0135: 38 LE=3.33E-3*DI*(-2.*ALOG10(4.864E-4/DI))**2
0044 01 0136: GO TO 50
0045 01 0137: 39 LE=1.916E-2*DI*(-2.*ALOG10(4.864E-4/DI))**2
0046 01 0140: GO TO 50
0047 01 0141: 40 LE=4.166E-2*DI*(-2.*ALOG10(4.864E-4/DI))**2
0048 01 0142: GO TO 50
0049 01 0143: 41 LE=0.0833*DI*(-2.*ALOG10(4.864E-4/DI))**2
0050 01 0144: GO TO 50
0051 01 0145: 42 LE=0.006833*DI**1.71*(-2.*ALOG10(4.864E-4/DI))**2
0052 01 0146: 50 LET=LET+LE
0053 0147: 95 XLONG=XLONGR+LET
0054 0150: IF(RE<2100.1),1.2
0055 0151: 1 FF=64./RE
0056 0152: GO TO 11
0057 C
0058 C
0059 C SE CALCULA EL FACTOR DE FRICCION POR MEDIO DE LA ECUACION

```

```

00n0      C DE COLEBROOK
00b1      C
00n2      C
00b3      0153: 2 A=12.*0.00015/(3.7*D1)
00b4      0154:   U=2.51/RE
00b5      0155:   X=-2.0*ALOG10(A+1.0E-12)
00b6      015b: 3 Y=X+2.0*ALOG10(A+B*X)
00b7      0157:   IF(ABS(Y).LT.1.0E-6)GO TO 10
00b8      0160:   YPRIM=1.0*(0.86858896*B)/(A+B*X)
00b9      0161:   X=X-Y/YPRIM
0070      0162:   GO TO 3
0071      0163:   ,0 FF=1.0/(X**2)
0072      C
0073      C
0074      C CALCULO POR PROCESO ITERATIVO DE LA CONTRAPRESION POR
0075      C MEDIO DE LA ECUACION DE FLUJO ISOTERMICO
007b      C
0077      C
007b      0164: 11 ALFA=Dc**2
0079      0165:   BETA=5.59851E-7*WT**2*P2/(DI**4*RO)
00b0      0166:   GAMMA=CF*ALONG*6./DI
00b1      0167:   P1C=(ALFA+BETA*(GAMMA)**0.5
00b2      0170: 12 P1=(ALFA+BETA*(GAMMA+ALOG(P1C/P2)))**0.5
00b3      0171:   IF(ABS(P1-P1C).LT.0.01)GO TO 13
00b4      0172:   P1C=P1
00b5      0173:   GO TO 12
00b6      0174: 13 IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,72)DI,RO,IS,VIS,WT,P2,P1,XLONGR,NACR,K
00b7      1,LE1,LE,RE,FF,ALFA,BETA,GAMA,P1C,P1
00b8      0175:   IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,73)
00b9      C
0090      C SE REGRESA EL CONTROL AL PROGRAMA PRINCIPAL
0091      C
0092      017b: RETURN
0093      0177: END

```

RFOR:IS TPF5.SONIC.5ONIC  
RFOR 5.1 10/18-20:07-(0)

0001  
0002  
0003  
0004  
0005  
0006  
0007  
0008  
0009  
0010  
0011  
0012  
0013  
0014  
0015  
0016  
0017  
0018  
0019  
0020  
0021  
0022  
0023  
0024  
0025  
0026  
0027  
0028  
0029  
0030

C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C  
C

SUBROUTINA SONIC

EN ESTA SUBROUTINA SE CALCULA EL DIAMETRO SONICO PARA  
UNAS CONDICIONES DADAS Y SE SELECCIONA UN DIAMETRO  
COMERCIAL

0101: SUBROUTINE SONIC(PM,TEM,PRE,CPCV,WT,JSIS,IND)  
0102: COMMON /RAS/NRAS  
0103: COMMON /SON/ XDIA,DIAM  
0104: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,50)  
0105: 50 FORMAT(/,10X,'RASTREO DE SONIC')  
0106: 51 FORMAT(  
0107: 52 FORMAT(/,10X,'SALIDA DE SONIC')  
0110: DIAM=(WT\*(1545.\*TEM/(CPCV\*PM\*(CPCV+1.)))\*0.5/(PRE\*11400.))\*0.5  
0111: DO 10 IND=1,31  
0112: 10 IF(DIAM.LE.XDIA(IND))GO TO 13  
0113: WRITE(6,1)JSIS  
0114: 1 FORMAT(5X,'\*\*\* ERROR EN EL SISTEMA ',I3,2X,'NO ALCANZAN LOS DIA',  
1'METROS (SONIC) FIN DE PROGRAMA')  
0115: STOP  
0116: 13 IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,51)PM,TEM,PRE,CPCV,WT,IND,DIAM,XDIA(IND)  
0117: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,52)  
C  
C  
C  
SE REGRESA EL CONTROL AL PROGRAMA PRINCIPAL  
0120: RETURN  
0121: END

```

RFOR,IS TPFs.PROPME.,PROPME
RFOR 5.1 10/18-20:07-(0)
0001 C
0002 C
0003 C SUBROUTINA PROPME
0004 C
0005 C
0006 C LA FUNCION DE ESTA SUBROUTINA ES LA DE CALCULAR LAS CONDICIONES
0007 C MEDIAS DE LA MEZCLA DE GAS EN LAS UNIONES DE TUBERIA
0008 C
0009 C
0010 0101: SUBROUTINE PROPME(IVAL,IVAL,WT,PM,CPCV,TEM,RO,VIS,PRES,IV,DATVA,
0011 1PRM)
0012 0102: COMMON /RAS/NRAS
0013 0103: DIMENSION DATVA(IV,6),PRM(IV,6)
0014 0104: DIMENSION IVAL(30),PHI(30,30)
0015 0105: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,50)
0016 0106: 50 FORMAT(/,10X,'RASTREO DE PROPIEDADES')
0017 0107: 51 FORMAT( )
0018 0110: 52 FORMAT(/,10X,'SALIDA DE PROPIEDADES')
0019 0111: XMOT=0.
0020 0112: CPCV=0.
0021 0113: TEM=0.
0022 0114: PM=0.
0023 0115: VIS=0
0024 0116: Z=0.
0025 0117: CP=0.
0026 0120: DO 10 J=1,NVAL
0027 01 0121: K=IVAL(J)
0028 01 0122: 10 XMOT=XMOT+DATVA(K,1)/PRM(K,6)
0029 0123: DO 20 MA=1,NVAL
0030 01 0124: K=IVAL(MA)
0031 01 0125: XMOL=DATVA(K,1)/(PRM(K,6)*XMOT)
0032 01 0126: PM=PM+XMOL*PRM(K,6)
0033 01 0127: Z=Z+XMOL*PRM(K,5)
0034 01 0130: CP=CP+XMOL*PRM(K,1)
0035 01 0131: CPCV=CPCV+XMOL*PRM(K,2)
0036 01 0132: TEM=TEM+XMOL*PRM(K,1)*DATVA(K,6)
0037 01 0133: DO 20 J=1,NVAL
0038 02 0134: IF(J.EQ.K)GO TO 20
0039 02 0135: B=1.0/SQRT(PRM(K,3)/PRM(J,3)+SQRT(PRM(J,6)/PRM(K,6)))
0040 02 0136: C=SQRT(8.0*(PRM(K,6)/PRM(J,6)+1.0))
0041 02 0137: PHI(K,J)=B*B/C
0042 02 0140: 20 CONTINUE
0043 0141: DO 17 K=1,NVAL
0044 01 0142: S=0.0
0045 01 0143: DO 16 J=1,NVAL
0046 02 0144: IF(J.EQ.K)GO TO 16
0047 02 0145: S=S+PHI(K,J)*(DATVA(J,1)/(PRM(J,6)*XMOT))/(DATVA(K,1)/(PRM(K,6)*
0048 1XMOT))
0049 02 0146: 16 CONTINUE
0050 01 0147: 17 VIS=VIS+PRM(K,3)/(1.0+S)
0051 0150: TEM=TEM/(XMOT*CP)
0052 0151: RO=PRES*PM/(Z*10.72*TEM)
0053 0152: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,51)NVAL,(IVAL(J),J=1,NVAL),WT,PM,CPCV,
0054 1TEM,RO,VIS,PRES,XMOT,XMOL,CP,Z
0055 0153: IF(NRAS.EQ.1)WRITE(6,52)
0056 C
0057 C SE REGRESA EL CONTROL AL PROGRAMA PHINCIPAL
0058 C
0059 0154: RETURN

```



JRFOR:IS TPFs.TVAL,TVAL  
RFOR 5.1 10/18-20:07-(0)

```
0001 C  
0002 C  
0003 C SUBROUTINA TVAL  
0004 C  
0005 C EN ESTA SUBROUTINA SE CALCULA LA TEMPERATURA DE SALIDA DE LAS  
0006 C VALVULAS, TENIENDO LA OPCION DE SER ENFORMA ISOENTALPICA  
0007 C O ISUENTROPICA  
0008 C  
0009 C  
0010 0101: SUBROUTINE TVAL(IOP,TREL,PREL,P2,TSAL,CPCV,XJT)  
0011 0102: COMMON /RAS/NRAS  
0012 0103: IF(NRAS.EQ.1),WRITE(6,15)  
0013 0104: 15 FORMAT(/,10X,*** SUBROUTINA TVAL ***)  
0014 0105: IF(IOP.EQ.2)GO TO 10  
0015 0106: TSAL=TREL*(P2/PREL)**((CPCV-1.)/CPCV)  
0016 0107: RETURN  
0017 0110: GO TO 10  
0018 C  
0019 C SE REGRESA EL CONTROL AL PROGRAMA PRINCIPAL  
0020 C  
0021 0111: RETURN  
0022 0112: END
```

TESIS PROFESIONAL E & P/R A M

PROGRAMA PARA EL CALCULO DE SISTEMAS DE DESFOGUE

EJEMPLO DE CALCULO DE SISTEMAS DE RELEVO DE PRESION E<sub>A</sub>P/RAM

\*\* DATOS DE CONFIGURACION \*\*

SISTEMA	CLASE	LONGITUD FT	DIAMETRO IN	DESCARGA AL NUMERO
1	SISTEM	300.0	.000	0
2	SISTEM	200.0	.000	1
3	VALVUL	125.0	.000	2
4	SISTEM	100.0	.000	2
5	VALVUL	130.0	.000	4
6	SISTEM	135.0	.000	4
7	VALVUL	110.0	.000	6
8	VALVUL	190.0	.000	6
9	SISTEM	98.0	.000	1
10	VALVUL	17.0	.000	9
11	SISTEM	45.0	.000	9
12	SISTEM	72.0	.000	11
13	VALVUL	35.0	.000	12
14	VALVUL	11.0	.000	12
15	SISTEM	45.0	.000	11
16	VALVUL	79.0	.000	15
17	VALVUL	91.0	.000	15

TESIS PROFESIONAL E A P/R A M  
PROGRAMA PARA EL CALCULO DE SISTEMAS DE DESFOGUE

EJEMPLO DE CALCULO DE SISTEMAS DE RELEVO DE PRESION E A P/R A M

FALLA DE PRUEBA EJEMPLO DEL CAPITULO III EAP/RA M  
\*\* DATOS DE VALVULAS \*\*  
CON PROPIEDADES MEDIAS \*\*

VALVULA NUMERO	SISTEMA NUMERO	DESCARGA LB/HR	TEMPERATURA G.F.	PRES.DE REL. PSI	DIAMETRO IN	MAX. CONTR. PRES PSI
1	3	20000.0	250.00	90.000	8.000	25.000
2	5	18000.0	260.00	85.000	8.000	23.000
3	8	12000.0	260.00	94.000	8.000	28.000
4	7	15000.0	280.00	98.000	8.000	29.000
5	16	16000.0	220.00	93.000	8.000	27.000
6	17	21000.0	250.00	100.000	8.000	30.000
7	13	27000.0	260.00	84.000	8.000	25.000
8	14	18000.0	230.00	89.000	8.000	26.000
9	10	17000.0	220.00	89.000	8.000	26.000

TESIS PROFESIONAL E A P R A M  
PROGRAMA PARA EL CALCULO DE SISTEMAS DE DESFOGUE  
EJEMPLO DE CALCULO DE SISTEMAS DE RELEVO DE PRESION EAP/RAM  
FALLA DE PRUEBA EJEMPLO DEL CAPITULO III EAP/RAM \*\*\*

\*\*\* RESULTADOS \*\*\*

\*\* SE CALCULARON LOS DIAMETROS DEL SISTEMA \*\*

SIST. NUM.	CONTRAPRESION PSIA	DIAMETRO IN	DIAMETRO SONICO IN	*** F I N A L E S ***		(FINAL) TEMPERATURA GF	VALVULA O SISTEMA	MAXIMA CONTRAPRESION PSIA
				VELOCIDAD FT/SEG	VELOCIDAD SONICA FT/SEG			
1	29.1320	11.938	11.729	1262.58	1308.06	194.98	SISTEM	
2	34.9676	7.981	5.052	486.10	1213.33	206.39	SISTEM	
3	36.0950	6.025	2.482	193.82	1142.37	193.41	VALVUL	39.70n
4	36.2341	7.981	3.884	294.52	1243.57	211.39	SISTEM	
5	37.1991	6.025	2.346	178.22	1175.40	207.89	VALVUL	37.70n
6	38.9451	6.025	3.007	320.70	1287.40	213.75	SISTEM	
7	39.5820	6.025	2.158	164.48	1282.40	221.46	VALVUL	43.70n
8	39.6632	6.025	1.939	134.13	1294.73	209.68	VALVUL	42.70n
9	41.4009	10.020	6.614	595.08	1365.67	189.26	SISTEM	
10	47.9909	3.068	2.543	884.03	1287.21	169.36	VALVUL	40.70n
11	44.7240	7.981	5.786	726.50	1382.14	192.50	SISTEM	
12	35.4117	7.981	4.146	379.69	1407.05	197.84	SISTEM	
13	48.8802	6.025	3.270	444.37	1508.67	209.06	VALVUL	39.70n
14	39.5905	3.058	2.424	776.51	1243.77	181.01	VALVUL	40.70n
15	36.7638	6.025	3.680	502.88	1348.13	182.64	SISTEM	
16	40.6698	4.026	2.227	369.85	1208.84	170.74	VALVUL	41.70n
17	38.1607	6.025	2.791	310.46	1446.73	190.46	VALVUL	44.70n

\*\* PRESION ATMOSFERICA = 14.700 PSIA PRESION FIJA (FINAL DEL SISTEMA UNO) = 14.700 PSIA \*\*

\*\*\* EXPANSION ISOENTROPICA EN VALVULAS \*\*\*

\*\*\* SE CONSIDERO CAIDA DE PRESION ISOTERMICA \*\*\*

FIN



A N E X O II



ES\*RGNEAP(1).PIPE/TR

```
1 QFTN=IS TFFS.MAIN,MAIN
2 C PROGRAMA PARA EL CALCULO DEL TRANSIENTE DE PRESION
3 C PARA UNA LINEA SIMPLE
4 C CAPITULO IV
5 C E. A. P. / R. A. M.
6 REAL LONG,K1,K2,K3,K4,K5,K6
7 DIMENSION P(30),Q(30),P12(30),LETR(13)
8 RO(A,B)=A*PM/(B*10.72*TEM)
9 Z(X)=1.+0.257*X/PC-0.533*TC*X/(PC*TEM)
10 READ(5,3)LETR
11 READ(5,1)K1,K2,K3,K4,K5,K6
12 READ(5,1)LONG,W,DIAM,VIS,PO,PC,TC,TEM,PM,NODOS,ITER,DT
13 XNOD=NODOS
14 TEM=TEM+460.
15 DFT=DIAM/12.
16 ZI=Z(P0)
17 RO1=RO(P0,ZI)
18 WRITE(6,1)K1,K2,K3,K4,K5,K6
19 WRITE(6,1)LONG,W,DIAM,VIS,PO,PC,TC,TEM,PM,NODOS,ITER,DT
20 FF=FRIC(W,DIAM,VIS)
21 WRITE(6,50)LETR
22 50 FORMAT(1H1,/,10X,13A4,/)
23 C2=1.04383E-6*FF*ZI*TEM/(PM*DFT**5)
24 DO 10 I=1,NODOS
25 IF(1.EQ.1)P12(1)=(P0**2-C2*LONG*(W/60.)**2/(2.*XNOD))**0.5
26 IF(1.NE.1)P12(I)=(P(I-1)**2-C2*LONG*(W/60.)**2/(2.*XNOD))**0.5
27 IF(1.EQ.1)P(1)=SQRT(P12(1)**2*2.- P0**2)
28 IF(1.NE.1)P(I)=SQRT(P12(I)**2*2.- P(I-1)**2)
29 10 Q(I)=W/60.
30 QIN=W/60.
31 QA=165.
32 QB=130.
33 WRITE(10,61)
34 WRITE(10,62)LONG,QA,QB
35 WRITE(10,63)ITER
36 WRITE(10,64)
37 ICONT=5
38 DO 11 I=1,ITER
39 K2=K2*K3
40 K5=K5*K6
41 TIME=TIME+DT
42 IF(1CONT.EQ.5)WRITE(10,65)NODOS,TIME
43 P0=P0+K1*SIN(K2*0.01745329)
44 QIN=QIN+K4*SIN(K5*0.01745329)
45 ZI=Z(P0)
46 FF=FRIC(QIN*60.,DIAM,VIS)
47 C1=13.6600*ZI**2*TEM/(DFT**2*PM)
48 C2=1.04383E-6*FF*ZI*TEM/(PM*DFT**5)
49 PGUAR=SQRT(P0**2-C2*LONG*QIN**2/(2.*XNOD))
50 DP1=PGUAR-P12(1)
51 Q(1)=QIN-DP1*LONG/(C1*DT)
52 P12(1)=PGUAR
53 P(1)=SQRT(P12(1)**2*2.-P0**2)
54 XL=0.
55 IF(1CONT.EQ.5)WRITE(10,66)XL,P(1)
56 DO 13 J=2,NODOS
57 PGUAR=SQRT(P12(J-1)**2-C2*LONG*Q(J-1)**2/(2.*XNOD))
58 DP=PGUAR-P12(J)
59 Q(J)=Q(J-1)-DP*LONG/(C1*DT*XNOD)
60 P12(J)=PGUAR
```



```

61 P(J)=SQRT(P12(J)**2+2.-P(J-1)**2)
62 XL=XL+LONG/XNOD
63 IF(ICONT.EQ.5)WRITE(10,66)XL,P(J)
64 13 CONTINUE
65 WRITE(6,2)TIME,FF,C1,C2
66 WRITE(6,4)QIN,(Q(J),J=1,NODOS)
67 WRITE(6,5)PO,(P(J),J=1,NODOS)
68 WRITE(6,6)(P12(J),J=1,NODOS)
69 ICONT=ICONT+1
70 IF(ICONT.GT.5)ICONT=1
71 11 CONTINUE
72 1 FORMAT(1)
73 2 FORMAT(/,10X,'TIEMPO = ',F8.2,' MIN',20X,'FACTOR DE FRICCION = '
74 1,F8.4,5X,'C1 = ',F10.3,5X,'C2 = ',F10.5,/)
75 61 FORMAT(5X,'LONGITUD FT',T35,'PRESION PSIA',T61,'7.0',T66,'7.0',
76 1T71,'LINLIN')
77 62 FORMAT(5X,'0.0',T11,F10.3,T21,F10.5,T31,F10.3)
78 63 FORMAT(1X,I3,T7,'TRANSIENTE DE PRESION Y GASTO',T38,
79 1'ANALISIS DE PRESION VS LONG.')
```

```

80 64 FORMAT(5X,'E. A. P. / R. A. M.')
```

```

81 65 FORMAT(1X,I3,T14,'TIEMPO = ',F6.2,' MIN')
```

```

82 66 FORMAT(2F15.3)
83 3 FORMAT(13A4)
84 4 FORMAT(/,10X,'GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = ',8F9.3)
85 5 FORMAT(/,10X,'PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = ',8F9.3)
86 6 FORMAT(/,10X,'PRESIONES MEDIAS (PSIA) = ',8F9.3)
87 STOP
88 END
```

```

89 @FTN,IS TPFS,FRIC,FRIC
90 FUNCTION FRIC(W,D,V)
91 RE=0.31*W/(V*D)
92 IF(RE-2100.)2*2.5
93 2 FRIC=64./RE
94 RETURN
95 5 A=12.*0.00015/(3.*D)
96 B=2.51/RE
97 X=-2.*ALOG10(A+1.0E-22)
98 10 Y=X+2*ALOG10(A+B*X)
99 IF(ABS(Y)-1.0E-6)30,30,20
100 20 YPRM=1.+(0.43429448*2.*B/(A+B*X))
101 X=X-Y/YPRM
102 GO TO 10
103 30 FRIC=1./((X**2)
104 RETURN
105 END
```

```

106 @MAP
107 IN TPFS,MAIN
108 IN TPFS,FRIC
109 LIB KF=LIUFTN.
110 END
111 @XQT
112 COMPUESTO ETILENO
113 1.0,5.0,1.0,5.0
114 1000,2000,7.9981,0.02,150,7*2,509.6,150,28.05,10,50,1.0
```

COMPUESTO ETILENO

TIEMPO =	1.00 MIN	FACTOR DE FRICCIÓN =	.0152	C1 =	618.737	C2 =	.00000
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	333.558	329.921	328.782	326.855	324.124	320.569	316.166 310.888
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	304.703	297.576	289.467				
PRESION EN LOS NODOS (PSIA) =	150.225	149.291	149.311	148.377	148.409	147.484	147.535 146.630
PRESION EN LOS NODOS (PSIA) =	146.709	145.831	145.948				
PRESIONES MEDIAS (PSIA) =	149.759	149.301	148.845	148.393	147.947	147.510	147.083 146.669
PRESIONES MEDIAS (PSIA) =	146.271	145.890					
TIEMPO =	2.00 MIN	FACTOR DE FRICCIÓN =	.0151	C1 =	618.620	C2 =	.00000
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	333.917	328.121	327.531	326.934	326.335	325.745	325.175 324.644
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	324.171	323.782	323.505				
PRESION EN LOS NODOS (PSIA) =	150.583	149.649	149.682	148.745	148.781	147.843	147.882 146.941
PRESION EN LOS NODOS (PSIA) =	146.983	146.039	146.083				
PRESIONES MEDIAS (PSIA) =	150.117	149.666	149.214	148.763	148.313	147.862	147.412 146.962
PRESIONES MEDIAS (PSIA) =	146.512	146.061					
TIEMPO =	3.00 MIN	FACTOR DE FRICCIÓN =	.0151	C1 =	618.461	C2 =	.00000
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	334.401	326.558	325.765	324.961	324.145	323.317	322.476 321.620
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	320.748	319.857	318.947				
PRESION EN LOS NODOS (PSIA) =	151.068	150.135	150.178	149.244	149.292	148.356	148.409 147.472
PRESION EN LOS NODOS (PSIA) =	147.530	146.593	146.656				
PRESIONES MEDIAS (PSIA) =	150.602	150.156	149.712	149.268	148.825	148.382	147.941 147.501
PRESIONES MEDIAS (PSIA) =	147.062	146.624					
TIEMPO =	4.00 MIN	FACTOR DE FRICCIÓN =	.0151	C1 =	618.265	C2 =	.00000
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	335.003	325.264	324.282	323.289	322.287	321.273	320.246 319.207
GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) =	318.154	317.086	316.002				

54777 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 151.670 150.737 150.791 149.858 149.917 148.984 149.050 148.117

PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 148.188 147.255 147.333

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 151.204 150.764 150.325 149.888 149.452 149.017 148.584 148.152

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 147.722 147.294

TIEMPO = 5.00 MIN FACTOR DE FRICCION = .0151 C1 = 618.034 C2 = .00000

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 335.710 324.263 323.111 321.950 320.779 319.598 318.406 317.203

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 315.987 314.758 313.515

PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 152.377 151.445 151.508 150.576 150.646 149.716 149.792 148.862

PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 148.945 148.017 148.107

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 151.912 151.476 151.043 150.611 150.181 149.754 149.328 148.904

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 146.482 148.062

TIEMPO = 6.00 MIN FACTOR DE FRICCION = .0151 C1 = 617.774 C2 = .00000

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 336.509 323.575 322.275 320.967 319.651 318.326 316.991 315.647

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 314.291 312.925 311.546

PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 153.176 152.244 152.315 151.385 151.463 150.535 150.621 149.695

PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 149.788 148.864 148.964

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 152.711 152.280 151.851 151.424 151.000 150.578 150.158 149.741

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 149.326 148.914

TIEMPO = 7.00 MIN FACTOR DE FRICCION = .0151 C1 = 617.488 C2 = .00000

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 337.384 323.213 321.790 320.361 318.924 317.481 316.030 314.570

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 313.101 311.623 310.135

PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 154.050 153.120 153.197 152.269 152.353 151.428 151.521 150.597

PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 150.698 149.778 149.887

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 153.586 153.158 152.733 152.311 151.891 151.474 151.060 150.648

PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 150.239 149.833

TIEMPO = 8.00 MIN FACTOR DE FRICCION = .0151 C1 = 617.184 C2 = .00000

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 338.317 323.184 321.666 320.143 318.614 317.080 315.540 313.993  
 GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 312.439 310.878 309.309  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 154.984 154.054 154.136 153.209 153.299 152.376 152.474 151.553  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 151.660 150.743 150.859  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 154.520 154.095 153.673 153.254 152.838 152.425 152.014 151.607  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 151.202 150.801

TIEMPO = 9.00 MIN FACTOR DE FRICCION = .0151 C1 = 616.866 C2 = .00000

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 339.292 323.489 321.905 320.318 318.727 317.132 315.532 313.928  
 GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 312.319 310.705 309.086  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 155.958 155.030 155.114 154.189 154.282 153.360 153.463 152.544  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 152.655 151.740 151.860  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 155.495 155.072 154.652 154.236 153.822 153.412 153.004 152.600  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 152.198 151.800

TIEMPO = 10.00 MIN FACTOR DE FRICCION = .0151 C1 = 616.542 C2 = .00000

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 340.288 324.123 322.504 320.884 319.261 317.635 316.008 314.377  
 GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 312.744 311.108 309.469  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 156.954 156.027 156.113 155.189 155.284 154.363 154.467 153.550  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 153.663 152.749 152.871  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 156.491 156.070 155.652 155.236 154.824 154.415 154.009 153.606  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 153.207 152.810

TIEMPO = 11.00 MIN FACTOR DE FRICCION = .0151 C1 = 616.216 C2 = .00000

GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 341.286 325.074 323.452 321.829 320.206 318.582 316.957 315.332  
 GASTO EN LOS NODOS (LB/MIN) = 313.707 312.080 310.454  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 157.953 157.026 157.112 156.189 156.284 155.364 155.468 154.552  
 PRESION EN LOS NODOS (PSIA) = 154.665 153.752 153.873  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 157.490 157.069 156.651 156.237 155.825 155.416 155.011 154.608  
 PRESIONES MEDIAS (PSIA) = 154.209 153.813



A N E X O III



```

ES=HGNEAP(1),PIPE2
1  BRUN,/TP EAP,10,ES159USE,ES,3,100 *SIN TARJETAS* EXT,2389 ES*ERNESTO ALFARO*
2  @FOR,IS TFFS,PIPE2,,PIPE2
3      REAL MULG
4      COMMON/PROPS/COMP(2,20),P4(20),TEB(20),TC(20),PC(20),RM(60),
5      ICTRL(20)
6      COMMON/GA/NCAM,XL,MGRAF,TR,P0,P4,TEM,D,DT,PM1,ELEM(2)
7      DIMENSION Y(3),PRES(4,300),GAST(4,300),QIN(300),PSV(300),PSV1(300),
8      1,PSV2(300),PSV3(300)
9  C *****
10 C
11 C      ELEM=ELEMENTO DEL QUE SE TRATA
12 C
13 C *****
14 C      READ(5,26)ELEM
15 C *****
16 C
17 C      LECTURA DE DATOS REQUERIDOS POR EL SISTEMA
18 C      WES= GASTO QUE SE DESEA
19 C      PVAL= PRESION MAXIMA A LA SALIDA DE LA VALVULA
20 C      XL= LONGITUD SUPUESTA (PUEDE VARIAR)
21 C      U= DIAMETRO DE LA TUBERIA
22 C      TH= LONGITUD DE TUBO RECTO SUPUESTA (PUEDE VARIAR)
23 C      PU= PRESION INICIAL
24 C      P4= PRESION AL FINAL DE LA TUBERIA EN EL TIEMPO 0
25 C      TEM= TEMPERATURA DE LA LINEA (SE CONSIDERA CONSTANTE)
26 C      PRI= PRESION AL FINAL DE LA TUBERIA A ESTADO ESTABLE
27 C
28 C *****
29 C
30 C      DATOS ADICIONALES DEL SISTEMA
31 C      DT= INCREMENTOS DE TIEMPO DESEADOS
32 C      PC1= PRESION CRITICA DEL COMPUESTO
33 C      TC1= TEMPERATURA CRITICA DEL COMPUESTO
34 C      PM1= PESO MOLECULAR DEL COMPUESTO
35 C
36 C *****
37 C
38 C      VARIABLES DE CONTROL
39 C      NCAM= SI ES 1 LA PRESION FINAL NO CAMBIARA CON EL TIEMPO
40 C      IRAS= SI ES 1 SE ESCRIBIRAN UNA SERIE DE VAORES INTERMEDIOS
41 C      IGRA= SI ES 1 SE ESCRIBIRAN LAS GRAFICAS Y LOS VALORES FINALES
42 C      MGRAF= SI ES 1 NO SE ESCRIBIRAN LAS GRAFICAS PERO SI LOS VA-
43 C      LORES FINALES DE PRESION Y GASTO VS LONGITUD
44 C
45 C *****
46 C      READ(5,1)WES,PVAL,P0,P4,TEM,TR,PRI
47 C      FORMAT(246)
48 C      READ(5,1)DT,XL,D,PC1,TC1,PM1
49 C      READ(5,1)NCAM,IRAS,IGRA,MGRAF,ITMAX
50 C
51 C      ITMAX= MAXIMO TIEMPO DEL TRANSIENTE (300 VECES)
52 C
53 C
54 C      WRITE(6,28)ITMAX
55 C      FORMAT(1H1,///,20X,'PROGRAMA PARA DETERMINAR EL TRANSIENTE DE',
56 C      1' PRESION EN UNA SOLA LINEA PARA',2X,14,2X,'SEG',///,5X,100(' '),
57 C      1//)
58 C      WRITE(6,25)PU,P4,TEM,XL,D,DT,ELEM,PM1,PC1,TC1,PRI
59 C      FORMAT(10X,'PRESION INICIAL=',F6.1,2X,'PRESION FINAL=',F6.1,2X,'TE
60 C      MPERATURA MEDIA=',F6.1,/,10X,'LONGITUD (FT)=',F6.1,2X,'DIAMETRO (
      2IN)=',F5.1,2X,'INCREMENTOS DE TIEMPO (SEG)=',F6.5,2X,/,30X,'DATOS

```



```

61      3 ADICIONALES',/,10X,'COMPUESTO='0,2X,2A6,2X,'PESO MOLECULAR='F10.2
62      4,2X,'PRESION CRITICA='F10.2,2X,'TEMPERATURA CRITICA='F10.1,///,
63      515X,'PRESION FINAL A ESTADO ESTABLE='F8.1,///,5X,100('**')
64      1 FORMAT( )
65      WRITE(6,29)NCAM,IRAS,IGRA,MGRAF
66      29 FORMAT(//,40X,'VARIABLES DE CONTROL',//,10X,'NCAM='0,I3,2X,
67      1,'SI ES 1 LA PRESION FINAL NO VARIA',/,10X,'IRAS='0,I3,2X,'SI ES',
68      2,' 0 NO SE ESCRIBEN VALORES INTERMEDIOS',/,10X,'IGRA='0,I3,2X,
69      3,'SI ES 1 SE ESCRIBIRAN LAS GRAFICAS Y LOS VALORES DE GASTO Y ',
70      4,' PRESION CONTRA LONGITUD',/,10X,'MGRAF='0,I3,2X,'SI ES 1 SOLA',
71      5,'MENTE NO SE ESCRIBIRAN LAS GRAFICAS')
72      C *****
73      C
74      C INICIALIZACION DE LAS VARIABLES
75      C
76      C *****
77      P1=P4
78      P2=P4
79      P3=P4
80      CTRL(1)=1.
81      PM(1)=PM1
82      TC(1)=TC1
83      PC(1)=PC1
84      TEM=TEM+460.
85      F=0.014
86      Y(1)=1.
87      V=MULG(1,Y,TEM,1)
88      CALL DELTAP(P0,PR1,RES,PVAL,V,D,XL,TR,XLV,PM1,TEM)
89      TR1=TR/4.
90      TR2=TR/4.*2.
91      TR3=TR/4.*3.
92      XL1=XL/4.
93      XL2=XLV
94      C
95      C SE INICIA EL CALCULO DE LAS CONSTANTES DEL PROGRAMA Y
96      C EL FACTOR DE COMPRESIBILIDAD
97      C
98      Z=1.+0.257*P0/PC1-0.533*TC1*P0/(PC1*TEM)
99      C1=13.6608*Z**2*TEM/(D/12.)*2*PM1)
100     WRITE(6,6)V,TEM,Z,C1
101     6 FORMAT(10X,'VISC='0,F9.5,2X,'TEM='0,F10.2,2X,'Z='0,F6.4,2X,
102     1'C1='0,F10.2,///)
103     DO 10 I=1,ITMAX
104     IF(IRAS.EQ.0)GO TO 150
105     WRITE(6,5)I
106     5 FORMAT(10X,'TIEMPO ='0,I3)
107     150 C2=1.0+3E-6*F*Z*TEM/(PM1*(D/12.))**5)
108     C
109     C CALCULO DE LAS CONDICIONES MEDIAS EN LOS NODOS
110     C
111     P12=(P0+P1)/2.
112     P32=(P1+P2)/2.
113     P52=(P2+P3)/2.
114     P72=(P3+P4)/2.
115     IF((P0/P1).LT.1.01)GO TO 20
116     C *****
117     C
118     C CALCULO DE LOS GASTOS EN FUNCION DE LAS CONDICIONES MEDIAS EN
119     C LOS NODOS
120     C
121     C *****

```

```

122      Q0=SQRT(4.*(P0**2-P12**2)/(C2*XL))
123      Q1=SQRT(ABS(4.*(P12**2-P32**2)/(C2*XL)))
124      Q2=SQRT(ABS(4.*(P32**2-P52**2)/(C2*XL)))
125      Q3=SQRT(ABS(4.*(P52**2-P72**2)/(C2*XL)))
126      QFIN=SQRT(ABS(8.*(P72**2-P4**2)/(C2*XL)))
127      IF(QFIN.GT.Q3)QFIN=Q3*0.98
128      IF(1.NAS.EQ.0)GO TO 120
129      WRITE(6,3)P0,P1,P2,P3,P4,P12,P32,P52,P72,Q0,Q1,Q2,Q3,QFIN,C2
130      3      FORMAT(10X,'VALORES INICIALES',2X,'P0=',F10.2,2X,'P1=',F10.2,
131      12X,'P2=',F9.2,2X,'P3=',F10.2,2X,'P4=',F10.2,/,10X,'P12=',F10.2,2X,
132      2,P32=',F10.2,2X,'P52=',F10.2,2X,'P72=',F10.2,/,10X,'Q0=',F10.2,2X,
133      3,'Q1=',F10.2,2X,'Q2=',F10.2,2X,'Q3=',F10.2,2X,'QFIN=',F10.2,2X,'C2=
134      4',F11.9)
135      WRITE(6,9)
136      9      FORMAT(10X,'VALORES FINALES')
137      120     GAST(1,1)=Q1
138             QIN(1)=Q0
139             GAST(2,1)=Q2
140             GAST(3,1)=Q3
141             GAST(4,1)=QFIN
142             IF(1.EQ.1)GO TO 87
143             IF(GAST(4,1).GE.GAST(4,I-1))GO TO 87
144             GAST(4,1)=GAST(4,I)*1.4142
145             QFIN=GAST(4,1)
146             IF(GAST(4,1).GE.GAST(4,I-1))GO TO 87
147             GAST(4,I)=GAST(4,I-1)
148             QFIN=GAST(4,1)
149     C *****
150     CC
151     CC CALCULO DE LA PROPORCION DE CAMBIO DE LAS PRESIONES MEDIAS
152     CC EN LAS LINEAS, ESTO SERVIRA PARA CONOCER LA PRESION EN CADA
153     CC NOUD.
154     CC
155     C *****
156     87      DP12=4.*C1*(Q0-Q1)*DT/(60.*XL)
157            DP32=4.*C1*(Q1-Q2)*DT/(60.*XL)
158            DP52=4.*C1*(Q2-Q3)*DT/(60.*XL)
159            DP72=4.*C1*(Q3-QFIN)*DT/(60.*XL)
160            P1=P0
161            P2=P1
162            P3=P2
163            P4=P3
164            P1=(DP12+P12)*2.-P0
165            P1B=(P1+P1)/2.
166            P2=(DP32+P32)*2.-P1B
167            IF(P2.GE.P1)GO TO 11
168            P2=(DP32+P32)*2.-P1
169            11      PIC=(P2+P1)/2.
170            P3=(DP52+P52)*2.-PIC
171            IF(P3.GE.P1)GO TO 12
172            P3=(DP52+P52)*2.-PIC
173            12      PID=(P3+P1)/2.
174            IF(1.NCAM.EQ.1) GO TO 13
175            P4=(DP72+P72)*2.-PID
176            IF(P4.GE.P1)GO TO 13
177            P4=(DP72+P72)*2.-PID
178            13      N=60 * 60.
179            CALL FFRIC (N,V,D,F,0,0)
180            IF(P2.LT.P3)P2=P3,DP52
181            IF(P3.LT.P4)P3=P4,DP72
182            IF(P3.LT.P4)P3=P4*.01

```

```

33      IF (IRAS.EQ.0) GO TO 121
34      WRITE (6, L) P0, P1, P2, P3, P4, DP12, DP32, DP52, DP72
35 121   PRES(1, I) = P1
36      PRES(2, I) = P2
37      PRES(3, I) = P3
38      PRES(4, I) = P4
39      IF (XLV.GT.XLI) GO TO 200
40      UP34 = (P0 - P1) / XLI
41      PSV(1) = P0 - UP34 * (XLI - XL2)
42      PSV(1) = P0 - (UP34 * (XLI - XL2 + TR1))
43      PSV2(1) = P0 - (UP34 * (XLI - XL2 + TR2))
44      PSV3(1) = P0 - (UP34 * (XLI - XL2 + TR3))
45      GO TO 203
46 200   IF (XLV.GT.(XLI*2.)) GO TO 201
47      DP34 = (P1 - P2) / XLI
48      PSV(1) = P1 - DP34 * (XLI*2. - XL2)
49      PSV(1) = P1 - (DP34 * (XLI*2. - XL2 + TR1))
50      PSV2(1) = P1 - (DP34 * (XLI*2. - XL2 + TR2))
51      PSV3(1) = P1 - (DP34 * (XLI*2. - XL2 + TR3))
52      GO TO 203
53 201   IF (XLI.GT.(XLI*3.)) GO TO 202
54      DP34 = (P2 - P3) / XLI
55      PSV(1) = P2 - DP34 * (XLI*3. - XL2)
56      PSV(1) = P2 - (DP34 * (XLI*3. - XL2 + TR1))
57      PSV2(1) = P2 - (DP34 * (XLI*3. - XL2 + TR2))
58      PSV3(1) = P2 - (DP34 * (XLI*3. - XL2 + TR3))
59      GO TO 203
60 202   DP34 = (P3 - P4) / XLI
61      PSV(1) = P3 - DP34 * (XLI*4. - XL2)
62      PSV(1) = P3 - (DP34 * (XLI*4. - XL2 + TR1))
63      PSV2(1) = P3 - (DP34 * (XLI*4. - XL2 + TR2))
64      PSV3(1) = P3 - (DP34 * (XLI*4. - XL2 + TR3))
65 203   CONTINUE
66      FORMAT(10X, 'P0=', F10.2, 2X, 'P1=', F10.2, 2X, 'P2=', F10.2, 2X, 'P3=',
67      IF10.2, 2X, 'P4=', F10.2, /, 10X, 'DP12=', F10.2, 2X, 'DP32=', F10.2,
68      2X, 'DP52=', F10.2, 2X, 'DP72=', F10.2)
69 10    CONTINUE
70      WRITE (6, 24)
71 24    FORMAT(4LX, 'DATOS DE PRESTION Y GASTO: //, 15X, 'PRESIONES:',
72      /, 35X, 'GASTOS: //, 15X, 'P1', 7X, 'P2', 7X, 'P3', 7X, 'P4', 7X, 'Q1', 10X,
73      /, 'Q2', 10X, 'Q3', 10X, 'Q4', 7X, 'SEG')
74      DO 93 J=1, 4
75      DO 93 K=1, ITMAX
76 93    GAST(J, K) = GAST(J, K) * 60.
77      DO 97 I=1, ITMAX
78      GAST(4, I) = GAST(4, I) * 1.4142
79 97    GIN(I) = GIN(I) * 60.
80      DO 57 I=1, ITMAX
81      XI = I
82      XI = XI * DT
83 57    WRITE (6, 17) (PRES(J, I), J=1, 4), (GAST(K, I), K=1, 4), XI
84 17    FORMAT(10X, 4(F7.2, 2X), 4(F10.2, 2X), 2X, F6.2)
85      WRITE (6, 60) TR1, TR2, TR3
86      DO 61 I=1, ITMAX
87      XI = I
88      XI = XI * DT
89      WRITE (6, 62) P0, PSV(1), PSV2(1), PSV3(1), GIN(I), XI
90 61    CONTINUE
91 60    FORMAT(/, 10X, 'P0=PRESSION INICIAL, PA=PRESSION A LA SALIDA DE '
92      1, 'LA VALVULA, PB=PRESSION A LOS', F7.1, 2X, ' FT', /, 10X, 'PC=PRESSION ',
93      2, 'A LJS', F7.1, 2X, ' FT, PD=PRESSION A LOS', F6.1, 2X, ' FT', /, 10X, 'QIN=GA

```

```

244      3STO INICIAL',//,13X,'P0',7X,'PA',7X,'PB',7X,'PC',7X,'PD',10X,
245      4*'QIN',5X,'SEG')
246      IF(IGRA.NE.1)GO TO 122
247
C
248      LLAMADO A LA SUBROUTINA DE GRAFICACION
C
249
250      CALL GRA(ITMAX,GAST,PRES,PSV,PSV1,PSV2,PSV3,QIN)
251      62 FORMAT(10X,5(F7.2,2X),F10.2,2X,F6.2,2X,F7.3)
252      122 CONTINUE
253      GO TO 77
254      20 WRITE(6,2)P0,P1
255      4  FORMAT(10X,'ERROR P0=',F10.2,3X,'P1=',F10.2)
256      77 STOP
257      END
258
259      *FOR: IS TPFS.GRA.GRA
SUBROUTINE GRA(ITMAX,GAST,PRES,PSV,PSV1,PSV2,PSV3,QIN)
260      COMMON/GA/NCAM,AL,MGRAF,TR,P0,P4,TEM,D,DT,PM,ELEM(2)
261      DIMENSION GAST(4,300),PRES(4,300),OPROM(4,100),PPROM(4,100),
262      LGMAX(4),PMAX(4),GRAF(100),PSV(300),PSV1(300),PSV2(300),PSV3(300)
263      Z,QIN(300),P1(100),P2(100),Q3(100)
264
C *****
265
C
266
C
267      ESTA ES LA SUBROUTINA PRINCIPAL DE GRAFICACION.
C
268      RECIBE LOS ARREGLOS CON LOS DATOS, LOS REDUCE HASTA UNA CONDICION
C
269      DE NO MAS DE 100 DATOS Y LOS GRAFICA AYUDANDOSE DE LA SUBROUTINA
C
C GRAFA.
270
C PARA GRAFICAR SE USA EL SISTEMA DE PONER UN ASTERISCO EN UN
271
C VECTOR ALFANUMERICO EN LA POSICION CORRESPONDIENTE A SU VALOR
272
C Y ESCRIBIR EL VECTOR.
273
C
274
C
275
C *****
276
277      X=0.
278      XL1=XL/4.
279      XL2=XL*2./4.
280      XL3=XL*3./4.
281      XLV=XL-TR
282      XLT=XL-TR+1000.
283      XIT=ITMAX
284      XIT=XIT/3.
285      IX=XIT
286      I7=ITMAX-2
287      WRITE(6,85)
288      85  FORMAT(1,1)
289      TES=.3*UT
290      WRITE(6,64)XL1,XL2,XL3,XLV
291      DO 60 J=1,4
292      K=1
293      DO 61 I=1,I7,3
294      WPRM(J,K)=(GAST(J,I)+GAST(J,I+1)+GAST(J,I+2))/3.
295      PPROM(J,K)=(PRES(J,I)+PRES(J,I+1)+PRES(J,I+2))/3.
296      IF(K.GT.IX)GO TO 62
297      K=K+1
298      61 CONTINUE
299      62 CONTINUE
300      60 CONTINUE
301      DO 63 J=1,4
302      QMAX(J)=QPRM(J,1)
303      DO 64 I=1,IX
304      IF(QPRM(J,I).LE.QMAX(J))GO TO 64

```

```

305      GMAX(J)=GPRON(J,I)
306      64 CONTINUE
307      63 CONTINUE
308      DO 65 J=1,4
309      PMAX(J)=PPROM(J,I)
310      DO 66 I=1,IX
311      IF(PPROM(J,I).LE.PMAX(J))GO TO 66
312      PMAX(J)=PPROM(J,I)
313      66 CONTINUE
314      65 CONTINUE
315      IF(MGRAF.EQ.1)GO TO 80
316      DO 68 J=1,4
317      WRITE(6,1)J,YES
318      WRITE(6,9)
319      DO 69 I=1,IX
320      IND=GPRON(J,I)*100./GMAX(J)
321      DO 70 K=1,100
322      70 GRAF(K)= ' '
323      IF(IND.LE.0)IND=1
324      IF(IND.GT.100)IND=100
325      GRAF(IND)='*'
326      WRITE(6,2)I,GRAF
327      2 FORMAT(2X,I3,3X,'I',2X,100A1,2X,'I')
328      69 CONTINUE
329      WRITE(6,9)
330      WRITE(6,81)
331      WRITE(6,82)ELEM,P0,XL,PM,P4,D,DT,TEM,ITMAX
332      81 FORMAT(8X,'0',10X,'10',8X,'20',8X,'30',8X,'40',9X,'50',9X,'60',9X,
333      '70',8X,'80',9X,'90',7X,'100',2X,'X',/)
334      82 FORMAT(///,8X,'COMPUESTO',2X,2A6,3X,'PRESION INICIAL',2X,F6.1,'PSI
335      1A',5A,'LONGITUD TOTAL',2X,F10.1,2X,'FT',///,8X,'PESO MOLECULAR',2X,
336      '2F6.1,4X,'PRESION FINAL',2X,F6.1,2X,'PSIA',3X,'DIAMETRO',2X,F10.1,2
337      '3X,'IN',///,4X,'INCREMENTOS DE TIEMPO',2X,F5.3,2X,'TEMPERATURA',2X,
338      '4F8.1,2X,'GR',9X,'TIEMPO TOTAL',15,2X,'SEG',/)
339      84 FORMAT(////////,5X,100(' '),/,5X,'*',20X,'NOTA LOS VALORES DE LONG
340      ITUD SUI (FT)',40X,'*',/,5X,'*',98X,'*',/,5X,'*',98X,'*',/,5X,'*',
341      '230X',NODO 1='F10.1,51X,'*',/,5X,'*',98X,'*',/,5X,'*',30X,'NODO 2='
342      '3',F10.1,51X,'*',/,5X,'*',98X,'*',/,5X,'*',30X,'NODO 3='F10.1,51X,
343      '4',/,5X,'*',98X,'*',/,5X,'*',30X,'NODO 4='F10.1,51X,'*',/,5X,'*'
344      '5,98X,'*',/,5X,'*',98X,'*',/,5X,100(' '))
345      83 FORMAT(///,15X,'NOTA LA PRESION FINAL VARIA CON EL TIEMPO')
346      IF(NCAM.NE.1)WRITE(6,83)
347      68 CONTINUE
348      DO 71 J=1,4
349      WRITE(6,3)J,YES
350      WRITE(6,9)
351      DO 72 I=1,IX
352      IND=PPROM(J,I)*100./PMAX(J)
353      DO 73 K=1,100
354      73 GRAF(K)= ' '
355      IF(IND.LE.0)IND=1
356      IF(IND.GT.100)IND=100
357      GRAF(IND)='*'
358      WRITE(6,2)I,GRAF
359      72 CONTINUE
360      WRITE(6,9)
361      WRITE(6,81)
362      WRITE(6,82)ELEM,P0,XL,PM,P4,D,DT,TEM,ITMAX
363      IF(NCAM.EE.1)WRITE(6,83)
364      71 CONTINUE
365      9 FORMAT(8X,100('A'))

```

```

366 1 FORMAT(1H1,30X,'GRAFICA DE TIEMPO CONTRA % DE GASTO MAXIMO EN',
367 1' EL NUDO',2X,I3,2X,'/',2X,'SEG X',F5.2,30X,'% DE GASTO MAXIMO')
368 3 FORMAT(1H1,30X,'GRAFICA DE TIEMPO CONTRA % DE PRESION MAXIMA',
369 1' EN EL NUDO',2X,I3,2X,'/',2X,'SEG X',F5.2,30X,'% DE PRESION MAXIMA')
370 80 CALL GRAFA(I7,IX,PSV,1,P1)
371 WRITE(6,B1)
372 WRITE(6,02)ELEM,P0,XL,PM,P4,D,DT,TEM,ITMAX
373 IF(NCAM,NE,1)WRITE(6,B3)
374 CALL GRAFA(I7,IX,PSV1,2,GRAF)
375 WRITE(6,B1)
376 WRITE(6,02)ELEM,P0,XL,PM,P4,D,DT,TEM,ITMAX
377 IF(NCAM,NE,1)WRITE(6,B3)
378 CALL GRAFA(I7,IX,PSV2,3,P2)
379 WRITE(6,B1)
380 WRITE(6,02)ELEM,P0,XL,PM,P4,D,DT,TEM,ITMAX
381 IF(NCAM,NE,1)WRITE(6,B3)
382 CALL GRAFA(I7,IX,PSV3,4,GRAF)
383 WRITE(6,B1)
384 WRITE(6,02)ELEM,P0,XL,PM,P4,D,DT,TEM,ITMAX
385 IF(NCAM,NE,1)WRITE(6,B3)
386 CALL GRAFA(I7,IX,QIN,5,Q3)
387 WRITE(6,B1)
388 WRITE(6,02)ELEM,P0,XL,PM,P4,D,DT,TEM,ITMAX
389 IF(NCAM,NE,1)WRITE(6,B3)
390 WRITE(6,7)
391 WRITE(6,4)Q3(1),X
392 WRITE(6,4)QPHOM(1,1),XL1
393 WRITE(6,4)QPHOM(2,1),XL2
394 WRITE(6,4)QPHOM(3,1),XL3
395 WRITE(6,4)QPRM(4,1),XL
396 DO 50 I=10,100,10
397 M=I*3
398 WRITE(6,6)M
399 WRITE(6,4)Q3(I),X
400 WRITE(6,4)QPRM(1,I),XL1
401 WRITE(6,4)QPRM(2,I),XL2
402 WRITE(6,4)QPRM(3,I),XL3
403 50 WRITE(6,4)QPRM(4,I),XL
404 WRITE(6,5)
405 WRITE(6,10)P0,X
406 WRITE(6,10)PPROM(1,I),XL1
407 WRITE(6,10)PPROM(2,I),XL2
408 WRITE(6,10)PPROM(3,I),XL3
409 WRITE(6,10)P1(I),XLV
410 WRITE(6,10)P2(I),XL
411 WRITE(6,10)PPROM(4,I),XL
412 DO 51 I=10,100,10
413 M=I*3
414 WRITE(6,6)M
415 WRITE(6,10)P0,X
416 WRITE(6,10)PPROM(1,I),XL1
417 WRITE(6,10)PPROM(2,I),XL2
418 WRITE(6,10)PPROM(3,I),XL3
419 WRITE(6,10)P1(I),XLV
420 WRITE(6,10)P2(I),XL
421 51 WRITE(6,10)PPROM(4,I),XL
422 4 FORMAT(5X,F10.2,2X,'10/HR',5X,F10.2,2X,'FT')
423 10 5 FORMAT(5X,F10.2,2X,'PSIA',5X,F10.2,2X,'FT')
424 5 FORMAT(10X,'VALORES DE PRESION A 1 SEGUNDO')
425 6 FORMAT(10X,'VALORES DE PRESION A ',I3,2X,'SEGUNDOS')
426 7 FORMAT(1H1,'/',10X,'VALORES DE GASTO A 1 SEGUNDO')

```

```

427      B FORMAT(10X,'VALORES DE GASTO A ',I3,2X,'SEGUNDOS')
428      RETURN
429      END
430  *FOR, IS TPF3, GRAFA, GRAFA
431      SUBROUTINE GRAFA(I7,IX,POR,M,PRON)
432      COMMON/GA/NCAM,XL,MGRAF,TR
433      DIMENSION POK(300),PROM(100),GRAF(100)
434  C *****
435  C
436  C LA FUNCION DE ESTA SUBROUTINA ES LA DE AYUDAR EN LA GRAFICACION
437  C A LA SUBROUTINA GRA.
438  C LOS VALORES LE SERAN MANDADOS DESDE GRA Y AQUI SE GRAFICARAN
439  C
440  C *****
441      TR1=TR/4.
442      TR2=TR1*2.
443      TR3=TR1*3.
444      K=1
445      DO 10 I=1,I7,3
446      PROM(K)=(POR(I)+POR(I+1)+POR(I+2))/3.
447      IF(K.GT.IX)GO TO 11
448  10  K=K+1
449  11  XMAX=PROM(I)
450      DO 20 I=1,IX
451      IF(PROM(I).LE.XMAX)GO TO 20
452      XMAX=PROM(I)
453  20  CONTINUE
454      IF(MGRAF.EQ.1)GO TO 50
455      IF(M.EQ.1)WRITE(6,1)
456      IF(M.EQ.2)WRITE(6,2)TR1
457      IF(M.EQ.3)WRITE(6,3)TR2
458      IF(M.EQ.4)WRITE(6,4)TR3
459      IF(M.EQ.5)WRITE(6,5)
460      WRITE(6,15)
461      DO 30 I=1,IX
462      IND=PROM(I)*100./XMAX
463      DO 40 K=1,100
464  40  GRAF(K)=
465      IF(IND.LE.0)IND=1
466      IF(IND.GT.100)IND=100
467      GRAF(IND)=
468      WRITE(6,9)I,OPAF
469  30  CONTINUE
470      WRITE(6,15)
471  15  FORMAT(6X,104('X'))
472      9  FORMAT(2X,13,2X,'I',100A1,2X,'I')
473      1  FORMAT(1H1,30X,'GRAFICA DE TIEMPO CONTRA % DE PRESION A LA ',
474      1'SALIDA DE LA VALVULA')
475      2  FORMAT(1H1,30X,'GRAFICA DE % DE PRES. A LOS',2X,F8.1,2X,'FT')
476      3  FORMAT(1H1,30X,'GRAFICA DE % DE PRES. A LOS',2X,F8.1,2X,'FT')
477      4  FORMAT(1H1,30X,'GRAFICA DE % DE PRES. A LOS',2X,F8.1,2X,'FT')
478      5  FORMAT(1H1,30X,'GRAFICA DE % DE GASTO INICIAL')
479  50  RETURN
480      END
481  *FOR, IS TPF3, DELTAP, DELTAP
482      SUBROUTINE DELTAP(PO,P4,W,PV,V,D,XL,TR,XLV,PM,TEM)
483      DIMENSION PRES(50)
484  C *****
485  C
486  C
487  C LA FUNCION DE ESTA SUBROUTINA ES LA DE PROPORCIONAR EL PERFIL DE

```

```

488 C PRESIONES QUE SERA NECESARIO ALCANZAR AL LLEGAR A REGIMEN PERMA-
489 C NENTE.
490 C CAMBIARA SI ES NECESARIO LA LONGITUD EQUIVALENTE DEL SISTEMA
491 C PROPORCIONARA UN LETRERO CON LOS VALORES CALCULADOS Y CAMBIARA
492 C ESTOS VALORES EN EL PROGRAMA PRINCIPAL.
493 C
494 C
495 C *****
496 C WRITE(6,6)
497 C XLV=0.
498 C XLONG=0.
499 C DP=(PG-P4)/50.
500 C PRES(1)=P0-DP
501 C DO 10 I=2,50
502 C PRES(I)=PRES(I-1)-DP
503 C CALL FFRIC(W,V,F,0)
504 C DP100=0.000336*F**2/D**5
505 C DO 20 I=1,50
506 C RO=PRES(I)*PM/(TEM*10.72)
507 C 20 XLONG=XLONG+UP*100.*RO/DP100
508 C XLONG=XLONG*1.35
509 C IF(XLONG.GE.XL)GO TO 21
510 C WRITE(6,2)XL,XLONG
511 C XL=XLONG
512 C 21 IF(XLONG.EQ.XL)GO TO 22
513 C WRITE(6,1)XL,XLONG
514 C XL=XLONG
515 C 22 DO 30 I=1,50
516 C RO=PRES(I)*PM/(TEM*10.72)
517 C IF(PRES(I).LE.PV)GO TO 31
518 C 30 XLV=XLV+UP*100.*RO/DP100
519 C 31 XLV=XLV*1.35
520 C XLT=XL-XLV
521 C IF(XLT.GE.TR)GO TO 33
522 C WRITE(6,4)TR,XLT
523 C TR=XLT
524 C 33 IF(XLT.EQ.TR)GO TO 34
525 C WRITE(6,3)TR,XLT
526 C TR=XLT
527 C 34 WRITE(6,5)XL,XLV,PV,TR
528 C 1 FORMAT(10X,'LA LONGITUD TOTAL DADA=',F10.1,2X,'ES MENOR QUE LA LON
529 C GITUD REAL=',F10.1)
530 C 2 FORMAT(10X,'LA LONGITUD TOTAL DADA=',F10.1,2X,'ES MAYOR QUE LA LON
531 C GITUD REAL=',F10.1)
532 C 3 FORMAT(10X,'LA LONGITUD DE TUBO RECTO DADA=',F10.1,2X,'ES MENOR QU
533 C E LA LONGITUD REAL DE TUBO RECTO=',F10.1)
534 C 4 FORMAT(10X,'LA LONGITUD DE TUBO RECTO DADA=',F10.1,2X,'ES MAYOR QU
535 C E LA LONGITUD REAL DE TUBO RECTO=',F10.1)
536 C 5 FORMAT(//,30X,'LAS LONGITUDES QUE SE VAN A UTILIZAR EN EL PROGRAMA
537 C 1 SON:',20X,'LONGITUD TOTAL=',2X,F10.1,3X,'PIES',//,20X,'LONGITUD E
538 C QUIVALENTE DE LA VALVULA=',2X,F10.1,3X,'PIES',//,20X,'PRESION FINAL
539 C 3A LA SALIDA DE LA VALVULA=',2X,F8.2,2X,'PSIA',//,20X,'LONGITUD DE T
540 C UBO RECTO=',2X,F10.1,2X,'PIES',//)
541 C 6 FORMAT(//,5X,100(' '),//)
542 C WRITE(6,6)
543 C RETURN
544 C END
545 C WMAP
546 C IN TPF$.PIPE
547 C IN TPF$.GRA
548 C IN TPF$.GRAFA

```



PROGRAMA PARA DETERMINAR EL TRANSIENTE DE PRESION EN UNA SOLA LINEA PARA 300 SEG

\*\*\*\*\*

PRESION INICIAL= 300.0 PRESION FINAL= 14.7 TEMPERATURA MEDIA= .0  
 LONGITUD (FT)= 16491.0 DIAMETRO (IN)= 10.0 INCREMENTOS DE TIEMPO (SEG)= 1.0000  
 DATOS ADICIONALES  
 COMPUESTO= ETILENO PESO MOLECULAR= 28.05 PRESION CRITICA= 742.00 TEMPERATURA CRITICA= 509.6  
 PRESION FINAL A ESTADO ESTABLE= 20.0

\*\*\*\*\*

VARIABLES DE CONTROL

NCAM= 0 ,SI ES 1 LA PRESION FINAL NO VARIA  
 INAS= 0 ,SI ES 0 NO SE ESCRIBEN VALORES INTERMEDIOS  
 IGRA= 1 ,SI ES 1 SE ESCRIBIRAN LAS GRAFICAS Y LOS VALORES DE GASTO Y PRESION CONTRA LONGITUD  
 MGRA= 0 ,SI ES 1 SOLAMENTE NO SE ESCRIBIRAN LAS GRAFICAS

\*\*\*\*\*

LA LONGITUD TOTAL DADA= 16491.0 ES MAYOR QUE LA LONGITUD REAL= 12041.9  
 LA LONGITUD DE TUBO RECTO DADA= 2000.0 ES MAYOR QUE LA LONGITUD REAL DE TUBO RECTO= 584.6

LAS LONGITUDES QUE SE VAN A UTILIZAR EN EL PROGRAMA SON  
 LONGITUD TOTAL= 12041.9 PIES  
 LONGITUD EQUIVALENTE DE LA VALVULA= 11457.3 PIES  
 PRESION FINAL A SALIDA DE LA VALVULA= 70.00 PSIA  
 LONGITUD DE TUBO RECTO= 584.6 PIES

\*\*\*\*\*

VISC= .00872 TEM= 460.00 Z= .8652 C1= 240.51

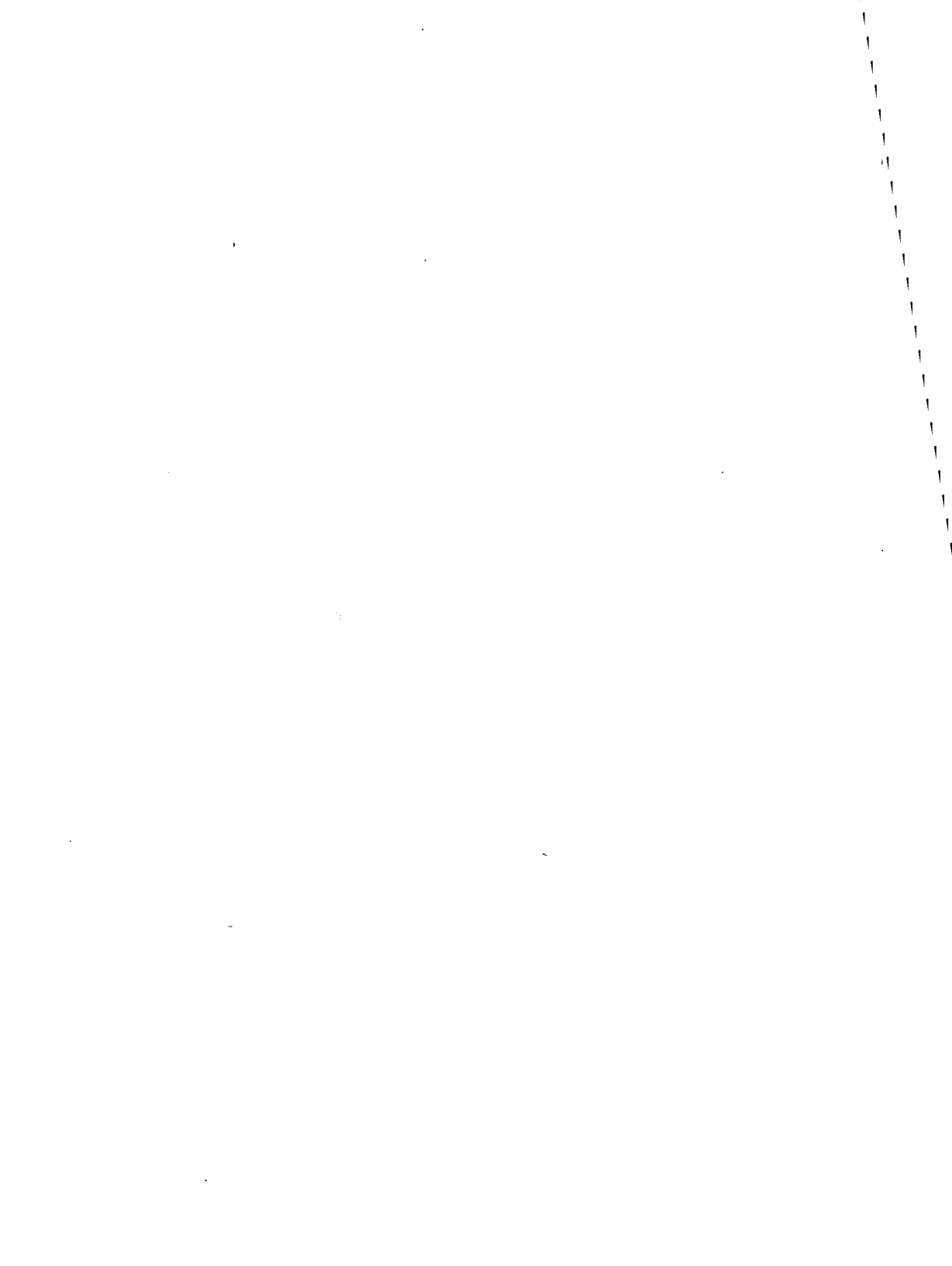
DATOS DE PRESION Y GASTO

PRESIONES				GASTOS				
P1	P2	P3	P4	Q1	Q2	Q3	Q4	SEG
28.59	18.39	14.70	14.70	239701.08	.00	.00	.00	1.00
41.91	21.84	15.35	14.91	253697.74	26018.35	11850.95	.00	2.00
54.42	25.42	16.37	15.41	262047.01	46405.75	16855.43	7810.13	3.00

46.17	29.14	17.79	15.97	269371.90	53070.38	21165.23	12092.90	4.00
7.21	33.00	19.53	16.57	275790.96	64715.98	25431.01	17041.30	5.00
17.56	36.95	19.59	17.16	281400.18	75568.75	29766.10	22354.41	6.00
17.28	40.96	19.94	17.56	286281.85	86535.21	33519.50	28975.44	7.00
16.40	45.00	20.55	18.01	290517.86	98803.88	37426.14	28975.44	8.00
14.96	49.05	21.42	18.46	294172.17	106447.44	41348.22	30403.97	9.00
22.98	53.11	22.50	18.88	297301.50	115512.42	45319.58	33252.13	10.00
30.50	57.16	23.79	19.26	299956.44	124034.05	49358.20	37344.64	11.00
37.55	61.19	25.27	19.56	302182.38	132041.46	53470.50	42437.48	12.00
44.15	65.18	26.90	19.79	304020.23	139560.32	57654.75	48281.68	13.00
50.34	69.14	28.68	19.93	305507.00	146614.26	61903.75	54659.57	14.00
56.14	73.05	30.59	19.99	306676.26	153225.63	66206.93	61395.20	15.00
161.57	76.91	32.00	20.97	307558.59	159415.90	70581.86	68350.47	16.00
160.65	80.72	34.73	21.97	308181.85	165205.92	74400.23	73524.06	17.00
171.42	84.46	36.95	22.97	308571.50	170608.05	78421.87	79036.77	18.00
175.88	88.13	39.25	23.96	308750.62	175641.59	82340.60	84849.22	19.00
180.06	91.74	41.63	24.94	308740.34	180325.43	86240.87	90923.15	20.00
183.98	95.28	44.05	25.89	308559.95	184078.09	90117.74	97221.55	21.00
187.06	98.75	46.53	26.80	308227.09	188717.70	93966.91	103708.73	22.00
191.11	102.14	49.03	27.68	307757.90	192461.97	97704.60	110350.34	23.00
194.35	105.46	51.56	28.51	307167.16	195928.17	101567.47	117113.48	24.00
197.39	108.70	54.10	29.29	306468.39	199133.12	105312.60	123966.69	25.00
200.24	111.87	56.65	30.02	305673.95	202093.12	109017.38	130800.07	26.00
202.93	114.97	59.19	30.70	304795.16	204823.98	112679.43	137825.29	27.00
205.45	117.99	61.72	31.32	303842.35	207340.91	116206.63	144775.64	28.00
207.83	120.93	64.23	31.88	302825.01	209508.61	119066.97	151706.14	29.00
210.08	123.80	66.72	32.38	301751.78	211791.14	123308.58	158593.52	30.00
212.19	126.60	69.18	32.82	300630.58	213751.98	126059.69	165416.29	31.00
214.19	129.32	71.60	33.19	299468.64	215553.96	130278.60	172154.74	32.00
216.09	131.98	73.99	33.52	298272.59	217209.22	133643.69	178790.97	33.00
217.08	134.56	76.33	33.78	297048.47	218729.61	136953.38	185308.89	34.00
219.57	137.07	78.62	33.98	295801.79	220125.78	140206.17	191694.19	35.00
221.18	139.51	80.86	34.14	294537.61	221408.12	143400.63	197934.35	36.00
222.71	141.88	83.05	34.24	293260.54	222586.30	146535.38	204018.52	37.00
224.17	144.19	85.18	34.29	291974.77	223669.35	149609.13	209937.56	38.00
225.55	146.42	87.26	34.29	290684.16	224665.67	152620.67	215603.90	39.00
228.87	148.60	89.28	34.26	289392.19	225593.12	155568.92	221251.54	40.00
228.13	150.70	91.25	34.17	288102.07	226428.89	158452.87	226635.89	41.00
229.35	152.73	93.15	34.06	286816.68	227209.69	161271.65	231833.74	42.00
230.48	154.73	95.00	33.90	285538.68	227931.64	164024.52	236843.12	43.00
231.57	156.65	96.78	33.72	284270.44	228600.35	166710.84	241663.23	44.00
232.63	158.52	98.51	33.50	283014.11	229220.95	169330.15	246204.33	45.00
233.63	160.32	100.18	33.26	281771.67	229798.10	171882.11	250737.66	46.00
234.00	162.00	101.79	33.00	280544.84	230336.02	174366.51	254295.26	47.00
235.53	163.75	103.34	32.72	279335.21	230838.51	176793.30	259070.00	48.00
236.42	165.38	104.84	32.41	278144.15	231309.02	179122.57	262965.35	49.00
237.28	166.96	106.29	32.10	276972.92	231750.60	181414.53	266685.39	50.00
238.10	168.49	107.68	31.76	275822.58	232166.03	183629.54	270234.64	51.00
238.09	169.96	109.02	31.42	274694.09	232557.74	185778.00	273618.03	52.00
239.65	171.39	110.31	31.07	273588.25	232927.91	187860.77	276840.84	53.00
240.39	172.76	111.55	30.71	272505.74	233278.46	189878.29	279908.54	54.00
241.09	174.09	112.74	30.35	271447.13	233611.12	191831.40	282826.79	55.00
241.77	175.37	113.88	29.99	270412.90	233927.37	193721.29	285601.39	56.00
242.43	176.60	114.98	29.62	269403.40	234228.54	195548.68	288238.20	57.00
243.06	177.79	116.04	29.25	268418.90	234515.80	197314.76	290743.06	58.00
243.67	178.94	117.05	28.89	267459.58	234790.17	199020.69	293121.83	59.00
244.25	180.04	118.03	28.52	266525.53	235052.53	200667.68	295380.24	60.00
244.82	181.10	118.96	28.16	265616.79	235303.69	202257.01	297524.00	61.00
245.30	182.13	119.86	27.81	264733.31	235544.31	203790.01	299558.63	62.00
245.88	183.11	120.72	27.45	263874.97	235775.02	205268.03	301489.55	63.00
246.39	184.06	121.55	27.11	263041.63	235996.37	206692.46	303322.01	64.00



ANEXO IV



```

ES,KG:HEAP(1).TRANSI/TESIS
1  RUN EAP,L9354,ES,1,20 *SIN TARJETAS* ALFARO EXT 2290
2  QFOR:IS TPF5,TRAN,TRAN
3  C *****
4  C  PROGRAMA DE TESIS          EAP/HAM
5  C *****
6  REAL JAC,K1,K2,K3
7  INTEGER I,MAX
8  DIMENSION JAC(7,7),F(7),DELTA(7),QA(3),QB(3),PA(3),PB(3),PRA(3),
9  PRB(3),QRA(3),QRB(3),K1(3),K2(3),K3(3),DATOS(6)
10 COMMON /LAM/PA,PRA,PB,PRB,QA,QRA,QB,QRB
11 READ(5,1)DT,PC,TC,PM,TEM,FACTOR,IVES,TOLERA,TMAX,DATOS,VAR,NRAST
12 DO I=1,3
13 C *****
14 C  *** PROGRAMA PARA CALCULAR EL TRANSIENTE DE PRESION Y
15 C  GASTO EN UNA RED SIMPLE DE TUBERIA *****
16 C  SE INICIA LA LECTURA DE DATOS
17 C *****
18 C  READ(5,1)DX,FF,DIAM,PA(I),PB(I),PRA(I),PRB(I)
19 C  READ(5,1)QA(I),QRA(I),QRB(I)
20 C *****
21 C  DIRECTORIO DE VARIABLES
22 C  1.- VARIABLES DE LECTURA
23 C  DT INCREMENTOS DE TIEMPO          SEG
24 C  PC PRESION CRITICA                PSIA
25 C  TC TEMPERATURA CRITICA           GR
26 C  PM PESO MOLECULAR
27 C  FACTOR VALOR PARA AMORTIGUAR LOS VALORES DE CORRECCION
28 C  IVES NUMERO MAXIMO DE ITERACIONES PERMITIDAS
29 C  TOLERA NIVEL DE TOLERANCIA
30 C  TMAX NUMERO TOTAL DE INCREMENTOS DE TIEMPO
31 C  DATOS SIRVEN PARA CAMBIAR LOS VALORES DE PA
32 C  Y VALORES INICIALES 3,4 FINALES
33 C  VAR VARIA LOS VALORES FINALES DE DATOS
34 C  NRAST MANTREU DE VALORES INTERMEDIOS SI ES 1
35 C *****
36 C  VARIABLES DEL PROGRAMA
37 C  JAC  MATRIZ JACOBIANA O DE DERIVADAS PARCIALES
38 C  F    VALORES DE LAS FUNCIONES
39 C  DELTA VALORES DE CORRECCION A LA VARIABLES
40 C *****
41 C  LECTURA DE VARIABLES PARA CADA LINEA
42 C  DA  LONGITUD DE LA LINEA  FT
43 C  FF  FACTOR DE FRICCION
44 C  DIAM DIAMETRO DE LA LINEA  IN
45 C  PA  PRESION EN EL TIEMPO CERO AL INICIO DE LA LINEA PSIA
46 C  PB  PRESION EN EL TIEMPO CERO AL FINAL DE LA LINEA PSIA
47 C  PRA PRESION EN EL TIEMPO T+DT AL INICIO DE LA LINEA PSIA
48 C  PRB PRESION EN EL TIEMPO T+DT AL FINAL DE LA LINEA PSIA
49 C  QA  GASTO EN EL TIEMPO CERO AL INICIO DE LA LINEA LB/SEG
50 C  QB  GASTO EN EL TIEMPO CERO AL FINAL DE LA LINEA LB/SEG
51 C  QRA GASTO EN EL TIEMPO T+DT AL INICIO DE LA LINEA LB/SEG
52 C  QRB GASTO EN EL TIEMPO T+DT AL FINAL DE LA LINEA LB/SEG
53 C *****
54 C *****
55 C  WRITE(6,4)I
56 C  WRITE(6,2)DX,FF,DIAM,PA(I),PB(I),QA(I),QB(I)
57 C  64 FORMAT(//,10X,'LINEA NUMERO=',I2)
58 C  2 FORMAT(1H0,/,5X,'DATOS INICIALES',/,5X,'LONGITUD=',F10.2,2X,
59 C  1'FF=',F10.5,5X,'DIAMETRO=',F10.2,/,5X,'PA=',F10.2,5X,'PB=',F10.2,
60 C  25X,'QRA=',F10.2,5X,'QRB=',F10.2)

```

```

61      PA(I)=PA(I)*144.
62      PB(I)=PB(I)*144.
63      PRA(I)=PRA(I)*144.
64      PRB(I)=PRB(I)*144.
65      Z=1+.0.257/PC-(0.533*TC*PA(I)/(144.*PC*TEM))
66      DIAM=DIAM/12.
67      AREA=DIAM**2*3.1416/4.
68      K1(I)=2*1545*TEM*DT/(AREA*DX*PM)
69      K2(I)=DX/(AREA*64.4*DT)
70      K3(I)=0.0251729*49*2*1545.*TEM*DX/(4.*DIAM**5*PM)*FF
71      WRITE(6,3)K1(I),K2(I),K3(I)
72      10  WRITE(6,65)
73      65  FORMAT(/,10X,30(' '))
74      3  FORMAT(/,2X,'CONSTANTES',/,5X,'K1=',F10.3,2X,'K2=',F10.3,3X,'K3=',
75      IF10.3)
76      C *** INICIO DE CALCULOS ***
77      C ** CALCULO DE VALORES DE F ***
78      WRITE(6,72)
79      LCONT=1
80      DO 500 ITIME=1,ITMAX
81      ICONT=1
82      ICONT=0
83      72  FORMAT(11H1//,5X,'E.A.P. / R.A.M.',20X,'TESIS DE TRANSIENTE',
84      //,20X,'PROGRAMA PARA CALCULAR EL TRANSIENTE DE PRESI
85      2UN EN UNA RED DE TUBERIAS',/,1X,'TIEMPO:',4X,'PA',9X,'PB',9X,'QA',
86      3T45,'QB',T55,'PRA',T66,'PRB',T78,'ORA',T86,'ORB',T98,'LINEA',/,T11
87      4,'PSIA',T22,'PSIA',T33,'LB/SEG',T43,'LB/SEG',T55,'PSIA',T66,'PSIA'
88      5,T76,'LB/SEG',T88,'LB/SEG',/)
89      100  DO 11 I=1,3
90      F(I)=PRA(I)+PRB(I)-PA(I)-PB(I)+K1(I)*(ORB(I)+QB(I)-ORA(I)-QA(I))
91      UN=(PRB(I)+PB(I))*2-(PRA(I)+PA(I))*2
92      DOS=K2(I)*(PRB(I)+PRA(I)+PA(I)+PB(I))*(ORA(I)+ORB(I)-QA(I)-QB(I))
93      TRES=(ORA(I)+ORB(I)+QA(I)+QB(I))*2*K3(I)
94      11  F(I+3)=UN+DOS+TRES
95      F(7)=ORA(3)-ORB(1)-ORB(2)
96      C ** CALCULO DE LA MATRIZ JACOBIANA ***
97      DO 12 I=1,3
98      JAC(I,1)=-K1(I)
99      JAC(I,1+3)=K1(I)
100     JAC(I,7)=1.
101     JAC(I+3,1)=K2(I)*(PRB(I)+PRA(I)+PA(I)+PB(I))+2.*K3(I)*(ORA(I)+
102     ORB(I)+QA(I)+QB(I))
103     12  JAC(I+3,1+3)=JAC(I+3,I)
104     DO 13 I=1,2
105     13  JAC(I+3,7)=2.*(PRB(I)+PB(I))+K2(I)*(ORA(I)+ORB(I)-QA(I)-QB(I))
106     JAC(6,7)=-2.*(PRA(3)+PA(3))+K2(3)*(ORA(3)+ORB(3)-QA(3)-QB(3))
107     JAC(7,3)=1.
108     JAC(7,4)=-1.
109     JAC(7,5)=-1.
110     C ** CAMBIO DE RENGLONES EN LA MATRIZ JACOBIANA **
111     DO 14 I=1,7
112     GUAR=JAC(4,I)
113     JAC(4,I)=JAC(7,I)
114     14  JAC(7,I)=GUAR
115     GUAR=F(4)
116     F(4)=F(7)
117     F(7)=GUAR
118     C ** INVERSION DE LA MATRIZ Y OBTENCION DE DELTAS **
119     CALL INVMAT(7,1,JAC,F,DELT)
120     C ** ESCRITURA DE RESULTADOS **
121     IF(NRST.NE.1)GO TO 70

```

```

122 WRITE(6,4)
123 4 FORMAT(//,10X,'RESULTADOS')
124 DO 15 I=1,7
125 15 WRITE(6,5)(JAC(I,J),J=1,7),DELTA(I),F(I)
126 5 FORMAT(5X,7(F10.2,1X),10X,F10.2,5X,'I',5X,F11.1)
127 70 DO 16 I=1,6
128 C ***** COMPARACION DE VALORES DE DELTA CON LA TOLERANCIA **
129 16 IF(ABS(DELTA(I)).GT.TOLERA)GO TO 25
130 IF(ABS(DELTA(7)/144.).GT.TOLERA)GO TO 25
131 IF(LCONT.GT.8)WRITE(6,72)
132 IF(LCONT.GT.8)LCONT=1
133 PSIA=PRA(3)/144.
134 IF(NRAST.NE.1)GO TO 71
135 WRITE(6,6)PSIA
136 6 FORMAT(//,10X,'SE ALCANZO CONVERGENCIA',//,10X,'P3=',F10.2)
137 DO 17 I=1,3
138 17 WRITE(6,7)GRA(I),GRB(I)
139 7 FORMAT(//,5X,'GRA=',F10.2,5X,'GRB=',F10.2)
140 71 CALL CAMBIA(ITIME,DT,DATOS,VAR)
141 C *** CAMBIO DE VALORES PARA EL PROXIMO INCREMENTO ***
142 LCONT=LCONT+1
143 GO TO 500
144 25 DO 18 I=1,3
145 C *** CORRECCION DE VALORES *****
146 GRA(I)=GRA(I)-DELTA(I)/FACTOR
147 18 GRB(I)=GRB(I)-DELTA(I+3)/FACTOR
148 PRA(3)=PRA(3)-DELTA(7)/FACTOR
149 PRB(1)=PRA(3)
150 PRB(2)=PRA(3)
151 IF(LCONT.GE.IVLS)GO TO 26
152 ICONT=ICONT+1
153 PSIA=PRA(3)/144.
154 IF(NRAST.NE.1)GO TO 75
155 WRITE(6,8)PSIA
156 8 FORMAT(//,10X,'RESULTADOS INTERMEDIOS',//,10X,'PRA=',F10.2)
157 DO 19 I=1,3
158 19 WRITE(6,7)GRA(I),GRB(I)
159 75 DO 58 I=1,7
160 C *** LIMPIEZA DE LA MATRIZ JACOBIANA ***
161 JAC(4,I)=0.0
162 58 JAC(7,I)=0.0
163 1 FORMAT( )
164 GO TO 100
165 500 CONTINUE
166 WRITE(6,152)
167 152 FORMAT(//,10X,'*** FIN DE PROGRAMA ***')
168 STOP
169 26 WRITE(6,27)IVES
170 27 FORMAT(//,5X,'NO SE ALCANZO CONVERGENCIA EN',I4,2X,'ITERACIONES')
171 STOP
172 END
173 @FOR,IS TPFS,CAMBIA,.CAMBIA
174 SUBROUTINE CAMBIA(ITIME,DT,DATOS,VAR)
175 COMMON /CAM/PRA(3),PRA(3),PRB(3),PRB(3),QA(3),QRA(3),QB(3),QRB(3)
176 DIMENSION P1(3),PR1(3),P2(3),PR2(3),DATOS(4)
177 C *****
178 C LA FUNCION DE ESTA SUBROUTINA ES LA DE ESCRIBIR LOS VALORES
179 C RESULTANTES Y CAMBIARLOS PAR; EL SIGUIENTE INTERVALO
180 C *****
181 TIME=ITIME
182 DO 10 I=1,3

```



```

183      P1(I)=PA(I)/144.
184      PR1(I)=PRA(I)/144.
185      P2(I)=PB(I)/144.
186      10 PR2(I)=PRB(I)/144.
187      TIME=TIME * UT
188      DO 11 I=1,3
189      11 *R1E(6,1) TIME,P1(I),P2(I),QA(I),QB(I),PR1(I),PR2(I),GRA(I),
190 C ***** ESCRITURA DE RESULTADOS *****
191      1 GRB(I),I
192      1 FORMAT(/,1X,F5.1,2X,B(F8.2,3X),2X,I5)
193      PA(3)=PRA(3)
194      DO 12 I=1,3
195 C *** REINICIO DE VARIABLES ***
196      QA(I)=GRA(I)
197      QB(I)=GRB(I)
198      GRA(I)=GRA(I)+1
199      GRB(I)=GRB(I)+1.
200      12 CONTINUE
201      PB(3)=PRB(3)
202      PB(1)=PRA(3)
203      PB(2)=PRA(3)
204 C *** CAMBIO DE LA PRESION INICIAL *****
205      DO 13 I=1,2
206      PA(I)=PRA(I)
207      PRA(I)=PRA(I)+DATOS(I)*SIN(0.017453292*DADOS(I+2))
208      13 CONTINUE
209      PRB(3)=PRB(3)+DADOS(3)*SIN(0.017453292*DADOS(6))
210      DO 14 I=4,6
211      DATOS(I)=DADOS(I)+VAR
212      RETURN
213      END
214 @FOR, IS TPF5, INVMAT, .INVMAT
215 SUBROUTINE INVMAT(N,IOPT,XMAT,VEC,SOL)
216 DIMENSION AMAT(7,15),VEC(7),XMAT(7,7),SOL(7)
217 C *****
218 C SUBROUTINA INVERSORA DE MATRICES
219 C *****
220      DO 25 I=1,7
221      DO 25 J=1,15
222      25 AMAT(I,J)=0.0
223      NI=N+1
224      NMOD=N+N+1
225      DO 10 I=2,N
226      DO 10 J=1,N
227      10 AMAT(I,J)=XMAT(I,J)
228      DO 1001 K=1,N
229      AMAT(K,NI)=VEC(K)
230      IUN=K+NI
231      1001 AMAT(K,IUN)=1.0
232      DO 1003 I=1,N
233      DIV=AMAT(I,I)
234      DO 1002 J=1,NMOD
235      1002 AMAT(I,J)=AMAT(I,J)/DIV
236      DO 1009 L=1,N
237      IF(L.EQ.1)GO TO 1009
238      FACTOR=AMAT(L,I)
239      DO 1004 M=I,NMOD
240      1004 AMAT(L,M)=AMAT(L,M)-(AMAT(I,M))*FACTOR
241      1009 CONTINUE

```

BRUN EAP+E9354\*ES \*S/T \* ALFARO EXT 2290

QXGT ES\*RGNCTR1.TRANSI/TRES

LINEA NUMERO= 1

DATOS INICIALES

LONGITUD= 350.00 FF= .01310 DIAMETRO= 12.00  
PA= 50.00 PB= 39.86 QA= 50.00 QB= 50.00

CONSTANTES

K1= 29.636 K2= 30.086 K3= 1022.042

LINEA NUMERO= 2

DATOS INICIALES

LONGITUD= 250.00 FF= .01375 DIAMETRO= 9.16  
PA= 70.00 PB= 39.86 QA= 60.00 QB= 60.00

CONSTANTES

K1= 70.363 K2= 36.865 K3= 2919.637

LINEA NUMERO= 3

DATOS INICIALES

LONGITUD= 300.00 FF= .01266 DIAMETRO= 13.83  
PA= 39.86 PB= 14.70 QA= 110.00 QB= 110.00

CONSTANTES

K1= 26.197 K2= 19.426 K3= 420.047

## PROGRAMA PARA CALCULAR EL TRANSIENTE DE PRESION EN UNA RED DE TUBERIAS

TIEMPO	PA PSIA	PB PSIA	QA LB/SEG	QB LB/SEG	PRA PSIA	PRB PSIA	GRA LB/SEG	QRB LB/SEG	LINEA
.2	50.00	39.86	50.00	50.00	50.10	40.85	65.70	60.41	1
.2	70.00	39.86	60.00	60.00	70.10	40.85	80.43	78.20	2
.2	39.86	14.70	110.00	110.00	40.85	14.85	138.61	132.35	3
.5	50.10	40.85	65.70	60.41	50.10	42.17	63.73	62.58	1
.5	70.10	40.85	80.43	78.20	70.10	42.17	74.70	74.22	2
.5	40.85	14.85	138.61	132.35	42.17	14.85	136.81	135.80	3
.7	50.10	42.17	63.73	62.58	50.10	42.01	60.70	62.63	1
.7	70.10	42.17	74.70	74.22	70.11	42.01	74.35	75.16	2
.7	42.17	14.85	136.81	135.80	42.01	14.85	137.78	139.68	3
.9	50.10	42.01	60.70	62.63	50.11	41.63	62.10	61.99	1
.9	70.11	42.01	74.35	75.16	70.12	41.63	75.06	75.01	2
.9	42.01	14.85	137.78	139.68	41.63	14.86	137.00	137.14	3
1.1	50.11	41.63	62.10	61.99	50.11	41.77	62.74	62.17	1
1.1	70.12	41.63	75.06	75.01	70.14	41.77	75.28	75.02	2
1.1	41.63	14.86	137.00	137.14	41.77	14.86	137.30	136.37	3
1.4	50.11	41.77	62.74	62.17	50.11	41.88	62.21	62.24	1
1.4	70.14	41.77	75.28	75.02	70.16	41.88	75.03	75.02	2
1.4	41.77	14.86	137.30	136.37	41.88	14.87	137.26	137.56	3
1.6	50.11	41.88	62.21	62.24	50.11	41.81	61.99	62.26	1
1.6	70.16	41.88	75.03	75.02	70.19	41.81	75.04	75.12	2
1.6	41.88	14.87	137.26	137.56	41.81	14.88	137.38	137.39	3
1.8	50.11	41.81	61.99	62.26	50.11	41.80	62.32	62.10	1
1.8	70.19	41.81	75.04	75.12	70.22	41.80	75.24	75.11	2
1.8	41.81	14.88	137.38	137.39	41.80	14.90	137.21	137.20	3

E.A.P. / R.A.M.		TESIS DE TRANSIENTE							
PROGRAMA PARA CALCULAR EL TRANSIENTE DE PRESION EN UNA RED DE TUBERIAS									
TIEMPO	PA PSIA	PB PSIA	QA LB/SEG	QB LB/SEG	PRA PSIA	PRB PSIA	QRA LB/SEG	QRB LB/SEG	LINEA
2.1	50.11	41.80	62.32	62.10	50.11	41.84	62.18	62.22	1
2.1	70.22	41.80	75.24	75.11	70.26	41.84	75.22	75.20	2
2.1	41.80	14.90	137.21	137.20	41.84	14.91	137.41	137.13	3
2.3	50.11	41.84	62.10	62.22	50.12	41.85	62.19	62.08	1
2.3	70.26	41.84	75.22	75.20	70.30	41.85	75.29	75.21	2
2.3	41.84	14.91	137.41	137.13	41.85	14.93	137.29	137.41	3
2.5	50.12	41.85	62.19	62.08	50.12	41.85	62.06	62.15	1
2.5	70.30	41.85	75.29	75.21	70.35	41.85	75.33	75.31	2
2.5	41.85	14.93	137.29	137.41	41.85	14.94	137.46	137.23	3
2.8	50.12	41.85	62.06	62.15	50.12	41.87	62.16	62.00	1
2.8	70.35	41.85	75.33	75.31	70.40	41.87	75.45	75.33	2
2.8	41.85	14.94	137.46	137.23	41.87	14.96	137.33	137.38	3
3.0	50.12	41.87	62.16	62.00	50.12	41.88	62.00	62.07	1
3.0	70.40	41.87	75.45	75.33	70.45	41.88	75.47	75.44	2
3.0	41.87	14.96	137.33	137.38	41.88	14.98	137.52	137.27	3
3.2	50.12	41.88	62.00	62.07	50.12	41.90	62.07	61.92	1
3.2	70.45	41.88	75.47	75.44	70.50	41.90	75.59	75.47	2
3.2	41.88	14.98	137.52	137.27	41.90	15.00	137.39	137.46	3
3.4	50.12	41.90	62.07	61.92	50.13	41.91	61.92	61.99	1
3.4	70.50	41.90	75.59	75.47	70.56	41.91	75.62	75.59	2
3.4	41.90	15.00	137.39	137.46	41.91	15.02	137.58	137.32	3
3.7	50.13	41.91	61.92	61.99	50.13	41.93	61.99	61.83	1
3.7	70.56	41.91	75.62	75.59	70.61	41.93	75.74	75.62	2
3.7	41.91	15.02	137.58	137.32	41.93	15.04	137.45	137.51	3

L.A.P. / R.A.M.

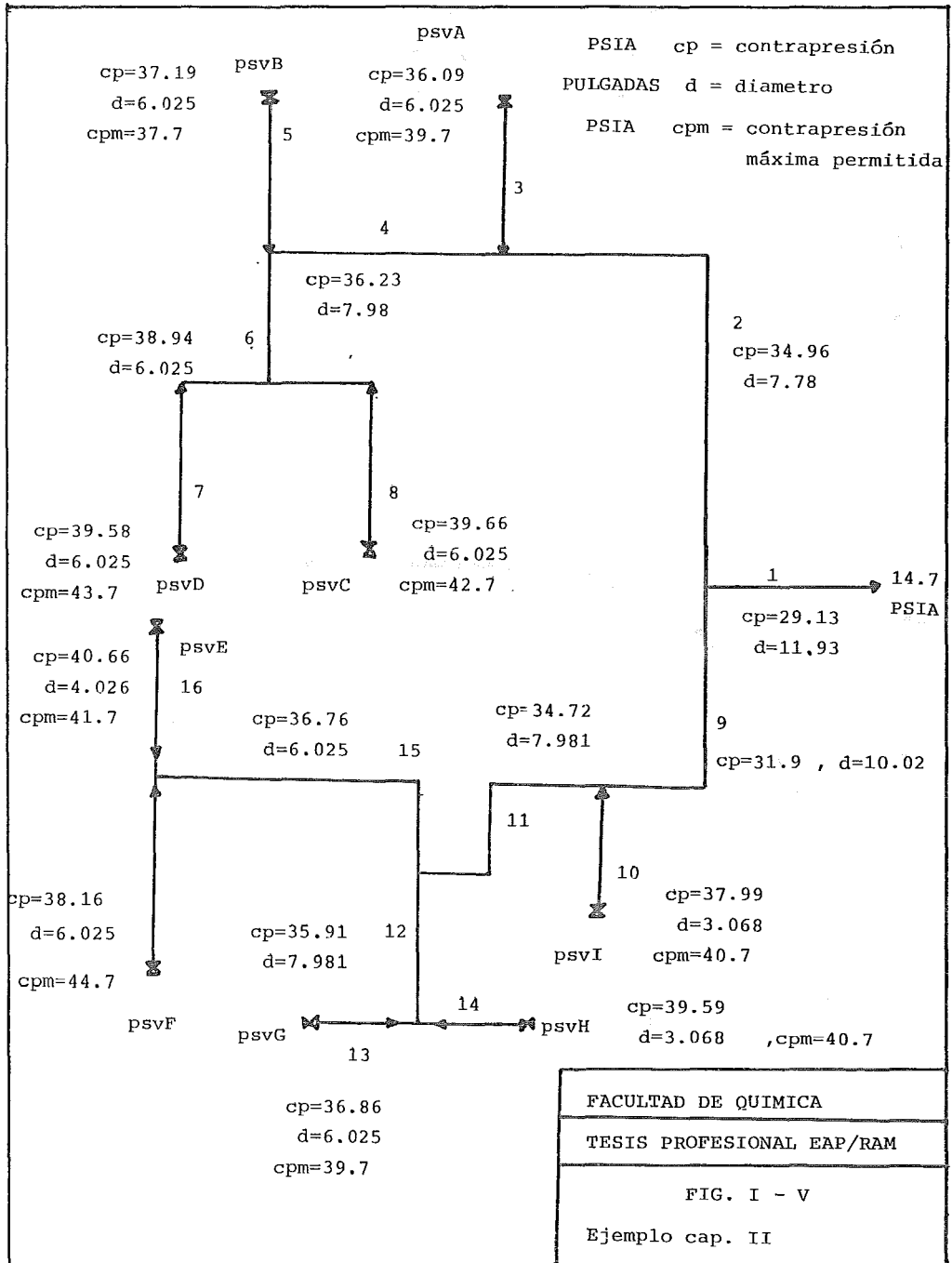
## TESIS DE TRANSIENTE

PROGRAMA PARA CALCULAR EL TRANSIENTE DE PRESION EN UNA RED DE TUBERIAS

TIEMPO	PA PSIA	PB PSIA	QA LB/SEG	QB LB/SEG	PRA PSIA	PRB PSIA	QRA LB/SEG	QRB LB/SEG	LINEA
3.9	50.13	41.93	61.99	61.83	50.13	41.94	61.83	61.90	1
3.9	70.61	41.93	75.74	75.62	70.67	41.94	75.77	75.74	2
3.9	41.93	15.04	137.45	137.51	41.94	15.06	137.64	137.39	3
4.1	50.13	41.94	61.83	61.90	50.13	41.96	61.89	61.74	1
4.1	70.67	41.94	75.77	75.74	70.72	41.96	75.89	75.78	2
4.1	41.94	15.06	137.64	137.39	41.96	15.08	137.52	137.57	3
4.4	50.13	41.96	61.89	61.74	50.13	41.98	61.74	61.81	1
4.4	70.72	41.96	75.89	75.78	70.78	41.98	75.92	75.90	2
4.4	41.96	15.08	137.52	137.57	41.98	15.10	137.70	137.45	3
4.6	50.13	41.98	61.74	61.81	50.13	41.99	61.80	61.65	1
4.6	70.78	41.98	75.92	75.90	70.83	41.99	76.04	75.93	2
4.6	41.98	15.10	137.70	137.45	41.99	15.12	137.57	137.64	3
4.8	50.13	41.99	61.80	61.65	50.14	42.01	61.64	61.72	1
4.8	70.83	41.99	76.04	75.93	70.88	42.01	76.06	76.04	2
4.8	41.99	15.12	137.57	137.64	42.01	15.14	137.76	137.51	3
5.1	50.14	42.01	61.64	61.72	50.14	42.02	61.71	61.56	1
5.1	70.88	42.01	76.06	76.04	70.93	42.02	76.17	76.07	2
5.1	42.01	15.14	137.76	137.51	42.02	15.16	137.63	137.70	3
5.3	50.14	42.02	61.71	61.56	50.14	42.03	61.56	61.64	1
5.3	70.93	42.02	76.17	76.07	70.97	42.03	76.19	76.17	2
5.3	42.02	15.16	137.63	137.70	42.03	15.18	137.81	137.57	3
5.5	50.14	42.03	61.56	61.64	50.14	42.05	61.63	61.49	1
5.5	70.97	42.03	76.19	76.17	71.01	42.05	76.28	76.19	2
5.5	42.03	15.18	137.81	137.57	42.05	15.19	137.68	137.76	3

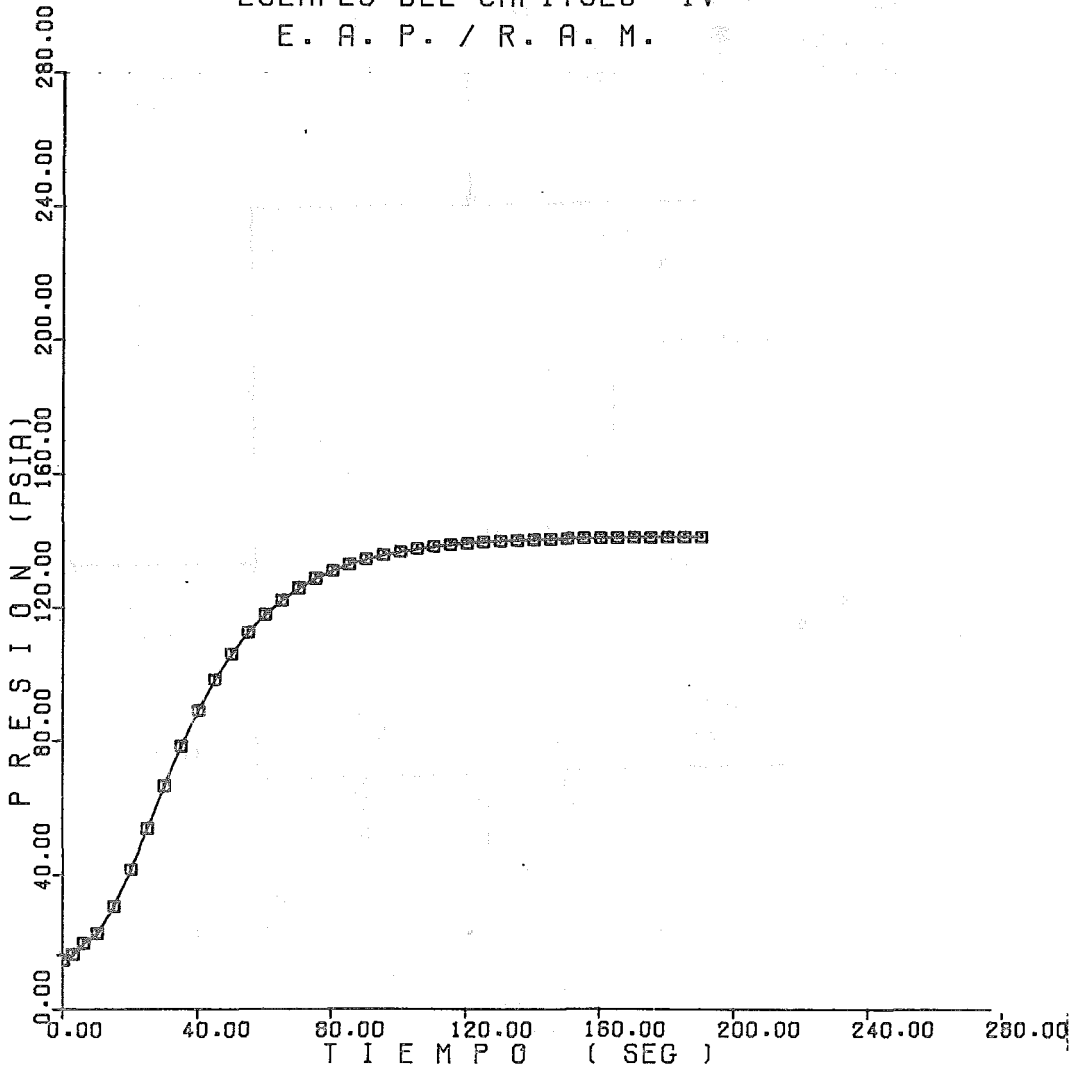
A N E X O V







ANALISIS DE PRESION VS TIEMPO  
EJEMPLO DEL CAPITULO IV  
E. A. P. / R. A. M.



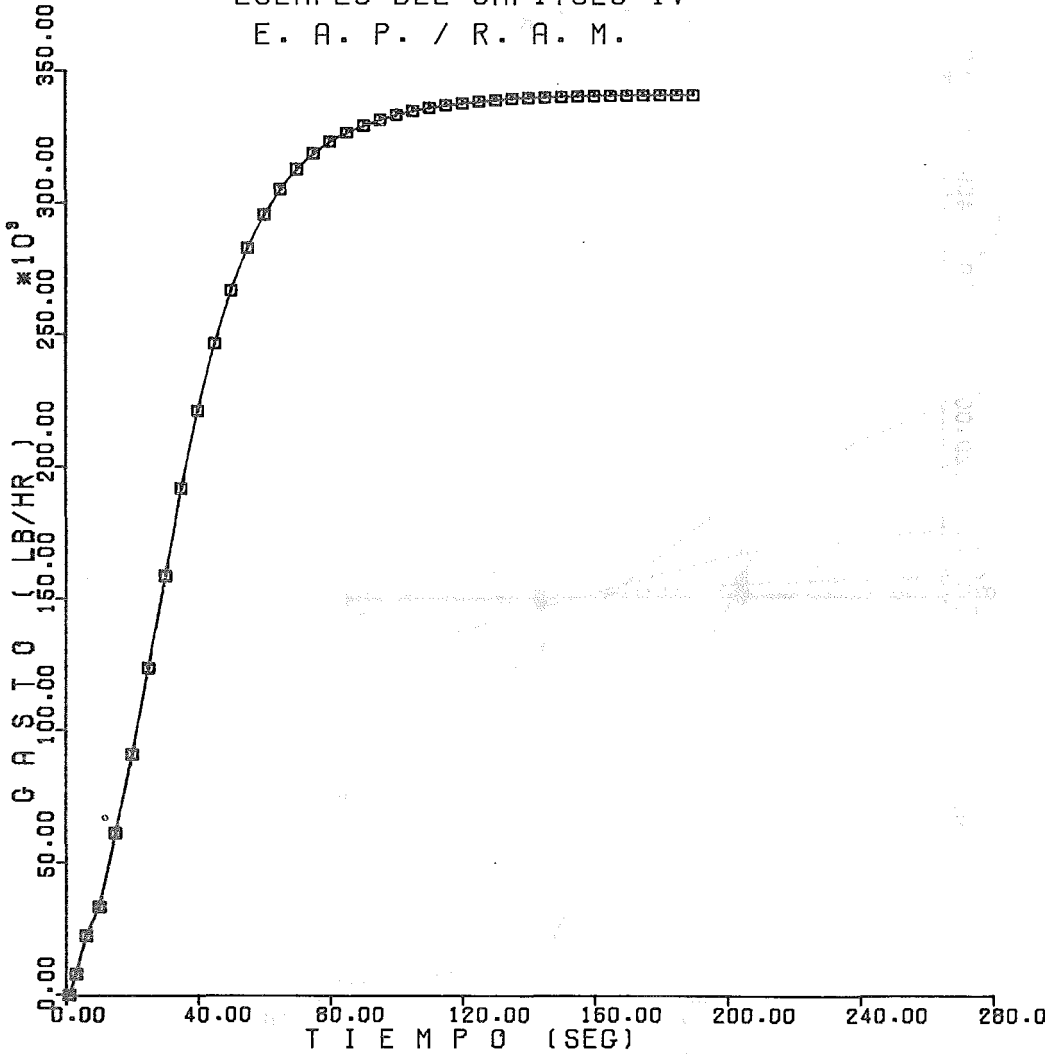
□ CAMBIO DE PRESION

FACULTAD DE QUIMICA  
TESIS PROFESIONAL

FIG. II-V

CAMBIO DE LA PRESION CON RESPECTO AL TIEMPO EN UN NODO  
EJEMPLO DEL CAPITULO IV MODELO DE PIPERTRAN

ANALISIS DE GASTO VS TIEMPO  
EJEMPLO DEL CAPITULO IV  
E. A. P. / R. A. M.



□ CURVA DE GASTO MASICO

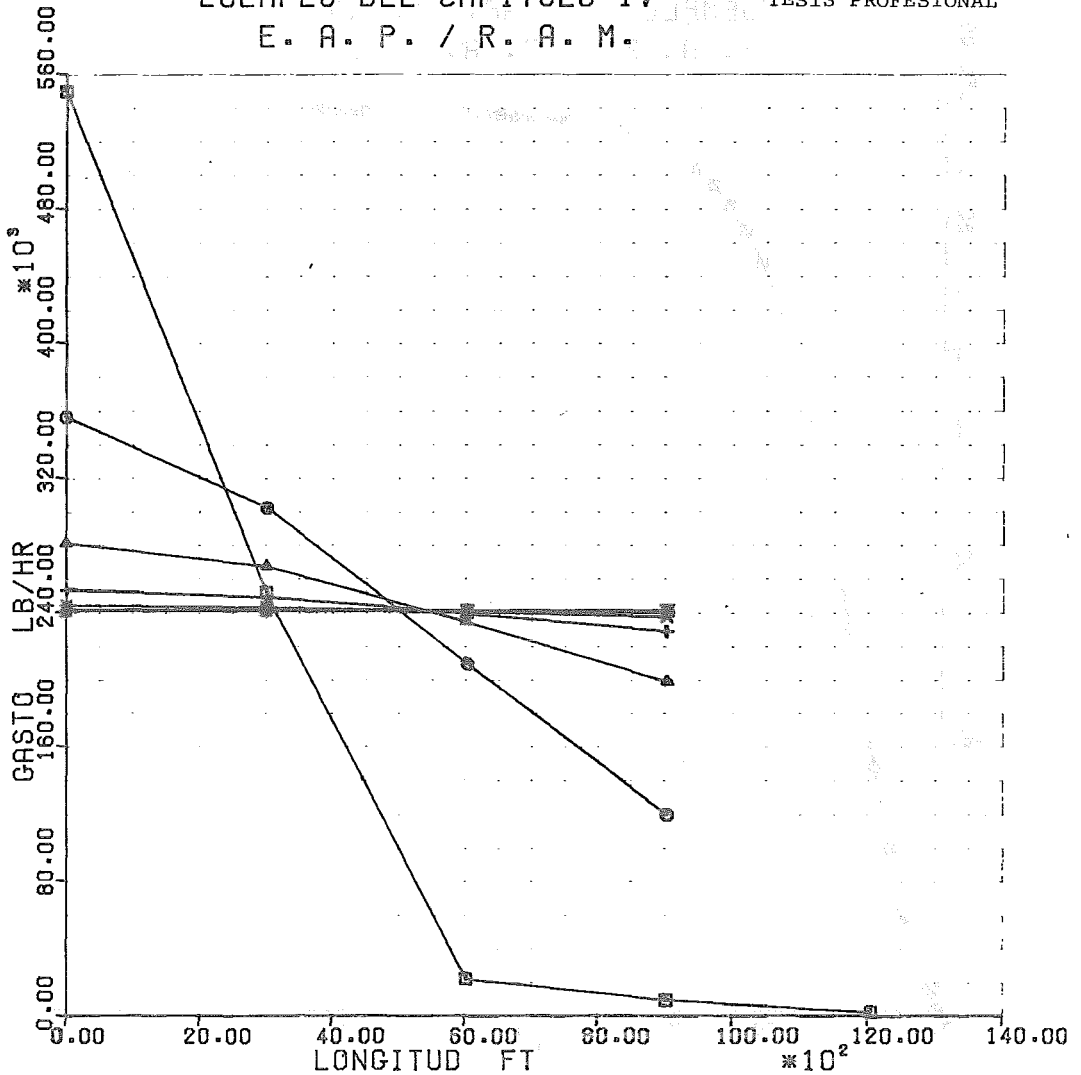
FACULTAD DE QUIMICA  
TESIS PROFESIONAL

FIG. III-V

CAMBIO DEL GASTO CON RESPECTO AL TIEMPO EN UN NODO  
EJEMPLO DEL CAPITULO IV MODELO PIPERTRAN

PERFIL DE GASTO VS TIEMPO  
 EJEMPLO DEL CAPITULO IV  
 E. A. P. / R. A. M.

FACULTAD DE QUIMICA  
 TESIS PROFESIONAL

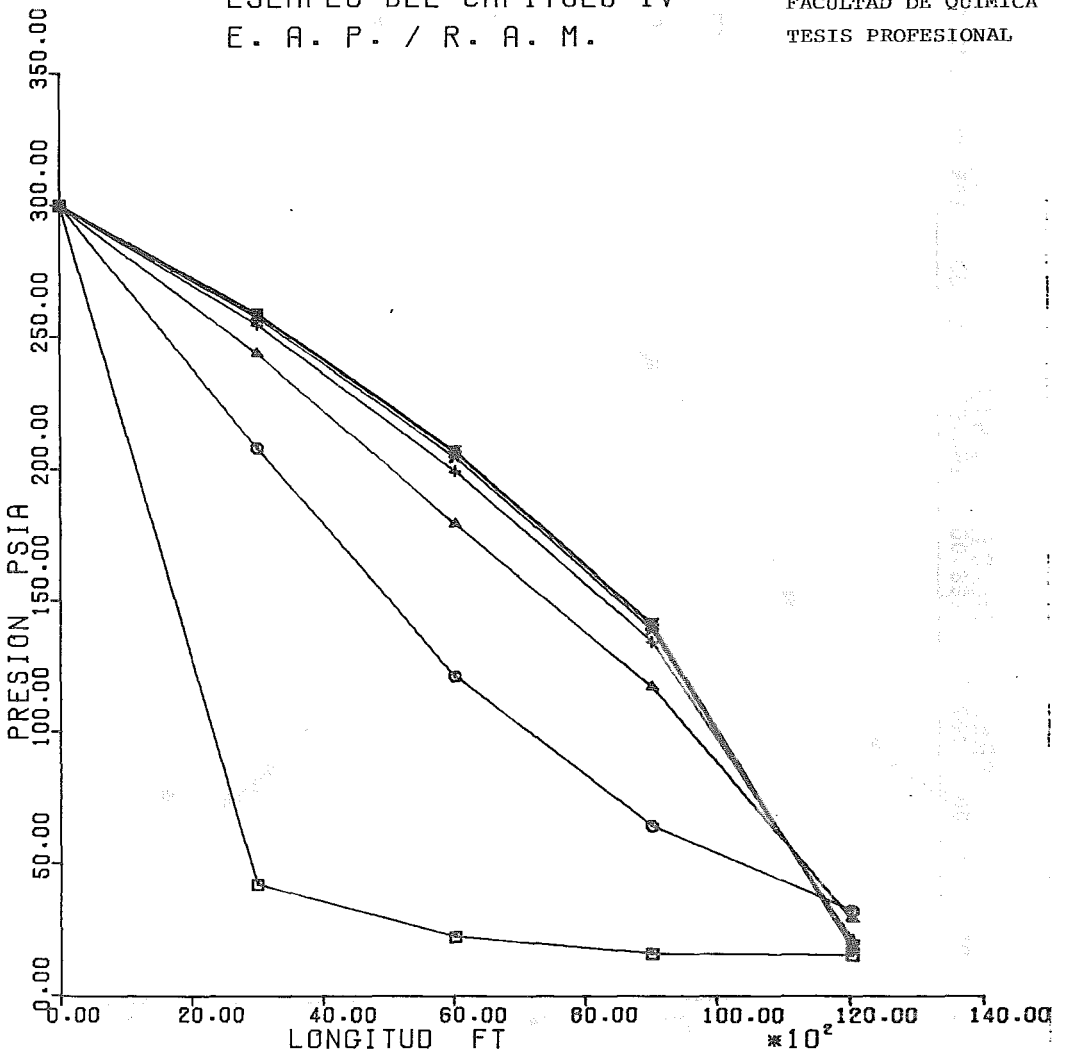


- GASTO A 30 SEGUNDOS
- △ GASTO A 60 SEGUNDOS
- + GASTO A 90 SEGUNDOS
- X GASTO A 120 SEGUNDOS
- ◇ GASTO A 150 SEGUNDOS
- ◊ GASTO A 180 SEGUNDOS
- × GASTO A 210 SEGUNDOS
- GASTO A 240 SEGUNDOS
- Y GASTO A 270 SEGUNDOS
- X GASTO A 300 SEGUNDOS

FIG. IV-V  
 PERFIL DE GASTO VS LONGITUD CAP IV

PERFIL DE PRESIONES VS TIEMPO  
 EJEMPLO DEL CAPITULO IV  
 E. A. P. / R. A. M.

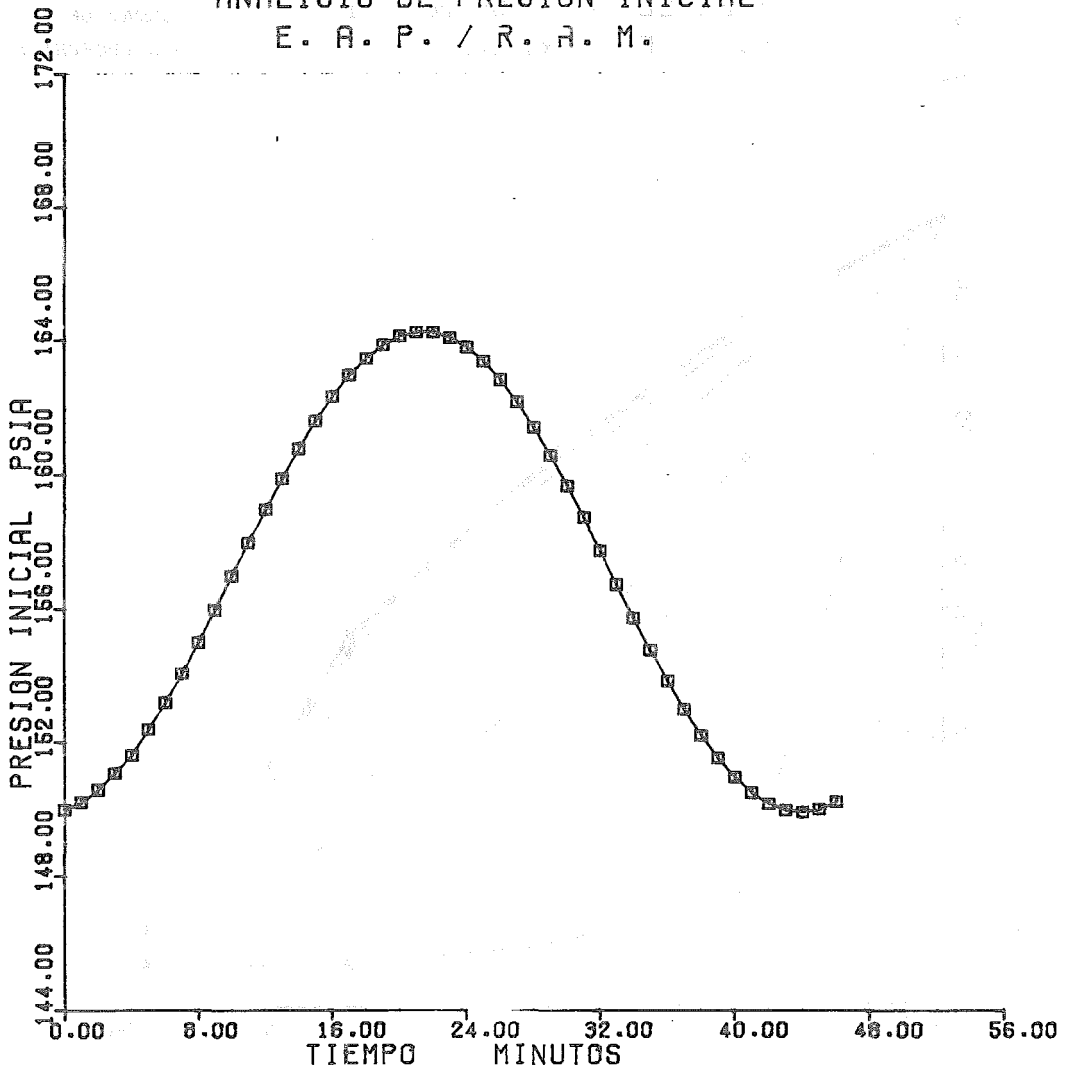
FACULTAD DE QUIMICA  
 TESIS PROFESIONAL



- PRESION A 1 SEGUNDO
- PRESION A 30 SEGUNDOS
- △ PRESION A 60 SEGUNDOS
- + PRESION A 90 SEGUNDOS
- × PRESION A 120 SEGUNDOS
- ◇ PRESION A 150 SEGUNDOS
- ♠ PRESION A 180 SEGUNDOS
- × PRESION A 210 SEGUNDOS
- ≡ PRESION A 240 SEGUNDOS
- Y PRESION A 270 SEGUNDOS
- ⌘ PRESION A 300 SEGUNDOS

FIG. V-V  
 EJEMPLO CAPITULO IV PIPERTRAN

TRANSIENTE DE PRESION Y GASTO  
ANALISIS DE PRESION INICIAL  
E. A. P. / R. A. M.



□ CURVA DE PRESION

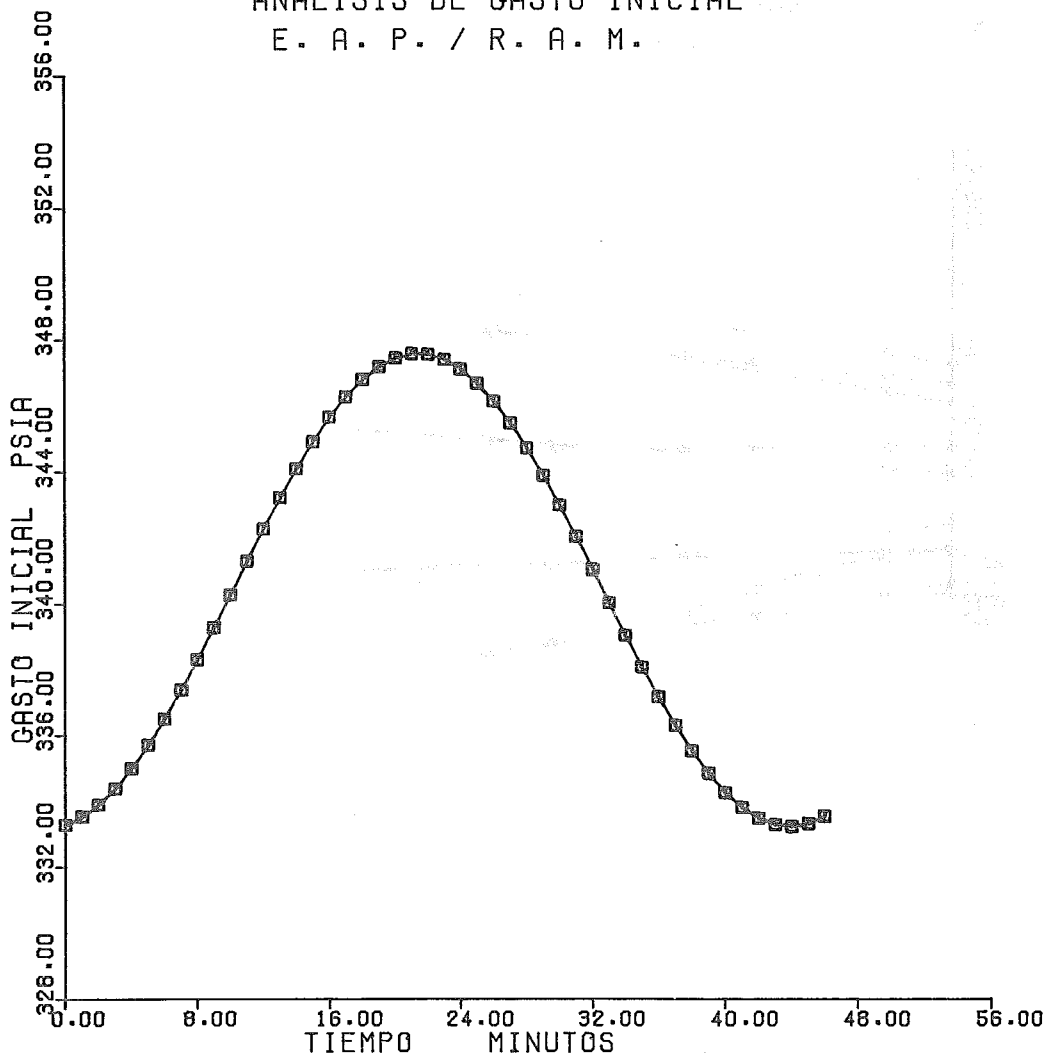
FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

FIG. VI-V

CAMBIO DE LA PRESION INICIAL CON RESPECTO AL TIEMPO PARA EL MO\_  
DELO DE PIPERTRAN SIGUIENDO UN TRANSIENTE OSCILATORIO

TRANSIENTE DE PRESION Y GASTO  
ANALISIS DE GASTO INICIAL  
E. A. P. / R. A. M.



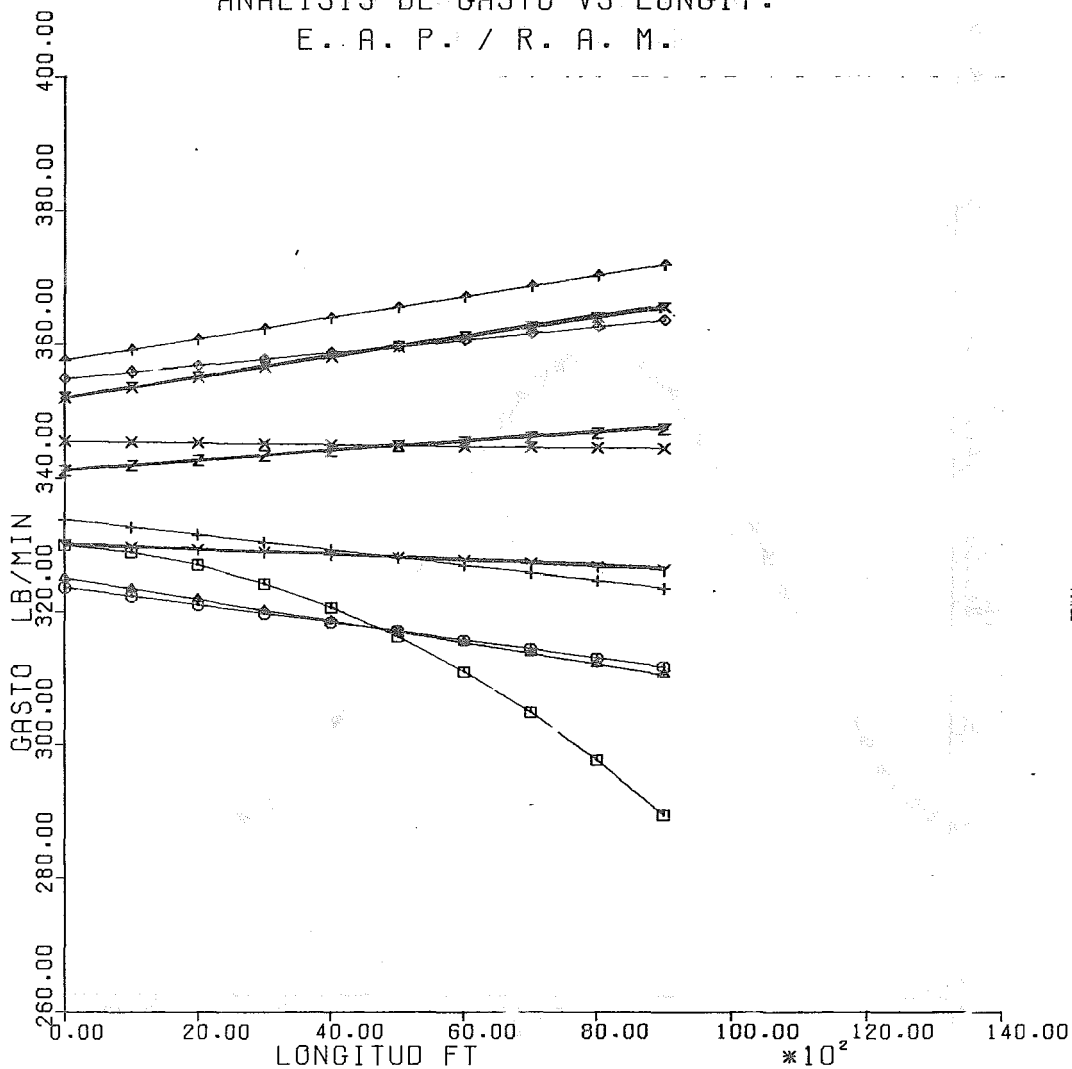
□ CURVA DE GASTO

FACULTAD DE QUIMICA  
TESIS PROFESIONAL

FIG. VII-V

CAMBIO DEL GASTO INICIAL CON RESPECTO AL TIEMPO PARA EL MODELO  
DE PIPERTRAN SIGUIENDO UN TRANSIENTE OSCILATORIO

TRANSIENTE DE PRESION Y GASTO  
 ANALISIS DE GASTO VS LONGIT.  
 E. A. P. / R. A. M.

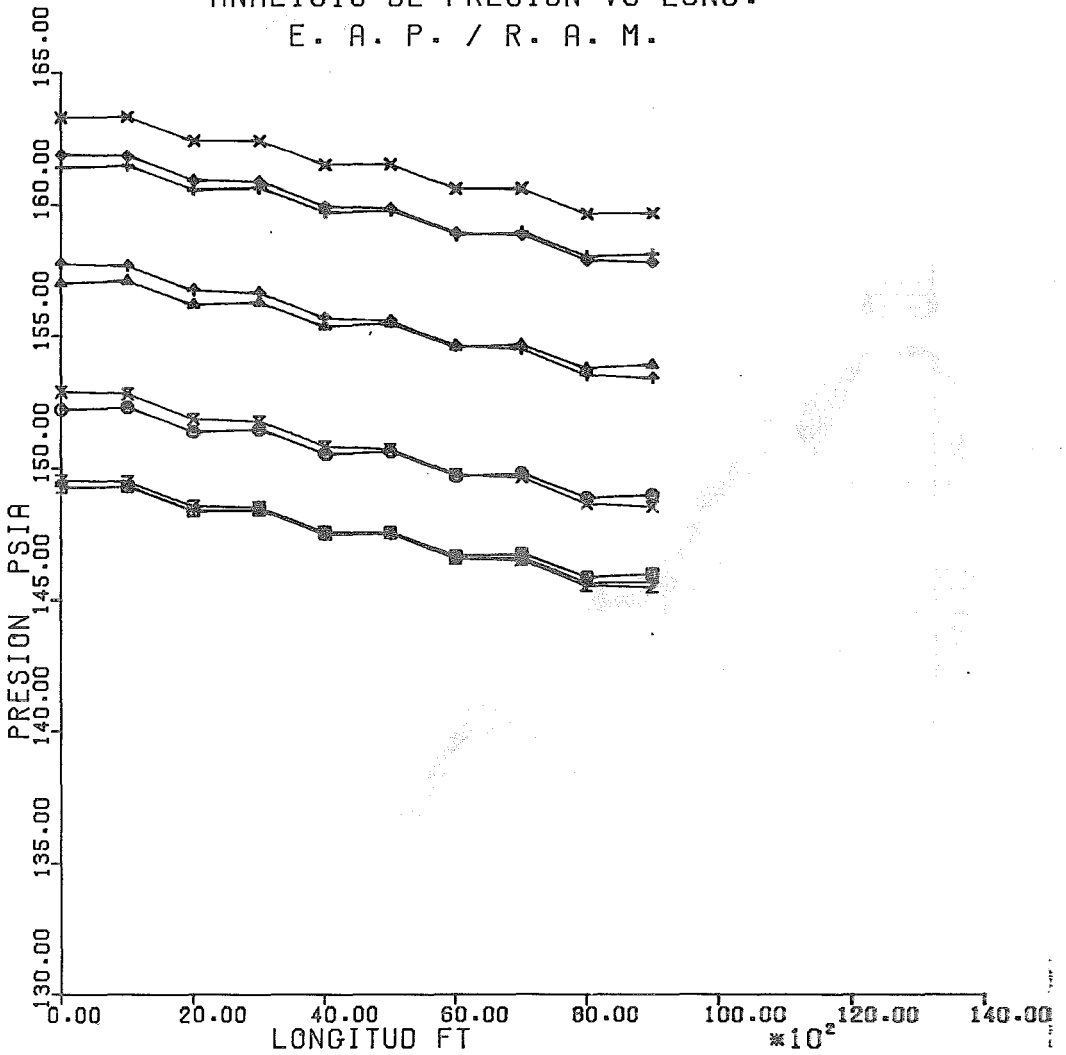


- |                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| □ TIEMPO = 1.00 MIN  | x TIEMPO = 36.00 MIN |
| ○ TIEMPO = 6.00 MIN  | z TIEMPO = 41.00 MIN |
| △ TIEMPO = 11.00 MIN | y TIEMPO = 46.00 MIN |
| + TIEMPO = 16.00 MIN |                      |
| x TIEMPO = 21.00 MIN |                      |
| ◇ TIEMPO = 26.00 MIN |                      |
| ♠ TIEMPO = 31.00 MIN |                      |

FACULTAD DE QUIMICA  
 TESIS PROFESIONAL  
 TRANSIENTE OSCILATORIO

FIG.VIII-V

TRANSIENTE DE PRESION Y GASTO  
 ANALISIS DE PRESION VS LONG.  
 E. A. P. / R. A. M.

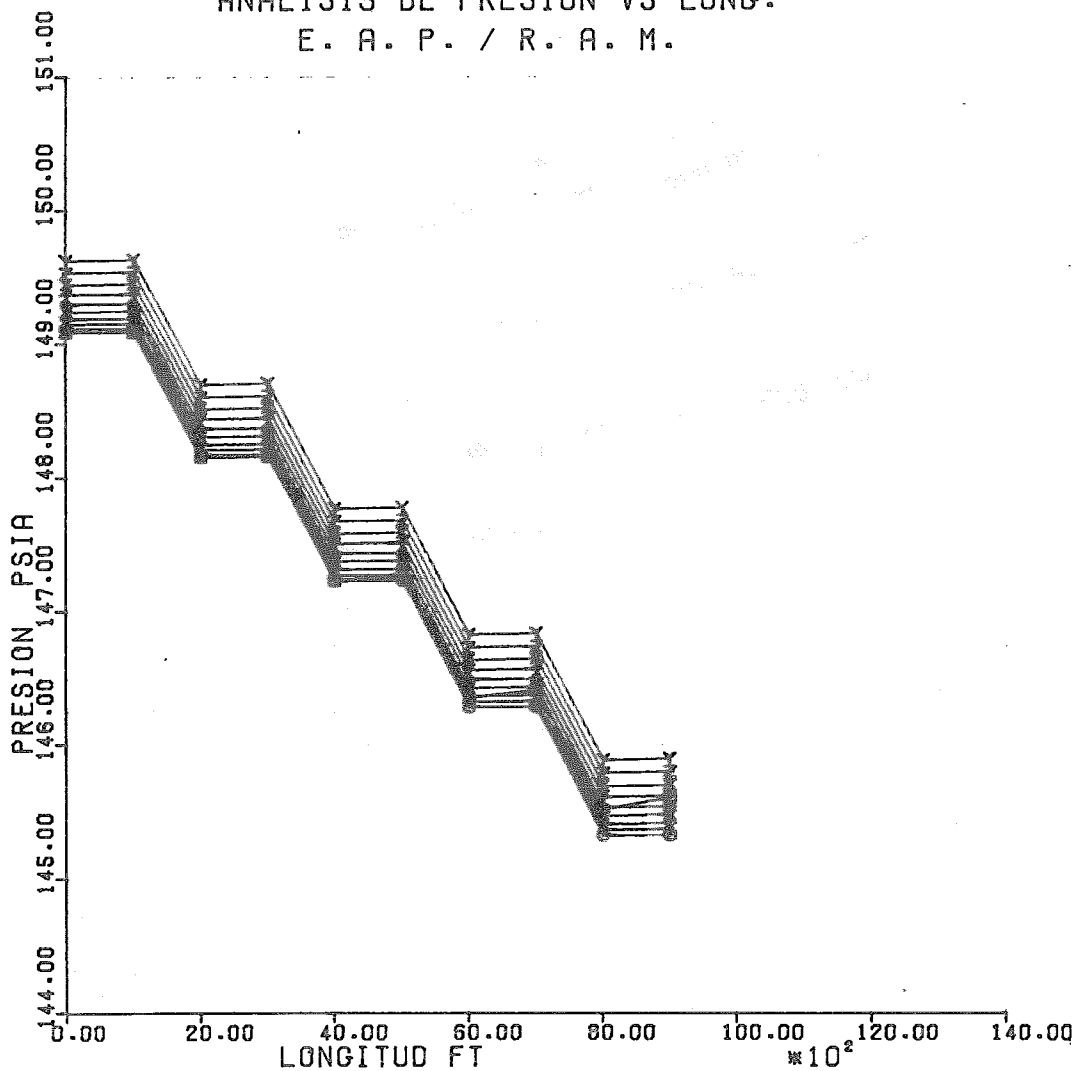


- |                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| □ TIEMPO = 1.00 MIN  | × TIEMPO = 36.00 MIN |
| ○ TIEMPO = 6.00 MIN  | ∩ TIEMPO = 41.00 MIN |
| △ TIEMPO = 11.00 MIN | ∪ TIEMPO = 46.00 MIN |
| + TIEMPO = 16.00 MIN |                      |
| × TIEMPO = 21.00 MIN |                      |
| ◇ TIEMPO = 26.00 MIN |                      |
| ∇ TIEMPO = 31.00 MIN |                      |

FACULTAD DE QUIMICA  
 TESIS PROFESIONAL  
 TRANSIENTE OSCILATORIO FIG. IX-V



TRANSIENTE DE PRESION Y GASTO  
 ANALISIS DE PRESION VS LONG.  
 E. A. P. / R. A. M.



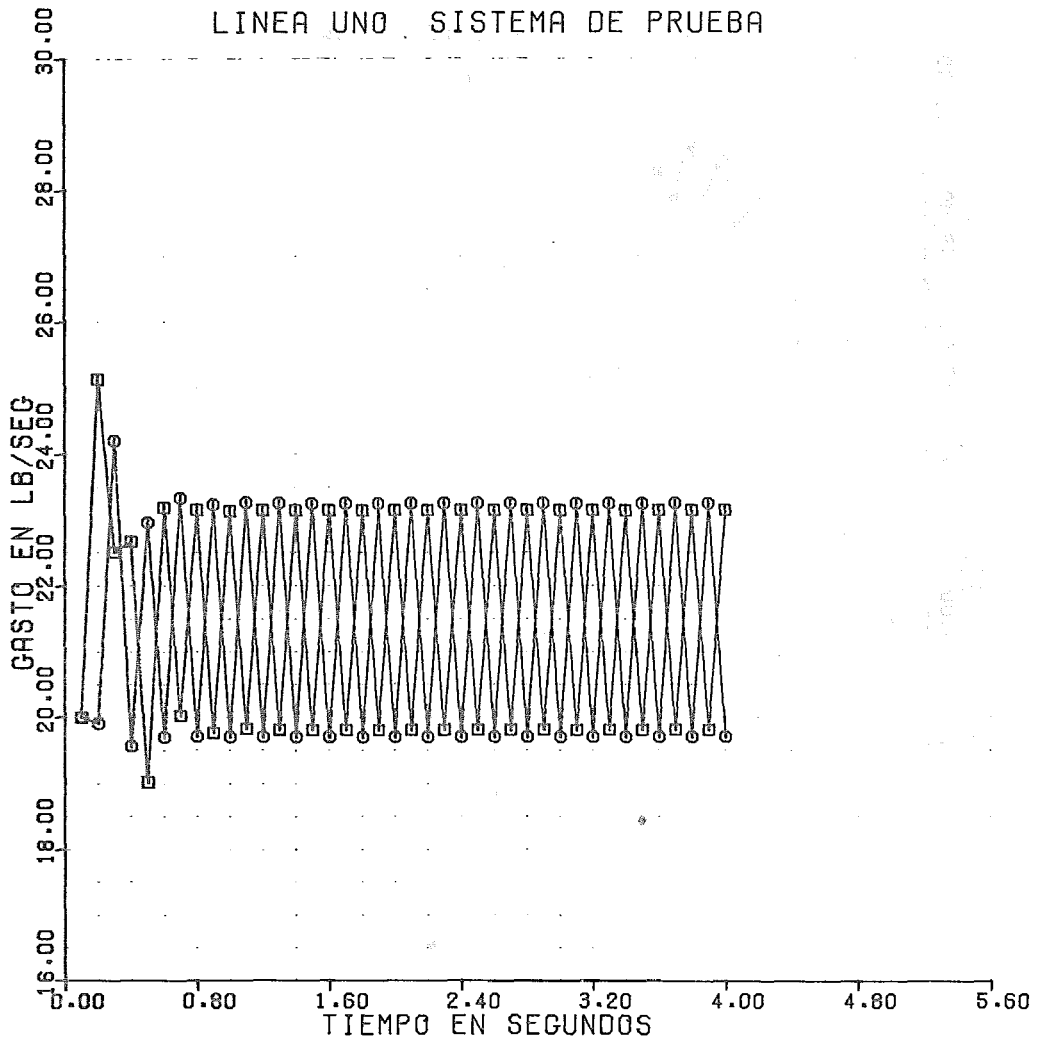
- TIEMPO = 1.00 MIN
- TIEMPO = 2.00 MIN
- △ TIEMPO = 3.00 MIN
- + TIEMPO = 4.00 MIN
- X TIEMPO = 5.00 MIN
- ◇ TIEMPO = 6.00 MIN
- ↑ TIEMPO = 7.00 MIN

- X TIEMPO = 8.00 MIN
- Z TIEMPO = 9.00 MIN
- Y TIEMPO = 10.00 MIN

FIG. X-V

FACULTAD DE QUIMICA  
 TESIS PROFESIONAL  
 EJEMPLO DE INESTABILIDAD PIPERTRAN

GRAFICA DE GASTO VS TIEMPO  
 TRANSIENTE DE PRESION Y GASTO  
 LINEA UNO SISTEMA DE PRUEBA



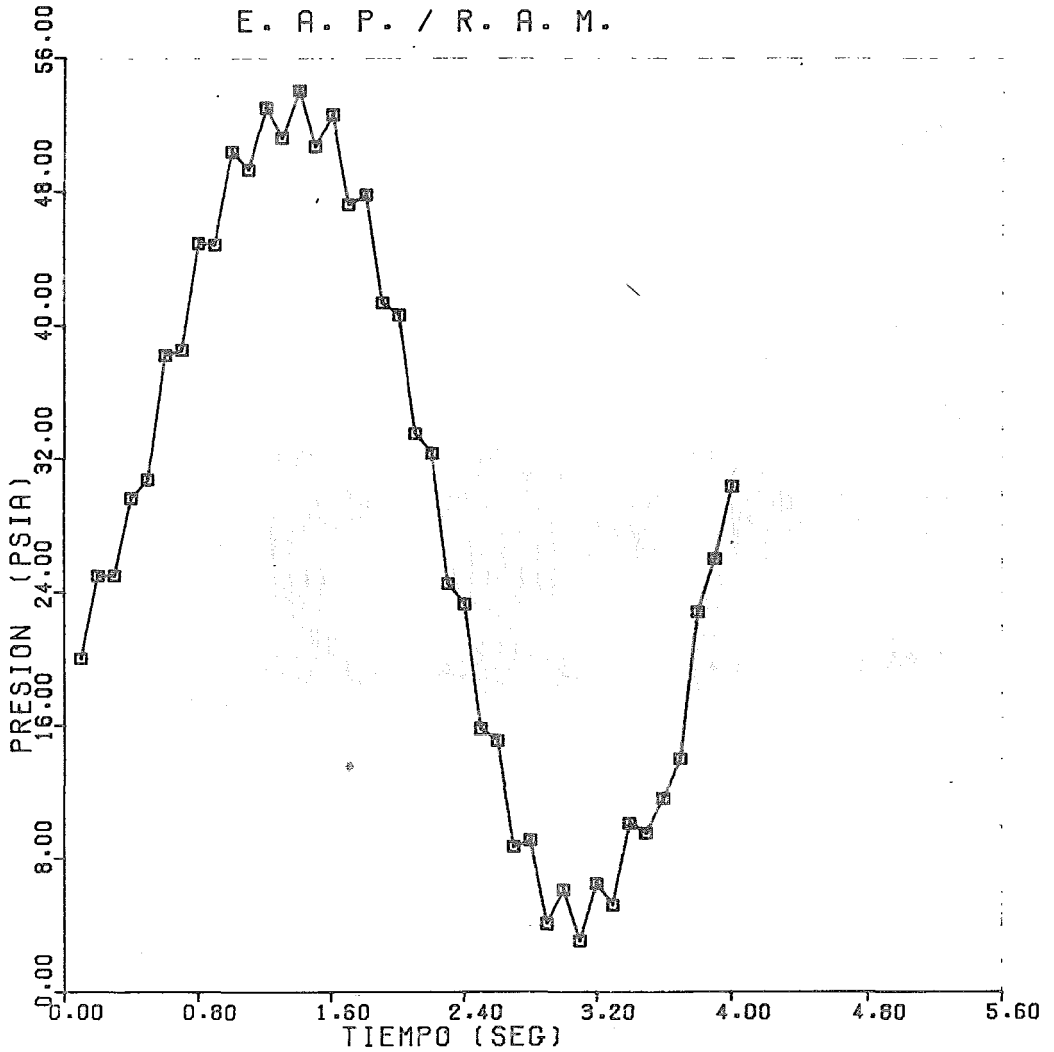
□ GASTO INICIAL QRA  
 ○ GASTO FINAL QRB

FACULTAD DE QUIMICA  
 TESIS PROFESIONAL EAP/RAM

FIG. XI-V

EJEMPLO DE INESTABILIDAD DEL MODELO DE STONER EN UNA LINEA DE  
 DESFOGUE

TRANSIENTE DE PRESION  
EJEMPLO DE INESTABILIDAD  
E. A. P. / R. A. M.



□ CAP. V EJEMPLO

FACULTAD DE QUIMICA  
TESIS PROFESIONAL

FIG. XII-V

TRANSIENTE OSCILATORIO MODELO DE STONER RED DE TUBERIAS