

EST. EN 1929  
AUTÓNOMA DE MEXICO

2013

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores  
"CUAUTITLAN"



"DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD EN CASO DE  
GOLPE DE ARIETE"

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
CESAR BALDERAS NARANJO

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx. 1987



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 está 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.

# C O N T E N I D O

CAPITULO	PAGINA
I.- INTRODUCCION	1
II.- INTRODUCCION AL FLUJO TRANSIENTE	3
2.1 Generalidades	4
2.2 Descripción del fenómeno	7
2.3 Ecuaciones básicas	15
2.4 Ejemplo de aplicación	36
III.- METODOS DE ANALISIS	39
3.1 Introducción	40
3.2 Solución mediante el Método de las Características	45
3.2.A Ecuaciones características	45
3.2.B Solución ppr diferencias finitas	53
3.2.C Establecimiento de la solución numérica	59
3.2.D Establecimiento de las condiciones a la frontera	61
3.3 Programa de cálculo	67
3.4 Ejemplo de aplicación	76
IV.- DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD	81
4.1 Introducción	82
4.2 Sistemas de protección	85
4.2.A Válvulas de Aire	89
4.2.B Válvulas Check	91
4.2.C Válvulas de Alivio	96
4.3 Otros sistemas	99
4.3.B "SURGE" ARRESTOR	99
4.3.C "SURGE" SENTINEL	107

# CONTENIDO

CAPITULO		PAGINA
V.-	APLICACIONES	110
VI.-	CONCLUSIONES	132
	A N E X O S	135
	B I B L I O G R A F I A	144

C A P I T U L O: I.    I N T R O D U C C I O N

"Emprendá todo lo que pueda hacer,  
o haya soñado que puede hacer.  
El arrojo lleva consigo genio,  
fuerza y magia"

-Goethe

## I.- INTRODUCCION

Gran parte del equipo que se emplea en las industrias químicas del -- petróleo y las relacionadas con ellas, deben diseñarse para el movimiento de fluidos; en consecuencia, el conocimiento de las relaciones de movimiento de fluidos es esencial para el ingeniero químico. Estas relaciones se -- basan en los siguientes principios: conservación de la masa, el principio - de cantidad de movimiento (segunda ley de Newton). Estas relaciones, comple tadas por un análisis de estado inestable (función del tiempo), constituyen la base para el análisis del flujo transiente.

En los sistemas de bombeo, la puesta en marcha y paro de una bomba; - en la apertura y cierre de una válvula y en general, en toda variación tanto de la velocidad del fluido como de la presión, se produce el fenómeno de GOLPE DE ARIETE. Este fenómeno, consiste en una oscilación de la presión que se propaga por el ducto y es amortiguado con el tiempo. El no considerar estos efectos en la etapa de diseño de un sistema (equipos, líneas, etc.), éste - estará sujeto; a violentos movimientos, vibraciones y posible rúptura en la tubería del proceso.

Con un mayor entendimiento de la naturaleza y severidad del problema de GOLPE DE ARIETE, las fuerzas destructivas se pueden evitar. Este entendi miento constituye para el ingeniero químico un papel importante; es decir, dar recomendación sobre la introducción o incorporación de medidas preveni vas en el diseño de instalaciones y de sistemas, los cuales ayudaran a pre venir al máximo, la seguridad del personal, reducir costos por daños a los equipos del sistema.

En el presente trabajo, se analizaran los efectos de sobrepresiones - causados por el GOLPE DE ARIETE, en los sistemas que transportan líquidos - en una sola fase, tomando en cuenta la compresibilidad del líquido y la - elasticidad de las paredes del conducto.

El desarrollo de esta Tesis, esta comprendida en tres etapas:

- 1.- Presentación de las ecuaciones básicas del Golpe de Ariete, así como la representación física del fenómeno. El cálculo del Golpe de Ariete se puede efectuar de varias maneras; en esta tesis se presentará el método de las CARACTERISTICAS, el cual se recomienda para usos generales en soluciones de computadoras.
- 2.- Una vez seleccionado el método de cálculo del golpe de ariete, se procederá a mostrar los dispositivos más utilizados para prevenir y/o anticipar al fenómeno. Estos dispositivos se presentarán en una forma simple, en donde se mostrarán los criterios de selección, así como las características generales de operación, todo esto en base a los fabricantes de estos dispositivos.
- 3.- Conociendo los dispositivos más utilizados, se procederá a analizar un problema de aplicación, en el cual se mostrará el análisis del Golpe de Ariete provocado por el cierre instantáneo de una válvula, aplicado a un sistema simple; es decir, un sistema de bombeo con un solo diámetro de la línea de descarga de una bomba que opera a velocidad constante. Se mostrará un diagrama general del sistema de bombeo de crudo así como donde se muestre la incorporación del dispositivo seleccionado para minimizar las fuerzas destructivas provocadas por el Golpe de Ariete.

C A P I T U L O: II. INTRODUCCION AL FLUJO TRANSIENTE

"ASPIRA a la perfección entodo, aunque sea inalcanzable. Los que la persiguen y perseveran, se le aproximarán mucho más que aquellos cuya pereza y desaliento hacen abandonarla por inalcanzable"

-Lord C.

## II.1. GENERALIDADES

Los procedimientos de condiciones de estado transiente requiere, al igual que el estado estable, de la Ingeniería Moderna que permita un diseño adecuado de tuberías para la transportación de fluidos, así como de los sistemas de control que pueda reducir las condiciones de transiente. El no considerar estas condiciones, puede causar serios problemas en los equipos de proceso, como, altas presiones, ruido, cavitación y vibración, los cuales no pueden ser determinados en condiciones de estado estable.

El estudio del transiente, esta basado en dos teorías básicas. La primera considera al fluido como una sustancia inelástica, en la que los cambios de presión se propagan instantáneamente a través del sistema y las propiedades elásticas de las paredes de la tubería no son de gran importancia. Esta teoría es conocida como TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA.

La segunda teoría, considera los efectos de elasticidad del fluido y de las paredes de la tubería, las cuales se toman en cuenta en los cálculos. Dentro de esta teoría es clasificado el Golpe de Ariete.

En el desarrollo de esta tesis, se tocarán brevemente estas teorías para la derivación de las ecuaciones que rigen el comportamiento de flujo transiente para el fenómeno de Golpe de Ariete.

La solución de problemas de transiente con la ayuda de computadoras digitales, hace posible resolver las ecuaciones de una manera relativamente general y fácil de entender, lo que genera una reproducción más exacta de flujo transiente.

### CAUSAS DEL TRANSIENTE

Las condiciones de transiente son iniciadas cuando hay alguna perturbación en la situación de transporte en estado estable. Esta perturbación puede ser causada por cambios (accidentes o planeados) de la velocidad en el flujo debido al ajuste del instrumento de control; y por cambios en la entrada o salida del flujo a un sistema.

Los ejemplos más comunes de la causa del transiente y por ser de más peligro y que pueden considerarse por las altas y bajas presiones dentro de un sistema son:

- 1) Cambios súbitos en el flujo por cierre y abertura de una válvula.
- 2) Arranque de bombas en un sistema.
- 3) Paro programado en un sistema de bombeo.
- 4) Falla en el suministro de Energía a los accionadores de las unidades de bombeo.
- 5) Cambios en los flujos de bombeo y presiones a la descarga en las estaciones de bombeo.

1) El cierre o abertura de una válvula en una tubería por el cual fluye un líquido, es el caso más común para introducir una condición de inestabilidad en el sistema. Las condiciones en los cambios de velocidad de un líquido provocará un aumento o disminución de la presión de la tubería, lo cual ocasionará la ruptura sobre la tubería. Como consecuencia pueden originarse serios problemas tanto daño a los equipos del sistema, como accidentes personales y problemas económicos.

Por tanto, debe preverse este tipo de situaciones generadas y dar recomendaciones, soluciones o analizarse en la etapa de diseño de la tubería.

La presión de diseño se tomara como la presión máxima a la descarga de la estación de bombeo más un porcentaje de sobrediseño. Para determinar los tiempos de cierre o abertura de una válvula se tomarán algunas recomendaciones tomadas de la experiencia o por medio de ecuaciones empíricas obtenidas de la bibliografía.

2) El arranque de un sistema de bombeo (oleoducto), generalmente se hace de la estación final y retrocediendo hasta la estación de origen. Las estaciones intermedias que se encuentran entre la estación inicial y final nos sirve para suministran suficiente presión a la succión.

Considerando que el ducto esta presionado, entonces, con el sistema -

de comunicación entre sistemas se establece el arranque de la siguiente estación (anterior) y así sucesivamente se ira arrancando hasta poner todo el ducto en operación.

Cuando las bombas de alta velocidad entran en operación, es recomendable que al inicio del arranque se mantenga una reducción del flujo a la descarga, para que de ésta manera se evite desarrollar inicialmente un alto -- Par a flujo total, lo que puede provocar una falla o problema al accionador de la(s) bomba(s). Dependiendo de éste control de flujo a la descarga puede suministrar inestabilidad en la tubería. Con esto podemos inferir que este caso puede en algun momento dado caer en el caso de apertura súbita de una válvula para poner en movimiento el fluido.

Cabe: hacer notar que cuando las bombas entran en operación, éstas -- se mantienen a recirculación hasta que haya entrado en operación la estación anterior a esta.

3) El paro programado del sistema de bombeo por alguna causa o razón este se desarrolla en sentido contrario al que se lleva efecto en el arranque de un sistema.

En esto hay que tener especial cuidado en la forma que se desarrolla el paro, ya que esto puede asemejarse a una falla de potencia de una estación de bombeo, y por consiguiente provocará una caída de presión a la -- descarga. La disminución alcanzada por esta caída de presión puede llevarnos a obtener en algunos casos presiones de vacío, lo cual provocará que la tubería esté sujeta al peligro de un colapso, es decir que la tubería se -- estreche.

Por otro lado, además puede hacer una similitud con el cierre de una válvula colocada a el extremo de la tubería, si por ejemplo una estación intermedia se aísla del sistema en operación es decir, sus bombas entran en recirculación y se desconectan de la línea principal, by--pasando la estación. Esto producirá que la estación corriente abajo soporte la columna de líquido que le corresponde a la estación en recirculación y en ese momento haya un retroceso de flujo provocando altas presiones a la descarga de la estación corriente abajo, originandose de esta forma condiciones de flujo -- transiente.

4) La falla de energía en los accionadores del sistema de bombeo provocan condiciones de flujo transiente.

Existen algunas condiciones de operación de los accionadores que son capaces de producir sustanciales cambios de presión en la tubería. De esas condiciones, una de las más importantes es la rápida desaceleración de los accionadores por falla en el suministro de energía. Cuando el suministro de energía al accionador de una bomba se corta súbitamente, la energía que mantiene en rotación a la bomba es la energía Inercial proporcionado tanto por la circulación del fluido a través de la bomba, como de la inercia de las partes en movimiento (impulsor), siendo entonces, reducida la velocidad de rotación de la bomba rápidamente.

Cuando se reduce la velocidad de la bomba, el flujo del líquido en el lado de la descarga también disminuirá. Como resultado de esos cambios rápidos de flujo, se producirán condiciones de flujo transiente en la que se -- formaran ondas de presión en el lado de la descarga, las cuales se reflejarán a través del sistema.

De las causas anteriormente explicadas, únicamente se enfocará el análisis del transiente debido al cierre instantáneo de una válvula, por ser -- el más común y de fácil manejo al desarrollar las ecuaciones que expliquen el comportamiento del fenómeno.

## II.2. DESCRIPCION DEL FENOMENO

En esta sección se describe brevemente en una forma sencilla al fenómeno que se presenta al provocar una perturbación al sistema, inducida por el cierre súbito de una válvula, la cual generará un estado no permanente.

Consideremos el sistema de tubería mostrado en la figura II.1.(a), -- donde la pérdida por fricción es despreciable. Al instante de cerrar la válvula, el fluido se desplaza con una velocidad ( $V_0$ ) y una presión inicial -- corriente arriba de la válvula de ( $P_0$ ), tan pronto como la primera capa se se desplaza, está se detiene y la misma acción se aplica para la siguiente

capa del fluido desplazado, donde la velocidad del fluido cambiara a  $(V_0 + \Delta V)$  la presión en la válvula será  $(P_0 + \Delta P)$ . En esta forma una onda de presión de magnitud  $(\Delta P)$ , viajará en la dirección corriente arriba, a la misma velocidad del sonido del fluido. Designaremos a la velocidad de propagación de la onda de presión, comunmente llamada velocidad de onda o celeridad designada por " $a$ ".

Si aplicamos un volumen de control a la figura II.1.(b), en la cual la onda se mueve a la izquierda con una velocidad absoluta  $(a - V_0)$ . Donde la velocidad de entrada y salida del flujo en el volumen de control son  $(V_0 + Q)$  y  $(V_0 + Q + \Delta V)$  respectivamente, y aplicando el principio de Conservación de la Masa, para el volumen de control dado, se obtiene:

$$\rho_1(V_0 + Q + \Delta V) - \rho_0(V_0 + Q) = 0 \quad (II.1)$$

Aplicando la segunda ley de Newton del Movimiento, la cual establece "La rapidez de cambio de movimiento de un sistema es igual a la fuerza neta que actúa sobre el sistema y ocurre en la dirección de la fuerza neta".

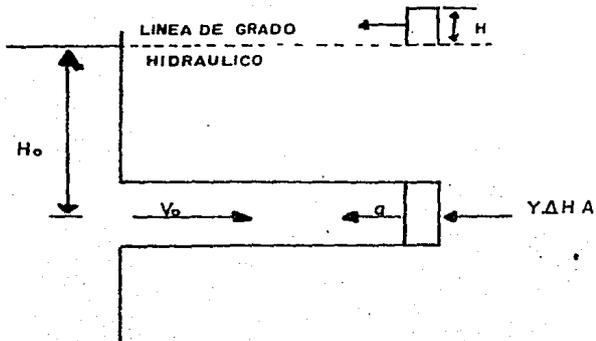
Entonces obtenemos:

$$-\gamma \Delta H = \rho_0(Q + V_0)\Delta V \quad (II.2)$$

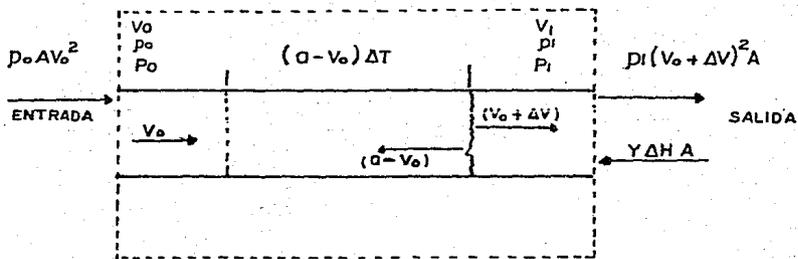
tenemos que la densidad del fluido esta relacionada por  $(\rho_0 = \gamma/g)$  sustituyendo obtenemos:

$$-\Delta H = \frac{Q}{g} \left(1 + \frac{V_0}{a}\right) \Delta V \quad (II.3)$$

como el valor de " $a$ ", es mucho mayor que la velocidad  $(V_0)$ , como se muestra en secciones posteriores, por tanto, la relación  $(V_0/a) \ll 1$  tenemos:



(a)



(b)

FIGURA. II. I.

$$\Delta H = -\frac{g}{g} \Delta V \quad (\text{II.4})$$

donde

$\Delta H$  = es el cambio de la cabeza de presión. (metros)

$g$  = velocidad de onda de propagación. (m/s)

$g$  = aceleración de la gravedad.

$\Delta V$  = es el cambio de velocidad. (m/s).

Si consideramos la longitud total de la tubería, tenemos que la presión o cabezal de presión en cualquier punto de la tubería, es la suma algebraica de todas las ondas de presión directas o reflejadas.

$$\sum \Delta H = \pm \frac{g}{g} \sum \Delta V \quad (\text{II.5})$$

Esta ecuación describe el cambio en el flujo relacionado con el cambio de cabezal. El signo menos puede ser usado para ondas que viajan corriente abajo; así mismo muestra que existe un aumento de presión para un incremento de la velocidad y una disminución en la presión para un decremento en la velocidad. Esta es la ecuación básica de GOLPE DE ARIETE.

Por otra parte, tenemos que el análisis para la determinación de la velocidad de onda o celeridad se desarrollará en secciones posteriores.

PROPAGACION DE LA ONDA Y SU REFLEXION EN UNA TUBERIA FORMADA POR EL CIERRE INSTANTANEO DE UNA VALVULA.

Consideremos el sistema mostrado en la figura II.2., donde las condiciones de flujo son estables en el tiempo ( $t=0$ ), la válvula es cerrada ins

tantáneamente. Si el sistema se supone sin fricción, entonces, el cabezal de presión a lo largo de la línea, alas condiciones iniciales es ( $H_0$ ), — sean la distancia ( $x$ ) y ( $V_0$ ) positivas en la dirección corriente abajo.

La secuencia de eventos que siguen después del cierre de la válvula puede ser dividido en cuatro partes:

1)  $0 < t \leq L/Q$

(fig.II.2 a y b)

Tan pronto como la válvula se cierra, la velocidad del flujo en la válvula se reduce a cero, lo cual ocasionará una elevación en la presión — de  $\Delta H = + (a/g)V_0$ . De este aumento de presión, la tubería se expandirá, el fluido se comprimirá incrementandose la densidad, y una onda de presión positiva se propagará hacia el recipiente. Atrás de esta onda, la velocidad del flujo será de cero, y toda su energía cinética se convertirá en energía de presión (elastica). Si " $Q$ " es la velocidad de onda de Golpe de Ariete, y " $L$ " es la longitud de la tubería, entonces, en el tiempo  $t = L/Q$  a lo largo de la línea, la tubería se expande, la velocidad del flujo es cero y el cabezal de presión es  $\Delta H + H_0$ .

2)  $L/Q < t \leq 2 L/Q$

(fig.II.2. c y d)

Como el nivel del recipiente es constante, las condiciones son inestables en el fondo del mismo, cuando la onda de presión lo alcanza, porque la presión en una sección del lado del recipiente es ( $H_0$ ), mientras que en la sección adyacente en la tubería es  $H_0 + \Delta H$ . De esta diferencial de presión, el fluido comenzará a fluir de la tubería al recipiente con una velocidad constante ( $-V_0$ ). Entonces, la velocidad cambiará de ( $0$  a  $-V_0$ ), lo cual provoca que la presión decaiga de  $H_0 + \Delta H$  a  $H_0$ . En otras palabras, una onda de presión negativa, viajará hacia la válvula, tal que la presión atrás de la onda (es decir en el lado corriente arriba) es ( $H_0$ )

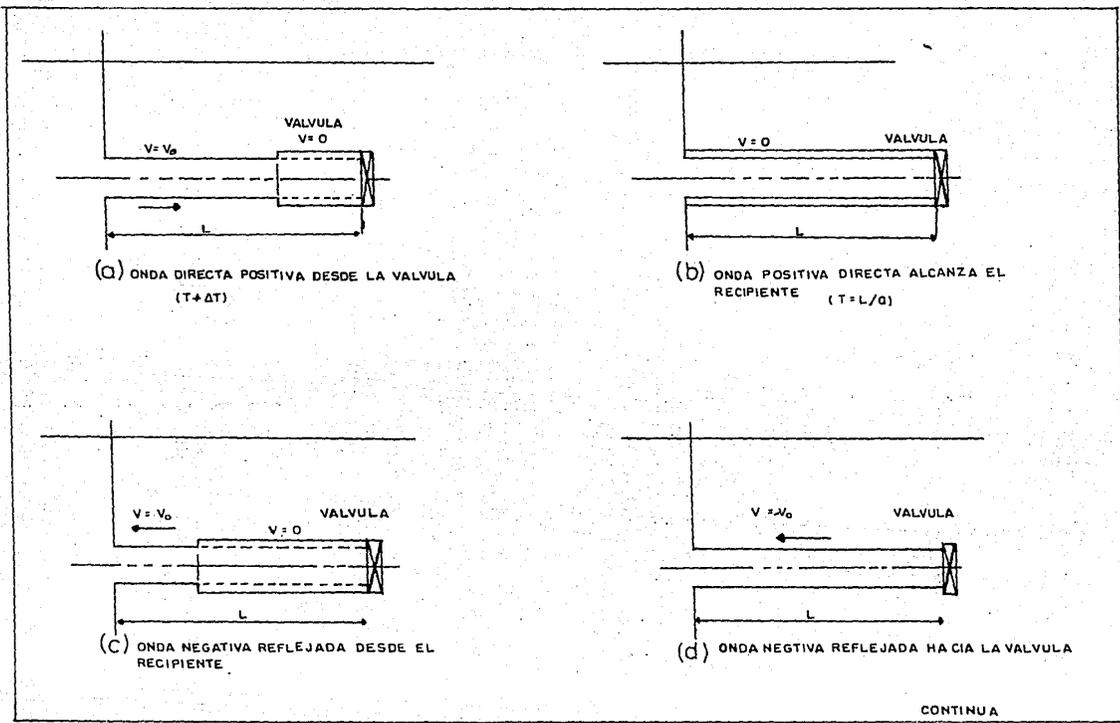
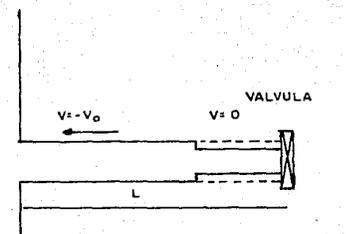
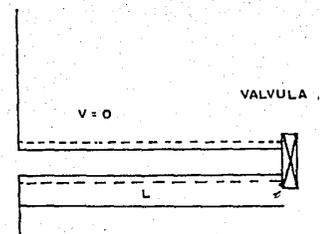


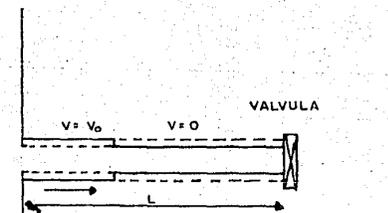
FIGURA II.2.2. PROPAGACION DE LAS ONDAS DE PRESION CAUSADAS POR EL CIERRE DE UNA VALVULA



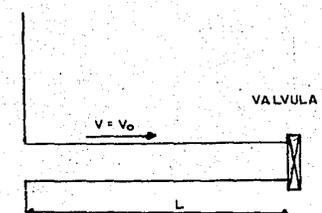
(e) ONDA NEGATIVA REFLEJADA HACIA EL RECIPIENTE



(f) ONDA NEGATIVA ALCANZA EL RECIPIENTE



(g) ONDA NEGATIVA REFLEJADA DESDE EL RECIPIENTE.



(h) ONDA REFLEJADA ALCANZA LA VALVULA COMPLETANDO UN CICLO.

FIGURA. 2. 2. PROPAGACION DE LAS ONDAS DE PRESION CAUSADAS POR EL CIERRE DE UNA VALVULA

y la velocidad del fluido es  $(-V_0)$ . En  $t = 2L/Q$ , la cabeza de presión en toda la línea es  $(H_0)$ , la velocidad del fluido es  $(-V_0)$ .

3)  $2L/Q < t \leq 3L/Q$

(fig. II. 2. e y f)

Puesto que la válvula está completamente cerrada, una velocidad negativa no podrá ser mantenida en la válvula. Por tanto, la velocidad cambiará instantáneamente de  $(-V_0)$  a cero. Esto es porque la presión es reducida a  $H_0 - \Delta H$  y una onda negativa se propagará corriente arriba. Detrás de esta onda, la presión es  $(H_0)$  y la velocidad del fluido es cero. En el tiempo  $t = 3L/Q$ , el cabezal de presión en toda la tubería es  $H_0 - \Delta H$  y la velocidad del fluido es cero.

4)  $3L/Q < t \leq 4L/Q$

(fig. II. 2 g y h)

Tan pronto como esta onda negativa alcanza el recipiente, una condición no balanceada se crea de nuevo en el extremo superior (orriente arriba, es decir, union tubería-recipiente). Ahora, la presión es mayor en el lado de la línea. Por tanto, el fluido comenzará a pasar hacia la válvula con una velocidad  $(V_0)$  restableciéndose a  $(H_0)$  el cabezal de presión. En el tiempo  $t = 4L/Q$  Entonces, las condiciones en la tubería son las mismas que las que tenía en las condiciones iniciales (régimen estable.)

Como la válvula está completamente cerrada, la secuencia de eventos comenzará de nuevo en  $t = 4L/Q$ . Como se supone que el sistema es sin fricción, este continuará y el ciclo se repitirá en un intervalo de  $4L/Q$ . A este intervalo después del cual las condiciones se repiten, se llama -

Periodo Teorico de la Línea.

### II.3. ECUACIONES BASICAS

En esta sección, las ecuaciones de movimiento y de continuidad son preparadas para ser utilizadas en capitulos posteriores.

Para situaciones en que se presentan cambios súbitos de velocidades y la tubería es de una longitud relativamente grande, las propiedades elásticas de la tubería y del líquido se consideran en el análisis. Se empleará el principio de las ecuaciones de Momentun y el de Conservación de la Masa para el desarrollo de este conjunto de ecuaciones que puedan describir el fenómeno.

#### ECUACIONES DE FLUJO TRANSIENTE A TRAVES DE CONDUCTOS CERRADOS.

El flujo transiente a través de conductos cerrados es descrito por ecuaciones dinámicas de momentun y continuidad. Las derivaciones de estas ecuaciones se mostraran a continuación.

#### SUPOSICIONES BASICAS

Un número considerable de suposiciones fueron hechas en la derivación de las ecuaciones fundamentales de Golpe de Ariete y en la solución de varios transientes hidráulicos en los sistemas de bombeo. Estas suposiciones son frecuentemente dados e involucran las propiedades de la tubería y del fluido, estas suposiciones son las siguientes:

- 1) El fluido en el sistema de tuberías es elastico, la densidad homogénea, y siempre en estado líquido.
- 2) El material de las paredes de la tubería o del conducto es homogéneo isotropico y elastico.
- 3) Las velocidades y presiones en la tubería, las cuales siempre son de flujo completo, estan uniformemente distribuidos bajo cualquier sección transversal de la tubería.

- 4) El cabezal de velocidad en la tubería es despreciable cuando es comparado con los cambio de presión.
- 5) El flujo en el conducto se efectua en una sola dirección espacial un solo componente en las coordenadas.
- 6) Las ecuaciones para calcular las pérdidas por fricción a régimen — permanente en tuberías, son válidas durante e- transiente; ya que — existen procedimientos demasiado complejos y molestos para usos generales, por lo que no lo discutiremos.

Para el desarrollo de las ecuaciones fundamentales de Golpe de Ariete usaremos la siguiente nomenclatura:

A = Area de la tubería  
D = Diámetro de la tubería.  
E = Módulo de Elasticidad del Material  
e = Espesor de la tubería  
g = Aceleración de la gravedad  
H = Cabezal de Presión  
K = Módulo de Elasticidad del Fluido  
L = Longitud total de la tubería  
P = Presión  
Q = Flujo volumétrico  
S = Esfuerzo cortante  
t = Tiempo  
V = Velocidad  
x = Segmento en que se divide la tubería  
Z = Altura

### II.3.A. ECUACION DINAMICA

Usaremos la siguiente notación: (x) distancia, (Q) flujo, (V) velocidad, las cuales son consideradas positivas corriente abajo, (H) es el cabezal piezometrico a centro de la línea del conducto sobre el nivel de referencia.

La ecuación esta dada en terminos de presión P(x,t), velocidad V(x,t) H(x,t) y Q(x,t). En la mayoría de este tratamiento, H y Q son referidas -- como variables dependiente, (x,t) como variables independientes.

En la figura II.3., se muestra un diagrama de cuerpo libre del fluido Consideremos un elemento inclinado con respecto a la horizontal a un ángulo (  $\alpha$  ), teniendo un área transversal (A) y una diferencial de longitud (  $\delta x$  ). Si el cabezal piezometrico y la velocidad a la distancia (x) son (H) y (V), entonces sus valores correspondientes en (  $x + \delta x$  ) seran:

$$H + (\partial H / \partial x) \delta x \quad \text{y} \quad V + (\partial V / \partial x) \delta x$$

respectivamente. En la dirección (x) existen tres fuerzas que actuan sobre el sistema.  $F_1$ ,  $F_2$  y S. Donde,  $F_1$  y  $F_2$  son las fuerzas debido a la presión; mientras que (S) es la fuerza constante debido a la fricción. Si ( $\rho$ ) es la densidad del fluido, (Z) es la altura del conducto sobre el nivel de referencia, entonces:

$$F_1 = \rho A (H - Z) \tag{II.3.1}$$

$$F_2 = \rho A \left[ (H - Z) + \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) \delta x \right] \tag{II.3.2}$$

Si aplicamos la fórmula de Darcy-Weisbach para calcular las pérdidas por fricción tenemos:

$$\Delta P = \frac{\rho f L v |v|}{D \cdot 2} \tag{II.3.3}$$

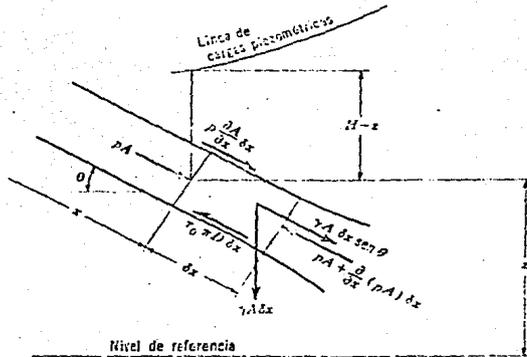


FIGURA II.3 DIGRAMA DE CUERPO LIBRE PARA DEDUCIR LA ECUACION DE MOVIMIENTO

Con la longitud (L) de la tubería horizontal, y de un balance de fuerzas en la tubería en flujo estable tenemos:

$$\Delta P \frac{\pi D^2}{4} = S \pi D L \quad (\text{II.3.4})$$

por tanto el esfuerzo cortante (S) esta dado por:

$$S = \frac{\rho f v |v|}{8} \quad (\text{II.3.5})$$

donde (g) es la aceleración de la gravedad, (f) es el factor de fricción y (D) diámetro de la tubería.

Aplicando la segunda ley del movimiento de Newton, que establece: que un pequeño elemento de velocidad que se mueve con el fluido, es acelerado - por las fuerzas que actúan sobre él.

$$\sum \text{FUERZAS} = \text{MASA} \times \text{ACELERACION} \quad (\text{II.3.6})$$

De la figura (II.3), la suma de la fuerzas esta dado por:

$$\sum F_{zas.} = \rho A(H-Z) - \rho A \left( H-Z + \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) \delta x \right) - \frac{\rho f |v|}{g} \pi D \delta x \quad (\text{II.3.7})$$

considerando la masa del fluido en cuestión tenemos:

$$\text{LA MASA DEL FLUIDO} = \frac{\rho}{g} A \delta x \quad (\text{II.3.8})$$

$$\text{LA ACELERACION} = \frac{\partial v}{\partial t} = \dot{v} \quad (\text{II.3.9})$$

combinando las ecuaciones (II.3.7., II.3.8. y II.3.9) en la ecuación ---- (II.3.6) obtenemos:

$$\frac{\rho}{g} A \delta x \dot{v} = -\rho A \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) \delta x - \frac{\rho f}{g} v |v| \pi D \delta x \quad (\text{II.3.10})$$

dividiendo por  $(\rho \kappa)$  e igualando a cero, obtenemos:

$$\frac{\rho}{g} A \dot{\varphi} + \rho A \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\rho}{g} \frac{f}{8} v |v| D \pi = 0 \quad (\text{II.3.11})$$

simplificando

$$\dot{\varphi} + g \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \quad (\text{II.3.12})$$

o bien

$$g H x + \frac{f v |v|}{2D} + \dot{\varphi} = 0 \quad (\text{II.3.13})$$

El termino aceleración  $(\dot{\varphi})$  es para una partícula del fluido, y biene dado por:

$$\frac{dv}{dt} = \dot{v} = v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

o bien

$$\dot{\varphi} = v v_x + v_t \quad (\text{II.3.14})$$

sustituyendo la ecuación (II.3.13) en la ecuación (II.3.14) tenemos:

$$g H x + \frac{f v |v|}{2D} + v_t + v v_x = 0 \quad (\text{II.3.15})$$

En la mayoría de los problemas del transiente, el termino  $(v v_x)$  es - más pequeño que  $(v_t)$  por lo que obtenemos:

$$g H x + \frac{f v |v|}{2D} + v_t = 0 \quad (\text{II.3.16})$$

en terminos del flujo (Q)

$$\rho H x A + \frac{\rho Q |Q|}{2DA} + Q t = 0 \quad (\text{II.3.17})$$

Las ecuaciones (II.3.16 y II.3.17), son las ecuaciones de Movimiento para el flujo transiente. Describen el cambio de cabezal con respecto a la distancia, el cambio del flujo o velocidad con respecto a el tiempo, las cuales estan relacionadas con las variables que permanecen constantes durante el transiente. Esta variables son: el área y el diámetro de la tubería.

### II.3.B. ECUACION DE CONTINUIDAD

Consideremos el volumen de control mostrado en la figura II.4, con longitud ( $\delta x$ ), al tiempo ( $t$ ) en la dirección axial. Aplicando la ley de la conservación de la masa, en donde la velocidad de afluencia de la masa dentro del volumen de control es justo igual a la velocidad de incremento de la masa dentro del volumen de control o bien:

$$-(\rho A (V-u)_x) \delta x = \left( \rho A \left( u \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \right) \delta x \quad (\text{II.3.18})$$

Designaremos ( $u$ ) como la velocidad corriente arriba, ( $x$ ) la distancia. Desarrollando la derivada total tenemos:

$$-(\rho A V)_x - (\rho A u)_x \delta x = (\rho A u)_x + (\rho A)_t \delta x \quad (\text{II.3.19})$$

igualando a cero y simplificando, obtenemos:

$$(\rho A V)_x + (\rho A)_t = 0$$

o bien

$$\mathbf{p} \mathbf{A} \mathbf{v}_x + \mathbf{v}(\mathbf{p} \mathbf{A})_x + (\mathbf{p} \mathbf{A})_t = 0 \quad (\text{II.3.20})$$

En la ecuación (II.3.20) los dos terminos  $\mathbf{v}(\mathbf{p} \mathbf{A})_x + (\mathbf{p} \mathbf{A})_t$  representan la derivada de  $\mathbf{p} \mathbf{A}$  con respecto al movimiento de una partícula de una partícula de masa, entonces:

$$\left( \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{p} \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{p} \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{p} \mathbf{A} \mathbf{v}_x = 0$$

dividiendo por  $(1/\mathbf{p} \mathbf{A})$

$$\frac{1}{\mathbf{p} \mathbf{A}} \left( \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{p} \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{p} \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \mathbf{v}_x = 0 \quad (\text{II.3.21})$$

por definición de la derivada total tenemos:

$$\frac{D'}{Dt} = \mathbf{v} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\frac{1}{\mathbf{p} \mathbf{A}} \left( \frac{D'}{Dt} (\mathbf{p} \mathbf{A}) \right) + \mathbf{v}_x = 0 \quad (\text{II.3.22})$$

Asignando la derivada total por un punto sobre la derivada de variable -- dependiente obtenemos:

$$\frac{1}{\mathbf{p} \mathbf{A}} (\mathbf{p} \dot{\mathbf{A}} + \mathbf{A} \dot{\mathbf{p}}) + \mathbf{v}_x = 0$$

o bien 
$$\frac{\dot{\mathbf{A}}}{\mathbf{A}} + \frac{\dot{\mathbf{p}}}{\mathbf{p}} + \mathbf{v}_x = 0 \quad (\text{II.3.23})$$

La ecuación (II.3.23.) se considera válida para toda clase de tubos así como para flujo de gas. Además, considera los efectos elásticos de la tubería y del fluido. Es decir, (  $\Delta A/A$  ) considera los cambios de área del ducto cuando existe el Golpe de Ariete; por otra parte, (  $\delta/\rho$  ) considera los cambios de masa del fluido, que se presentan en todo momento a través del ducto.

Los efectos se desarrollan de la siguiente forma:

- 1) Los cambios de masa involucran una propiedad que se conoce como Módulo de Elasticidad de la masa (K) de un fluido, el cual está definido como:

$$K = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{\delta}{\rho}$$

entonces

$$\frac{\delta}{K} = \frac{\delta}{\rho} \quad (\text{II.3.24})$$

- 2) Por otra parte, el cambio de área, involucra la elasticidad de la tubería, estos efectos de elasticidad (como son la expansión de las paredes de la tubería por unidad de área por unidad de tiempo  $\Delta A/A$ )
  - a) Para ensanchamiento de la tubería en cualquier punto y libre de tensiones axiales.
  - b) Para ensanchamiento de la tubería a través de movimientos axiales (tubería rígida).
  - c) Para ensanchamiento de la tubería con juntas de expansión.

Para el desarrollo de estos casos, primero definiremos el término de Razón de Poissons (  $\mu$  ) como:

$$\mu_1 = - \frac{\text{UNIDAD DE TENSION LATERAL}}{\text{UNIDAD DE TENSION AXIAL}} = - \frac{\xi}{\xi_1} \quad (\text{II.3.25})$$

El cambio de área, es el resultado de un cambio total en la tensión lateral o circunferencial.  $\xi_r$

$$\Delta A = \Delta \xi_r \frac{D}{2} \pi D$$

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \Delta \xi_r$$

entonces tenemos:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta A}{A} = 2 \xi_r \quad (\text{II.3.26})$$

por otra parte

$$\xi_r = \xi_2 + \xi$$

si

$$\mu_1 = - \frac{\xi}{\xi_1}$$

entonces

$$\xi_r = \xi_2 - \mu_1 \xi_1 \quad (\text{II.3.27})$$

El esfuerzo y la tensión están relacionados por el módulo de elasticidad del material de Young (E).  $\xi_2 = \frac{\sigma_2}{E}$ ,  $\xi_1 = \frac{\sigma_1}{E}$

en el cual

$$\dot{v}_1 = \text{unidad de esfuerzo axial}$$

$$\dot{v}_2 = \text{unidad de esfuerzo lateral}$$

por tanto

$$\xi_T = \frac{1}{E} (\dot{v}_2 - \mu \dot{v}_1) \quad (\text{II.3.28})$$

Susstituyendo las ecuaciones (II.3.24, II.3.25, II.3.26 y II.3.28) en la ecuación (II.3.23) obtenemos:

$$\frac{\dot{p}}{K} + \frac{2}{E} (\dot{v}_2 - \mu \dot{v}_1) - v_x = 0 \quad (\text{II.3.29})$$

Por otra parte, consideramos la figura (II.5) en el cual (e) es el espesor de la pared de la tubería, y (Tf) la fuerza de tensión circunferencial por unidad de longitud de tubería o bien:

$$v_2 = \frac{Tf}{e} = \frac{\gamma HD}{2e} \quad \text{ó} \quad \Delta v_1 = \frac{D \Delta P}{2e}$$

por tanto

$$\dot{v}_2 = \frac{\dot{p} D}{2e} \quad (\text{II.3.30})$$

Los cambios de (D) son pequeños con el tiempo, comparado con los cambios de presión. En el transiente, (D) es considerado constante para la derivación de la ecuación de continuidad.

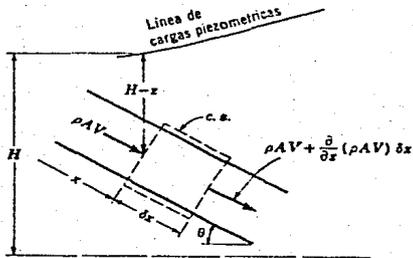


FIGURA. II. 4. VOLUMEN DE CONTROL PARA LA ECUACION DE CONTINUIDAD

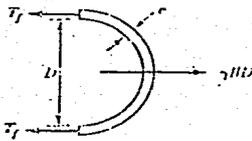


FIGURA. II. 5 FUERZAS DEBIDO A EL GOLPE DE ARIETE EN UNA TUBERIA SEMICILINDRO

Haciendo referencia de los tres casos mencionados anteriormente, la razón de cambio del esfuerzo a la tensión axial ( $\dot{\sigma}_T$ ) esta dado por:

caso a) El esfuerzo a la tensión axial es la fuerza en la válvula cerrada.

$$\dot{\sigma}_T = \frac{\dot{P} A}{\pi D e}$$

por otra parte

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

por tanto

$$\dot{\sigma}_T = \frac{\dot{P} D}{4e}$$

caso b) Para un ensanchamiento de tubería

$$\dot{\epsilon}_1 = 0 \quad \text{y} \quad \dot{\sigma}_T = \mu \dot{\sigma}_2$$

caso c) para juntas de expansión

$$\dot{\sigma}_T = 0$$

Por tanto

$$a) \quad \dot{\sigma}_T = \frac{\dot{P} D}{4e}$$

$$b) \quad \dot{\sigma}_T = \mu \dot{\sigma}_2$$

$$c) \quad \dot{\sigma}_T = 0$$

(II.3.31)

Sustituyendo las ecuaciones (II.3.31 y II.3.30) en la ecuación (II.3.29) obtenemos:

CASO A)

$$\frac{\dot{P}D}{Ee} (1 - \frac{\mu}{2}) + \frac{\dot{P}}{K} + Vx = 0$$

definiendo  $C_1 = 1 - \mu/2$

$$\frac{\dot{P}D}{Ee} C_1 + \frac{\dot{P}}{K} + Vx = 0 \quad (II.3.32.a)$$

CASO B)

$$\frac{\dot{P}D}{Ee} (1 - \mu^2) + \frac{\dot{P}}{K} + Vx = 0$$

definiendo  $C_1 = 1 - \mu^2$

$$\frac{\dot{P}D}{Ee} C_1 + \frac{\dot{P}}{K} + Vx = 0 \quad (II.3.32.b)$$

CASO C)

definiendo  $C_1 = 1$

$$\frac{\dot{P}D}{Ee} C_1 + \frac{\dot{P}}{K} + Vx = 0 \quad (II.3.32.c)$$

Por tanto

$$\left. \begin{array}{l} a) \quad C_1 = 1 - \mu/2 \\ b) \quad C_1 = 1 - \mu^2 \\ c) \quad C_1 = 1 \end{array} \right\} \quad (II.3.33)$$

Considerando la ecuación (II.3.32.a,b,c.) y multiplicando por K tenemos.

$$\dot{P} \left( \left( \frac{K}{E} \frac{D}{e} \right) C_1 + 1 \right) + K V_x = 0$$

dividiendo por ( P )

$$\frac{\dot{P}}{P} + \frac{K/P}{\left( \left( \frac{K}{E} \frac{D}{e} \right) C_1 + 1 \right)} V_x = 0 \quad (\text{II.3.34})$$

En suma, de lo antes descrito, la velocidad de onda de Golpe de — Ariete, depende de las propiedades elásticas tanto de la tubería como del fluido; así como también de las restricciones externas como son: tipo de soportes y la libertad del conducto para moverse en la dirección axial. — Por tanto la velocidad de onda esta definida como:

$$a^2 = \frac{K/P}{\left( \frac{K}{E} \right) \left( \frac{D}{e} \right) C_1 + 1}$$

o bien

$$a = \frac{(K/P)^{1/2}}{\left( \left( \frac{K}{E} \frac{D}{e} \right) C_1 + 1 \right)^{1/2}} \quad (\text{II.3.35})$$

en donde

$C_1 = 1 - \mu/2$  para el caso de la restricción (a)

$C_1 = 1 - \mu^2$  para el caso de la restricción (b)

$C_1 = 1$  para el caso de la restricción (c)

E = Módulo de Elasticidad del material ( Young)

D = Diámetro de la tubería

$e$  = Espesor de la tubería

$K$  = Módulo de Elasticidad del fluido

$\rho$  = Densidad del fluido

La tabla (II.1) muestra algunos valores de los módulos de elasticidad y Razón de Poisson para diferentes materiales.

La tabla (II.2) presenta los módulos de elasticidad y densidad para ciertos líquidos comunes.

Las figuras (II.6 y II.7) representan las curvas características - que relacionan los parametros adimensionales  $(K/E)$  y  $(D/e)$  con la velocidad de onda (celeridad) para varios materiales. Al final de esta sección - se muestra un ejemplo de aplicación de estas tablas y figuras, para el cálculo de la celeridad.

Sustituyendo la ecuación (II.3.35) en la ecuación (II.3.34) obtenemos:

$$\frac{\dot{P}}{P} + Q^2 V_A = 0 \quad (II.3.36)$$

En la ecuación (II.3.36)  $Q^2$  es considerada constante para una colección de propiedades tanto del fluido como de la tubería, en la mayoría de los casos.

Considerando la figura (II.3.4) tenemos que el cabezal piezometrico esta dado por:

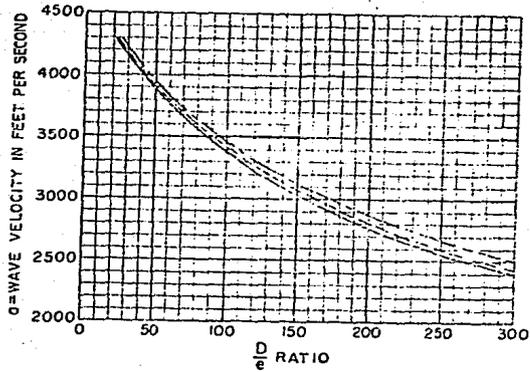
$$\begin{aligned} P &= \rho g(H-Z) \\ \dot{P} &= \rho g(\dot{H} - \dot{Z}) \end{aligned} \quad (II.3.37)$$

**TABLA II.] MODULO DE ELASTICIDAD Y RELACION DE POISSON'S  
PARA ALGUNOS MATERIALES DE TUBERIAS**

Acero	$E = 30 \times 10^6$ psi	$\mu = 0.30$
Fierro Colado	$E = 24 \times 10^6$ psi	$\mu = 0.28$
CObre	$E = 16 \times 10^6$ psi	$\mu = 0.30$
Aluminio	$E = 10.5 \times 10^6$ psi	$\mu = 0.33$
PVC	$E = 4. \times 10^5$ psi	$\mu = 0.45$
Plástfco con fibra de vidrio reforzado (PFV)	$E_p = 1.3 \times 10^6$ psi	$\mu = 0.27-30$
Asbesto Cemento	$E = 3.4 \times 10^5$ psi	
Concreto	$E = 57000$	

TABLA II.2. MODULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD DE  
LIQUIDOS COMUNES A PRESION ATM.

LIQUIDOS	TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD (LB/T <sup>3</sup> )	MODULO DE ELASTICIDAD (PSI) * 10 <sup>-3</sup>
Agua	20	62.6	317.63
Agua de mar	15	63.99	329.23
Alcohol etílico	0	49.32	191.45
Benceno	15	54.93	152.290
Crudo (petróleo)	15	56.8	217.56
Glicerina	15	78.86	642.52
Keroseno	20	50.29	191.45



**FIGURA. II.6 VELOCIDAD DE ONDA DE PRESION  
PARA TUBERIAS DE ACERO**

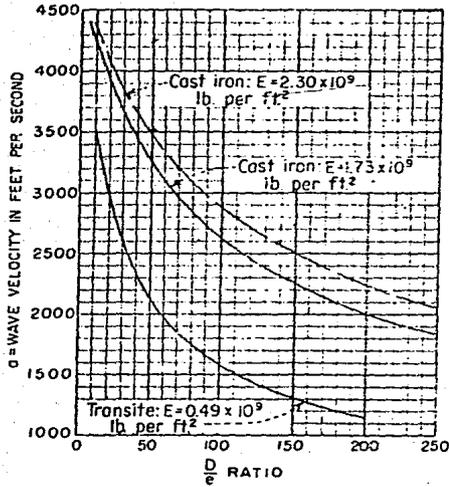


FIGURA. II.7. VELOCIDAD DE ONDA DE PRESION PARA TUBERIAS DE FIERRO COLADO

el cambio de altura esta dado por :

$$\Delta H = H \left( V \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) = V H_x + H_t$$

$$\Delta Z = Z \left( V \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) = V Z_x + Z_t$$

sustituyendo en (II.3.37)

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho g (V H_x + H_t - V Z_x - Z_t) \quad (\text{II.3.38})$$

si el movimiento en la tubería no ha sido transversal, entonces:

$$Z_t = 0; \quad Z_x = \text{SEN } \alpha$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho g (V H_x + H_t - V \text{SEN } \alpha) \quad (\text{II.3.39})$$

Sustituyendo en la ecuación (II.3.36) obtenemos:

$$g (V H_x + H_t - V \text{SEN } \alpha) + \alpha^2 V x = 0 \quad (\text{II.3.40})$$

dividiendo por (g) obtenemos:

$$V H_x + H_t - V \text{SEN } \alpha + \frac{\alpha^2}{g} V x = 0 \quad (\text{II.3.41})$$

La ecuación (II.3.41) es la forma conveniente de la ecuación de -- Continuidad, con (V ó Q) y (H ó P) como variables dependientes, y con (x) y (t) como variables independientes.

Transformando la ecuación (II.3.41) en terminos del gasto (Q) tenemos:

$$\frac{Q}{A} H_x + H_t - \frac{Q}{A} \text{SEN } \alpha + \frac{\alpha^2 Q x}{g A} = 0 \quad (\text{II.3.42})$$

Las ecuaciones de Continuidad (II.3.41) y de Movimiento (II.3.18) forman un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales de primer orden, la solución de estas ecuaciones diferenciales dependerá del método de solución utilizado, y de las restricciones pertinentes, hechas en cada solución. Por otra parte, el factor de fricción varía con el número de Reynolds. Por tanto (f) es considerado constante; porque los efectos de tales variaciones del estado transiente son despreciables.

En el siguiente capítulo, se mostrará un panorama general de los métodos de solución a las ecuaciones de Continuidad y de Movimiento; así como la descripción del Método de las Características de solución para el análisis del Golpe de Ariete.

#### II.2.4. EJEMPLO DE APLICACION

Una tubería de acero de 750 mm de diámetro, conduce agua, a la temperatura de 20°C. Estime la velocidad de onda (celeridad) que se desarrolla a estas condiciones, sí:

- a) Si la tubería es completamente rígida.
- b) Considerando los tres casos de restricción para la tubería de acero.
- c) Considere la misma tubería; pero condiferente espesor de pared. (50 mm).

SOLUCION:

De las tablas II.1 y II.2 obtenemos:

Para la tubería;

$$E = 30 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$\mu = .30$$

Para el líquido (agua):

$$\begin{aligned} K &= 317.63 \times 10^3 \text{ psi} \\ &= 62.6 \text{ lb/ft}^3. \end{aligned}$$

a) La ecuación que se obtiene es:

Sustituyendo valores tenemos

$$Q = \sqrt{\frac{(317630.0)(32.17)(144)}{62.6}} = \underline{\underline{4848.2 \text{ f/s}}} \quad (1477.73 \text{ m/s})$$

b) Donde el espesor de la tubería es de 6.35 mm.

CASO A. del conjunto de ecuaciones (II.3.33) obtenemos:

$$C_1 = 1 - 0.30/2 = \underline{\underline{0.85}}$$

la ecuación de onda que se obtiene es:

$$K/E = 317630/30 \times 10^6 = 0.0106 \quad D/e = 750/6.35 = 118.11$$

$$(K/E)(D/e) = 1.252.$$

por tanto la celeridad es:

$$Q = \frac{4848.2}{\sqrt{(1.252)(.85) + 1}} = \underline{\underline{3,374.5 \text{ f/s}}} \quad (1028.5 \text{ m/s})$$

CASO B.

$$C_1 = 1 - (.30)^2 = \underline{\underline{0.91}}$$

$$Q = \frac{4848.2}{\sqrt{(1.252)(.91) + 1}} = \underline{\underline{3,314.7 \text{ f/s}}} \quad (1010.32 \text{ m/s})$$

CASO C.

$$C_1 = 1$$

$$Q = \frac{4848.2}{\sqrt{(1.252)(1) + 1}} = \underline{\underline{3,230.7 \text{ f/s}}} \quad (984.7 \text{ m/s})$$

c) el espesor de la tubería es 50 mm.

$$(K/E)(D/e) = (0.0106)(15) = 0.159$$

CASO A.

$$C_1 = (2 \times 0.05 / .75)(1 + 0.3) + (.75 / (.75 + .05))(1 - 0.3/2) \\ = \underline{\underline{0.97}}$$

$$Q = \frac{4848.2}{\sqrt{(0.159)(0.97) + 1}} = \underline{\underline{4,512.7 \text{ f/s}}} \quad (1,375.5 \text{ m/s})$$

CASO B de la misma forma  $C_1 = 1.026$

$$Q = \frac{4848.2}{\sqrt{(0.159)(1.026) + 1}} = \underline{\underline{4,495.4 \text{ f/s}}} \quad (1,370.2 \text{ m/s})$$

CASO C. de igual forma  $C_1 = 1.11$

$$Q = \frac{4848.2}{\sqrt{(0.159)(1.11) + 1}} = \underline{\underline{4,469.8 \text{ f/s}}} \quad (1,362.4 \text{ m/s})$$

C A P I T U L O: III. METODOS DE ANALISIS

"NUNCA debemos mostrarnos más sabios  
que las personas con quienes estamos.  
Ten tus conocimientos como un reloj -  
de bolsillo: guardados, y no los saques  
para contar las horas, sino darla  
cuando te la piden"

-Lord C.

### III.1. INTRODUCCION

#### DESARROLLO HISTORICO

La historia del análisis del problema de Golpe de Ariete está hecha por las vías de solución algunas veces ingeniosas y practicas para resolver las ecuaciones de continuidad y de movimiento. Los métodos generalmente reflejan el nivel de eficiencia en el análisis numérico.

Los primeros trabajos que se realizaron en el análisis del transiente, fueron hechos por: el físico Nicolas E. Joukowsky, el ingeniero -- Lorenzo Allivi y posteriormente Michaud (\*). Estos trabajos se realizaron al inicio del siglo XX, cada uno de estos investigadores, generó las ecuaciones básicas del Golpe de Ariete. Asi mismo fundaron la base de todo desarrollo del transiente. Estas ecuaciones son:

#### ECUACION DE JOUKWSKY

$$h_{\text{max.}} = \frac{aV_0}{g}$$

#### ECUACION DE ALLIVI

$$P_g = \frac{aV}{g}$$

#### ECUACION DE MICHAUD

$$P_g = \frac{2LV}{gt}$$

Estas ecuaciones se utilizaron hasta alrededor de 1920 y son clasificadas dentro del método aritmético.

Durante los años 30's, Bergeron ídeo procedimientos gráficos para resolver las ecuaciones del método práctico. El efecto de la fricción es incluido.

Alrededor de los 50's, Ludwig y Jhonson dan soluciones análíticas para resolver el problema del transiente en tuberías que transportan líquidos, en donde la velocidad de flujo cambia instantáneamente de un punto. Estas soluciones incluyen el efecto de la fricción.

En los 60's, soluciones análíticas del tipo armonico para el problema del transiente en tuberías, fueron presentadas por Kernsten y Waller. La fricción fué incluida. Para este método se requiere que las variaciones del gasto o de la presión sean presentadas por funciones oscilatorias del tiempo.

Por otra parte, Burnett desarrolló una solución análítica aproximada y una solución numérica implícita, para el flujo de líquidos en tubería en estado transiente. La solución análítica es una extensión del método de Ludwig y Jhonson y del método numérico consistió en aplicar directamente diferencias finitas pertinentes para aproximar a ecuaciones diferenciales parciales, ambos métodos incluyen la fricción.

Durante los 70's, Streeter y Wylie introdujieron el método de las Características, para resolver problemas de flujo transiente en tuberías, este método numérico incluye la fricción y trata las condiciones de frontera en una trayectoria natural.

Todos los métodos de análisis o síntesis de flujo transiente en la alimentación a conductos con ecuaciones de movimiento y de continuidad o energía; ecuaciones de estado y otras relaciones de las propiedades físicas, se emplean diferentes consideraciones y restricciones pertinentes.

#### CLASIFICACION DE LOS METODOS

Todos los métodos que se han presentado para resolver el problema de

Golpe de Ariete, son clasificados de la siguiente forma:

- 1.- METODOS ARITMETICOS
- 2.- METODOS GRAFICOS
- 3.- METODO DE LAS CARACTERISTICAS
- 4.- METODOS ALGEBRAICOS
- 5.- METODOS IMPLICITOS
- 6.- METODOS DE ANALISIS LINEAL
- 7.- OTROS METODOS

1.- METODO ARITMETICO: Este método desprecia la fricción. La ecuación --- (II.5) se integra de la siguiente forma:

$$H \pm \frac{\alpha}{g} V = C \quad (\text{III.1.1})$$

el signo es positivo, cuando la onda de presión viaja desde B a A figura (III.1) y toma la forma:

$$H_A + \frac{\alpha}{g} V_A = H_B + \frac{\alpha}{g} V_B \quad (\text{III.1.2})$$

Las condiciones en A ocurren en  $L/a$  segundos, después las condiciones en B. Con (H) y (V) conocidas, entonces, con información adicional, la condición A es conocida en  $(L/a)$  más tarde (condición frontera) permite conocer  $(H_A \text{ y } V_B)$ .

De igual forma, para una onda que viaja de A hacia B

$$H_A - \frac{\alpha}{g} V_A = H_B - \frac{\alpha}{g} V_B \quad (\text{III.1.3})$$

para la aplicación de este par de ecuaciones se requieren las condiciones de frontera.

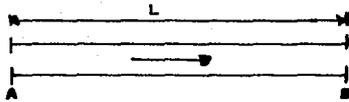


FIGURA III.1. APLICACION DE LA ECUACION ARITMETICA DE GOLPE DE ARIETE

2.- METODO GRAFICO: El método gráfico, desprecia la fricción en el desarrollo teórico. Las ecuaciones de continuidad y de movimiento, pueden adaptarse a la solución gráfica. Es una gráfica con líneas rectas en un diagrama (H-V), donde (H) es la ordenada, y (V) es la abscisa. - Los procedimientos gráficos fueron usados principalmente en los años (1930 - 1960). Estos procedimientos han sido ahora suplantados por los métodos digitales de computadoras. El desarrollo de este método se explica en el capítulo 4, Streeter Fluid Transients.

3.- METODO DE LAS CARACTERISTICAS: El método de las características convierte las ecuaciones de continuidad y de movimiento en dos ecuaciones diferenciales parciales, dentro de cuatro ecuaciones diferenciales -- totales. Estas ecuaciones son expresadas entonces en forma de diferencias finitas, usando el método de especificar intervalos de tiempo y la solución es llevada para usarse en computadoras digitales.

El método de las características tiene muchas ventajas sobre los -- demas métodos. Estas ventajas son:

- a) Los criterios de estabilidad son firmemente establecidos.
- b) Las condiciones de frontera son fácilmente programables.
- c) Los terminos secundarios pueden ser retirados si es deseado.
- d) Muchos sistemas complejos pueden ser manejados.
- e) Tiene mejor exactitud, de cualquier de los métodos de diferencias finitas.
- f) Los programas son fácilmente modificables a las situaciones que se desee analizar, porque satisfacen todas las condiciones de es-

tado estable, y cualquier cambio en la programación, muestra un cambio en las condiciones de estado estable.

- g) Es en método detallado, y muestra los resultados en forma tabular. El desarrollo de este método se analizará en detalle en esta sección.

4.- METODO ALGEBRAICO: Las ecuaciones algebraicas son básicamente las dos ecuaciones características para ondas de pulso sónica, en las direcciones positiva y negativa de una tubería en cuestión. Ellas son escritas en subscritos de tiempo. Un segundo subscrito, es en algunas veces usado para indicar la localización de una tubería. Una particular ventaja, es que las ecuaciones pueden ser aplicadas bajo ciertos segmentos, pero usa el incremento de tiempo apropiado a un simple segmento; es decir,  $(\Delta X = \Delta T)$ . Otra importante ventaja es que ellas son de fácil resolución para cada incremento de tiempo, lo cual provee las bases para la síntesis del flujo transiente.

Para el desarrollo de estas ecuaciones, consulte el capítulo cuatro de Fluid Transient, Streeter.

5.- METODOS DE ANALISIS LINEAL: Para la linearización del término de fricción y otros términos no lineales en la ecuación de movimiento, una solución analítica para las ecuaciones, puede ser fijada para las oscilaciones de onda. Estos análisis pueden ser considerados en dos categorías: Fluctuaciones al arranque en oscilaciones-estables, para alguna función impelente, para una bomba de desplazamiento positivo tipo pistón; y libre de vibraciones de un sistema de bombeo.

Este método no averigua la naturaleza de una función impelente, pero determina la naturaleza de las frecuencias del sistema, y proveer información en la razón de amortiguación de las oscilaciones, cuando el impelente es interrumpido.

El nombre "Métodos de Impedancia" ha sido dado para el estudio de oscilaciones-estables, por medio de un análisis armónico. Estos métodos se desarrollan en los capítulos 12 y 13 de Fluid Transient.

Actualmente, la técnica más general y exacta para resolver este -- conjunto de ecuaciones, es el método de las características. Afortunada-- mente, esta técnica es muy compatible con la solución numérica por compu-- tadora. Por esta razón, este trabajo aplicará este enfoque de solución, recordando que hay otros posibles caminos para resolver el problema. El -- método de las características es el más eficaz y lo respalda la parte expe rimental.

Los detalles del método de las características serán planteados en -- esta sección (sin considerar los sistemas complejos), se derivarán las -- ecuaciones que predigan el comportamiento de un transiente en un sistema -- por la teoría de Golpe de Ariete, y se desarrollaran las condiciones de frontera para algunos casos, es decir, sistemas bajo condiciones sencillas que puedan crear efectos de inestabilidad (perturbaciones en el sistema).

Los criterios de estabilidad y de convergencia para alcanzar la solu-- ción por el método de las características en diferencias finitas, serán -- presentados, y un procedimiento para el análisis de los sistemas de trans porte de líquidos, mediante un programa de computadora, que será enfocado para el uso de calculadoras programables como son: CASIO y la serie de HP 41-C / 41-CV.

### III.2.A ECUACIONES CARACTERISTICAS

Las ecuaciones de continuidad (II.3.41) y de movimiento (II.3.16), forman un par de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas cuasi-- líneal, en terminos de dos variables dependientes (velocidad o gasto y -- presión o cabezal), y dos variables independientes como son (tiempo y lon-- gitud de la tubería), Las ecuaciones son transformadas dentro de cuatro -- ecuaciones simplificadas..

Las ecuaciones simplificadas son obtenidas por la eliminación del -- termino de variación espacial de (V y Q) o (P y H), siempre que los termi-- nos espacial y el tiempo aparezcan en la misma ecuación, porque en general la variación con respecto al tiempo, es decir, que el termino (VVx o QQx es mucho menor que Vt o Qt), esto es solo aplicable a tuberías de paredes

relativamente poco rígidas.

De acuerdo con este enfoque, podemos expresar las ecuaciones de movimiento y de continuidad como:

$$L_1 = gHx + Vf + \frac{f|V|}{2D} = 0 \quad (\text{III.2.1})$$

$$L_2 = Ht + \frac{g^2}{g} Vx = 0 \quad (\text{III.2.2})$$

Estas ecuaciones son combinadas linealmente usando un multiplicador desconocido ( $\lambda$ ), de la siguiente manera:

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (\text{III.2.3})$$

o en forma global

$$L = \lambda \left[ \frac{Hx}{\lambda} + Ht \right] + \left[ Vx \lambda \frac{g^2}{g} + Vf \right] + \frac{f|V|}{2D} = 0 \quad (\text{III.2.4})$$

Si  $H=H(x,t)$  y  $V=V(x,t)$ , son soluciones de las ecuaciones (III.2.1) (III.2.2). Entonces las derivadas totales deben expresarse como:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} = Hx \frac{dx}{dt} + Ht \quad (\text{III.2.5})$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} = Vx \frac{dx}{dt} + Vt \quad (\text{III.2.6})$$

Nótese que estas ecuaciones vienen de la definición que un observador se mueve con el líquido en una sola dirección ( $x$ ), observando la variación de ( $V$ ) y ( $H$ ) con respecto al tiempo, recordando que: ( $\partial H/\partial t$ ) y ( $\partial V/\partial t$ )

es la derivada para un punto fijo en el espacio.

Ahora examinamos la ecuación (III.2.4) y las ecuaciones (III.2.5) y (III.2.6.) podemos notar que si definimos el multiplicador ( $\lambda$ ) como:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{g} \quad (\text{III.2.7})$$

La ecuación (III.2.4) vendrá a ser una ecuación diferencial ordinaria, con esta definición y utilizando las expresiones de las ecuaciones (III.2.5) y (III.2.6.) obtenemos:

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} = 0 \quad (\text{III.2.8})$$

De la ecuación (III.2.7) se producen dos valores particulares de ( $\lambda$ ):

$$\lambda \frac{g}{g} = \frac{g}{\lambda} \quad \therefore \quad \lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (\text{III.2.9})$$

sustituyendo los valores de ( $\lambda$ ) en la ecuación (III.2.7) tenemos:

$$\frac{dx}{dt} = \pm \frac{g a}{g} = \frac{g a^2}{a}$$

por tanto

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (\text{III.2.10})$$

Esto muestra los cambios en posición de una onda relacionada a los cambios en el tiempo por la velocidad de propagación de la onda de presión "a". Cuando el valor de ( $\lambda$ ) es positivo, se usa la ecuación (III.2.7) el valor negativo de ( $\lambda$ ) debe utilizarse la ecuación (III.2.8) es decir:

$$\left. \begin{aligned} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{f|v|v}{2D} \end{aligned} \right\} C^+ \quad (\text{III.2.11})$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} = +a \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.2.12})$$

De manera similar, para un valor negativo de  $(\lambda)$ , la sustitución de ese valor en la ecuación (III.2.8) nos producirá:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} \end{aligned} \right\} C^- \quad \text{(III.2.13)}$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad \text{(III.2.14)}$$

El hecho que la relación entre  $(x)$  y  $(t)$  en la ecuación (III.2.11) - debe satisfacer la ecuación (III.2.12), esto ha provocado que se se le conozca como la ecuación característica de la ecuación (III.2.11). Siguiendo un razonamiento similar para las ecuaciones (III.2.13) y (III.2.14); así la ecuación (III.2.14) es la ecuación característica de la ecuación ---- (III.2.13). Entonces, siendo que la ecuación (III.2.11) es válida si la ecuación (III.2.12) se satisface; así, los valores reales de  $(\lambda)$  han sido usados para convertir las ecuaciones diferenciales parciales originales en dos ecuaciones diferenciales ordinarias en valores de variables independientes del tiempo  $(t)$ .

Porque las ecuaciones (III.2.11) y (III.2.13) se aplican solamente a lo largo de la característica apropiada, es más fácilmente ver la situación gráficamente, esto se hace, dibujando en el plano coordenado para las variables independientes  $(x-t)$ .

Por otra parte, tenemos que, la velocidad de onda de golpe de ariete que se definió únicamente con las propiedades tanto del fluido como de la tubería, por tanto, en este tratamiento se considera generalmente constante para una tubería, entonces la ecuación (III.2.12) se gráfica como una -- línea recta en plano  $(x-t)$ , y de igual forma, la ecuación (III.2.14), ambas presentan dos líneas rectas de pendiente  $(\pm a)$ . Matemáticamente, esas líneas dividen el plano  $(x-t)$  en dos regiones, la cual debe ser del dominio de dos clases diferentes de solución, por ejemplo, la solución debe ser -- discontinua a lo largo de esas líneas. Físicamente, ellas representan la trayectoria recorrida por una perturbación en el punto A, figura III.2,

alcanzará el punto P después de un incremento de tiempo. ( $\Delta t$ ), las líneas trazadas en el plano ( $x-t$ ) son llamadas las líneas características, siendo la línea característica con pendiente positiva referida como la línea ( $C^+$ ) y la pendiente negativa referida como la línea ( $C^-$ ).

Antes de presentar un procedimiento para resolver las ecuaciones (III.2.11) y (III.2.13), primero se analizará el significado físico de las líneas características en el plano ( $x-t$ ).

Para facilitar el análisis, consideremos una sola tubería, como se muestra en la figura (III.3). Las ecuaciones compatibles (III.2.11) y (III.2.13) son válidas a lo largo de la tubería (por ejemplo, cuando  $0 < x < L$ ) y las condiciones límites espaciales son requeridas en las terminaciones (por ejemplo, cuando  $x=0$ , y cuando  $x=L$ ), figura (III.4).

En el ejemplo bajo consideración, hay un cabezal constante en el extremo del recipiente, es decir, en la terminación superior ( $x = 0$ ) y otro valor en el extremo inferior ( $x = L$ ) y las condiciones del transiente son producidas por el cierre de una válvula. Suponemos que hay flujo estable en la tubería en el tiempo ( $t = 0$ ), cuando la válvula es cerrada instantáneamente, esta reducirá el flujo a cero y el resultado será un aumento de presión y una onda presión viajará en la dirección corriente arriba. Si la trayectoria de esta onda es graficada en el plano ( $x-t$ ), sería representada por la línea BP mostrada en la figura III.5.

Es claro que las condiciones en la región I, depende solamente de las condiciones iniciales, porque las condiciones límites en la corriente arriba no cambian; mientras que en la región II, depende de las condiciones corriente abajo. Entonces la línea característica BP separa dos tipos de soluciones. Si las excitaciones son impuestas simultáneamente en los puntos A y B, entonces la región influenciada por las condiciones iniciales es como se muestra en la figura III.6. La línea característica AC separa las regiones influenciadas por la corriente arriba y las iniciales; y la línea BC separa las regiones influenciadas por las condiciones corriente abajo e iniciales. Es decir, las líneas características en el plano ( $x-t$ ) representan la trayectoria de las perturbaciones iniciadas en varios puntos ---

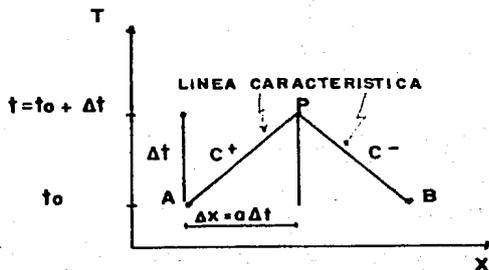


FIGURA. III.2. LINEAS CARACTERISTICAS EN EL PLANO  $x-t$

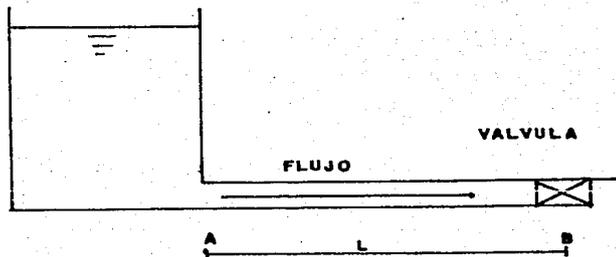


FIGURA. III.3 REPRESENTACION SENCILLA DEL FENOMENO.

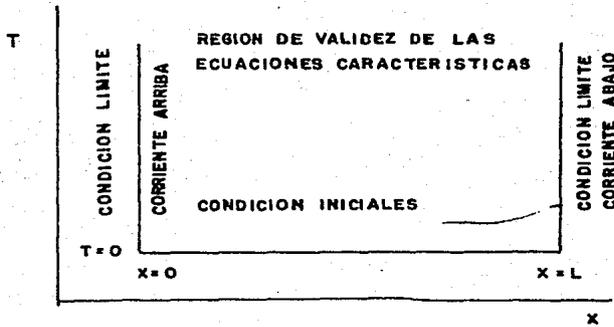


FIGURA. III. 4 REGION VALIDA DE APLICACION DE LAS ECUACIONES CARACTERISTICAS

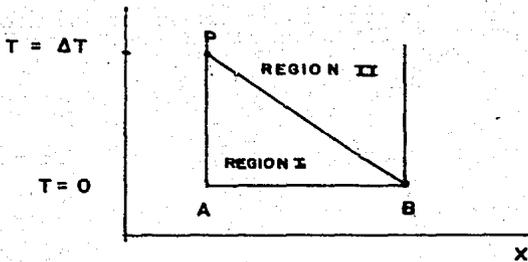


FIGURA. III. 5 EXCITACION EN EL LIMITE CORRIENTE ABAJO

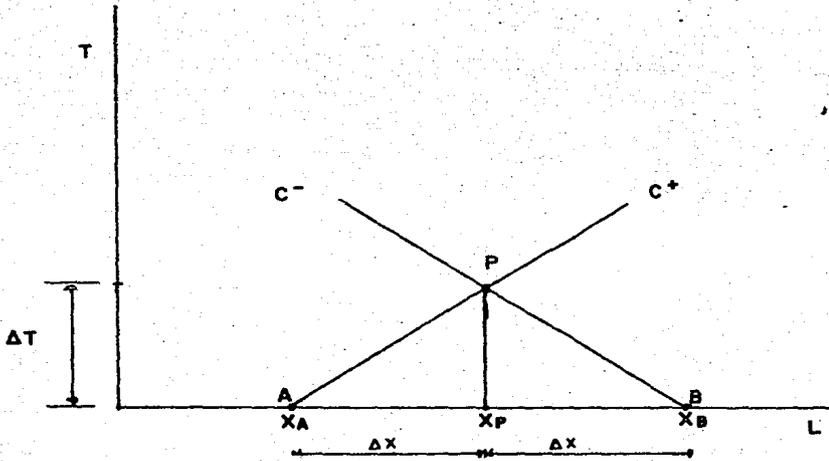


FIGURA. III.6 REGION DE LAS ECUACIONES CARACTERISTICAS EN EL PLANO  $X$  vs.  $T$

o localizaciones en el sistema.

Para resolver las ecuaciones (III.2.11) hasta (III.2.14), un número de esquemas de diferencias finitas han sido propuestas por Streeter y Wylie los cuales usan una técnica de primer orden en diferencias finitas; Evangelist sugieren un método corrector predictor. Lister emplea ambos esquemas primer orden y segundo orden en diferencias finitas. Porque los intervalos de tiempo usados en la resolución de las ecuaciones para problemas prácticos, son generalmente pequeños, una técnica de primer orden sugerida por Streeter y Wylie es suficientemente precisa y discutida en esta sección. Por otra parte, si las pérdidas por fricción son grandes, entonces, una aproximación por primer orden debe producir resultados inestables. Para esos casos, un método de corrector predictor o una aproximación de segundo orden es utilizado para evitar inestabilidad del esquema de diferencias finitas.

### III.2.B. SOLUCION POR DIFERENCIAS FINITAS

Si, una tubería es dividida en (N) tramos, cada ( $\Delta T$ ) es un incremento en longitud, como se muestra en la figura III.7. Un incremento de tiempo es calculado como  $\Delta T = \Delta X / C$  y la ecuación (III.2.12) se satisface por una pendiente positiva de la malla representada por la línea característica AP. Si las variables dependientes (V y H) son conocidas en el punto A, entonces la ecuación (III.2.11), la cual es válida a lo largo de la línea característica ( $C^+$ ) y puede ser integrada entre los límites A y P, y de este modo expresarla en términos de la variable dependiente (V y H) en el punto P.

La ecuación (III.2.13) se satisface por una pendiente negativa de la malla, mostrada por la línea BP. La integración de la ecuación característica ( $C^-$ ) compatible a lo largo de la línea BP, con condiciones conocidas en el punto B y desconocidas en el punto P, nos lleva a una segunda ecuación en términos de las mismas variables desconocidas (V y H) en el punto P.

Una solución simultánea nos producirá condiciones en el tiempo y po-

sición en el plano (x-t) en el punto P.

Multiplicando la ecuación (III.2.11) por  $\alpha dt/g = dx/g$  e introduciendo el área de la tubería, esto es mediante el cambio de la -- variable de la velocidad a el gasto, la ecuación que obtenemos para ser -- integrada a lo largo de la línea característica ( $C^+$ ). Tenemos:

$$\int_{H_A}^{H_P} dH + \frac{\alpha}{gA} \int_{Q_A}^{Q_P} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{X_A}^{X_P} Q|Q| dx = 0 \quad (III.2.15)$$

Las ecuaciones diferenciales ordinarias puede ser ahora expresadas en forma de diferencias finitas. Así la ecuación (III.2.15) se transforma en:

$$H_P - H_A + \frac{\alpha}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f \Delta X}{2gDA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (III.2.16)$$

De forma similar, la ecuación (III.2.13) se multiplica por  $\alpha dt/g = dx/g$  e integrando a lo largo de la línea característica ( $C^-$ ) entre B y P, obtenemos:

$$-\int_{H_P}^{H_B} dH + \frac{f}{2gDA^2} \int_{X_P}^{X_B} Q|Q| dx + \frac{\alpha}{gA} \int_{Q_P}^{Q_B} dQ = 0 \quad (III.2.17)$$

expresando en diferencias finitas tenemos:

$$H_P - H_B - \frac{\alpha}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f \Delta X}{2gDA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (III.2.17.a)$$

Es importante mencionar que para obtener estas ecuaciones el termino

$(f/2gDA^2)Q|Q|dx$  se consideró una aproximación de primer orden, para realizar la integración. Esta aproximación considera a la variación de la fricción (f) con respecto a la velocidad constante. Cuando el término de fricción es importante, como se discutirá más adelante, esta aproximación de primer orden se realiza de la siguiente forma:

Para ( $C^+$ ) en forma de función es:

$$\int_{x_A}^{x_P} f(Q) dx = f(Q_A)(x_P - x_A) = f(Q) \Delta x$$

así, aplicada sería

$$\frac{f}{2gDA^2} Q_A |Q_A| \Delta x$$

de igual forma, puede aproximarse para la ecuación característica ( $C^-$ ).

Las ecuaciones compatibles (III.2.16) y (III.2.17) son relaciones algebraicas básicas, que describen la propagación transiente del cabezal de presión y del flujo en una tubería. En estas ecuaciones tenemos dos incógnitas (H y Q) que se tienen que resolver simultáneamente para conocer los valores de (H y Q) en el punto P. Siendo que ya tenemos o conocemos los valores de una etapa anterior (A y/o B), se asignamos:

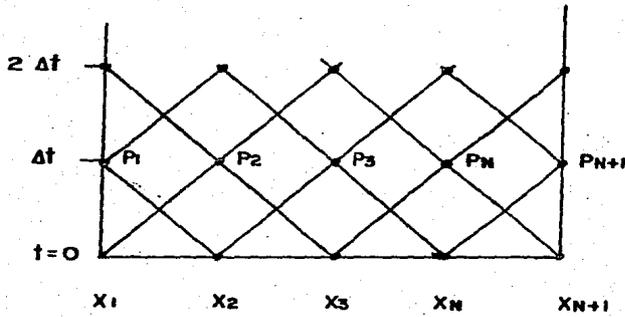
$$B = \frac{Q}{gA}$$

$$R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2}$$

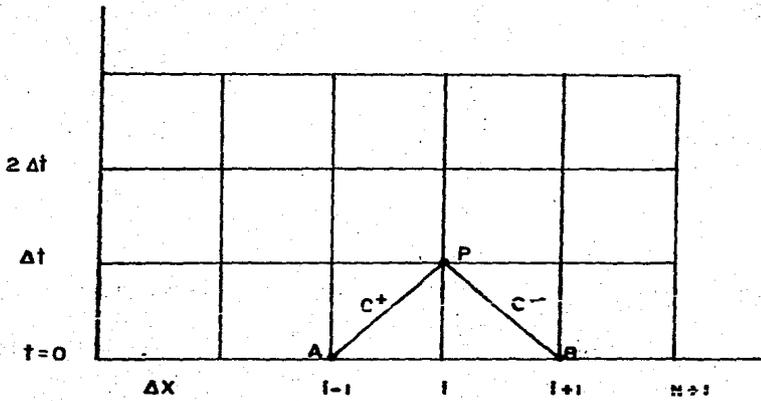
resolviendo las ecuaciones tenemos:

$$C^+: H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - R(Q_A |Q_A|)$$

(III.2.18)



(a)



(b)

FIGURA. III. 7. a y b. MALLA CARACTERISTICA PARA RESOLVER PROBLEMAS DE SISTEMAS SIMPLES

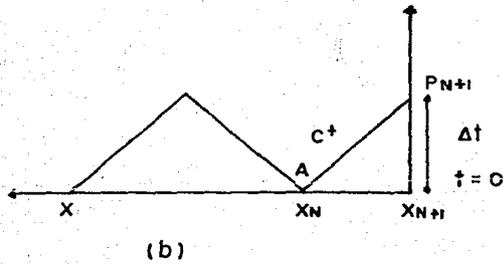
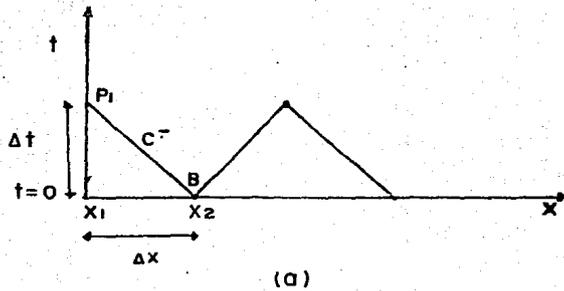


FIGURA. III. 8. a y b. CONDICIONES A LA FRONTERA.

$$C^- : H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) + R(Q_B | Q_B) \quad (\text{III.2.19})$$

Ya que dividimos la tubería en (N) secciones, entonces, cada sección será  $\Delta x = L/N$ . Por tanto, es posible construir una malla característica - como se muestra en la figura III.7.

Los puntos de la malla a lo largo de la abscisa (x) representa puntos especificados de  $\Delta x$  a lo largo de la tubería, y los valores de (Q y H) - para (t = 0); en esos puntos sobre la abscisa representan las condiciones iniciales, los cuales generalmente estan dados a condiciones de flujo estable, en la tubería. En estas condiciones de flujo estable, los flujos son iguales, es decir,  $Q_A = Q_P = Q_B$  y  $R Q_A | Q_A|$  es el cabezal de la pérdida por fricción en estado estable, bajo el  $\Delta x$  alcanzado.

Para alcanzar el punto P2 de la malla a través de un  $\Delta x$  en la tubería, es necesario resolver simultáneamente las ecuaciones (III.2.18) y -- (III.2.19), siendo conocidas las variables  $Q_A, Q_B, H_A, f$  y D de una etapa anterior ( t = 0 ), podemos determinar el punto en la tubería.

El procedimiento anteriormente descrito para el punto P2 puede -- continuarse hasta que los valores de (Q) y (H) en los puntos P2 hasta Pn sean alcanzados. Ahora nos queda determinar los puntos P1 y Pn+1, los valores de (Q y H) en estos puntos deben determinarse con ayuda de las condiciones a la frontera.

En (x = 0) de la tubería, tenemos que solamente es aplicable la ecuación (C<sup>-</sup>) o (III.2.19), de esta manera, debemos relacionar con otra ecuación entre los puntos X1 y X2 como podemos ver en la figura (III.8.a).

La condición a la frontera en ( x = 0 ) debe proporcionar otra ecuación de HPI y/o QPI para resolverlas simultáneamente con la ecuación -- (C<sup>-</sup>).

La misma situación y requerimientos existe en (X = L) de la tubería

siendo la diferencia de la anterior que aquí es aplicable la ecuación ( $C^+$ ) que se muestra en la figura (III.8.b).

En forma general, se puede decir que las condiciones a la frontera se pueden establecer con (H) conocida a través de una ecuación en los nodos  $l$  o  $N+1$ , y calcularse  $Q_P$  en los nodos  $l$  o  $N+1$ . De acuerdo con la ecuación -- característica aplicable ( $C^+$  ó  $C^-$ ) donde necesariamente se involucre  $H_P$  y  $Q_P$  en estos puntos, en esos caso hay que resolver simultáneamente.

Después que las condiciones a la frontera han sido establecidas, entonces, los cabezales y flujos en todos los puntos (nodos) de la malla a  $t = \Delta t$  pueden calcularse. Los valores obtenidos son utilizados para dar solución a las ecuaciones para los valores de (H y Q) en el siguiente incremento de tiempo  $t = 2 \Delta t$ , este procedimiento se repite hasta que la cantidad de tiempo requerido que se especifique, se cumpla para su solución (tiempo máximo de simulación del transiente,  $T_{max}$ ). El resultado es un conjunto de valores de (H y Q) a intervalos discretos de tiempo para los nodos  $N+1$  en tubería.

Finalmente, podemos concluir en los conceptos de propagación de la onda, que la perturbación se propaga a lo largo de las líneas características de la malla.

### III.2.C. ESTABLECIMIENTO DE LA SOLUCION NUMERICA

En la sección anterior hemos establecido las ecuaciones en diferencias finitas, lo cual permitira calcular los valores de (H y Q) en intercepciones predeterminadas de las características ( $C^+$ ) y ( $C^-$ ). Los valores de (H y Q) en los extremos de la tubería, fueron determinados, usando las condiciones a la frontera, quedando ahora por establecer un procedimiento para la solución, tal que una técnica por computadora pueda usarse.

Si asignamos a cualquier punto de intersección en el interior de la malla, sección (i), las ecuaciones compatibles son resueltas simultáneamente para las variables desconocidas ( $H_{pi}$ ) y ( $Q_{pi}$ ). Definiendo a

$$CP = H_{i-1} + BQ_{i-1} + RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (III.2.20)$$

$$CM = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (III.2.21)$$

entonces, las ecuaciones (III.2.18) y (III.2.19) se transforman en:

$$C^+ : H_{pi} = CP - BQ_i \quad (III.2.22)$$

$$C^- : H_{pi} = CM + BQ_i \quad (III.2.23)$$

Resolviendo simultáneamente

$$H_{pi} = (CP + CM) / 2 \quad (III.2.24)$$

entonces ( $Q_{pi}$ ) puede transformarse de la ecuación (III.2.22) o (III.2.23). Por tanto:

$$Q_{pi} = (H_{pi} - CM) / B \quad (III.2.25)$$

Para transformar las ecuaciones a un lenguaje de computadora, nos referimos a la figura (III.9), puede notarse que la sección (i) se refiere a cualquier punto de intersección de la malla en la dirección (x).

Los valores sub-indizados de (Q) y (H) a cada sección, son siempre disponibles para proceder al siguiente incremento de tiempo. Así como las condiciones iniciales dadas, o como los resultados de una etapa previa de los cálculos, los nuevos cabezales y flujos al tiempo corriente durante el transiente.

Examinando la malla de la figura (III.9), muestra que los puntos finales del sistema comienzan influenciados por los puntos interiores después del primer incremento de tiempo deseado, es necesario introducir las -- condiciones apropiadas a la frontera.

Para entender como manejar las condiciones límite, examinaremos algunos ejemplos comunes.

### III.2.D. ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES A LA FRONTERA APLICADAS A SITUACIONES SENCILLAS.

En la sección anterior señalamos que las condiciones a la frontera se requieren para determinar las condiciones en los extremos de la tubería las cuales son desarrolladas, resolviendo las ecuaciones (III.2.22) y --- (III.2.23), y las condiciones impuestas por los límites. Cabe mencionar -- que cada condición a la frontera resulta independientemente de las otras condiciones límites y del cálculo de los puntos interiores.

Un número de condiciones a la frontera sencillas son desarrolladas en esta sección.

- a) CONDICION A LA FRONTERA DE UN RECIPIENTE DE NIVEL CONSTANTE COLOCADO CORRIENTE ARRIBA DEL SISTEMA.

Si consideramos a un recipiente de gran tamaño conteniendo un líquido como se muestra en la figura (III.3), donde las variaciones del nivel con respecto al flujo en la tubería pueden considerarse despreciables. De esta forma, si las pérdidas a la salida (contracción súbita) del recipiente. Así obtenemos:

$$H_{P1} = H_{RES} \quad (III.2.26)$$

donde  $H_{RES}$  es la altura del recipiente desde la superficie del líquido hasta algún nivel de referencia. De la ecuación (III.2.23) y resolviendo -- simultáneamente con (III.2.25) obtenemos:

$$Q_{P1} = (H_{P1} - CM) / B \quad (III.2.27)$$

De esta forma queda determinada el punto (1) en ( $x=0$ ), estableciendo ( $H_{P1}$ ) y resolviendo para ( $Q_{P1}$ ) con la ecuación ( $C^-$ ).

Por otra parte, si las pérdidas por contracción súbita no son despreciables, entonces se deben considerar en el análisis de la siguiente forma.

Sean las siguientes pérdidas por contracción:

$$h_e = \frac{KV^2}{2g}$$

donde ( $K=fL/D$ ) es el coeficiente de pérdidas por fricción. Refiriéndose a la figura (III.3) tenemos:

$$H_{P1} = H_{RES} - (1+K) \frac{Q_{P1}^2}{2Ag} \quad (III.2.28)$$

resolviendo con la ecuación (III.2.25) obtenemos:

$$Q_{P1}^2 \frac{(1+K)}{2Ag} + BQ_{P1} + CM - H_{RES} = 0$$

resolviendo cuadrática, obtenemos:

$$Q_{P1} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 2(1+K)/AQ(CM - H_{RES})}}{(1+K)/Ag} \quad (III.2.29)$$

b) VALVULA COLOCADA CORRIENTE ABAJO

Hay varias maneras de representar el modelo de cierre de una válvula. Por ejemplo, el flujo a través de la válvula a régimen permanente puede expresarse como :

$$Q_0 = [C_d A_g]_0 \sqrt{2gH_0} \quad (III.2.30)$$

Esta es la ecuación de un orificio para flujo en estado estable donde ( $Q_0$ ) es el flujo a estado estable, ( $H_0$ ) es el cabezal corriente arriba de la válvula y ( $[C_d A_g]_0$ ) es el área de abertura de la válvula.

Una ecuación similar puede aplicarse para el estado transiente como:

$$Q_{PN+1} = (C_d A_g) \sqrt{2gH_{N+1}} \quad (III.2.31)$$

Si dividimos la ecuación de régimen permanente con la ecuación de estado transiente, teniendo cuenta la relación de abertura de la válvula, la cual se define como:

$$\gamma = \frac{(Cd A_G)}{(Cd A_G)_0} \quad (III.2.32)$$

de aquí obtenemos:

$$Q_{PN+1} = \frac{Q_0}{\sqrt{H_0}} \gamma \sqrt{H_{PN+1}} \quad (III.2.33)$$

Para flujo estable ( $\gamma = 1$ ), para cuando no hay flujo, es decir, la válvula esta en posición de cierre, ( $\gamma = 0$ ).

Por otra parte, para una tubería simple la relación de cierre de la -- válvula ( $\gamma$ ) esta dada por:

$$\gamma = (1 - t/t_c)^{E_m} \quad (III.2.34)$$

donde

$T_c$  = es el tiempo de cierre de la válvula

$t$  = Tiempo corriente de la válvula

$E_m$  = exponente de cierre de la válvula, cuyos valores más usuales son desde (1 hasta 4).

Cuando el subscrito (Ns) para la sección corriente abajo, las variables sub-índizadas ( $Q_p$ ) y ( $H_p$ ) y las ecuaciones (III.2.22) y (III.2.33), se resuelven simultáneamente.

$$Q_{PNS} = - BCv + \sqrt{(BCv)^2 + 2 C_v C_P} \quad (III.2.35)$$

en el cual

$$C_v = \frac{(Q_o T)^2}{2 H_o}$$

El correspondiente valor de (  $H_{NS}$  ) puede ser determinado por la ecuación (III.2.22)

$$H_{PNS} = C_P - B Q_{PNS} \quad (III.2.36)$$

Las características hidráulicas de las válvulas dependen generalmente de la configuración del perfil del flujo a través de la válvula abierta los coeficientes de estado estable, como una función de la posición de la válvula, son provistas por los fabricantes.

c) CONDICIONES DE FRONTERA PARA UNA BOMBA CENTRIFUGA A VELOCIDAD CONSTANTE.

Esta condición a la frontera ofrece la complejidad adicional de una condición límite, conteniendo (H) y (Q). El análisis puede realizarse por definición de la curva característica de la bomba. En un programa de computadora, este análisis puede ser acompañado por la historia de los datos - tabulados que describen la curva o por uso de una ecuación que relacione - las variables.

Si la bomba es suministrada de flujo desde un recipiente, la ecuación que puede ser usada es:

$$H_{PI} = H_s + P_{SOH} - C_p (Q_{PI})^2 \quad (III.2.37)$$

donde

$H_s$  = es el cabezal de succión

$C_p$  = constante cuadrática de la bomba

$PSOH$  = cabezal diferencial Shut-off.

La constante de la bomba ( $C_p$ ) es evaluada a las condiciones de estado estable, y esta dado por:

$$C_p = \frac{PSOH - H + H_s}{(Q_0)^2} \quad (III.2.38)$$

Resolviendo simultáneamente (III.2.37) y (III.2.23) y eliminando  $(H_{p1})$  obtenemos:

$$C_p(Q_{p1})^2 + B Q_{p1} + CM - H_s - PSOH = 0$$

Por tanto; obtenemos una ecuación cuadrática, la cual tiene la siguiente solución:

$$Q_{p1} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4C_p(CM - H_s - PSOH)}}{2C_p} \quad (III.2.39)$$

Como detalle adicional, es interesante notar que si una válvula check es instalada a la descarga de la bomba, tendríamos que checar el signo de  $(Q_{p1})$ . Si  $(Q_{p1})$  fuera negativo (flujo inverso); entonces cambiaremos  $(H_{p1})$  de la ecuación (III.2.23) y no de la ecuación (III.2.37); porque la válvula check ha aislado a la bomba de la tubería en estudio (bomba fuera de operación) y por tanto, la válvula check pasará a ser condición límite.

### III.3. PROGRAMA DE CALCULO

#### a) ESTRUCTURA BASICA DEL PROGRAMA

Se realizó un programa de cálculo por computadora. El programa tiene acceso a cualquier calculadora programable, tanto CASSIO como HEWLETT-PACKARD (41C/ 41CV).

El programa simula el comportamiento de un líquido fluyendo en una tubería, teniendo una temperatura uniforme.

El objetivo del análisis del transiente, es determinar si la presión en cualquier punto de la tubería excede de la presión máxima disponible del transiente (MATOP). El (MATOP) es usualmente especificada como el 110% de la presión interna de diseño o la presión máxima disponible en operación de estado estable (MASSOP).

En la versión básica del programa, determina la situación a regimen permanente ( $t = 0$ ). Estos valores son entonces alimentados para establecer las condiciones iniciales.

En suma, el programa lee la información básica, generará los valores de  $(Q)$  y  $(H)$  en los puntos interiores (intercción) a lo largo de la tubería y entonces comienza los cálculos a regimen transiente. Los puntos interiores de la malla son calculados con las ecuaciones (III.2.14) y (III.2.16). Las condiciones a la frontera, de acuerdo al sistema en cuestión son utilizados para obtener dos valores de  $(Q)$  y  $(H)$  en los extremos de la tubería.

El proceso completo, comienza de nuevo, usando los valores calculados de  $(Q_p)$  y  $(H_p)$  en la etapa anterior. El proceso continua con un "loop" hasta que alcanza un tiempo máximo ( $T_{max}$ ). Antes que la operación termine los valores de  $(H)$  son almacenados para cada nodo. Estos valores son las máximas y mínimas presiones calculadas en cada punto durante el análisis.

Para simular los problemas del transiente con otras condiciones límites, es necesario solo cambiar partes del programa, el cual ya tiene una estructura fija.

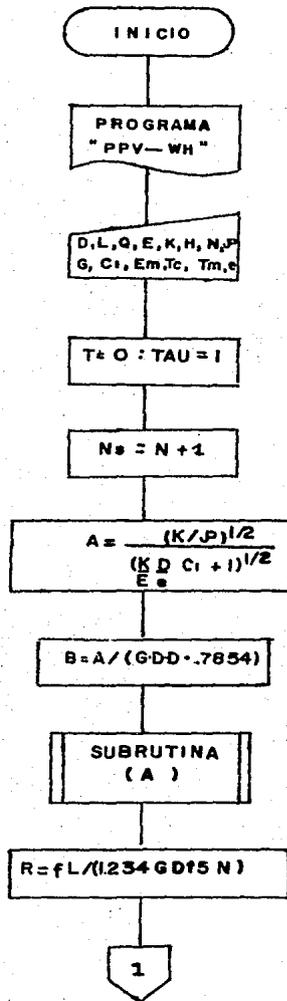
b) PROCEDIMIENTO DE CALCULO.

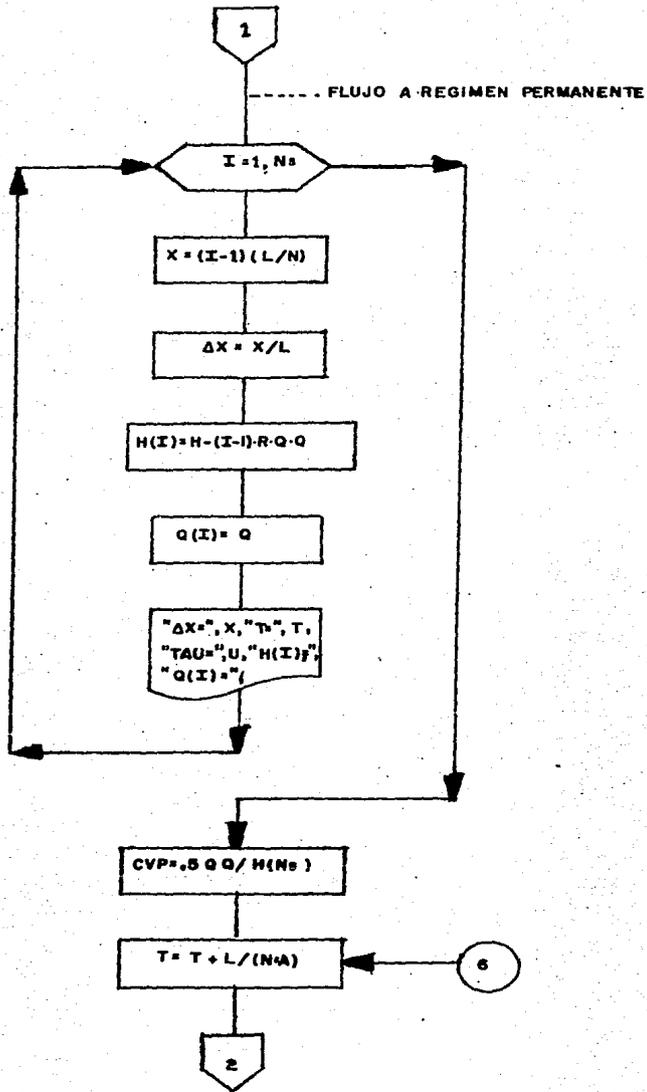
El procedimiento para resolver problemas numéricos de flujo transiente involucra un número de cálculos repetitivos, y se resuelven mediante los siguientes pasos:

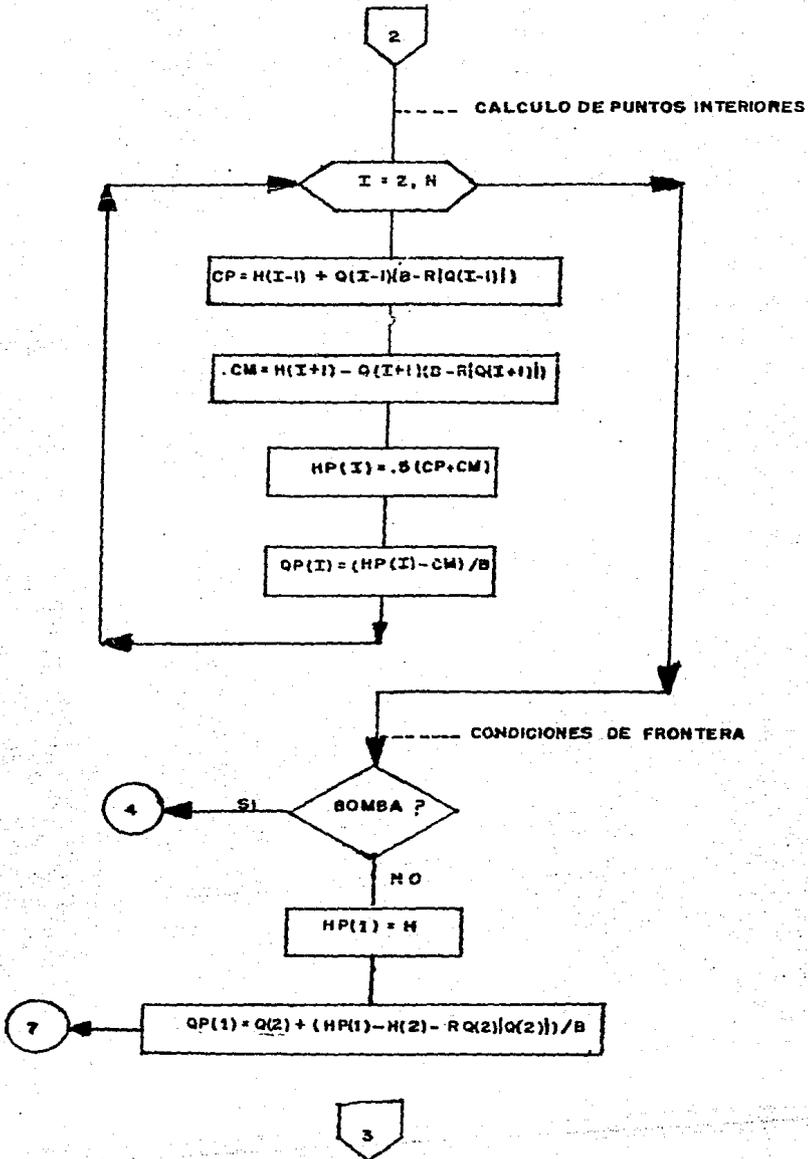
- 1.- Leer valores que describan el sistema y el caracter del transiente.
- 2.- Calcular todas las constantes y condiciones iniciales de estado estable.
- 3.- Calcular el factor de fricción mediante el procedimiento iterativo de Colebrook-White, antes de calcular todos los valores iniciales.
- 4.- Calcular y almacenar todos los valores de condiciones iniciales --  $(Q_i)$  y  $(H_i)$  para  $(t = 0)$ .
- 5.- Escribir los valores de  $(Q_i)$  y  $(H_i)$  en cada sección, así como el -- tiempo de abertura de la válvula.
- 6.- Incrementar el tiempo por  $(\Delta T)$ , y calcule los puntos interiores de  $(Q_{p2})$  a  $(Q_{pn})$ ,  $(H_{p2})$  a  $(H_{pn})$  y calcule los valores a la -- frontera de  $(Q_{p1})$  y  $(H_{p1})$ ;  $(Q_{pns})$  y  $(H_{pns})$  del sistema en estudio.
- 7.- Almacene todos los valores  $(Q_{pi})$ ,  $(H_{pi})$  en  $(Q_i)$  y  $(H_i)$  respectivamente.
- 8.- Transfiera a la línea 3 o incremente el tiempo y cheque si el tiempo máximo de simulación  $(T_{max.})$  ha sido excedido. Si no continúe con -- los cálculos.

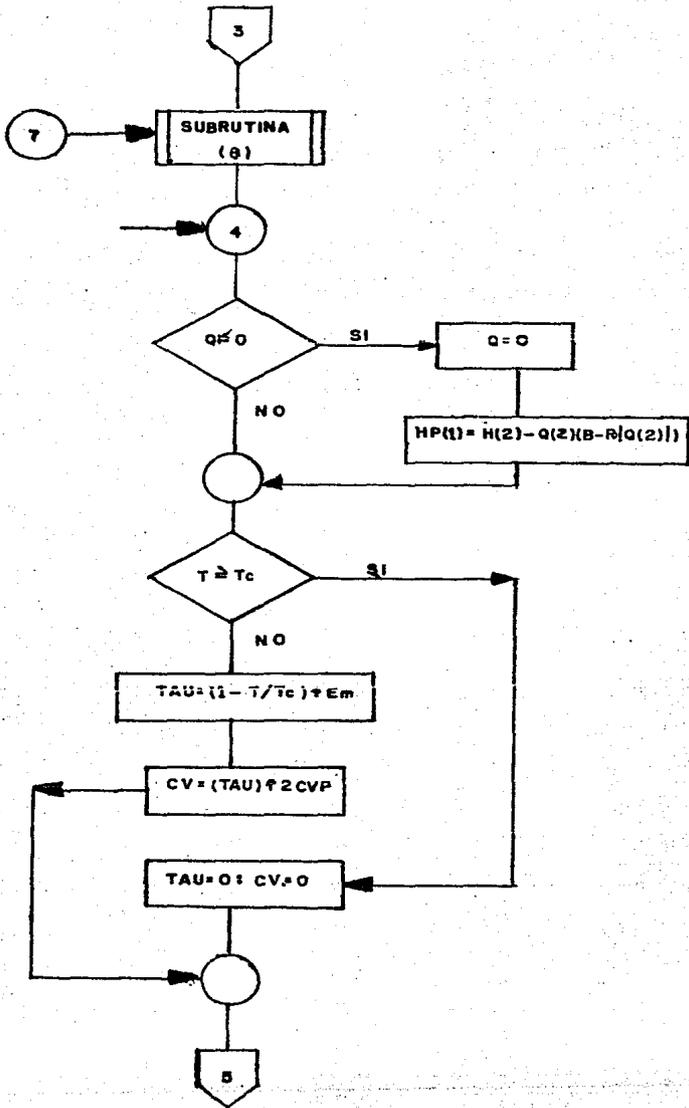
Este procedimiento se muestra en el diagrama de flujo correspondiente así como las subrutinas del cálculo del factor de fricción, y la condición a la frontera de una bomba centrífuga en operación a velocidad constante, esto es conociendo la curva característica de la bomba.

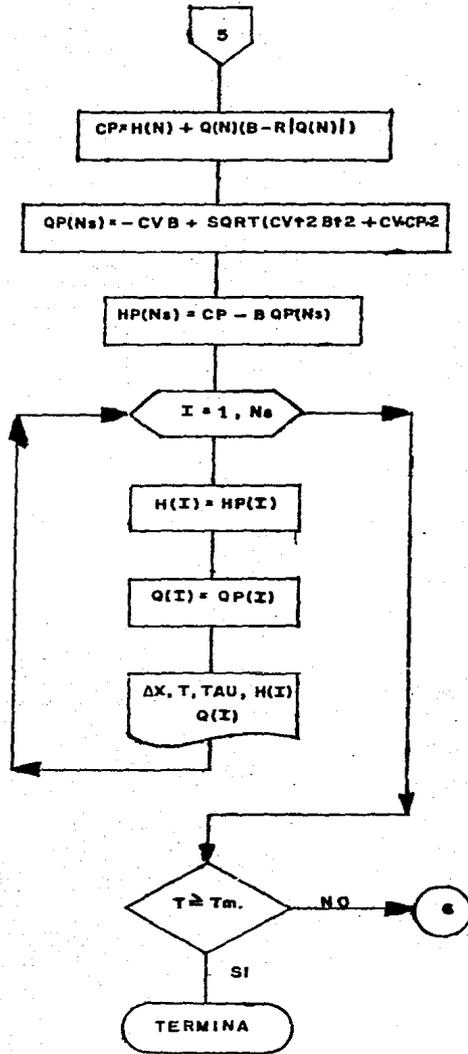
DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE GOLPE DE ARIETE



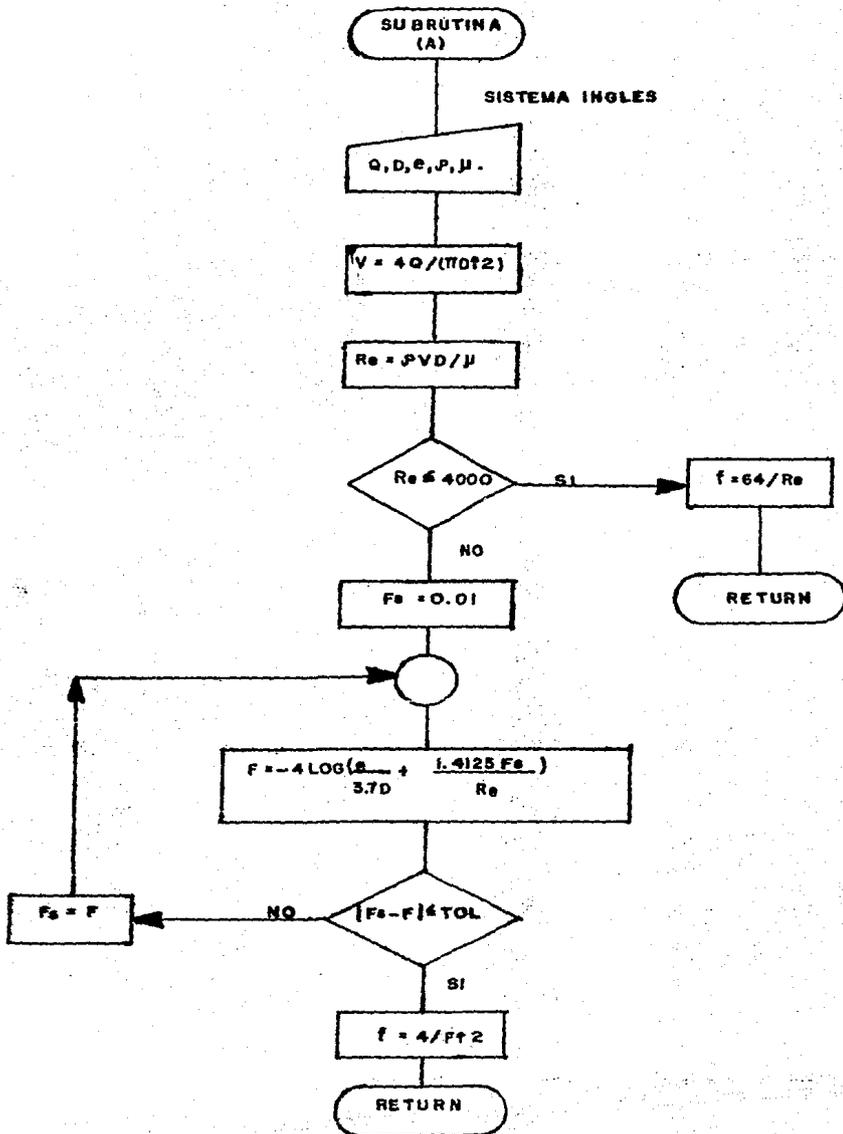




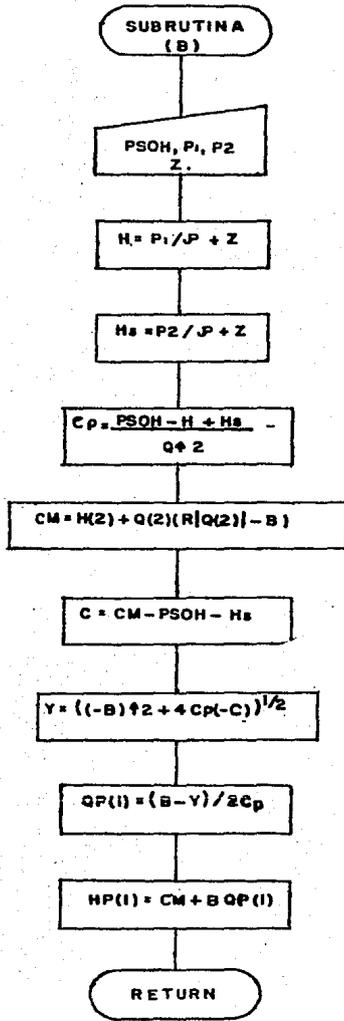




CALCULO DEL FACTOR DE FRICCION



CONDICION DE FRONTERA PARA UNA BOMBA  $v = cte.$



### III.3.4 EJEMPLO DE APLICACION

#### SISTEMA DE BOMBEO DE CRUDO

Condiciones del líquido:

Gravedad específica (Sg).- 0.8651

Módulo de elasticidad volumétrica.- 210,241 psi

Viscosidad.- 7 cp.

Condiciones de la tubería:

Diámetro.- 16 in.

Espesor.- 0.4240 in.

Rugosidad.- 0.0005 in.

Condiciones de la Estación de Bombeo:

Flujo.- 213,372.0 BPD.

Presión de descarga, 1,414.00 psig.

Presión de succión.- 50.00 psig.

Elevación.- se considera un terreno plano. ( $Z_1 = 0$  ;  $Z_2 = 0$  )

Longitud del oleoducto.- 26.2 millas.

Análizar el transiente que se presenta en este sistema, provocado por la acción del cierre instantáneo de una válvula.

#### SOLUCION:

El sistema que se analiza es Bomba-Tubería-Válvula. Por lo que, el programa de cálculo que se presenta en esta sección se puede aplicar sin ninguna modificación.

Los datos que se tienen son corridos en la calculadora HP 41-CV. También se pueden correr en CASSIO FX-700/850.

El programa simula la onda de presión, que se presenta en el sistema y predice las presiones a lo largo de la tubería., en un tiempo de simulación de 250 segundos.

Los resultados se muestran en la tabla A. y se gráficán, figura A.

La gráfica muestra las presiones a estado estable (  $t = 0$  ), después de que la válvula es cerrada en (  $t = 20.12$  sgs. ), y las presiones cuando la máxima presión (MAP) ocurre en el sistema, (  $t = 213.24$  sgs ).

Esta máxima presión se muestra con líneas segmentadas.

La máxima presión en operación transiente (MATOP) que se obtiene en este sistema es:

MATOP = 2,183 psig.

La máxima presión en estado estable (MASSOP) en el sistema es:

MASSOP = 1,984. psig.

Como se observa, la (MAP) se encuentra entre (MATOP) y (MASSOP), lo que significa, que el sistema no corre el riesgo de sufrir daño alguno, por la acción del cierre de una válvula, colocada corriente abajo de la tubería es decir al final de la tubería.

TABLA. A. ANALISIS DEL TRANSIENTE.

T=0.00	T=12.07	T=20.12	T=213.24	T=217.27	T=253.48	MAX P
MP=0.00 P=1,414.00 Q=213.37	MP=0.00 P=1,414.00 Q=213.37	MP=0.00 P=1,414.00 Q=213.37	MP=0.00 P=2,031.04 Q=0.82	MP=0.00 P=2,042.64 Q=0.00	MP=0.00 P=2,079.28 Q=0.00	MP=0.00 P <sub>MAX</sub> =2,080.35 Z=0.00
MP=2.91 P=1,265.78 Q=213.37	MP=2.91 P=1,265.78 Q=213.37	MP=2.91 P=1,265.78 Q=213.37	MP=2.91 P=2,040.87 Q=-0.77	MP=2.91 P=2,040.51 Q=-3.28	MP=2.91 P=2,078.99 Q=0.59	MP=2.91 P <sub>MAX</sub> =2,079.3 Z=0.00
MP=5.82 P=1,117.55 Q=213.34	MP=5.82 P=1,117.55 Q=213.37	MP=5.82 P=1,117.55 Q=213.37	MP=5.82 P=2,049.75 Q=0.73	MP=5.82 P=2,049.29 Q=-4.41	MP=5.82 P=2,076.91 Q=0.00	MP=5.82 P <sub>MAX</sub> =2,077.93 Z=0.00
MP=8.73 P=969.33 Q=213.37	MP=8.73 P=969.33 Q=213.37	MP=8.73 P=969.33 Q=213.37	MP=8.73 P=2,058.17 Q=-0.58	MP=8.73 P=2,057.47 Q=-2.62	MP=8.73 P=2,074.09 Q=1.79	MP=8.73 P <sub>MAX</sub> =2,074.46 Z=0.00
MP=11.64 P=821.10 Q=213.34	MP=11.64 P=821.10 Q=213.37	MP=11.64 P=821.10 Q=213.34	MP=11.64 P=2,064.89 Q=0.60	MP=11.64 P=2,064.45 Q=-3.29	MP=11.64 P=2,069.66 Q=1.62	MP=11.64 P <sub>MAX</sub> =2,070.61 Z=0.00
MP=14.56 P=672.88 Q=213.37	MP=14.56 P=672.88 Q=213.37	MP=14.56 P=680.40 Q=210.12	MP=14.56 P=2,071.23 Q=-0.36	MP=14.56 P=2,070.36 Q=-1.78	MP=14.56 P=2,064.41 Q=2.97	MP=14.56 P <sub>MAX</sub> =2,071.23 Z=0.00
MP=17.47 P=524.65 Q=213.37	MP=17.47 P=524.65 Q=213.37	MP=17.47 P=553.71 Q=200.53	MP=17.47 P=2,075.34 Q=0.38	MP=17.47 P=2,075.01 Q=-2.00	MP=17.47 P=2,057.92 Q=2.37	MP=17.47 P <sub>MAX</sub> =2,075.45 Z=0.00
MP=20.39 P=376.46 Q=213.37	MP=20.39 P=391.63 Q=206.79	MP=20.39 P=467.59 Q=175.63	MP=20.39 P=2,079.23 Q=-0.17	MP=20.39 P=2,078.28 Q=-0.89	MP=20.39 P=2,050.80 Q=3.98	MP=20.39 P <sub>MAX</sub> =2,079.23 Z=0.00

CONTINUA

TABLA. A. ANALISIS DEL TRANSIENTE

CONTINUA

T=0.00	T=12.07	T=20.12	T=213.24	T=217.27	T=253.48	MAX P
MP=23.29 P=228.21 Q=213.37	MP=23.29 P=284.58 Q=188.42	MP=23.29 P=469.77 Q=115.88	MP=23.29 P=2,080.62 Q=0.12	MP=23.29 P=2,080.37 Q=-0.67	MP=23.29 P=2,042.63 Q=2.05	MP=23.29 PMAX=2,080.77 Z=0.00
MP=26.20 P=79.98 Q=213.37	MP=26.20 P=241.39 Q=146.97	MP=26.20 P=624.21 Q=0.00	MP=26.20 P=2,081.91 Q=0.00	MP=26.20 P=2,080.91 Q=0.00	MP=26.20 P=2,044.54 Q=0.00	MP=26.20 PMAX=2,081.91 Z=0.00

CONCLUSION

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

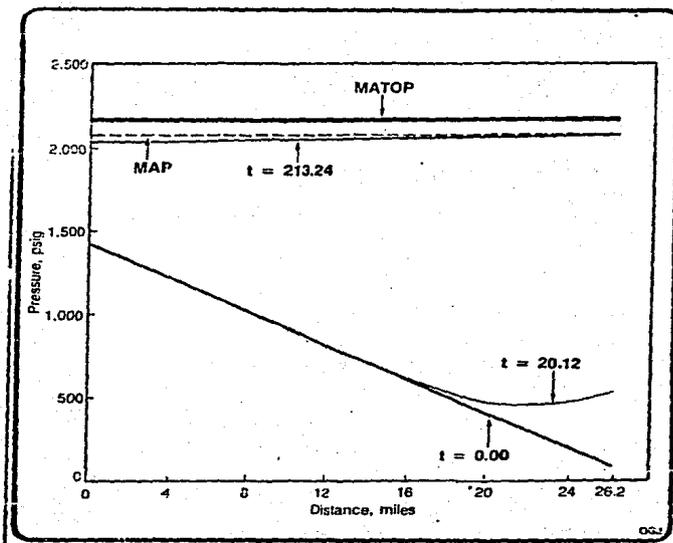


FIGURA A. PERFIL DE PRESIONES PARA EL EJEMPLO

**C A P I T U L O: IV. DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD**

#### IV.1. INTRODUCCION

Como todo sistema operativo, una instalación de bombeo debe de disponer de sus sistemas de seguridad para protección del mismo, como de las partes que interaccionan con él, (operadores, equipos, población, etc.). De esta manera, en esta sección se discutirán algunos aspectos prácticos e los dispositivos de control del Golpe de Ariete.

Es importante señalar, que existen algunos aspectos o factores importantes que nos permite decidir si los dispositivos deben o no usarse para la protección del sistema en cuestión. Los factores son:

1) ESPESOR DE DISEÑO DE LA PARED DE LA TUBERIA.

ESTE espesor, se calcula primero la presión interna mediante la siguiente fórmula.

$$t = \frac{P_i D}{2 S}$$

donde

t = espesor de diseño de la pared de la tubería

P<sub>i</sub> = presión interna máxima de diseño (MASSOP)

D = diámetro exterior de la tubería.

S = esfuerzo máximo permisible del material de la tubería.

La presión máxima de trabajo en cualquier punto de la línea, es la presión máxima esperada en condiciones normales de operación (MASSOP) e incluye tanto la presión estática debida al gradiente hidráulico, como la presión requerida para vencer las pérdidas por fricción.

Por tanto, si las sobrepresiones generadas por el Golpe de Ariete -

sobrepasan la presión máxima de trabajo, el sistema requiere de protección o de algún otro dispositivo, que permita minimizar las sobrepresiones, esto es cuando el sistema ya está establecido.

Por otra parte, si el sistema se encuentra en la parte de diseño, tenemos que la presión máxima de diseño debe ser mayor o igual que la presión máxima de trabajo, más la sobrepresión por el golpe de ariete.

La selección de la tubería involucra, además de estos parámetros, la evaluación de varias fuerzas, tanto externas como internas, que actúan sobre la tubería; fuerzas internas importantes, son las presiones de operación, expansiones de la tubería y/o del líquido, peso de la tubería, la capacidad y las presiones generadas por algún transiente. Fuerzas externas — incluyen presiones hidroestáticas soportadas por la tubería en las líneas sumergidas, vacío y soportes.

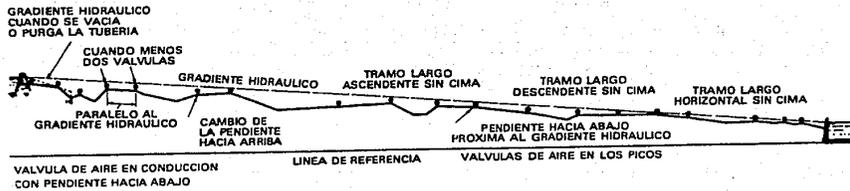
## 2) PERFIL TÍPICO DE LA LÍNEA.

ESTE PERFIL TIENE COMO OBJETIVO, MOSTRAR QUE TIPO DE DISPOSITIVO se utilizará en la sección adecuada, para aliviar las sobrepresiones.

Los dispositivos se instalarán en los picos de las tuberías, estos — picos son determinados por referencia de la línea de grado hidráulico, tomando el nivel de referencia horizontal.

La línea de grado hidráulico, es la altura que se eleva el líquido en un tubo de vidrio vertical, conectado a un piezómetro abierto a la línea ( $P/ + Z$ ).

Si consideramos un perfil de la tubería como se muestra en la figura IV.1, de acuerdo con este perfil, se muestran los dispositivos básicos que se instalan a lo largo de la tubería. Es decir, cuando la sección de la tubería se encuentra por encima del gradiente hidráulico, la sección de la tubería está bajo una presión negativa, por tanto una válvula de aire puede situarse en esta sección. A un punto donde la pendiente decrece, en este punto, una válvula de expulsión de aire es requerida. Cuando la pendiente se incrementa, el aire puede acumularse en el punto de cambios de pendientes, se requiere de válvulas de combinación.



**FIGURA. IV.1 PERFIL TIPICO DE TUBERIA**

En las líneas grandes, tanto ascendentes como descendentes, se requiere de la colocación de estas válvulas, aproximadamente a 2000 pies, a intervalos iguales.

Ademas de estos parametros, existen otros para decidir cuando un sistema requiere o no de protección, uno de estos parametros que aqui se considera, es la longitud total de la tubería; es decir, sin una tubería tiene una longitud menor a los 1500 pies, normalmente no requiere de protección. A veces se considera como parametro, la velocidad del fluido que se esta manejando.

De acuerdo con lo antes descrito, en esta sección, se dará una clasificación de los dispositivos, de acuerdo al medio en que los efectos de las sobrepresiones sean minimizados. Por otra parte, se describiran algunos aspectos más importantes de estos dispositivos, lo que nos permitira visualizar su campo de aplicación.

#### IV.2. SISTEMAS DE PROTECCION.

Para evitar los efectos destructivos que origina el golpe de ariete se recurre a medios que permitan minimizar las presiones desarrolladas durante el impulso del flujo del líquido. Los medios más comunes son:

- A) El aumento del tiempo en que se efectue la detención del flujo en ciertos intervalos de la tubería.
- B) Purgando algo del líquido de la tubería. (alivio de la presión.

Dentro de los sistemas que actualmente se utilizan y son clasificados en estos dos medios para reducir las sobrepresiones generadas durante el transiente.

Los dispositivos se clasifican de la siguiente forma:

A.- DETENCION DEL FLUJO EN CIERTOS INTERVALOS DE LA TUBERIA

- a) Válvulas de aire (se analizaran en esta sección)
- b) Cámaras de aire
- c) Inyección y Aspiración de aire.

B.- ALIVIO DE LA PRESSION

- a) Válvulas de retención (cierre lento, cierre controlado)
- b) Válvulas de alivio (varios tipos)

Estos dispositivos se analizaran esta sección.

C.- OTROS SISTEMAS

- a) Tanque "surge"
- b) Silenciador de "surge"
- c) "Surge" SUPRESOR
- d) "surge" SENTINEL. (se analizará en esta sección.

La operación y el uso de estos dispositivos de control y de protección de equipos contra el Golpe de Ariete, depende principalmente de los siguientes factores:

- a) Presión de la línea de la bomba (Ho)
- b) Propiedades de la tubería
- c) Condiciones finales
- d) Máxima velocidad del fluido
- e) Longitud de la tubería
- f) Presión de diseño de la tubería comparada con la presión de operación.

TABLA IV.1. CRITERIOS DE SELECCION DE LOS DISPOSITIVOS

DISPOSITIVOS	FUNCION	APLICACION
Válvulas de aire:	La función principal de estos dispositivos, es expulsar el aire acumulado en los puntos altos del sistema.	Se utilizan en los puntos altos de una línea principal, para prevenir y/o anticipar a los fenómenos destructivos, como el golpe de ariete, principalmente cuando el fluido manejado es un líquido. Se usa en líneas mayores de 6".
Válvulas check:	La función principal de estos dispositivos, es prevenir el flujo inverso a través de la bomba; cuando existe falla de energía. También previene la fuerzas destructivas que se desarrollan por la acción de estas válvulas.	Estas válvulas, se utilizan en los sistemas de bombeo, para prevenir el flujo inverso y el golpe de ariete asociados tanto en el paro como en el arranque de las bombas. Para líneas mayores de 6"
Válvulas de alivio:	La función principal, es abrir rápidamente cuando la presión de la línea excede a la presión de diseño de la tubería.	Se utilizan en estaciones de bombeo, para proteger las líneas contra las presiones excesivas -- causadas por el cierre de válvula corte de energía, falla de bombas y en algunos casos por paro normal. Para líneas mayores de 8".

CONTINUA.

TABLA IV.1. CRITERIOS DE SELECCION DE LOS DISPOSITIVOS

		CONTINUA
DISPOSITIVOS	FUNCION	APLICACION
"SURGE" ARRESTOR:	<p>Son sistemas completos que permiten controlar y/o anticipar a las ondas de choque que causan presiones altas y presiones bajas que puede llegar a un vacio y colapsar la tubería. El control de las presiones se realiza mediante tres etapas de control:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Control Anormal de la presión</li> <li>b) Control Subnormal de la presión</li> <li>c) Control Anormal-Subnormal de la presión.</li> </ul>	<p>Es un sistema que se utiliza en las estaciones de bombeo. Con la aplicación de las válvulas de alivio, este sistema provee un control más adecuado de las ondas de choque (golpe de ariete). Se aplica para líneas mayores de 8".</p>
"SURGE" SENTINEL:	<p>Son los sistemas mas adelantados para anticipar y controlar eléctricamente todos los eventos que crean presiones altas y presiones bajas. Posee una caja de control, la cual por medio de alarmas, mediante señales de luz de diferentes colores se realiza el control de estas presiones y así asegurar el equipo.</p>	<p>Se utilizan en las estaciones de bombeo, para proteger el equipo de las fuerzas destructivas (golpe de ariete), anticipa a las ondas del golpe de ariete y mediante el control se realiza, el equipo queda seguro en forma más eficaz.</p>

#### IV.2.A. VALVULAS DE AIRE

Las válvulas de aire, en las líneas de conducción de fluidos que se utilizan para prevenir y/o anticipar a los fenómenos destructivos, como son el golpe de ariete, son:

- i) Válvulas de expulsión de aire
- ii) Válvulas combincadas (Aire-Vacio/ Expulsión)

La función principal de estos dispositivos, es expulsar el aire acumulado en los puntos altos de un sistema que se encuentra en operación, si no se hace prevención para remover este aire, una pequeña cavidad de aire se incrementara de tamaño reduciendo el área efectiva disponible para el flujo del líquido, creando efectos de estrangulación, como el cierre parcial de una válvula. Como resultado de este efecto, el problema más serio que origina, son los cambios de la velocidad del líquido, creando fenómenos destructivos como el golpe de ariete.

La situación ideal de este tratamiento, es anticipar estos problemas y prevenir todo tipo de acumulación de aire mediante los diferentes tipos de válvulas de aire.

#### i) VALVULAS DE EXPULSION DE AIRE.

Una válvula de expulsión de aire, puede ser descrita como un dispositivo, el cual automáticamente darra salida de aire acumulado en pequeñas cavidades de los puntos altos de un sistema en operación y bajo presión.

Se instalan en los puntos altos o en cilicndro de operación de la válvula reguladora automática, en los domos de las válvulas de compuerta, etc. Junto al lado de aguas abajo de cualquier mecanismo que aumente la temperatura del fluido.

#### OPERACION

- 1.- El orificio de la válvula de expulsión de aire se mantiene cerrado normalmente por la fuerza boyante del flotador.

- 2.- Cuando el aire se acumula en el cuerpo de la válvula de expulsión de aire, el flotador descenderá permitiendo la expulsión del aire a la atmósfera.

Quando el aire es expulsado al subor el flotador taponeará otra vez - el orificio, impidiendo el escape del líquido. Como este aire es expulsado el nivel del líquido dentro de la válvula aumentará, levantando el flotador y cerrando el orificio de la válvula. Este ciclo automáticamente se repite tan frecuente como sea necesario en el ciclo de bombeo. Ver anexo 2.1.(a).

#### DIMENSIONAMIENTO

Es muy difícil determinar la cantidad de aire que pueda ser expulsado en un sistema dado. Por tanto, en la mayoría de los casos, el tamaño de la válvula de expulsión de aire seleccionado, es una decisión, basadas en la experiencia, esto es por medio del diámetro de la tubería, capacidad de bombeo.

La selección de la válvula puede ser hecha para cada tamaño de tubería o por capacidad de bombeo. En estos casos, cuando una capacidad de bombeo específica es requerida, la selección puede hacerse con los parámetros de diseño que proporcione el proveedor, el cual también proporciona cartas para la selección de la válvula.

#### ii) VALVULAS DE AIRE COMBINADAS

Las válvulas combinadas (aire-vacio/expulsión) son completamente automáticas y son utilizadas para cumplir con las siguientes funciones:

- a) para ventear aire que se acumule durante la operación de la tubería.
- b) para expulsar grandes cantidades de aire dentro de la línea, mientras es cargada
- c) proteger el sistema de una presión negativa.

d) prevenir el golpe de ariete.

#### OPERACION

Como el fluido entra en el interior de la válvula, el nivel del líquido incrementa dentro de la válvula, el flotador asciende hasta el botón del orificio, localizado en el brazo del flotador, empuja contra el tapón del vástago y levanta para hacer contacto con el asiento. La presión dentro del cuerpo de la válvula actúa contra la parte inferior del tapón y forzará a este, apretarse contra el asiento; así cierra a la descarga de la válvula.

Como el aire entra hasta el interior de la válvula, el flotador — comienza a caer, como el brazo del flotador se balancea hacia abajo, el botón del orificio rompe contacto con la porción del vástago del tapón pequeñas cantidades de aire se expulsaran del orificio en el vástago; mientras la línea permanece bajo una presión positiva, la válvula expulsará — aire que este presente cuando la presión de la línea sea alcanzada o sea menor el tapón cae a una posición más abajo, permitiendo grandes cantidades de aire entrar al sistema.

#### IV.2.B VALVULAS CHECK

Hay un número de problemas asociados con el uso de las válvulas check en las líneas de descarga de bombas. Sin embargo, cuando existe una falla de energía, tendremos flujo inverso a través de la bomba, entonces la válvula check cerrará rápidamente, resultando de esta acción fuerzas dinámicas en el disco de la válvula, de acuerdo con esto, existen una gran variedad de válvulas check con dispositivos especiales para cerrar rápidamente la válvula y prevenir las fuerzas dinámicas destructivas al sistema.

Con estos dispositivos especiales y característicos de cada válvula las fuerzas hidráulicas del disco serán suficiente para vencer el golpe de ariete y el choque, normalmente asociado con el cierre de la válvula.

Las válvulas checks en las líneas de descarga de bombas que se utilizan para prevenir el golpe de ariete y otras fuerzas destructivas son:

- i) Válvulas check silenciadora
- ii) Válvulas check con disco inclinado
- iii) Válvulas check amortiguada

i) VALVULA CHECK SILENCIADORA

La válvula check de operación tipo silenciador, que comienza a cerrar al disminuir la velocidad de flujo y cierra completamente a velocidad cero previniendo el flujo inverso y el golpe de ariete resultante.

El diseño de la válvula incorpora una guía central, una guía opuesta un resorte que tiene un recorrido lineal, lo que genera una área de flujo igual a la de la tubería. El resorte es diseñado para resistir 100,000 ciclos sin falla y ejerce una fuerza, la cual permite a la válvula abrir a la alimentación a una presión diferencial de 0.5 psi y abrir completamente a la velocidad de flujo de 4pies/seg.

#### OPERACION

Las válvulas son diseñadas para prevenir automáticamente el flujo inverso en el arranque de bombas, las fuerzas del flujo del líquido permite abrir al disco, por tanto el fluido pasa en una área igual al tamaño de la tubería. En el paro de bomba, los resortes especiales cierran el disco antes que ocurra el flujo inverso. Este tipo de cierre, permite la operación silenciadora de la válvula. Ver anexo 2.2(b)

El sistema de aplicación se muestra en la figura (IV.2).

ii) VALVULAS CHECK CON DISCO INCLINADO

A. CON TOP MOUNTED OIL DASHPOT (TMOD)

El disco inclinado de la válvula check, consiste en una carcasa de --

dos secciones sujetadas con tornillos al centro con una brida diagonal de 15°. Formando una cubierta simple de la válvula. La sección de entrada, contiene un anillo de asiento, situado y sujetado por la brida diagonal - de 15°. La sección de salida contiene dos pivotes localizados excentricamente en la línea, lo cual permite girar el anillo del disco, sin contacto con la superficie de la base del asiento, cuando abre la válvula. El cierre completo de la válvula, se logra cuando se hace contacto final de la base.

Un espacio pequeño puede existir entre el pivote pasador y el casquillo, cuando el anillo del disco inclinado hace completamente contacto con el asiento, para asegurar un sello hermetico. La porción central del cuerpo de la válvula puede ser gradualmente ampliada para compensar el área -- ocupada por el cuerpo del disco. El área de flujo a través de la válvula - iguala o excede a el área de flujo de la tubería. El área de flujo a través del asiento será mínimo 40% mayor que el flujo por el área de tamaño nominal de la válvula, para minimizar la pérdida de cabezal a través de la -- válvula.

La unidad de (TMOD), se instala en la parte superior de la válvula - check de disco inclinado, por medio del registro. Esta unidad provee una - simple etapa de control de ajuste a la velocidad de la válvula, el disco se desplaza a la posición abierta, para reducir la presión de "surge" en el arranque de bombas y puede proveer dos etapas de control de ajuste de la válvula, el disco se desplaza a la posición cerrada para reducir el golpe de ariete.

La unidad consiste de un cilindro hidráulico con un colchón interno con el siguiente arreglo: Dos válvulas de flujo ajustable, recipiente de -- aceite presurizado, recipiente no presurizado y tuberías, un espaciador - el cual conecta el cilindro hidráulico con la carcasa de la válvula check de disco inclinado. El espaciador esta provisto de un hueco de aire para prevenir que el líquido presurizado hidráulicamente entre a la carcasa de la válvula y contamine el líquido del sistema.

Todos los controles son independientes de cada control y pueden ser fácilmente ajustados.

Los dispositivos (TMOD) se muestran en el anexo 2.2,c-i.

B.- CON BTOM MOUNTED OIL DASHPOT (BMOD).

Este dispositivo se instala en la parte inferior de la válvula check de disco inclinado, por medio de un registro. Esta unidad provee de un control del disco que se desplace un 10% a la posición de cierre, reduce el golpe de ariete, normalmente asociado con las condiciones de flujo inverso que existe en la parada de una bomba.

El (BMOD) no esta directamente conectado al disco, por tanto permite al disco abrir libremente la válvula, sin restricción y cerrar libremente un 90% de desplazamiento.

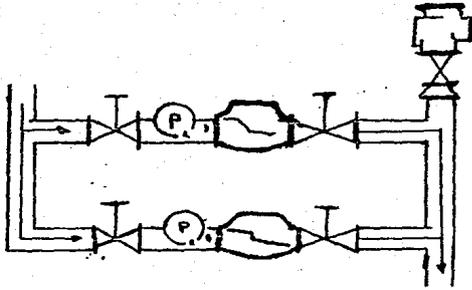
El (BMOD) es así mismo un sistema, el cual no permite que el líquido resurizado en tre a la carcasa de la válvula y contamine el líquido del -- sistema, esto es posible mediante el hueco de aire entre él líquido presurizado y el cilindro. Ver anexo 2.2.(c-ii).

iii) VALVULAS CHEC AMORTIGUADAS

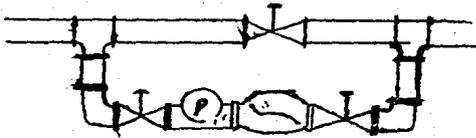
Las válvulas check amortiguadas, son usadas en las estaciones de -- bombeo de agua, aguas residuales y otros líquidos. Eestan disponibles con una cámara de aire (cierre rápido) y una cámara de aceite (cierre lento) para prevenir los efectos del golpe de ariete.

La válvula check del anexo 2.2.a, es una válvula de contrapeso externo y cierre con asiento de hule on metal a metal, que cuenta con una cámara amortiguadora; cuya función es permitir el flujo solamente en una dirección, cerrar herméticamente cuando la presión en el lado de la descarga excede a la entrada y efectuar dicho cierre silenciosamente sin ningun golpeteo.

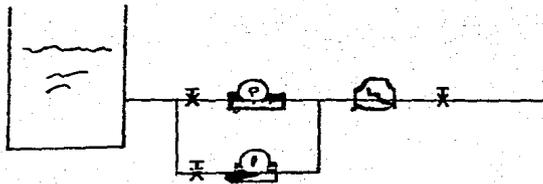
Esta válvula estará constituida por un cuerpo de fierro fundido o de semiacero con asiento de bronce o acero inoxidable para servicio y un - eje de metal corrosivo para acoplar la palanca, y los contrapesos y una - cámara amortiguadora no corrosiva. La válvula prevendra el retorno del líquido de la misma, cuando la presión de entrada disminuye a un valor inferior a la descarga. El asiento dehera ser reemplazable exteriormente.



(a) ESTACION PRINCIPAL DE BOMBEO



(b) ESTACION BOOSTER



(c) ESTACION DE BOMBEO

FIGURA. IV. 2 (a,b y c). APLICACION DE LAS VALVULAS

La cámara amortiguadora estará acoplada en un lado del cuerpo de la válvula y construida con un pistón, operando en una cámara que efectivamente permita a la válvula ser operada sin ninguna acción de golpe. La cámara amortiguadora funciona automáticamente, y no requiere de ninguna fuente de suministro de aire, y la velocidad de cierre de la última parte de la carrera del pistón será ajustable a las necesidades del servicio.

El disco de la válvula será de hierro fundido o acero fundido, y estará suspendido por medio de un eje no corrosivo; el cual atraviesa el cuerpo de la válvula, y estará sellado con una prensa estopa y conectado también a la cámara amortiguadora, en el exterior de la válvula.

#### IV.2.C VALVULAS DE ALIVIO

Las válvulas de alivio son operadas por medio de un piloto, para abrir rápidamente cuando la presión de la línea excede a la de la montura. Este tipo de válvula puede ser usado en transmisión principal en estaciones de bombeo o en sistemas de distribución para proteger las líneas contra presiones excesivas. Estas altas presiones pueden ser causadas por el cierre rápido de una válvula o hidratante, en el arranque o paro de una bomba equipada con una válvula check de cierre lento, reduciendo la demanda del fluido en el ciclo de bombeo, u otros factores.

Se instala una conexión "tee", para descargar un volumen de líquido y así mantener la presión de operación. Esta descarga puede ser a la atmósfera o a una zona de baja presión o en algunos casos, en la estación de bombeo a la succión. Si la descarga es a la atmósfera, una provisión adecuada debe ser hecha mientras la válvula es capaz de abrir muy rápido será usado solo cuando la presión se incrementa.

#### OPERACION

La operación de la válvula de alivio es simple. El pistón de la válvula principal es accionado por la presión de la línea a través de un circuito de control del piloto. Este pistón es cerrado hidráulicamente cuando

el asiento de la válvula piloto cierra. Cuando la presión alta, ocurre a la entrada de la válvula, el líquido es atrapado en la cámara que opera sobre el pistón de la válvula principal. La válvula de aguja controla la velocidad a la cual, la presión alta del líquido es introducido a la cámara.

Cuando la presión que entra a la válvula piloto excede a la del montaje del resorte, el piloto abrirá. Esto permitirá al líquido pasar desde la cámara que es introducido a través de la válvula de aguja, la presión caerá en la cámara, y la presión de la línea permitira abrir la válvula. Por tanto, un balance entre el flujo que entra y sale de la cámara ocurre un equilibrio, el cual sera establecido, el piloto ocupará la posición hasta el establecimiento del pistón para abrir o cerrar la válvula. Ver anexo 2.3.

Las válvulas de alivio de la presión, que se utilizan para prevenir el golpe de ariete y otras fuerzas destructivas son:

- i) Válvulas de alivio contra el golpe de ariete
- ii) Válvulas de alivio contra el golpe de ariete con solenoide de control.

#### i) VALVULAS DE ALIVIO CONTRA EL GOLPE DE ARIETE.

Estas válvulas de control, son usadas en sistemas de bombeo, para proteger contra las ondas de choque causadas por; cierre de válvulas interrupción de energía, en algunos casos por paro normal. Estas válvula tienen la capacidad de anticipar ala onda de choque y abrir la válvula antes que la alta presión ocurra, asi como, la habilidad para proteger contra la sobrepresiones normales, este tipo de válvula es esencial para la protección de los sistemas de bombeo.

#### OPERACION

La válvula anticipará a las altas presiones de "surge" por medio de un sensor hidráulico, que es actuado por aciad de presión de la línea.

Cuando la presión cae, el pistón abre y el líquido se transfiere -- desde la cámara de la válvula piloto principal a el acumulador, en este caso la válvula abre en anticipación de la onda de presión alta. La válvula permanecera abierta hasta que el acumulador se vacía, en este instante -- la válvula cerrará lentamente. El acumulador es dimensionado para asegurar que la válvula permanezca abierta hasta que la onda de presión sea aliviada a través de la válvula abierta. Ver anexo 2.3.

ii) VALVULAS DE ALIVIO CONTRA EL GOLPE DE ARIETE CON SOLENIIDE DE CONTROL

La válvula anticipa a la onda de alta presión de "surge", mediante la utilización de una señal eléctrica, esto es a través del uso de solenoide piloto. Cuando el solenoide piloto es energizado bajo condiciones normales el acumulador es descargado por drene en circuito de control y la válvula tiene función de una válvula de alivio estandar. En la pérdida de la señal el solenoide es des-energizado y transfiere el líquido desde la cámara de la válvula, también funciona como ajuste de tiempo ("dwell") en la posición completamente abierta. Una vez que el acumulador se llena, el circuito de control es presurizado y la válvula de alivio empieza el ciclo de cierre. El ajuste de la velocidad de cierre es controlada por la válvula de aguja, la cual es monitoreado automáticamente. Ver anexo 2.3.

En resumen, la válvula abre cuando la presión del sistema exceda la intensidad para la cual el piloto es colocado. Abrirá rápidamente, y -- cerrará lentamente a una determinada razón de velocidad. La provisión será hecha en la válvula para regula la velocidad de cierre.

El solenoide piloto suministra el cierre en la válvula principal, -- cuando es energizada y coloca a la válvula en operación automática, cuando se des-energiza.

VALVULA PILOTO

La válvula piloto controla la presión de entrada de la válvula principal -- por trampa de presión sobre el pistón principal o por expulsión de esta -- presión a la salida de la válvula. La presión corriente arriba es comunicada en la parte inferior del diafragma. Cuando esta presión excede de

carga o del resorte, el vástago del piloto levanta el asiento para abrir. - En este instante, la válvula principal abre. El piloto puede ser ajustado sobre un amplio rango, por el cambio de posición del tornillo de ajuste. - Ver anexo 2.4. La válvula de aguja se muestra en el anexo 2.3.

#### IV. 3. OTROS SISTEMAS

##### IV.3.A " SURGE " ARRESTOR

El sistema "surge" arrestor tiene las siguientes características principales:

- a) Provee rápida abertura en presiones anormales y sobnormales de la línea y también en interrupción de la energía.
- b) Provee de ajuste del tiempo "delay" antes de cerrar y disipar - el "surge".
- c) La velocidad de cierre es controlada por regulación de la válvula de aguja.
- d) Contiene un colchón de aire y de agua para prevenir el golpe de ariete.
- e) El movimiento del pistón en el cuerpo de la válvula es un diseño hidráulico simple.

La válvula del sistema "surge" arrestor tiene las siguientes funciones:

- a) Abrir rápidamente a presiones anormales ( sobrepresiones) en la línea, para disipar el "surge" a la atmósfera y proteger el sistema.
- b) Anticipa al "surge" causado por paro de la bomba, por la interrupción de la energía eléctrica, por aumento de la presión sobre la presión normal y abrir inmediatamente a través de un piloto (solenoide), y proteger el sistema.

- c) Anticipa al "surge" para prevenir el aumento de la presión por encima de la presión normal y abrir inmediatamente a través de un piloto subnormal (presión reducida) y proteger el sistema.

La válvula del sistema "surge" arrestor abre completamente y permanece en esta posición por un ajuste del periodo del tiempo (delay) y entonces cierra a una predeterminada velocidad de ajuste. Toda regulación es ajustable y todos los pilotos proveen un amplio rango a el juste de la presión.

El control de toda variación de la presión se realiza mediante las siguientes formas:

A.- CONTROL ANORMAL

Este es simple pero totalmente efectivo tipo de protección de la presión y requiere un mantenimiento mínimo. Es frecuentemente usado en múltiples instalaciones de válvulas de alivio, para proveer un mayor control en la instalación.

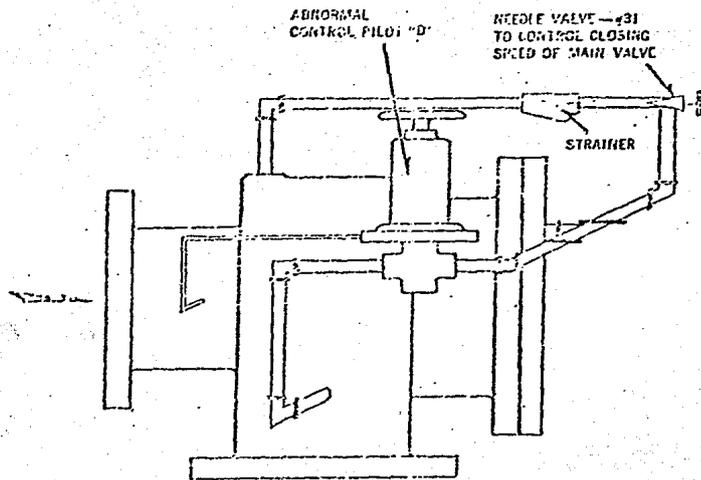
- 1.- Abre rápidamente a una predeterminada sobrepresión y disipar el "surge".
- 2.- Cerrará lentamente a predeterminado ajuste de la velocidad, por medio de la válvula de aguja #31, despues la presión en la línea ha retornado. Ver figura IV.4.

B.- CONTROL SUBNORMAL

Esta válvula es instalada donde se produce caída de presión.

- 1.- Abrirá rápidamente a una determinada presión reducida y disipar el "surge". La velocidad a la cual la válvula se mantiene en la posición totalmente abierta o en la posición cerrada, es controlada por la válvula de aguja #31, mostrada en la figura IV.5.

USO: Es generalmente instalada en una "TEE" a la descarga de la válvula - check de la bomba. Descargando a la atmósfera o desague.



FIGURA, IV. 4. CONTROL ANORMAL

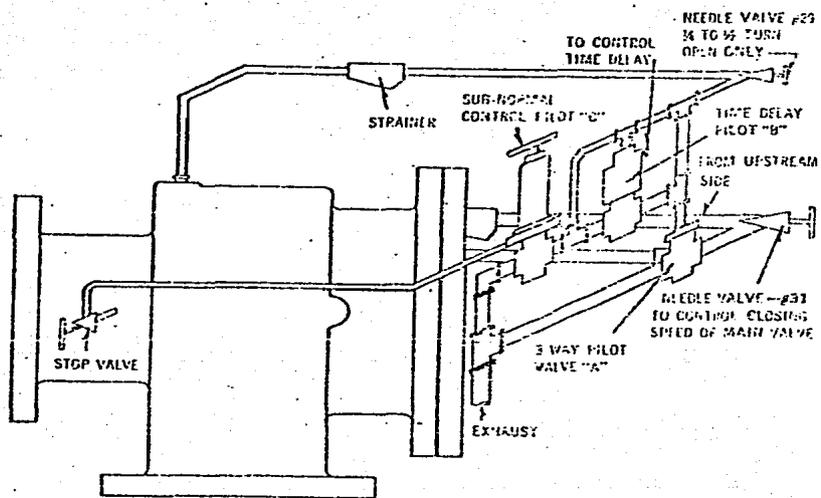


FIGURA. IV. 5. CONTROL SUBNORMAL

C.- CONTROL ANORMAL-SUBNORMAL

Esta válvula es usada como un anticipador del "surge" donde hay energía para operar el solenoide. Abre a una falla de energía o falla de la bomba, cuando la presión de descarga cae, montaje subnormal.

- 1.- Abre rápidamente a una determinada sobrepresión y así disipar el "surge" y cerrar lentamente después de la restauración de la presión
- 2.- Abre rápidamente a una determinada presión reducida, permanece totalmente abierta en un periodo de tiempo para disipar el "surge" y entonces normal.
- 3.- La válvula permanecera en la posición totalmente abierta en un periodo de tiempo "delay" determinado por el montaje del piloto, tiempo en el cual el "surge" es disipado a la atmósfera a través de la válvula principal.
- 4.- Las sobrepresiones y presiones reducidas son facilmente ajustables.
- 5.- La velocidad de cierre de la válvula principal es controlada por la válvula de aguja #31, indicada en la figura IV.6.

D.- CONTROL ANORMAL-SUBNORMAL CON SOLENOIDE

Esta es la más positiva de los tres modos de protección disponible instalada en el cabezal de descarga de la bomba, abrirá a la falla de energía, a falla de la bomba o cualquier situación de presión anormal, sin tomar en cuenta la posición del piloto de control.

Posee todas las características expuestas anteriormente. Ver figura IV.6.

SECUENCIA DE OPERACION

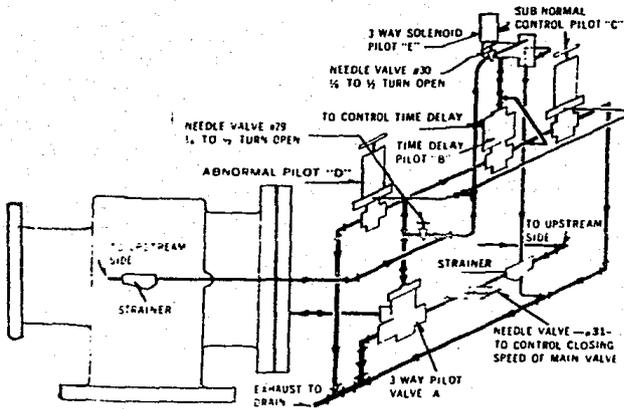


FIGURA IV.6. CONTROL ANORMAL - SUBNORMAL

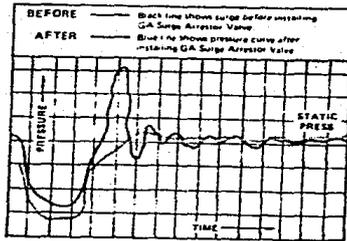


FIGURA IV.7. APLICACION

A.- OPERACION DE CIERRE NORMAL DE LA VALVULA PRINCIPAL

Cuando la bomba es operada, el solenoide de la válvula piloto "E" - (3-WAY), admite caudal de líquido desde la válvula de aguja #30 a la parte superior del pistón del piloto "E" (tiempo delay). A presión normal, el piloto "C" de control "subnormal" y el piloto "D" de control "anormal" - son cerrados y el caudal de líquido es permitido para acumularse en la parte superior del pistón de la válvula piloto "A" (3-WAY), cerrando completamente y abriendo corriente arriba de la cara de la válvula permanece en esta posición hasta que una condición de emergencia ocurra, como sobrepresiones, presión reducida o pérdida de la energía eléctrica.

B. LA VALVULA PRINCIPAL ABRE DEBIDO A LA PRESION ANORMAL

Si cualquier condición de presión anormal prevalece en exceso de la dinámica normal del cabezal de bombeo, el piloto "D" de control anormal - abrirá a la descarga del líquido desde la parte superior del pistón de la válvula piloto "A" (3-WAY), para inmediatamente abrir rápidamente la válvula principal durante el periodo de sobrepresión en el sistema. Tan pronto que la presión del sistema ha retornado a la presión normal, la válvula empieza el ciclo de cierre, que es controlado por la válvula de aguja #31.

C.- LA VALVULA PRINCIPAL ABRE DEBIDO A LA PRESION SUBNORMAL

Si la presión del diafragma en el piloto de control "C" baja sobre la montura del resorte #12, la válvula piloto "A" (3-Way) a través del piloto "B" de tiempo (delay) para drenar a la atmósfera. La válvula piloto "A" (3-WAY) cierre corriente arriba y el pistón abre completamente la válvula principal. La válvula piloto "B" se desplaza lentamente a la posición cerrada de acuerdo con el montaje del control en el punto de aguja. Cuando el piloto "B" ha sido cerrado completamente y la presión de la línea ha retornado a la presión normal, el piloto "C" de control subnormal cierra y entonces el caudal del líquido es admitido a la parte superior del pistón de la válvula piloto "A" (3-WAY) a través de la válvula de aguja #29,

cerrando y abriendo a la corriente abajo, así cerrar la válvula principal. La velocidad de cierre de la válvula principal es controlada por la válvula de aguja #31.

D.- LA VALVULA PRINCIPAL ABRE DEBIDO A LA FALLA DE ENERGIA ELECTRICA

Cuando el circuito del motor de la bomba es interrumpida por un corte de emergencia de la energía, el solenoide es operado por la válvula piloto "E" des-energizado, cierra al caudal del líquido, y abre para drenar libremente. El líquido es drenado desde la parte superior del pistón de la válvula piloto "A" a través del piloto "B"; cierra al flujo corriente arriba y abre la válvula principal mediante el pistón. La válvula piloto "B" (tiempo delay) se desplaza lentamente a la posición cerrada, accionando con el montaje del control en el punto de la aguja. Cuando el piloto "A" ha cerrado completamente, el flujo es admitido en la parte superior del pistón de la válvula piloto "A" a través de la válvula de aguja #29, cerrando la salida y abriendo corriente arriba, para cerrar la parte superior del pistón de la válvula, así la válvula principal. La velocidad de cierre es controlada por la válvula de aguja #31.

SELECCION DE LA VALVULA.

Para seleccionar el tamaño adecuado de la válvula "SURGE" ARRESTOR para una instalación en particular, en muchos casos, se recomienda el uso de las cartas de capacidad de las válvulas de alivio.

Sin embargo, debido a la complejidad de este equipo y debido a la variedad de las características de instalación, se sugiere contactar información directa de los proveedores.

#### IV.3.B. "SURGE" SENTINEL

¿ Qué es ?

Es el unico anticipador de "surge", es un adelanto serio en implementación de la electronica en el estado micro-sólido, combinado con una válvula hidráulica y así proveer un amplio rango en la pretección contra el "surge" y el golpe de ariete.

¿ Qué hace ?

El "SURGE" SENTINEL anticipador del "surge", funciona para proteger el sistema de bombeo, de las sobrepresiones destructivas y así abrir la válvula en respuesta a causa se la presión "surge".

¿Dónde se instala ?

El anticipador de "surge" es instalado en el cabezal principal corriente de la(s) válvula(s) check y en la descarga de drenaje o a la atmósfera.

#### FUNCION

La función de las válvulas anticipadora de "surge" controlada electricamente por la caja de control, es abrir en respuesta a los eventos, -- los cuales crean presiones de "surge" como: falla de la Bomba, la cual no es una falla de energía, falla de energía. La válvula de "surge" abrirá -- completamente antes que la onda de "surge" retrrne y llegue a la válvula. -- La válvula después de un determinado tiempo "delay" cerrará lentamente. Las válvulas aliviadoras del "surge" responderan a las sobrepresiones independientes de los controles electronicos,

#### DESCRIPCION

La caja de control es capaz de operar en uno de los modos diferentes dependiendo de los requerimientos del sistema. Los dos modos en terminos de "A" y "R" sera seleccionados por la posición del switch dentro de la caja

En un modo, la caja de control será provisto con una característica

de tiempo "delay" ajustable, el cual puede impedir cualquier acción de -- "surge", por un periodo de tiempo pres-set en el arranque de bombas, las cuales emplean válvulas check convencionales.

El ajuste del periodo será de cero a 300 segundo. Durante este periodo, una luz de color ambar es indicada en la puerta de la caja de control.

En el modo "A", las siguientes secuencias se desarrollan:

- 1.- La caja de control permitirá que la válvula "surge" abra en cualquier instante al (downsurge), una vez que la bomba ha sido arrancada y por aproximadamente 30 segundos después del paro de la bomba. La indicación de una luz verde indicará que la caja de control es protegida - y responderá a las ondas del "surge". Después del periodo de 30 segs., una luz de color ambar comienza a indicar a la caja de control la - posición de arranque de la bomba.
- 2.- La caja de control será provista de un contador de la onda de surge en el cual, la válvula de "surge" abre completamente. En cualquier - momento, la caja de control mandará abrir la válvula, en este instan - te, una luz roja será en la puerta de la caja de control. Después de un periodo de tiempo de ajuste de cero a 30 segundos, el contador - de la onda de "surge" se cerrará. La caja de control en este instan - te será activada. Cuando la presión normal del sistema y la energía (A-C) sean restaurados, la indicación de luz ambar será dada y la caja de control será preparada para operar.

En el modo "B" seleccionado por la posición del switc, la caja de -- control y la operación de la válvula de "surge" será similar al modod "A" con la siguiente adición, la caja de control mandará abrir la válvula surge en cualquier momento que ocurra la falla de energía, mientras la bomba es arrancada y después que la bomba se detiene. Ver figura IV.8.



**C A P I T U L O : V. A P L I C A C I O N E S**

## V.- APLICACIONES

Uno de los problemas que se presentan en las instalaciones de bombeo es el constante cambio de las situaciones de transporte de los líquidos; - es decir, cambios en las condiciones de operación, que como se menciono anteriormente, esos cambios ocasionan situaciones de transiente, de no analizarse en una etapa de diseño del sistema, se puede llegar a serios problemas.

En esta sección se analizará el comportamiento de un oleoducto en -- los sistemas de bombeo de crudo, el cual se realiza a grandes distancias. Estas estaciones estan instaladas a intervalos adecuados.

Los sistemas de bombeo de crudo por ser de gran importancia en nuestro país y estar sujetos a los constantes cambios de las condiciones de -- operación, sera analizada tomando en cuenta las siguientes características

### a) ARREGLO DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO

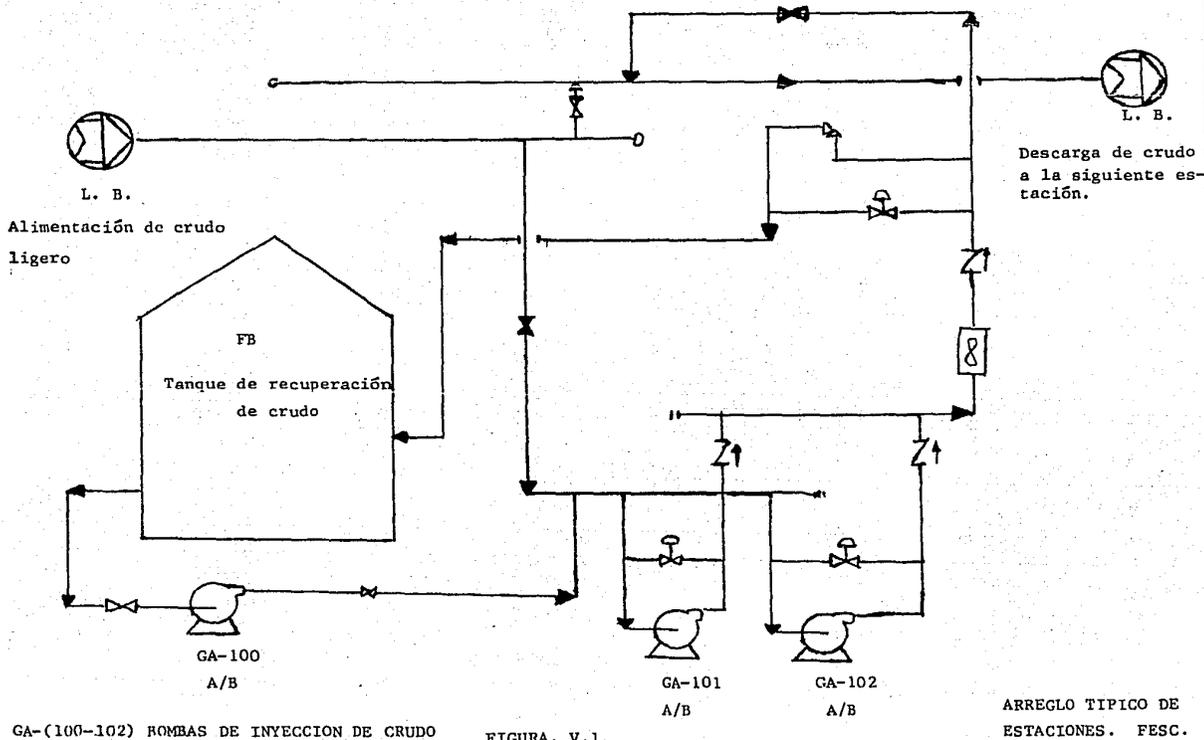
Las estaciones de bombeo estan instaladas a intervalos adecuados y - estrategicos para la distribución de las refineries. El sistema típico de bombeo, es construida en el extremo de la línea o en una unión importante de un sistema que maneja diversos crudos. Tiene zonas de almacenamiento - para recibir, almacenar y así mismo distribuir. La figura ( V.1 ) muestra una estación principal de bombeo de crudo.

### b) PARAMETROS DE DISEÑO DE UN OLEODUCTO

Los parámetros de diseño de un oleoducto son: espesor de diseño de la tubería, la presión máxima de trabajo, así como las propiedades de la - tubería.

## A. SISTEMA DE APLICACION

El estudio se realizará en una estación de bombeo localizada en ---- Tuzandepetl, Veracruz. Tiene un alcance de 16.5 Km de longitud donde se - encuentra la siguiente estación de bombeo; es decir, distancia entre la -- Estación No. 1 y la Estación No. 2 de bombeo. Existe un terreno plano entre ambas estaciones.



GA-(100-102) BOMBAS DE INYECCION DE CRUDO

FIGURA. V.1.

ARREGLO TÍPICO DE ESTACIONES. FESC.

El análisis de esta estación se realizará en dos etapas:

a) Se mostrará como se comporta el fenómeno, al viajar el frente de onda de presión a través del oleoducto aplicado, a la condición anormal -- del cierre súbito de una válvula que se encuentra localizada al final de la tubería. Esto con el fin de observar los resultados obtenidos mediante el programa de cálculo aplicado a las calculadoras programables. Ver anexo 1.

b) Se darán recomendaciones del uso de los dispositivos de seguridad que puedan aplicarse a esta estación de bombeo. Esto es, considerando los resultados obtenidos en la etapa anterior, teniendo en cuenta que los dispositivos se utilizan siempre y cuando las presiones máximas que se obtengan en este análisis sean mayores que la presión máxima disponible en operación transiente (MATOP).

Con base a lo anterior, se fijaron las condiciones que a continuación se menciona, para elaborar el estudio en el oleoducto de 36" que va de la Estación No. 1 a la Estación No. 2.

## B. BASES DE DISEÑO

### Perfil Topográfico

Para este estudio, se considera una elevación de terreno aproximadamente lineal; terreno plano.

### Propiedades de la Tubería

- a) Tubería de acero de alta resistencia (API STD 5L X 65).
- b) Espesor promedio, ~ 0.50 in.
- c) Diámetro, ~ 36".

#### Propiedades Físicas del Crudo

- a) Peso específico.- 0.918
- b) Viscosidad.- 11. cp.
- c) Módulo de Elasticidad Volumétrica.- 218,000 lb/ in<sup>2</sup>.

#### Condiciones de Operación

Presión de Descarga en Estación No. 1.- 25 Kg/ cm<sup>2</sup> máxima.

Presión de Succión en Estación No. 2.- 15 Kg/ cm<sup>2</sup> mínima.

Flujo Volumétrico manejado.- 600,000 BPD.

Temperatura.- se considera un rango de 30°C a 36°C.

Longitud.- 16.5 Km

#### Parametros adicionales

La tubería en cuestión se dividió en cinco tramos iguales. Se considera un tiempo de simulación mayor al periodo o ciclo crítico donde se desarrolla las máximas y mínimas presiones, que por lo general se presentan en el tiempo ( 2L/a ). El cierre de la válvula se consideró lineal, cierre parcial y total desde 3 a 12 segundos. Cierre súbito.

#### Método de solución

Para resolver el problema, se realizaron modificaciones al programa - " PPV-WH ", del anexo 1.

Para poder correr el programa, se dividió la longitud de la tubería - en cinco tramos iguales ( 3,300 metros cada tramo ). La válvula se programa para reducir el flujo a cero en 12 segundos.

En el tiempo (  $t = 0$  ), donde la presión de descarga de la Estación - No. 1, es de ( 23.2 Kg/cm<sup>2</sup> ) y la presión de succión en la Estación No. 2, es de ( 15.0 Kg/cm<sup>2</sup> ), obteniendose un perfil de velocidad de ( 5.92 fps. ), y el factor de fricción ( 0.028782 ).

La velocidad de propagación de la onda de presión que se obtuvo del - programa, dando como resultado un valor de ( 3,589.67 fps o 1,094.1 m/s ).

Así es como que desde el momento de producirse la inestabilidad, está se transmitirá desde la Estación No. 2 ( donde esta localizada la válvula ).

hasta la Estación No. 1, en un tiempo de (  $L/a$  ), que en este caso fue de 15 segundos.

En la tabla No. 1, se muestran los valores obtenidos del programa, — dicha tabla, constituye el conjunto de valores tanto de los cabezales ( en metros ) como los flujos (  $m^3/seg$  ) que se presentan a lo largo de la tubería a diferentes incrementos de tiempo, este incremento de tiempo resultó de ( 3 segs. ), el programa se detuvo hasta alcanzar un valor de un tiempo equivalente a (  $10L/a$  ).

De la tabla No. 1, se obtuvieron los datos más importantes; así mismo se construyeron los gráficos tanto de presión vs longitud de la tubería, — como el flujo vs la longitud de la tubería, los cuales se les conoce como — Perfil de Presión y Perfil de Flujos respectivamente.

Estos gráficos se muestran en las figuras V.2 y V.3, de estos gráficos podemos resaltar las siguientes observaciones:

En la Estación No. 1, la máxima presión que se tiene es de (  $38.4 \text{ Kg/cm}^2$  ), que ocurren en el tiempo de 39 segundos a la longitud de la tubería de 16.5 Km.

En la Estación No. 2, la máxima presión que se obtiene es de (  $38.47 \text{ Kg/cm}^2$  ), que ocurre a los 27 segundos a la descarga de las bombas.

Por otra parte, el flujo máximo en retroceso, se observa que ocurre a una longitud de ( 9,900 metros ) entre la Estación No. 1 y la Estación No. 2, en el tiempo de 30 segundos cuyo valor es de (  $-0.385 \text{ m}^3/seg.$  ).

En este caso, las condiciones de mínimas presiones corresponden a las condiciones de operación en el tiempo (  $t = 0$  ).

Las condiciones de la Estación No. 1 y de la Estación No. 2 se muestran en las tablas No. 2 y No. 3 respectivamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, observamos que las máximas presiones que se presentan tanto en la Estación No. 1 como en la Estación No. 2, sobrepasan a la presión máxima de trabajo, así como a la presión máxima en operación transiente, que en este caso son (  $34.2 \text{ Kg/cm}^2$  y  $37.604 \text{ Kg/cm}^2$  respectivamente. Por tanto el sistema requiere de protección para asegurar que la tubería no sufra ruptura ni el equipo de bombeo sufra daño.

En este caso, se sugiere disminuir el flujo manejado, con el fin de observar que efectos se producen en las sobrepresiones generadas durante el transiente.

Se eligió disminuir el flujo en un 50% del total manejado; ya que en este porcentaje se tendrá como referencia si se está alejando del flujo -- adecuado para minimizar las sobrepresiones, que la presión máxima de trabajo sea mayor a estas sobrepresiones, o bien si se está próximo al flujo adecuado.

Para obtener el conjunto de valores de las presiones y de los flujos, se hicieron algunas modificaciones al programa " PPV-WH ", donde se obtuvieron los siguientes resultados.

La máxima presión registrada en la Estación No. 1, es de ( 31.6 --  $\text{Kg/cm}^2$  ), la cual se presenta en el tiempo de 39 segundos; en la Estación No. 2, la máxima presión que se registra es de ( 31.7  $\text{Kg/cm}^2$  ), que ocurre a la distancia de 16.5 Km., en un tiempo de 27 segundos.

El máximo flujo en retroceso que se obtuvo a los 30 segundos, en la distancia de 13,200 metros entre estaciones fue de ( - 0.185  $\text{m}^3/\text{seg}$  ). Los resultados que se obtuvieron, se muestran en las gráficas V.4 y V.5.

Las condiciones que se obtuvieron en las estaciones se muestran en -- las tablas No. 4 y No. 5.

### C. ANALISIS DE RESULTADOS

Iremos analizando etapa por etapa que está ocurriendo en la tubería -- desde el momento de producirse la inestabilidad, cuando la onda de presión viaja a intervalos discretos de tiempo.

En la tabla No. 1 (  $t = 6$  segs ) muestra el efecto cuando la válvula cierra un porcentaje de su abertura dejando pasar 56.2 % de su flujo total generando una presión de ( 19.6  $\text{Kg/cm}^2$  ), corriente arriba de la válvula. En este tiempo, la onda de presión ha viajado 3,300 metros.

A los 12 segundos, donde la válvula ya está completamente cerrada, la presión de la válvula aumenta a ( 34.5  $\text{Kg/cm}^2$  ). Este aumento se debe a --

"ANALISIS DEL TRANSIENTE"

SISTEMA "BOMBAS EN PARALELO CON CIERRE DE VALVULA"

TABLA No.1

ESTUDIO DE CONDICIONES

		CABEZAL DE PRESION (H= METROS)						FLUJO (Q= METROS CUBICOS/S66)						TAU
AX	T	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
0		252.3	234.4	216.5	198.7	180.8	163	1.104	1.104	1.104	1.104	1.104	1.104	1
3		252.3	234.4	216.5	198.7	180.8	198.1	1.104	1.104	1.104	1.104	1.104	0.911	0.75
6		252.3	234.4	216.5	198.7	213.1	251.5	1.104	1.104	1.104	1.104	0.927	0.62	0.50
9		252.3	234.4	216.5	226.4	263.2	314.2	1.104	1.104	1.104	0.995	0.652	0.30	0.25
12		252.3	234.4	243.8	275.3	323.6	375.9	1.104	1.104	0.96	0.884	0.348	0	0
15		252.3	259.4	287.6	333.3	384.5	385.3	0.853	0.97	0.714	0.391	0.047	0	0
18		252.3	281	343.1	393.2	395.8	393.1	0.45	0.637	0.43	0.094	0.047	0	0
21		257.1	295.9	363.6	402.3	401.7	402.2	0	0.6175	0.041	0.093	0.047	0	0
24		374.8	321.8	357.9	392.2	410.7	410.2	0	-0.3	-0.15	-0.01	0.05	0	0
27		385.1	379.9	330.9	386.5	400.7	419.1	0	-0.03	-0.34	-0.2	-0.05	0	0
30		391.4	388.3	388.3	340.3	375.2	391.2	0	-0.02	-0.07	-0.383	-0.241	0	0
33		401.6	396.5	396.6	396.6	331.9	352.1	0	-0.03	-0.06	-0.12	-0.53	0	0
36		408.	404.8	404.8	387.4	353.6	274.1	0	-0.017	-0.07	-0.012	0.12	0	0
39		418.	413.	395.6	361.9	329.6	374.9	0	-0.03	0.03	0.163	0.304	0	0
42		389.8	403.8	370.3	338.5	385.	383.8	0	0.08	0.21	0.35	0.045	0	0
45		353.6	361.5	347.6	391.1	391.8	391.1	0	0.16	0.386	0.09	0.044	0	0
48		279.7	306.5	382.2	399.8	399.2	399.8	0	0.15	0.04	0.09	0.044	0	0
51		374.1	327.4	358.6	390.3	407.7	407.2	0	-0.26	-0.14	-0.01	0.043	0	0
54		383.6	378.9	335.9	366.7	396.3	415.6	0	-0.03	-0.303	-0.182	-0.05	0	0
57		389.8	386.7	386.7	344.6	374.8	389.4	0	-0.02	-0.07	-0.343	-0.223	0	0
60		399.3	394.5	394.5	394.5	336.6	354.8	0	-0.03	-0.08	-0.112	-0.24	0	0
63		405.4	402.3	402.2	385.9	354.8	285.	0	-0.02	-0.07	-0.07	0.11	0	0

( CONTINUA )

TABLA No.1 (CONTINUACION)

		CABEZAL DE PRESION (H=METROS)						FLUJO (Q= METROS CUBICOS/SEG)						
AM	T	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	TAU
66		414.6	410.0	393.7	362.4	334.4	374.2	0	-0.03	0.031	0.15	0.27	0	0
69		386.3	401.4	370.4	342.7	361.9	362.6	0	0.073	0.192	0.31	0.042	0	0
72		336.2	362.1	351.0	369.5	390.2	369.5	0	0.144	0.35	0.064	0.042	0	0
75		289.6	312.7	381.1	397.7	397.1	397.8	0	0.13	0.04	0.083	0.042	0	0
78		373.5	391.9	359.34	364.7	405.2	404.6	0	-0.23	-0.13	-0.004	0.041	0	0
81		362.5	376.0	339.9	367.0	396.3	412.6	0	-0.03	-0.27	-0.17	-0.08	0	0
84		388.5	385.5	385.5	348.1	374.6	367.9	0	-0.02	-0.07	-0.311	-0.21	0	0
87		397.4	392.9	392.9	392.8	340.4	337.3	0	-0.03	-0.06	-0.11	-0.26	0	0
90		403.3	400.3	400.1	384.8	355.5	293.8	0	-0.02	-0.064	-0.012	0.10	0	0
93		411.7	407.5	392.2	363.0	336.2	373.6	0	-0.023	0.028	0.14	0.243	0	0
96		387.1	399.4	370.5	346.0	360.9	361.7	0	0.07	0.18	0.282	0.04	0	0
99		336.4	362.6	353.8	368.2	368.9	368.2	0	0.134	0.32	0.08	0.04	0	0
102		297.5	317.9	360.3	395.9	395.4	396.2	0	0.113	0.04	0.08	0.04	0	0
105		373.1	335.6	360.0	367.5	403.2	402.7	0	-0.21	-0.12	-0.01	0.04	0	0

## ANALISIS DE RESULTADOS

TABLA No. 2

ESTACION No. 1

TIEMPO (SEG.)	PRESION (KG/cm <sup>2</sup> )	FLUJO (M <sup>3</sup> /SEG.)	COMENTARIOS
0	23.2	1.104	REGIMEN PERMANENTE
15	23.2	0.853	INICIA BAJA DE FLUJO
21	23.2	0	INICIA FLUJO CERO E INCREMENTO DE PRESION.
39	38.4	0	MAXIMA PRESION

TABLA No. 3

ESTACION No. 2

TIEMPO (SEG.)	PRESION (KG/cm <sup>2</sup> )	FLUJO (M <sup>3</sup> /SEG.)	COMENTARIOS
0	15	1.104	REGIMEN PERMANENTE.
12	34.5	0	PARO COMPLETO DE LA ESTACION
27	38.47	0	MAXIMA PRESION.

MAXIMA PRESION DE TRABAJO... 34.2. KG./cm<sup>2</sup>

MATQP. \_ 37.604 "

FACTOR DE FRICCION... 0.026762

VELOCIDAD... 5.92 FPS

PERFIL DE PRESIONES

ESTACION No. 1-ESTACION No.2.

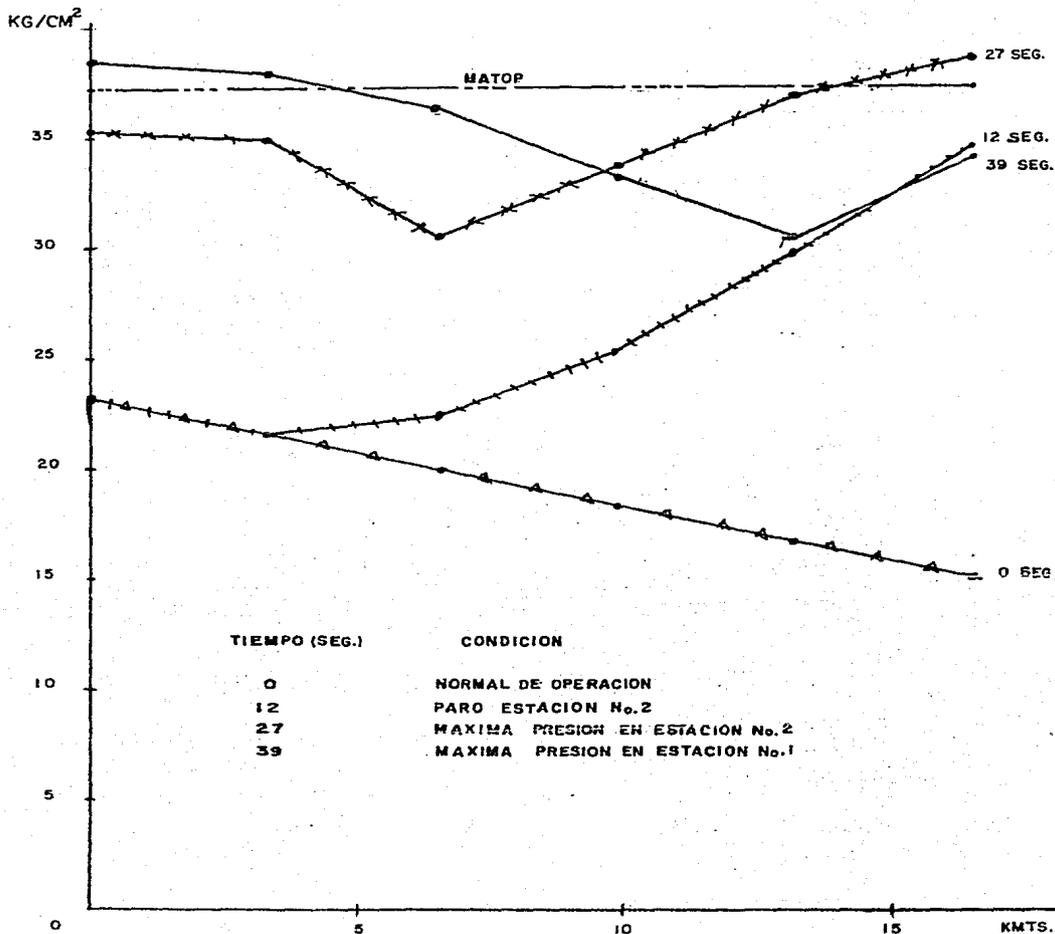
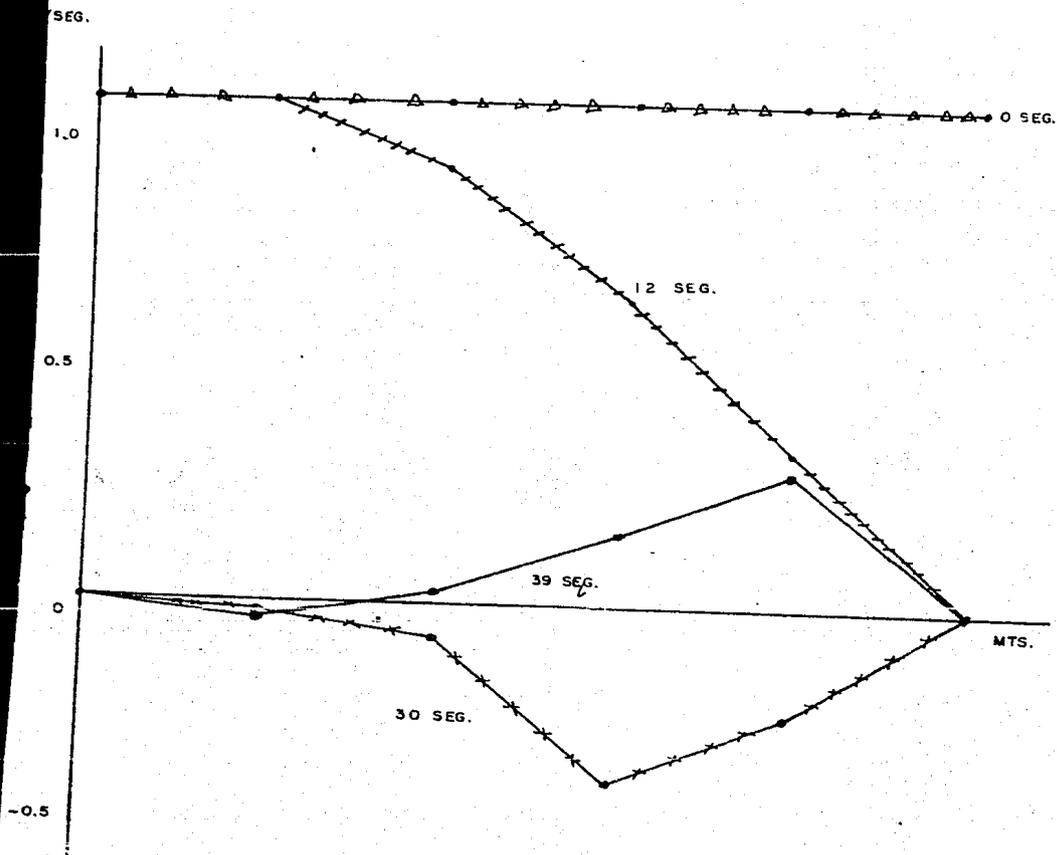


FIGURA V. 3

PERFIL DE FLUJOS  
ESTACION No.1-ESTACION No.2



TIEMPO (seg)

- 0
- 12
- 30
- 39

CONDICION

- NORMAL EN OPERACION
- PARO DE ESTACION No2
- MAXIMO RETROCESO DE FLUJO.
- MAXIMA PRESION EN ESTACION No.1

FIG. V. 4

"ANALISIS DEL TRANSIENTE"

SISTEMA "BOMBAS EN PARALELO CON CIERRE DE VALVULA"

TABLA No. 4

ESTUDIO DE CONDICIONES (50%) DE FLUJO

		CABEZAL DE PRESION (H= MTS.)						FLUJO (Q= MTS. CUB./ SEG.)						TAU
Δ X	T	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
	0	252.3	234.4	216.5	198.7	180.8	163.0	1.104	1.104	1.104	1.104	1.104	1.104	1
	3	"	247.6	243.3	236.8	234.3	251.6	0.552	0.552	0.552	0.552	0.462	0.462	0.75
	6	"	"	"	"	255.2	275.6	"	"	"	"	0.437	0.30	0.50
	9	"	"	"	258.9	276.5	306.0	"	"	"	0.442	0.32	0.143	0.25
	12	"	"	262.6	281.5	308.4	333.5	"	"	0.446	0.331	0.154	0	0
	15	"	266.3	284.5	310.8	335.7	356.2	0.36	0.451	0.326	0.166	0.012	0	0
	18	"	271.1	313.2	337.9	338.4	357.9	0.136	0.244	0.18	0.024	0.012	0	0
	21	281.4	279.1	324.1	340.6	340.1	340.6	0	-0.013	-0.05	0.024	0.012	0	0
	24	333.2	305.5	306.5	326.3	342.8	342.3	0	-0.143	-0.165	-0.06	0.012	0	0
	27	335.6	334.5	309.8	308.9	328.5	345.0	0	-0.01	-0.124	-0.174	-0.07	0	0
	30	337.6	336.7	336.7	312.2	311.3	314.8	0	-0.005	-0.02	-0.165	-0.165	0	0
	33	340.2	336.8	336.8	336.8	296.7	276.1	0	-0.01	-0.016	-0.031	-0.09	0	0
	36	341.9	341.0	341.0	325.3	305.7	282.6	0	-0.005	-0.019	0.06	0.151	0	0
	39	344.4	343.1	327.5	306.0	309.2	332.9	0	-0.01	0.07	0.162	0.15	0	0
	42	314.9	329.6	310.4	311.5	335.0	335.5	0	0.06	0.173	0.157	0.012	0	0
	45	279.4	297.1	313.6	337.1	337.5	337.1	0	0.10	0.167	0.02	0.012	0	0
	48	283.7	281.6	323.8	339.7	339.3	339.7	0	-0.012	-0.05	0.023	0.012	0	0
	51	332.6	308.3	307.5	326.0	341.8	341.4	0	-0.135	-0.154	-0.061	0.012	0	0
	54	335.1	333.8	310.5	309.7	326.1	343.9	0	-0.01	-0.15	-0.164	-0.07	0	0
	57	336.8	335.9	335.9	312.1	312.0	315.0	0	-0.005	-0.018	-0.160	-0.175	0	0
	60	339.3	338.0	338.0	338.0	300.0	280.6	0	-0.01	-0.016	-0.03	-0.061	0	0

(CONTINUA)

TABLA N<sup>o</sup> 4 (CONTINUACION.)

ΔX	CABEZAL DE PRESION (H=MTS.)						FLUJO (Q=MTS.CUB./SEG.)						TAU
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	
63	340.9	340.1	340.1	325.0	306.6	284.8	0	-0.005	-0.018	0.056	0.143	0	0
66	343.4	342.2	327.1	308.9	309.9	332.3	0	-0.010	0.070	0.160	0.140	0	0
69	315.0	329.2	311.1	312.1	334.4	334.8	0	0.080	0.164	0.150	0.011	0	0
72	281.8	298.4	314.4	336.4	336.8	336.4	0	0.092	0.160	0.023	0.011	0	0
75	285.7	283.8	323.6	338.9	338.5	338.9	0	-0.01	-0.05	0.023	0.011	0	0
78	332.0	309.0	308.3	325.7	340.9	340.6	0	-0.13	-0.14	-0.06	0.011	0	0
81	334.5	333.3	311.2	310.6	327.8	343.0	0	-0.01	-0.14	-0.16	-0.07	0	0
84	336.1	335.3	335.3	313.4	312.7	315.1	0	-0.004	-0.02	-0.15	-0.17	0	0
87	338.5	337.3	337.3	337.3	300.8	282.9	0	-0.007	-0.016	-0.03	-0.08	0	0
90	340.2	339.3	339.3	324.6	307.5	286.7	0	-0.004	-0.02	0.053	0.135	0	0

**TABLA No. 5**

**ESTACION No. 1**

<b>TIEMPO (SEG.)</b>	<b>PRESION (kg/cm )</b>	<b>FLUJO (M /SEG)</b>	<b>COMENTARIOS</b>
0	23.2	1.104	REGIMEN PERMANENTE
15	23.2	0.36	INICIA BAJA DE FLUJO
21	23.2	0	INICIA FLUJO CERO E INCREMENTO DE PRESION
39	31.6	0	MAXIMA PRESION

**TABLA No. 6**

**ESTACION No. 2**

<b>TIEMPO (SEG.)</b>	<b>PRESION (KG./CM )</b>	<b>FLUJO (M./SEG.)</b>	<b>COMENTARIOS</b>
0	15	1.104	REGIMEN PERMANENTE
12	30.6	0	PARO COMPLETO DE LA ESTACION
27	31.7	0	MAXIMA PRESION

### PERFIL DE PRESIONES

ESTACION No.1 -- ESTACION No.2

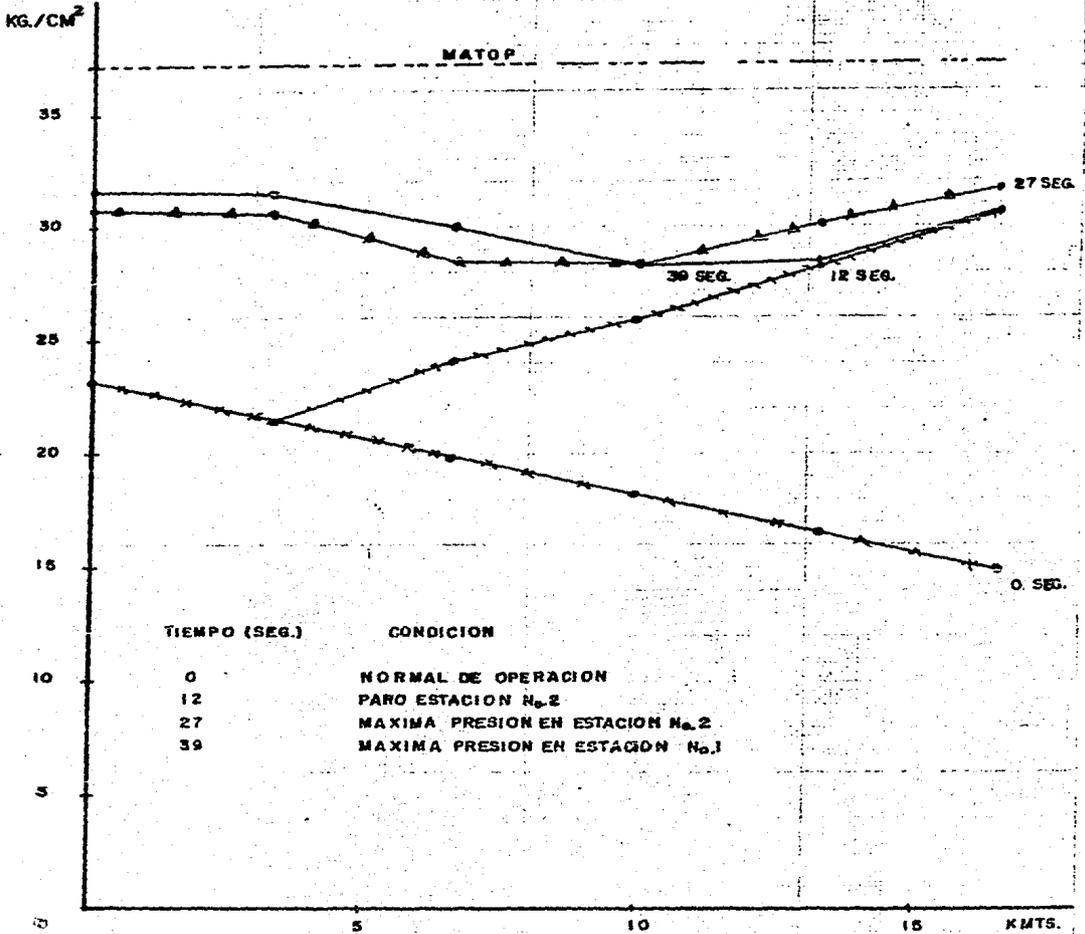
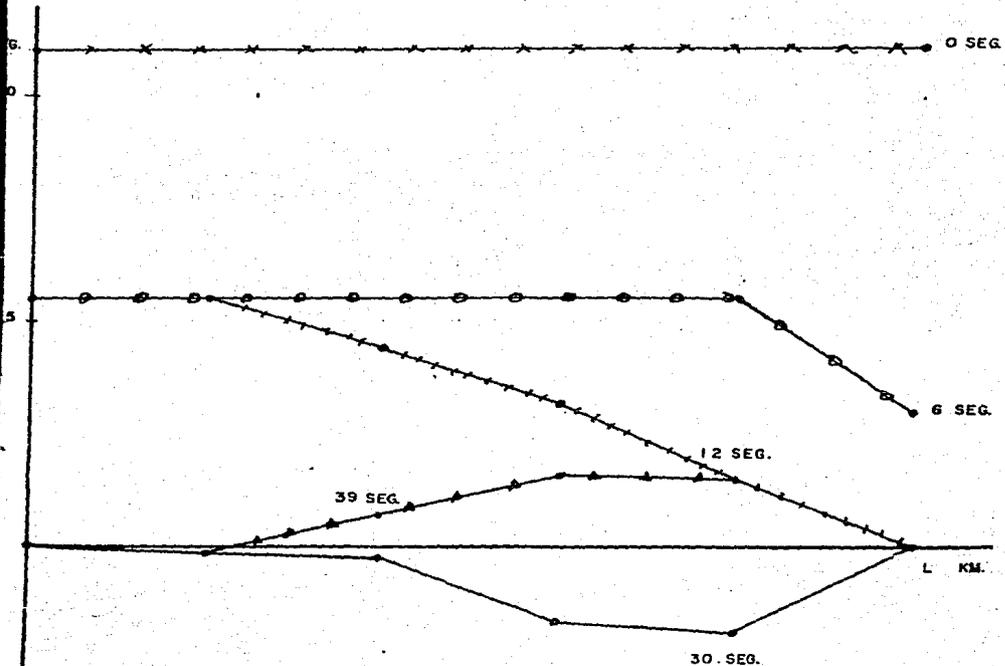


FIGURA V.5

- 126 -  
**PERFIL DE FLUJOS**  
**ESTACION. No.1 - ESTACION. No.2.**



TIEMPO (SEG.)	CONDICION
0	NORMAL EN OPERACION
12	PARO DE ESTACION No. 2
30	MAXIMO FLUJO EN RETROCESO
39	MAXIMA PRESION EN ESTACION No.1

FIGURA. V.6

a que el fluido todavía continua fluyendo hacia la válvula ( empaquetamiento de la tubería ), aunque con velocidad menor.

La onda de presión en este momento ha recorrido ( 9,900 metros ).

Por otra parte, se observa como se va deteniendo el fluido, aumentando la presión a lo largo de la tubería.

A los 21 segundos, cuando la onda de presión ya ha alcanzado la descarga de la Estación No. 1, lo que hace que cambien sus condiciones, es decir, las bombas emiten una respuesta a las condiciones que detecta a la descarga, esto es cerrar la válvula check para no permitir el flujo en retroceso, cambiando con esto las condiciones a la frontera, se asigna  $( Q = 0 )$ , la válvula check pasa hacer la condición frontera corriente arriba de la tubería. En este momento, el oleoducto esta presionado, se alcanza una presión de  $( 37 \text{ Kg/cm}^2 )$  en la Estación No. 2.

A los 27 segundos se obtiene la presión máxima a la succión de la Estación No. 2, dando un valor de  $( 38.5 \text{ Kg/cm}^2 )$ .

A los 39 segundos se presenta la presión máxima a la descarga de la Estación No. 1, dando un valor de  $( 38.4 \text{ Kg/cm}^2 )$ .

En estos momentos puede presentarse una ruptura en el oleoducto, ya que este se encuentra presionado y esta trabajando por arriba de sus condiciones normales de operación. Si esto ocurre, comenzará a desarrollarse depresiones, lo que provocará que las bombas por su sistema de control entren en recirculación, saliendose de operación del sistema de bombeo.

En los siguientes incrementos comienza a desarrollarse una secuencia de eventos, en la que el fenómeno ( onda ) oscila entre una estación y otra ( resonancia ).

Por otra parte, debe considerarse que despues, las bombas ya no se vuelven arrancar durante el ciclo de duración del fenómeno de Golpe de Ariete.

De acuerdo con las máximas y mínimas presiones registradas, se infiere que durante la etapa crítica donde se desarrollan estas, es en el periodo  $( 2L/a )$  o ciclo del fenómeno, en el cual el oleoducto siempre estará sujeto a operar durante el transiente a altas presiones.

Debemos señalar que una cuestión que no se ha abordado, es el fijar el tiempo de simulación de todo el proceso, esto debe fijarse en los datos de entrada, la manera de fijarlo para no detener el análisis sin que se haya alcanzado los puntos máximos o mínimos de presiones, podemos fijarlo que sea mayor al periodo crítico (  $2L/a$  ); pero habrá sistemas que todavía no lo desarrollen.

Una buena regla es fijar el tiempo de simulación no menor al periodo (  $6L/a$  ). En nuestro caso el tiempo de simulación fue de (  $16 L/a$  ).

De acuerdo con los datos obtenidos, el " MATOP es menor a la presión máxima registrada en este análisis, por tanto, el sistema requiere de protección para asegurar que no ocurra ruptura en la tubería. Por tanto se darán las siguientes recomendaciones para minimizar las sobrepresiones generadas durante el transiente.

Uno de los medios más usados para reducir las sobrepresiones, es el uso de las válvulas de alivio de la presión. Esto se hace mediante el desfogeo de una cantidad de flujo, lo que nos permitiera reducir las presiones máximas generadas cuando se presenta el Golpe de Ariete.

En este caso el flujo se redujo a la mitad ( 50% ), teniendo los siguientes resultados: Haciendo el mismo análisis obtenemos.

En la tabla No. 6 (  $t = 6$  ), muestra el efecto cuando la válvula cierra un porcentaje de su abertura, dejando pasar el 27.17% de su flujo total generando una presión, de (  $25.3 \text{ Kg/cm}^2$  ), corriente arriba de la válvula. En este tiempo la onda de presión ha viajado 3,300 metros.

A los 12 segundos, donde la válvula ya esta completamente cerrada, la presión de la válvula aumenta a (  $30.63 \text{ Kg/cm}^2$  ). Este aumento se debe a que el fluido todavía continua fluyendo hacia la válvula ( empaquetamiento aunque con una velocidad menor.

En este momento, la onda de presión ha recorrido 9,900 metros. Por otra parte, se observa como se va deteniendo el fluido, aumentandose la presión a lo largo de la tubería.

A los 21 segundos, como en el caso anterior, la válvula check pasa a hacer la condición frontera corriente arriba de la tubería. Esto es median

te la asignación de ( $Q = 0$ ). En este momento la onda de presión ya ha alcanzado la descarga de la Estación No. 1. Se alcanza una presión de  $\sim$  ( $31.27 \text{ Kg/cm}^2$ ) en la Estación No. 2.

A los 27 segundos se obtiene la presión máxima a la succión de la Estación NO. 2, dando un valor de ( $31.7 \text{ Kg/cm}^2$ ).

A los 39 segundos se obtiene la presión máxima a la descarga de la Estación No. 1, dando un valor de  $31.6 \text{ Kg/cm}^2$ .

Como observamos las máximas presiones generadas en este caso durante el transiente, no sobrepasan las máximas presiones de trabajo y de operación del transiente; por tanto, el flujo seleccionado es adecuado para minimizar las sobrepresiones, operando en condiciones normales del sistema. Por tanto, la ruptura de la tubería no se presentará.

El desfogue del 50% del flujo total manejado, se realizará mediante el uso de las Válvulas de Alivio de Presión. Esta válvula se dimensionó, mediante el uso de las gráficas presentadas en la sección IV.2.C.

Las dimensiones generales de la válvula son:

DIAMETRO.- 14 in.

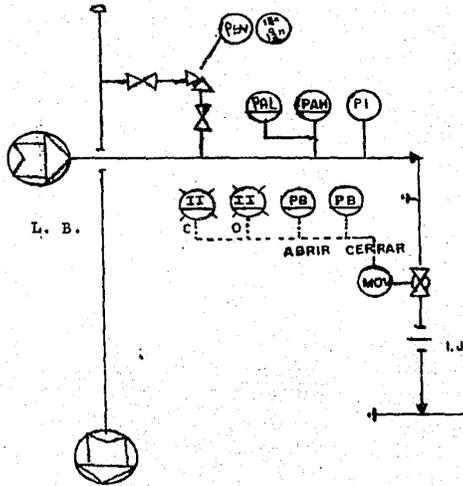
PERDIDA DE CABEZAL.- 30 ft.

MATERIAL.- De acuerdo al fabricante.

El esquema que representa el arreglo general del sistema analizado, muestra el uso de esta válvula. Ver figura V.7.a,b.

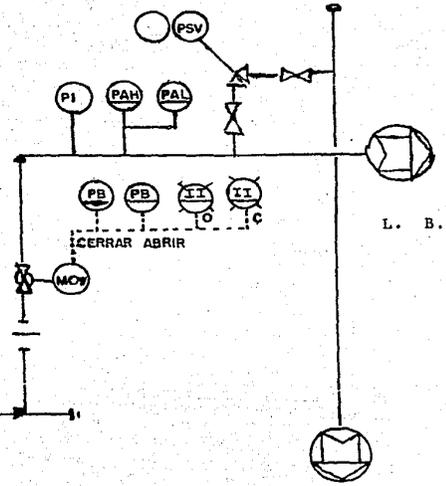
Nota: Las dimensiones de esta válvula son tanto para la descarga de la Estación No. 1, como para la succión de la Estación No. 2.

ESTACION No. 1



A TANQUE DE RECUPERACION

ESTACION No. 2.



A TANQUE DE RECUPERACION

FIGURA. V.7. APLICACION DE LAS VALVULAS DE ALIVIO

DTI'S. SISTEMA DE PROTECCION  
VALVULAS DE ALIVIO.  
FESC.



C A P I T U L O : VI.      C O N C L U S I O N E S

"Siendo joven aún, me dí a buscar  
abiertamente la sabiduría ... y  
hasta mi último día, la andaré  
buscando"

-Anónimo

## VI. CONCLUSION

En esta tesis, se estudiaron las ecuaciones básicas del Golpe de Ariete; así como, la representación física del fenómeno, con el objeto de seleccionar el método más adecuado. El método seleccionado fue programado en las calculadoras CASSIO FX-700/850 y/o HP 41-C/ 41-CV.

El programa de cálculo permite hacer el análisis del transiente, presentado por la acción del cierre instantáneo de una válvula, colocada corriente abajo, al final de la tubería; además, con la estructura básica del programa, se pueden hacer modificaciones, para realizar el análisis del transiente, causado por otros casos como: Bomba colocada corriente arriba, tanto en operación a velocidad constante, como a velocidad variable, tuberías de diferentes diámetros.

Las limitaciones de este programa, son del tipo inherentes, propios de la calculadora, como es la capacidad de la misma, se recomienda usar una ampliación de la memoria o usar otro tipo de computadora. El programa no resuelve el golpe de ariete, cuando se tienen factores de fricción mayores, por lo que se tendría que usar otro método de cálculo del factor de fricción, también cuando existen cambios de especificación de la tubería, así como tramos mayores de nueve. (segmentos de la tubería).

Así mismo, tal como se estableció en el objetivo de esta tesis, se mostraron los dispositivos de seguridad más utilizados para prevenir o anticipar al fenómeno de golpe de ariete.

Por último, se aplicó un problema real, definiendo las siguientes conclusiones:

Para el ejemplo de aplicación los resultados obtenidos, definen las máximas presiones generadas, las cuales sobrepasan a la presión máxima de trabajo del oleoducto; por lo que se tomó la decisión de seleccionar el medio más común, para reducir estas sobrepresiones, el cual consiste en aliviar la presión, mediante el uso de Válvulas de Alivio de Presión. Esto

se lleva acabo, relevando cierta cantidad del líquido, la cual se establece mediante un ensayo y error. De este análisis, la cantidad de líquido relevado que permitio minimizar las sobrepresiones, fue del 50% del flujo total - manejado en el sistema de bombeo de crudo, permitiendo asi disminuir las -- sobrepresiones un 18%.

La recomendación final es: que en la etapa de diseño, se identifiquen los problemas, que se pueden presentar, al entrar en operación el oleoducto y seleccionar la presión de diseño de la tubería, tomando en cuenta las -- sobrepresiones en operacion transiente. En la operación, que se tenga cuidado de provocar altos indices de inestabilidad en el sistema por peligro - que se estará expuesto, y si no pueden evitar, tratar de hacerlos lo menos severos. Cuando se tenga que tomar acciones correctivas, hay que detectar - cuales son los casos más severos y comunes que se presentan, y de esa forma seleccionar el o los dispositivos de control que nos permita minimizar la inestabilidad en el sistema.

Tratando; en cualquier caso, de hacer un estudio especifico para cada situación que se presente.

**A N E X O S**

PROGRAMA PARA: GOLPE DE ARIETE  
SISTEMAS SENCILLOS

PROGRAMA "PPV-WH"

CONTENIDO DE  
MEMORIAS

```

2 REM BASIC WATER
  HAMMER PROGRAM
5 INPUT "a=",A,"L
  on.=",L,"Diam="
  ,D,"Fricc=",F
10 INPUT "Tc=",J,"
  Grav=",G,"Elev="
  ",2,"Em=",E
15 INPUT "Tmax=",Y
  ,"N=",N,"CDA="
  ,C
20 T=0:U=1
25 M=N+1
30 B=A/(G*D*D*.785
  4)
35 R=F*L/(1.234*6*
  D*5*N)
36 PRINT "T=";T,"T
  AU=";U
38 INPUT "Q=",Q
40 IF Q 0 THEN 55
45 S=2*G*C*C
50 Q= SQR(S*Z/(R*S
  +1))
52 REM FIND STEADY
  STATE FLOW
55 FOR I=1 TO M
60 X=(1-1)*(L/N)
65 A(30+1)=Z-(1-1)
  *R*Q*Q
70 A(40+1)=Q
75 PRINT "x=";X/L
  ,"H(1)=";A(30+1
  ),"Q(1)=";A(40+
  1)
80 NEXT I
85 P=.5*Q*Q/(A(30+
  M)
90 T=T+(L/(N*A))
  
```

NOTAS:

PROGRAMA PARA: GOLPE DE ARIETE  
SISTEMAS SENCILLOS

PROGRAMA "PPV-WH"

CONTENIDO DE  
MEMORIAS

```

95 REM COMPUTATION OF INTERIOR POINTS
100 FOR I=2 TO N
105 O=A(30+I-1)+A(40+I-1)*(B-R*ABS(A(40+I-1)))
110 Y=A(30+I+1)-A(40+I+1)*(B-R*ABS(A(40+I+1)))
115 A(50+I)=.5*(O+Y)
120 A(60+I)=(A(50+I)-Y)/B
125 NEXT I
128 REM BOUNDARY CONDITIONS
130 A(51)=Z
135 A(61)=A(62)+(A(51)-A(52)=R*A(62))*ABS(A(62))
/8
140 IF T≠J THEN 160
145 U=(1-T/J)*E
150 W=U*UP
155 GOTO 170
160 U=0:W=0
170 A(27)=A(30+N)+A(40+N)*(B-R*ABS(A(40+N)))
175 A(60+M)=-N*B+S(QR(W*W*B*B+N*A(27)*2))
180 A(50+M)=A(27)-B*A(60+M)
182 PRINT "T=";T,"T AU=";U
185 FOR I=1 TO N
190 X=(1-I)*(L/N)
195 A(30+I)=A(50+I)
200 R(40+I)=A(60+I)
205 PRINT "X=";X/L,"H(1)=";A(30+I),"Q(1)=";A(40+I)
210 NEXT I
215 IF T>Y THEN 225
220 GOTO 90
225 END
    
```

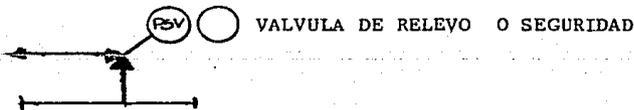
NOTAS

ANEXO. 2. SIMBOLOGIA DE INSTRUMENTOS

F	FLUJO
FIC	INDICADOR CONTROLADOR DE FLUJO
FV	VALVULA REGULADORA DE FLUJO
P	PRESION
PI	INDICADOR DE PRESION
PAL	ALARMA POR BAJA PRESION
PAH	ALARMA POR ALTA PRESION
PSL	INTERRUPTOR DE PRESION
T	TEMPERATURA
TI	INDICADOR DE TEMPERATURA
TAH	ALARMA DE ALTA TEMPERATURA
TSAH	INTERRUPTOR DE ALTA TEMPERATURA
XA	ALARMA POR FALLA ELECTRICA
II	INTERRUPTOR DE CORRIENTE
PSL/PAL	PARA SISTEMA DE LUBRICACION
SSF/SAF	A FALLA DE SELLO MECANICO
VSH/ VAH	PARA QUITAR LA VIBRACION DEL EQUIPO

 ROTON DE PANICO

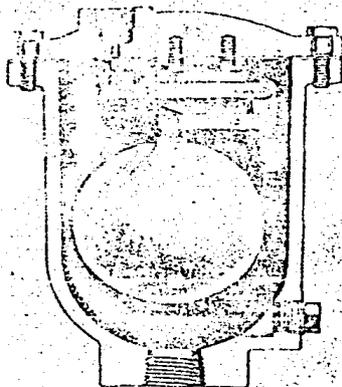
 LUZ INDICADORA



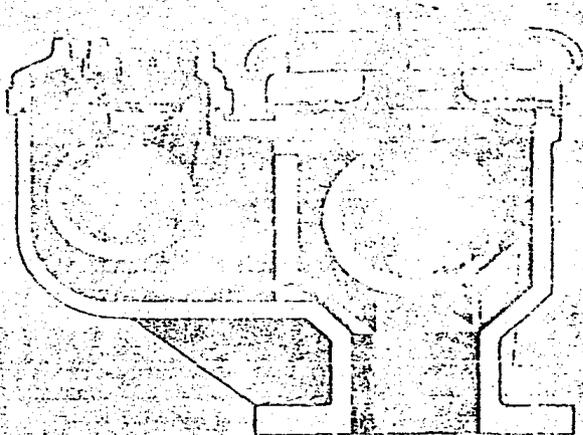
ANEXO. 2.1. VALVULAS DE AIRE.

a) EXPULSION DE AIRE

b) COMBINADAS



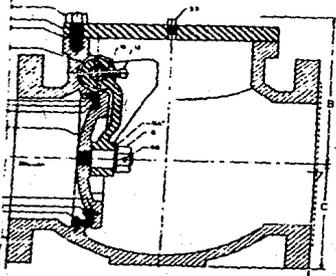
(a)



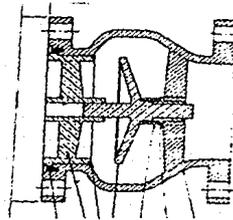
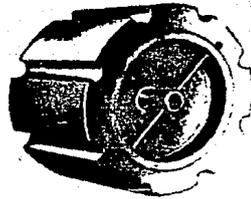
(b)

**ANEXO. 2.2. VALVULAS CHECK**

- a) **AMORTIGUDAS**
- b) **SILENCIADORAS**
- c) **DISCO INCLINADO**



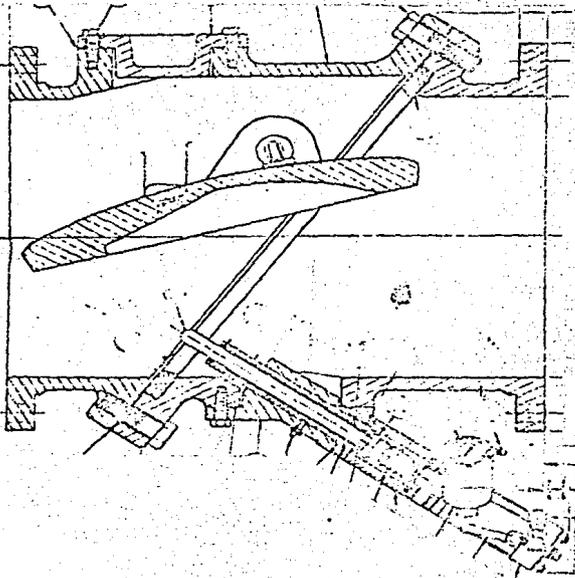
(a)



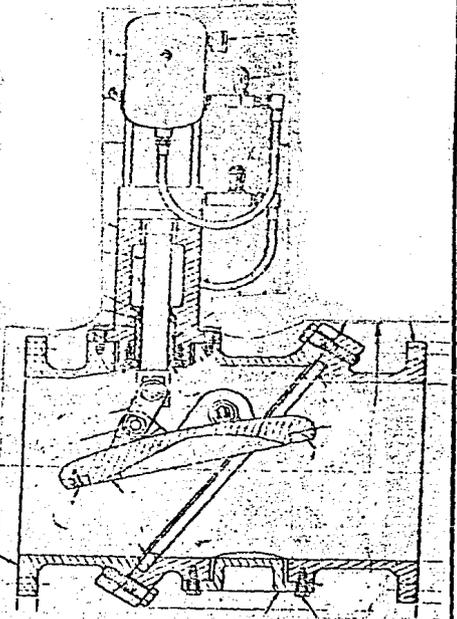
(b)

(c) i) CON T.MOD.

ii) CON B.MOD.

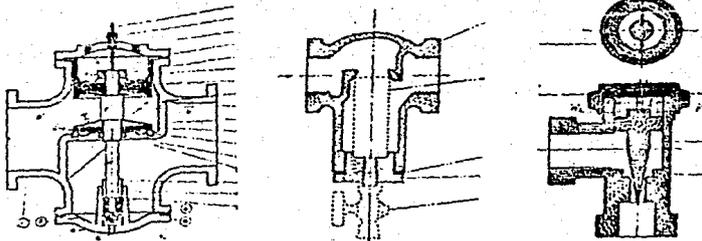
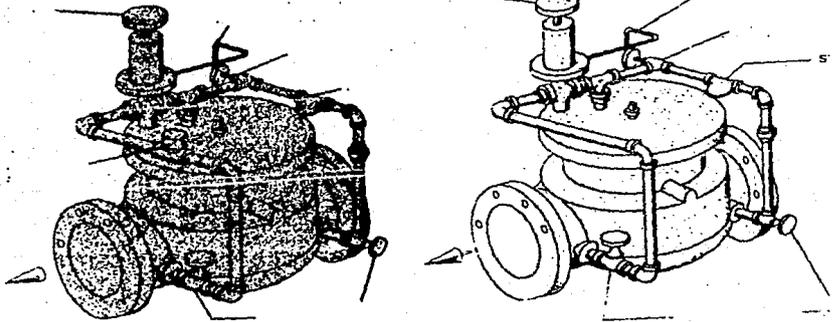


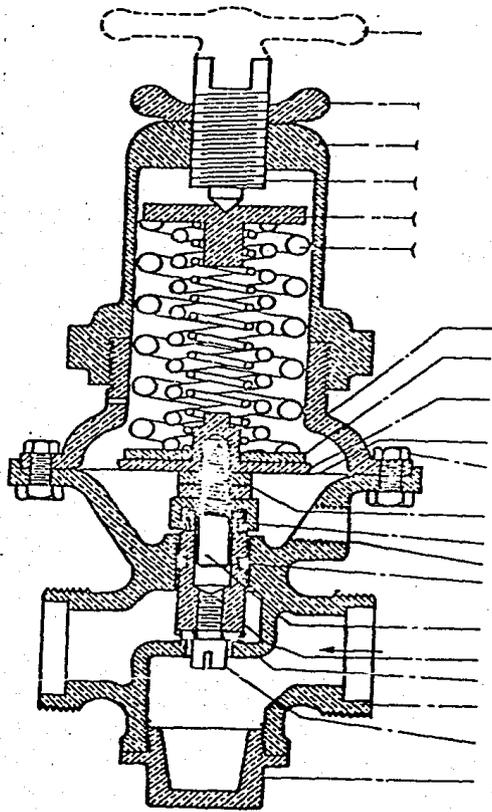
(ii)



(i)

ANEXO.2.3. VALVULAS DE ALIVIO CONTRA EL GOLPE DE ARIETE





BIBLIOGRAFIA

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

- 1.- Hara A. et al.  
Test Results Validate Computer Simulations.  
of de Pipeline Surges. Pags. 41 - 46  
Oil and Gas Journal, December 22, 1975.
- 2.- Hein M.  
Calculator Can Ease Pipeline Surge Analysis  
Pags. 100 - 106  
Oil and Gas Journal, August. 10, 1981.
- 3.- Hein M.  
Analysing Line Surge With Hand-Held Calculator  
Pags. 128 - 134  
Oil and Gas Journal, August, 17, 1981
- 4.- Kapiian M.  
Analysing Pipeline Transient by Method of Characteristics  
Pags. 105 - 108  
Oil and Gas Journal, January 15, 1968
- 5.- Karassik Igor J. et al.  
Pump Handbook.  
Mc Graw-Hill Book Co. 1976
- 6.- Kremers J.  
Avoid Water Hammer  
Pags. 67 - 70  
Hydrocarbon Processing, March 1983

- 7.- Mayor J. M. et al.  
Tuberías tomo 4.  
Tecnicos Asociados S. A. Barcelona
  
- 8.- Mendiluce R. E.  
Una protección eficaz contra el golpe de ariete en  
las insataciones industriales.  
Pags. 141 - 145  
Ingenieria Química, Julio 1978
  
- 9.- Stepanff A. J.  
Elements of Graphical Solotions of Water Hammer in  
Centrifugal-Pump System.  
Pags. 515 - 534  
Transactions of the ASME, July 1949
  
- 10.- Streeter V. L.  
Fluid Transients  
Mc Graw-Hill Book Co. 1978