



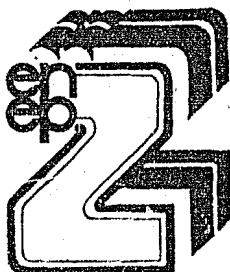
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**Escuela Nacional de Estudios Profesionales
"ZARAGOZA"**



**ANALISIS DINAMICO DEL TRANSIENTE
EN ESTACIONES DE BOMBEO.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
FRANCISCO JAVIER OSORIO NATAREN



México, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE GENERAL

I.- INTRODUCCION

II.- GENERALIDADES

.1 TRANSPORTE DE CRUDO

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO DE UN OLEODUCTO
DIAMETRO Y ESPACIAMIENTO ENTRE ESTACIONES
ARREGLO DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO EN EL OLEODUCTO

- A) ESTACION INICIAL
- B) ESTACION BOOSTER
- E) ESTACION DE INYECCION

EQUIPO DE BOMBEO

- 1) CALCULO DE LA POTENCIA
- 2) CONSIDERACIONES EN LA SELECCION DE BOMBAS

EVALUACION ECONOMICA DE BOMBAS

VALVULAS

RASPADORES Y TRAMPAS DE DIABLOS

.2 ASPECTOS DE SEGURIDAD

COMPONENTES QUIMICOS DE LA TUBERIA

AHORROS DE TUBERIAS

PARAMETROS DE DISEÑO DE UN OLEODUCTO

PRESIONES INTERNAS DESARROLLADAS EN UN OLEODUCTO

PRESIONES DE PRUEBA

VALVULAS DE SECCIONAMIENTO

RIESGOS ESPECIFICOS Y SUS CAUSAS

CONTROL DE RIESGOS

A) CORROSION

- 1) REVESTIMIENTOS
- 2) PROTECCION CATODICA

B) SOLDADURAS

- 1) PUNTOS DEBIL DE UNA SOLDADURA
- 2) INSPECCION DE SOLDADURAS

NORMAS QUE REGULAN LOS OLEODUCTOS

.3 PERFIL DE PRESIONES EN OLEODUCTOS

LINEAS DE GRADO HIDRAULICO Y ENERGIA

GRADIENTE HIDRAULICO EN OLEODUCTOS

CABEZA TOTAL

III.- CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL FENOMENO

.1 DEFINICIONES

.2 DESCRIPCION DEL FENOMENO

CAMBIOS DE PRESION CAUSADOS POR CAMBIOS DE VELOCIDAD INSTANTANEOS

PROPAGACION DE LA ONDA Y SU REFLECCION EN UNA TUBERIA

.3 CAUSAS QUE PUEDEN PROVOCAR SOBREPRESIONES EN EL OLEODUCTO

CAUSAS MAS COMUNES

IV.- TEORIA GENERAL DEL ESTADO NO PERMANENTE

.1 TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA

SUPOSICIONES

DERIVACION DE LA ECUACION GENERAL DE MOMENTUM A REGIMEN NO PERMANENTE

PRESIONES CAUSADAS POR EL CIERRE DE UNA VALVULA EN UNA TUBERIA HORIZONTAL

CONSIDERACION DEL EFECTO DE LAS PERDIDAS POR FRICCION POR CAUSAS MENORES

LIMITACIONES DE LA TEORIA

.2 TEORIA DE LA COLUMNA ELASTICA

SUPOSICIONES

DERIVACION DE LAS ECUACIONES GENERALES A REGIMEN NO PERMANENTE

A) ECUACION DINAMICA

B) ECUACION DE CONTINUIDAD

.1) CONSIDERACIONES EN UN ELEMENTO DE VOLUMEN

.2) CAMBIOS DE VOLUMEN DEL LIQUIDO

.3) CAMBIOS DE VOLUMEN DE LA TUBERIA

.4) VELOCIDAD DE LA ONDA DEL GOLPE DE ARIETE

.5) OBTENCION DE LA ECUACION DE CONTINUIDAD

PANORAMA GENERAL DE LAS ECUACIONES DINAMICA Y CONTINUIDAD

V.- METODO DE SOLUCION A LAS ECUACIONES DE LA TEORIA ELASTICA

.1 SOLUCION APROXIMADA POR EL METODO DE LAS CARACTERISTICAS

DERIVACION DE LA SOLUCION

SOLUCION NUMERICA POR DIFERENCIAS FINITAS

ESTABLECIMIENTO DE LA SOLUCION NUMERICA

ESTABLECIMIENTO DE CONDICIONES A LA FRONTERA APLICADAS A SITUACIONES SENCILLAS

A) VALVULA COLOCADA CORRIENTE ABAJO

B) CONDICION PARA UNA BOMBA DE VELOCIDAD CONSTANTE

TRANSFORMACION DE LAS ECUACIONES DEL MODELO A EXPRESIONES -
PARA UN PROCEDIMIENTO COMPUTACIONAL

ESTRUCTURA BASICA DEL PROGRAMA

- .2 ANALISIS DEL TERMINO DE FRICCIÓN EN LA ECUACION DINAMICA
- .3 DESARROLLO DEL METODO DE SOLUCION DE LAS ECUACIONES COMPLE-
TAS

DERIVACION DE LA SOLUCION

LA SOLUCION NUMERICA

LA MALLA $\Delta x - \Delta t$

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

- .4 ALGUNOS EFECTOS DE LOS PARAMETROS EN LOS RESULTADOS DE LA -
SOLUCION

EFECTOS DEL NUMERO DE TRAMOS SELECCIONADOS

EFECTOS DE LAS PENDIENTES

INESTABILIDAD NUMERICA E IMPRECISION

VERIFICACION EXPERIMENTAL

VI.- ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES A LA FRONTERA EN EL OLEODUCTO

- .1) TUBERIAS EN SERIE

CONDICIONES LIMITES EN LAS UNIONES

CALCULO DEL INCREMENTO DE TIEMPO

- .2) VALVULAS

VALVULAS EN EL INTERIOR DE LA LINEA

CALCULO DE K_L

EFECTOS DE LAS CARACTERISTICAS DE UNA VALVULA SOBRE LAS -
PRESIONES GENERADAS

- A) SEPARACION DE UNA COLUMNA DE LIQUIDO

- B) CAUSAS DE UNA SEPARACION DE COLUMNA

.3) LAS ESTACIONES DE BOMBEO DENTRO DE LA GENERACION DE SOBREPRESIONES (GOLPE DE ARLETE)

CONDICIONES DE TRANSIENTE CAUSADAS POR BOMBAS EN OPERACION
TEORIA Y OPERACION DE BOMBAS PARA SU REPRESENTACION MATEMATICA

FUNDAMENTOS

A) POTENCIA Y EFICIENCIA EN BOMBAS

B) LEYES DE SIMILARIDAD

CARACTERISTICAS Y FALLA DE POTENCIA

A) FALLA DE BOMBAS

B) ESTABLECIMIENTO DE LAS ECUACIONES

C) CALCULO DE LOS CAMBIOS DE VELOCIDAD

D) SOLUCION DE LAS ECUACIONES

FALLA DE UNA O MAS BOMBAS OPERANDO EN UNA ESTACION

A) ESTABLECIMIENTO DE LAS ECUACIONES

ARRANQUE DE BOMBAS

A) ESTABLECIMIENTO DE ECUACIONES

VII.- APLICACION DEL MODELO AL OLEODUCTO NUEVO TEAPA - VENTA DE CARRIZO - TULA

DESCRIPCION

DESARROLLO

BASE DE DATOS

DETERMINACION DEL PERFIL DE PRESIONES EN EL OLEODUCTO A REGIMEN PERMANENTE

VIII.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

REGIMEN PERMANENTE

REGIMEN NO PERMANENTE

- 1) CIERRE DE VALVULAS
- 2) FALLA DE BOMBAS
- 3) FALLA POR CAMBIOS DE OPERACION

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I
INTRODUCCION

El efecto de propagación de las ondas de presión en una tubería por un fluido incomprensible se ha conocido con el nombre de golpe de Ariete.

El golpe de Ariete son cambios de presión que se presentan en una tubería, las que se desplazan a una determinada velocidad, éstas dependen de las propiedades del fluido y de las características de la tubería; y se deben a los cambios bruscos de flujo en las condiciones de operación. El provocar una condición brusca; genera una inestabilidad en el sistema, lo que hará que cambie la energía cinética contenida en el fluido en movimiento. Esta energía es transformada en energía de presión, creando ondas que se desplazan a lo largo de la tubería, oscilando entre un extremo y otro y se amortiguarán por los efectos de fricción. Con el frente de la onda, la presión aumentará localmente y disminuirá al paso de ésta.

Con esta breve descripción del fenómeno, todos entenderían el problema por golpe de Ariete, pero pocos sabrán evaluar sus efectos y corregirlos. Mucho se ha escrito acerca de la solución del fenómeno. Probablemente por la teoría tan compleja del movimiento de la onda de presión. Además, se tiene la creencia de que si no existe ruido, no hay golpe y esto no siempre sucede.

Para el control del golpe de Ariete uno debe entender qué es y qué lo causa y entonces determinar la magnitud de la inestabilidad y sus relaciones a los esfuerzos de la tubería en todos los puntos críticos. Es entonces esencial ser capaces de conocer cuándo esperar un golpe de Ariete, para estimar los aumentos de presión y si se presentan, proporcionar algún dispositivo para reducirlos a un límite de seguridad.

Las condiciones de flujo a régimen no permanente se ha estado desarrollando bajo el punto de vista de dos teorías básicas. Una de ellas conocida como la TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA y la otra como la TEORIA DE LA COLUMNA ELASTICA. Cada una tiene sus suposiciones y limitaciones y es necesario tomarlos en cuenta a los casos donde se aplican, aunque podría considerarse a la ELASTICA como la más general. En este trabajo se aplicará ésta, por el tipo de problema que se analizará.

Primero se dará un enfoque general del sistema de bombeo; posteriormente se analizarán las teorías, después se buscará su solución y por último se aplicará a un problema específico. (Oleoducto Nuevo Teapa - Venta de Carpio - Tula).

Para el caso de la solución de la teoría Elástica (golpe de Ariete) -- utiliza; algunas veces, métodos ingeniosos y prácticos para resolver las ecuaciones de movimiento y continuidad. Estos generalmente reflejan el nivel de eficiencia en el análisis numérico.

Actualmente, la técnica más general y exacta para resolver este conjunto de ecuaciones es el METODO DE LAS CARACTERISTICAS. Afortunadamente, esta técnica es también muy compatible con la solución numérica por computadora. Por esta razón se utilizará sólo este enfoque de solución, recordando que -- existen otros posibles caminos para resolver el problema, pero hasta el momento éste es el más eficaz.

La estrategia de resolución del método, se basa en una solución general a las ecuaciones diferenciales parciales, las que deben transformarse por

el método de las características en ecuaciones diferenciales totales. Estas ecuaciones posteriormente serán integradas por diferencias finitas, las cuales darán la solución numérica final.

El método de solución requerirá condiciones límites, las cuales estableceremos a través de las causas que pueden producir condiciones de inestabilidades en el oleoducto. Haciendo para esto, los modelos que reproducirán éstas; como por ejemplo la operación de cierre de una válvula, la falla de bombas, etc.

Como el objetivo es analizar el régimen no permanente en el oleoducto en el sentido de las presiones que se generan, causados por los eventos que ocurren en el sistema con las condiciones de diseño. Cuando se aplica el modelo matemático del fenómeno expresado en un programa de computadora, es posible evaluar los efectos de inestabilidades bajo condiciones de variación. Es decir; los programas permitirán conocer qué sucede cuando en la tubería principal se cierra una válvula debido a una emergencia; de esta forma, pueden preverse las condiciones bajo las cuales podría encontrarse sin necesidad de poner en peligro el oleoducto. Si se encuentra en operación y no se ha previsto estos casos, será necesario evaluarlos y en caso de presentarse, dar medidas correctivas y colocar dispositivos de amortiguamiento para que proporcione una operación segura.

Además puede utilizarse para determinar si la tubería puede romperse debido al aumento de presión en algún punto determinado por la falla en las estaciones de bombeo o para determinar estrategias de operación durante el arranque o paro del oleoducto, o para determinar la localización de válvulas de bloqueo; en un momento dado, para limitar el derrame de crudo si se llega a presentar una ruptura, etc.

Antes de aplicar los programas al análisis del golpe de Ariete a las que puede estar expuesto el oleoducto, utilizaremos un programa a regimen permanente para que establezca las condiciones bajo las cuales opera normalmente el oleoducto entre las Estaciones No. 1 y la Estación No. 3, en la que se determinarán una serie de parámetros para su estudio; como son: el perfil de presiones a lo largo de la tubería; en las estaciones de bombeo, el NPSH, flujos, cabezas, eficiencias, RPM'S, etc.

Después aplicaremos el análisis provocando aquellas inestabilidades que son factibles de llevarse a cabo y veremos cómo se van produciendo los cambios de presión y flujo en todo el oleoducto. Indicaremos cuáles fueron las condiciones máximas y mínimas alcanzadas, en qué tiempo y su localización.

CAPITULO II

GENERALIDADES

II.1. TRANSPORTE DE CRUDO

En esta parte se describe en forma general el sistema de transporte, desde sus puntos más elementales como son las propiedades que pueden afectar al dimensionamiento del sistema hasta las consideraciones de control y arreglo en las estaciones.

Si bien un oleoducto en sentido estricto está constituido por la tubería y sus accesorios, en un sentido más amplio, también comprende la central de almacenamiento con su estación de bombeo, así como las facilidades de almacenaje y calentamiento del crudo, los medios de medición y control de las operaciones y los sistemas de comunicación.

El transporte de petróleo constituye uno de los aspectos más importantes en su industrialización. En nuestro país se tiene construida una red de tubería para el transporte de hidrocarburos, pasando éstos a través de diferentes estados, para su distribución hacia las regiones donde se localizan las refinerías.

Dentro del sistema de transporte de petróleo se deben distinguir los siguientes componentes:

- 1).- El sistema de recolección que partiendo de los pozos productores pasa a las baterías de Separación o Estabilización de crudo para dirigirse posteriormente a las estaciones de medición, hasta llegar a la central de almacenamiento.

Estas operaciones son en algunas ocasiones específicamente para manejo en tierra. En operaciones costa fuera, de las estaciones de medición pa

sa directamente a las monoboyas localizadas en puntos estratégicos y de ahí a buques-tanques o de lo contrario deben dirigirse a una terminal de almacenamiento (Buque Terminal).

2).- El oleoducto, que desde la central de almacenamiento lleva el crudo hasta las refinerías o a las terminales de embarque.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO DE UN OLEODUCTO.

Los principales factores son:

- VISCOSIDAD
- PRESION DE VAPOR
- MODULO DE ELASTICIDAD VOLUMETRICO
- INFLUENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE
- EFECTOS DINAMICOS
- SOBRECARGAS
- EXPANSIONES Y CONTRACCIONES

a).- Viscosidad: Es la propiedad más importante, ya que afecta el diseño de la línea, como es, en el diámetro de la tubería, el espaciamiento entre estaciones y la potencia requerida para su operación.

Por lo general, la viscosidad se reporta como Saybolt Universal - - (SSU) y para crudos viscosos muy pesados como Saybolt Furol y el Saybolt - Thermo para los de baja viscosidad.

b).- Presión de vapor: La presión de vapor se determina a 100°F - para los productos del petróleo de acuerdo al ASTM D325-55 y D1267-55 y se

conoce como la presión de vapor de Reid (RVP).

La presión de vapor de Reid, se emplea como un estándar para la clasificación de productos del petróleo de acuerdo a las características de volatilidad. Se expresa en "libras Reid" y está determinada por el uso de aparatos y de acuerdo con los procedimientos autorizados por el ASTM.

La presión de vapor es de importancia porque:

1) Cuando se transportan crudos, la presión mínima debe ser lo suficientemente mayor para mantener el estado líquido en la tubería y en las bombas.

2) Regirá en el NPSH disponible, es decir, influirá en la localización y tipo de succión de las bombas, y de esta manera evitar la cavitación en las mismas.

3) El transporte de fluidos volátiles requerirá de dispositivos de seguridad adicionales y precauciones para evitar el fuego. Es decir, por lo general se instalan, en tramos de tubería; válvulas de seguridad y relevo, dimensionadas para la causa de expansión térmica. Aunque el caudal de relevo es demasiado pequeño, calculándose una válvula pequeña; ésto evitará que en la línea se presenten problemas.

c).- El módulo de elasticidad volumétrico del fluido (Bulk Modulus), el cual es el recíproco de la compresibilidad isotermico (K), es un factor importante para la determinación de los aumentos de presión en las líneas causadas por condiciones anormales (golpe de Ariete). El módulo se define

como:

$$v \left(\frac{\partial \rho}{\partial V} \right)_T = \frac{1}{K}$$

6

$$\text{MÓDULO DE ELASTICIDAD Volum.} = \frac{(P_2 - P_1) V_1}{(V_2 - V_1)}$$

donde P2 y P1 son las presiones en psi y V2 y V1 son los volúmenes en pies cúbicos en el estado 1 y 2.

Para propósitos de su determinación, una muestra de crudo que será transportado puede enviarse a un laboratorio y el valor se determinará en el lapso de un minuto.

En una tubería específica, el módulo de elasticidad volumétrica puede evaluarse midiendo la velocidad de las ondas de presión inducidas. Hay muchas dificultades prácticas para la determinación del módulo por las variables: presión, densidad, tiempo y temperatura, por mencionar algunas.

d).- Influencia del medio ambiente. En el diseño se toman en cuenta los incrementos de presión causados por el calentamiento del crudo, cuando el oleoducto atraviesa zonas de elevadas temperaturas si se bloquea un tramo de tubería.

e).- Efectos dinámicos. También se consideran durante el diseño los efectos dinámicos a los que pueda estar sujeta la tubería. Entre estos aspectos se pueden citar los provocados por impactos, viento, vibraciones, movimientos de la tierra, etc.

f).- Sobrecargas. Comprende el propio peso del fluido transportado, así como el peso hidrostático para el caso de tubería submarina, o en tubería enterrada el peso de la tubería, el revestimiento y otros componentes.

g).- Cargas por expansiones y contracciones térmicas. Los cálculos sólo son necesarios cuando existen dudas sobre la adecuada flexibilidad del sistema para soportarlas.

Ello ocurre en el caso de líneas en las que se verifican sustanciales cambios de temperaturas, como sucede en oleoductos de crudo caliente, - expuestos a temperaturas ambientales cambiantes.

DIAMETRO Y ESPACIAMIENTO ENTRE ESTACIONES

La selección de un diámetro óptimo para el transporte de un crudo a un flujo específico por el costo mínimo durante el estimado de vida del proyecto no es una labor sencilla. Existen demasiadas variables, de hecho, algunas tienen un rango muy amplio; como son los costos en contratos especiales o si el área o vías de acceso son remotas, rocosas, pantanosas; otras - como los costos de energía, etc., todas ellas deben considerarse. Como puede apreciarse hay consideraciones que no pueden o son muy difíciles de evaluar para tomarlos en cuenta y proponerlos en un modelo matemático y de esta manera poder optimizarlo. (Aunque existen algunos modelos propuestos).

Algunas compañías han sido capaces de tomar soluciones muy satisfactorias a problemas de este tipo. Con algunos años de experiencia han podido recavar información, tales como el funcionamiento de equipos, compra de los mismos, selección de diámetros, especificación de tuberías, etc.

Una consideración importante en el diseño económico de un oleoducto es la relación entre el diámetro de la tubería y el espaciamiento entre estaciones. De ahí que a diámetros pequeños de tuberías requerirá de más estaciones a un intervalo más cercano. Una inversión menor en tubería es compensada por los aumentos en los costos por estación y altos costos de operación. Ha habido cierta tendencia de instalar diámetros grandes, para tener mayor capacidad de manejo, para espaciar más las estaciones y utilizar un control remoto para poder operarlas eficientemente. Estas tendencias aumentan los requerimientos del capital original (o inversión inicial). Como estrategia general, el espaciamiento entre estaciones puede estar entre 80 y 90 millas. Una aproximación al problema básico en la determinación de una solución óptima en la relación diámetro-espaciamiento es considerar una inversión estimada, costos de operación y otros factores pertinentes y entonces determinar el retorno de la inversión. De esta manera, la comparación es más completa y puede reducirse al problema para obtener una solución aceptable.

Es probable que el sistema opere inicialmente a una capacidad mínima y posteriormente incrementarse gradual o rápidamente. Esto provocará la construcción de algunas estaciones iniciales capaces de manejar las condiciones mínimas de diseño.

En la evaluación de alternativas, la capacidad potencial frecuentemente influye en la decisión para instalar una línea de diámetros grande o uno más pequeño. Otra consideración y muy importante es la política que el cliente marque, ya que la solución que se obtenga pueda no ser la óptima.

Cuando hay la necesidad de aumentar la capacidad en el oleoducto y na

da más se dispone de una tubería, una posibilidad es la de poner una línea paralela (del mismo diámetro o diferente).

Algunos de los oleoductos comenzaron a operar con una sola línea y a través de programas o aumentos en las capacidades se han desarrollado en una red de varias tuberías.

ARREGLO DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO EN EL OLEODUCTO

A) ESTACION INICIAL

Este tipo de estación se construye en el extremo de la línea o en una unión importante de un sistema que maneja diversas clases de crudos. Tiene zona de almacenamiento para recibir, almacenar y así mismo distribuir.

Algunos diseños tienen un cabezal receptor separado y líneas de llenado a los tanques; otros utilizan un solo cabezal para el mismo servicio.

El flujo que llega son dirigidos a los tanques, generalmente a un g_{asto} menor a la que opera la estación (Fig. II.1.D).

Las bombas Booster se requieren cerca de la zona de almacenamiento para mantener una presión de succión necesaria en la línea principal. En los actuales diseños se emplean controles en la que pocos operadores pueden manejar una red de tuberías y sus estaciones.

Las bombas Booster o bombas reforzadoras tienen como función la de mantener o suministrar suficiente presión en el lado de la succión de las bombas de gran capacidad. De ahí que las bombas en las estaciones, para sa-

tisfacer los requerimientos de alta presión a la descarga necesitan desarrollar altas velocidades, por lo tanto, mientras mayor es la velocidad, mayores serán los requerimientos de carga neta positiva (NPSH).

Las bombas Booster, por lo general, tendrán un rango de velocidades de operación menores.

Como un ejemplo adicional podremos citar el caso que ocurre en las plataformas de inyección de agua a los pozos de producción de crudo en alta mar. El agua debe suministrarse a los pozos a altas presiones, además debe ser una agua tratada de mar. Es por esto que las bombas de inyección deben generar altas cabezas de descarga, pero el agua proveniente de un desaereador para eliminar los gases disueltos y de esta manera disminuir los problemas de corrosión en las tuberías, vienen a una presión cercana a la presión de vapor. Si se suministrase el líquido directamente desde el desaereador a las bombas de gran capacidad se tendrían problemas por carga neta positiva (NPSH). Para evitar esto, se adicionan las bombas reforzadoras, y de esta manera, las bombas de inyección operarán con mayor eficiencia.

Generalmente se instalan en cada estación lanzadores y receptores de diablos, esto se detallará más adelante.

B) ESTACIONES BOOSTER

Esta es una estación sobre la línea principal que puede operar continua o intermitentemente para aumentar la capacidad en la tubería. Generalmente, es una estación satélite, controlada remotamente en otra estación. No requiere de una zona de almacenamiento y en ocasiones se instalan trampas de diablos. (Fig. II.2.D).

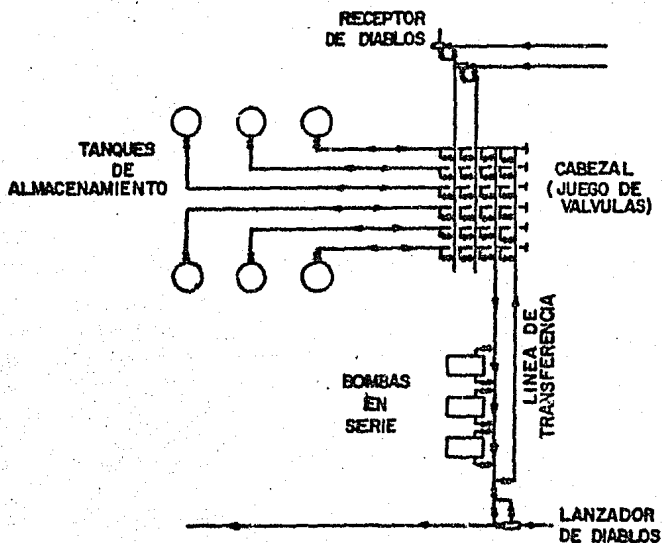


FIG. II. 1. D. ARREGLO DE TUBERIAS DE UNA ESTACION DE ORIGEN.

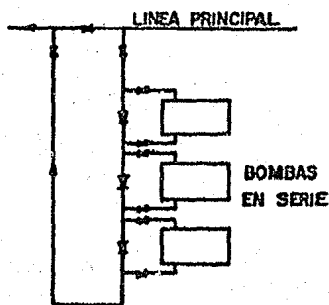


FIG. II. 2. D. ARREGLO DE TUBERIAS PARA UNA ESTACION INTERMEDIA.

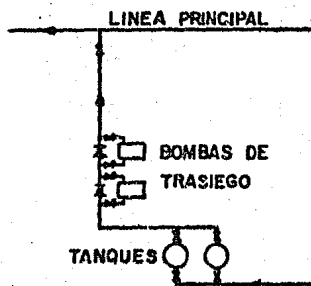


FIG. II. 3. D. ARREGLO DE TUBERIAS PARA BOMBAS DE INYECCION.

ESTACIONES DE INYECCION

Esta estación, Fig. (II.3.D) funciona como una estación de origen. Tendrá zona de almacenamiento y deberá operar continua o periódicamente. La operación involucra la inyección de una segunda corriente de crudo en la tubería principal que está operando.

Una estación de inyección requiere adecuada potencia y capacidad para mantener las condiciones de flujos normales en la tubería.

EQUIPO DE BOMBEO

1) CALCULO DE LA POTENCIA

La potencia total consumida por un sistema de bombeo es la suma de las potencias requeridas para elevar el nivel del fluido, vencer las pérdidas por fricción en la succión y en la descarga, las pérdidas en los internos de las bombas, en los soportes, sellos y empaques, compensar las pérdidas entre el accionador y la bomba.

Para el transporte de crudo existe una fórmula establecida en los términos siguientes:

$$H = \frac{P \cdot B}{2450} \div E$$

donde:

P = Presión diferencial, en PSIG (Descarga -- Sección)

B = Capacidad en BPH (BPH = BARRILES/hora (42 US GAL)

E = Eficiencia de la bomba (%)

H = Potencia al freno (Hp).

Una estación de origen o una de inyección tenderán a elevar la pre-

sión a la descarga, mientras que una estación Booster suministrará una diferencial menor. Las eficiencias de las bombas varían. Algunos valores razonables de diseño para crudos poco viscosos en bombas reciprocantes puede tomarse al 80%, y para bombas centrífugas el 75%. Los crudos viscosos reducen la eficiencia considerablemente en las bombas centrífugas. A partir de las curvas de las bombas proporcionada por los fabricantes se dispone de un valor de eficiencia más exacto.

2) CONSIDERACIONES EN LA SELECCION DE BOMBAS

El error dentro del cual se cae continuamente al especificar una bomba, es al dimensionarla, ya que frecuentemente suponen en el cálculo un flujo particular. Esta equivocación de suponer una capacidad fija, no previendo la flexibilidad y rangos de operación que puedan tener la(s) bomba(s) nos pueden guiar a resultados perjudiciales cuando estén en operación.

Deben preverse las condiciones bajo las cuales pueda estar operando las bombas, como son por altos y bajos flujos, por períodos cortos y largos, con altas o bajas cabezas, los primeros protegiéndolos con dispositivos de seguridad que por lo general son con un by pass por flujo mínimo.

Hay algunas consideraciones para la selección de bombas. Entre las más importantes están la capacidad, la presión de operación, factores de carga (o peso), requerimientos de espacio, flexibilidad en la operación, selección del tipo de curva de la bomba (H vs. Q), y costos.

Los requerimientos de espacio son de importancia secundaria a menos que ello sea un factor determinante cuando se instale una nueva unidad en una estación ya existente.

La flexibilidad en la operación se alcanza seleccionando un mayor número de unidades. Los flujos bombeados pueden variar adicionando o quitando una bomba. Si se tiene más de una unidad también se asegura una continuidad en la operación en el caso que se presente algunas dificultades mecánicas o se tengan rutinas de mantenimiento.

No hay un criterio universal para la selección de las bombas, cada aplicación debe estudiarse con sus requerimientos y limitaciones, haciendo una discretización para su selección. Muchos de los oleoductos se han construido con un diámetro de tubería grande y casi todas las unidades de bombeo han sido centrífugas. Esto no significa que este tipo de unidades sea aplicable a todos los casos. Hay veces que otro tipo de bombas es más ventajosa.

Las bombas centrífugas tienen una curva característica que es la cabeza-capacidad (Fig's. II.1 E y II. 2 E).

La cabeza disminuye cuando la capacidad aumenta y una curva plana es mejor que una curva más inclinada (Fig. II.6.E.1) para la mayoría de los sistemas a una velocidad constante la bomba siempre opera sobre algún punto de la curva. Es posible aumentar o disminuir la cabeza a una dada capacidad -- variando la velocidad de la bomba. Aunque el motor o accionador de velocidad constante, turbinas (de gas o de vapor) o accionador de velocidad variable darán velocidades de regulación deseables, las ventajas de uno u otro -- son compensadas por los altos costos de bombeo.

Las bombas reciprocantes, por lo general, no son consideradas para la aplicación de las bombas en las estaciones de un oleoducto, dada sus bajas capacidades y sus limitaciones de velocidad. Su uso generalmente está confi

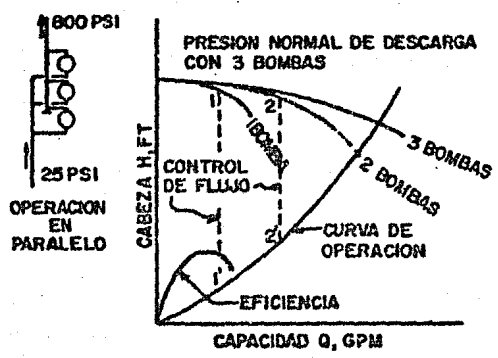


FIG. I. I. E CARACTERISTICAS DE CURVAS PARA OPERACIONES DE BOMBAS EN PARALELO. (1) BOMBA OPERANDO DEL PUNTO 1' A 1 PERO CON ALTO ESTRANGULAMIENTO. (2) DOS BOMBAS EN 2' A 2 ESTRANGULADAS. DOS BOMBAS EN 3' SOBRECARGADAS (PROBABLEMENTE).

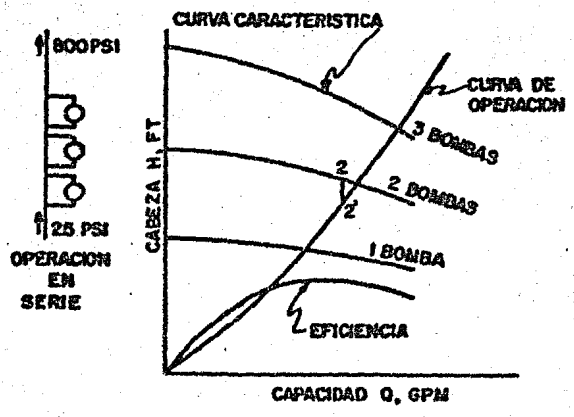


FIG. II. 2. E CARACTERISTICAS DE CURVAS PARA OPERACIONES DE BOMBAS EN SERIE. (1) BOMBA OPERANDO CON ALTA FLEXIBILIDAD Y EFICIENCIA. CON LIGERO CONTROL (DE FLUJO) COMO EN 2' A 2.

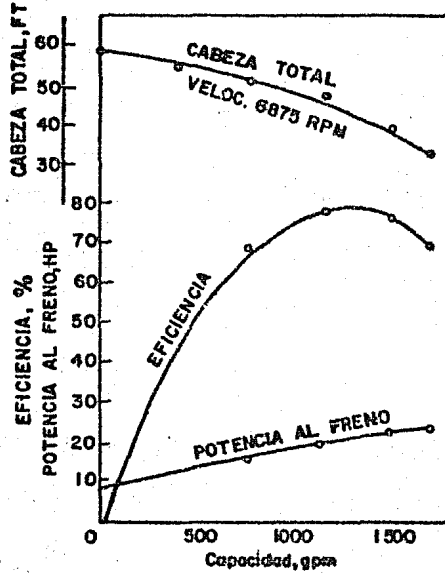


FIG. II. 6. E. I REPRESENTACION TIPICA DE LAS CARACTERISTICAS DE UNA BOMBA DE ALTA SUCCION.

nado a las aplicaciones de bajo volumen.

La clave para hacer la correcta selección de las bombas está en la comprensión o entendimiento del sistema dentro del cual operará la bomba. La especificación deficiente de una bomba se hace porque no se ha investigado los requerimientos totales del sistema, además no se ha comprendido cuál será el funcionamiento de la bomba.

Así, con esta primera regla, lo siguiente es tener el esquema o perfil de la tubería. Otro factor importante es de donde tomarán la succión las bombas, de un recipiente, tanque o directamente de la línea o en donde se colocarán.

Algo muy importante que considerar en las bombas es la eficiencia. En un intento por ahorrar, se seleccionan frecuentemente las que no tienen los más eficientes diseños disponibles para un servicio dado. ¿La selección de la eficiencia será tomada enteramente por el fabricante? Ciertamente, él dará alguna guía por el uso estimado de los costos de energía.

La eficiencia nos guiará al consumo de energía, menor eficiencia mayor consumo, mayores eficiencias mayores costos en las unidades.

Generalmente, la selección de la eficiencia estará dada por la experiencia de los diseñadores, pero como una regla de dedo (THUMB) puede considerarse un 70% inicialmente.

Cuando se diseña una bomba, lo que se tiene es el sistema donde se implementará y las necesidades que va a requerir que se cumplan. Por lo tan-

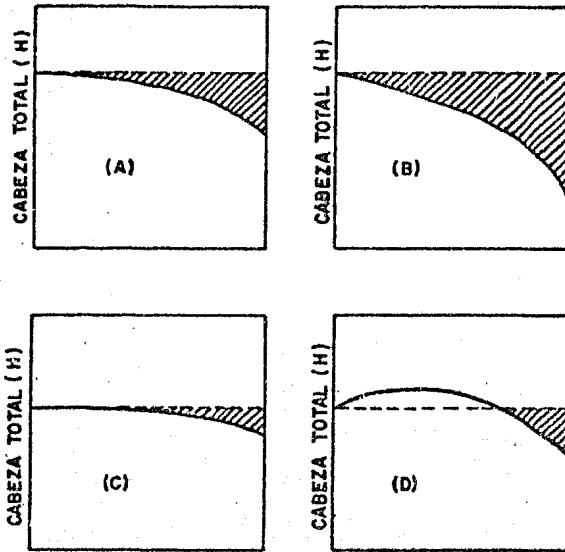


Fig. II. 6. E 2. CURVAS CARACTERISTICAS CABEZA TOTAL Vs.

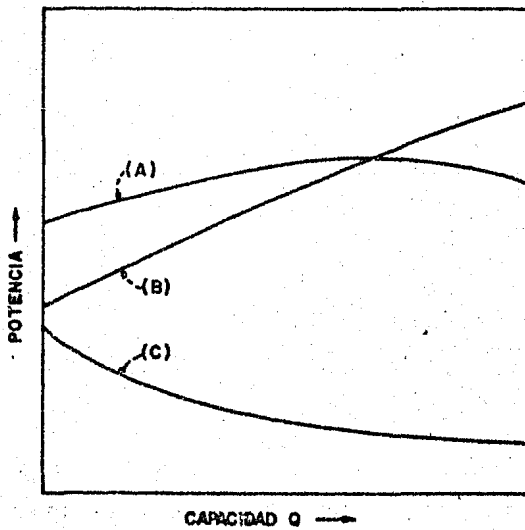


Fig. II. 7 E CURVAS CARACTERISTICAS POTENCIA Vs. CAPACIDAD PARA BOMBAS CENTRIFUGAS.

to, no se dispone del NPSH requerido por la bomba. Dado un sistema, muchos tipos de bombas de fabricantes pueden dar el servicio deseado, pero la cuestión es a qué precio.

Hay muchos factores dentro de los cuales puede moverse el ingeniero - para ver la economía del proceso, entre ellos pueden estar: ajustar, si es posible, la altura en el lado de la succión; o quizá aumentar el diámetro en la línea de succión para reducir las pérdidas por fricción. Todo esto es - con el objeto de alcanzar una carga de cabeza positiva (NPSH) disponible mayor que el requerido; ya que un valor alto en $NPSH_D$ hará posible una selección más eficiente de la bomba. Ahora la pregunta obligada es ¿qué tan grande? Si se selecciona un $NPSH_D$ muy cercano al requerido, esto nos puede llevar a problemas y fallas en las bombas y si es demasiado grande nos guiará a la selección de una bomba no económica. La utilización de una bomba sobrediseñada para reducir el NPSH requiere algunas veces intercambiar un problema por otro.

Como una regla de dedo para diseño debe considerarse un NPSH requerido = $\frac{1}{3}$ NPSH disponible como estimado inicial.

Las bombas a bajas velocidades transmiten más torque* para una potencia dada, teniendo la ventaja de requerir bajos valores de NPSH y generalmente bajos niveles de ruido.

Para la selección de bombas de grandes capacidades y altas presiones es menester llevar una relación estrecha con los fabricantes para que proporcionen la información indispensable de las características que puedan cumplir sus bombas.

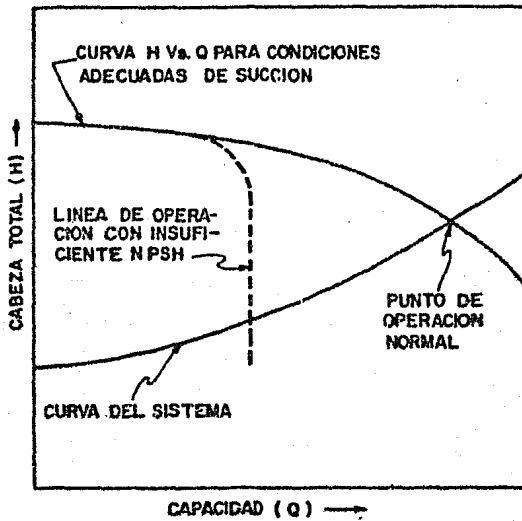


FIG. II. 1. F. EFECTOS DEL NPSH DISPONIBLE SOBRE LA CURVA H V.s. Q

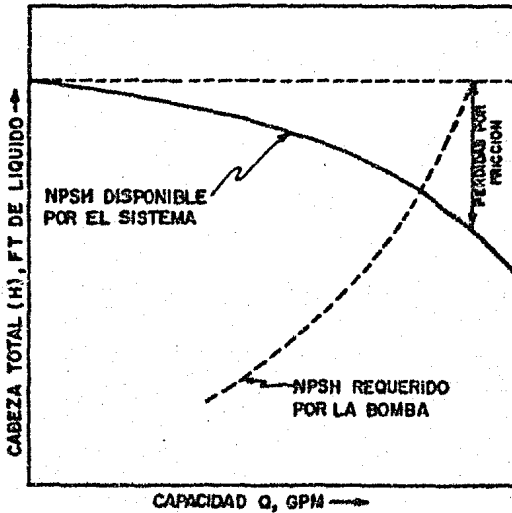


FIG. II. 2. F. RELACION ENTRE EL NPSH REQUERIDO Y DISPONIBLE EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO.

Si necesitamos grandes capacidades y además altas presiones, generalmente es conveniente disponer de bombas centrífugas arregladas en serie o en paralelo o una combinación de arreglos, es decir que en algún momento dado el sistema pueda operar en serie y en otro en paralelo.

La especificación de materiales compatibles con los líquidos bombeados es un requerimiento obvio. Tipos de accionadores, mecanismos de los accionadores, acoplamiento, engranaje y sellos también entran en la decisión final. Otro factor es la disponibilidad que exista en el mercado, así como las partes de repuesto para las mismas.

EVALUACION ECONOMICA DE BOMBAS

Después de las consideraciones técnicas, prácticas, operacionales y otros; existe siempre una evaluación económica. A veces debe ser recomendable pagar un precio razonable alto para obtener poco mantenimiento en las unidades, así como también, mayor economía y flexibilidad. Es difícil considerar a las bombas por un lado y los accionadores por el otro. Una evaluación de alternativas de bombas y accionadores debe requerirse.

Las bombas reciprocantes son generalmente instaladas en paralelo sobre la línea, teniendo un cabezal común, tanto a la de succión como a la descarga. No hace muchos años que las bombas centrífugas de varias etapas fueron instaladas de la misma forma, pero esto trae consigo sus desventajas inherentes. La operación de bombas centrífugas en paralelo son inconsistentes, una tiene la tendencia a tomar la carga de las otras y la estación no es muy flexible. Una configuración más ideal es la de instalar las bombas centrífugas en serie de una o dos etapas, de esta manera, tendremos más estabilidad, flexibilidad y eficiencia. Las figs. II.1.E y II.2.E ayudan para -

esclarecer la diferencia entre operaciones en serie y en paralelo. Notar -- que en las operaciones en serie es factible obtener regulaciones de presión a eficiencias tolerables.

VALVULAS

Las válvulas son ampliamente utilizadas en los sistemas de transporte de hidrocarburos como son: para seleccionar la trayectoria que debe seguir - el flujo, para aislar un tramo del sistema, para dar mantenimiento. Las vál- vulas son instaladas en cada estación para bypasearla de la línea princi- - pal, para dividirla en segmentos o para aislarla en los cruces de los ríos.

Son arregladas de tal manera que proporcionen un servicio flexible, - fácil de maniobrar, den seguridad en los cabezales de las estaciones de bom- beo o en los cabezales de las centrales de almacenamiento donde se tienen -- juegos de válvulas.

Un diseñador experimentado localizará las válvulas estratégicamente - para manejar operaciones de rutinas, de emergencias, riesgos por fuego, así como los sistemas de drenes y venteos.

Las válvulas de gran tamaño son difíciles de maniobrar manualmente y consumen mucho tiempo al operarlas. Las válvulas con operadores automáticos generalmente se utilizan cuando se tienen este tipo de válvulas, las más co- munes son del tipo eléctrico, pero las hay también hidráulicas y neumáticas. La utilización de válvulas de control son indispensables por los programas - de automatización.

Las válvulas con cuerpo de acero son utilizadas en aplicaciones de altas presiones, ya sean bridadas o soldadas. Los cuerpos con otro tipo de materiales como acero al carbón tienen su uso donde los movimientos de la tubería o las condiciones internas del flujo son a bajas presiones y temperaturas, de lo contrario romperían las bridas si se aplicasen.

Para la selección del tipo de válvula para que cumpla con los requerimientos de presiones de trabajo en las bridas, como también en los rangos de temperatura (ratings), corrosión mínima, etc.; hay normas o estándares que pueden consultarse como el MSS (Manufactures Standarization of the valve and fittings Industry), API SP-6D (válvulas en general) y otros (ver lista de códigos y estándares aplicables a sistemas de transporte de crudo).

La selección de la válvula es una materia de experiencia y de buen criterio. Hay algunos fabricantes que ofrecen una gran variedad de tipos, materiales y diseño, así es que el ingeniero debe seleccionar las que mejor proporcionen el servicio deseado.

RASPADORES Y TRAMPAS DE DIABLOS

Los oleoductos son equipados con dispositivos de limpieza y detección de fallas. Entre los dispositivos más utilizados en los programas de mantenimiento preventivo se tienen a los raspadores o mejor conocidos en el lenguaje de la industria con el nombre de "cochinos". Aunque existen diferentes tipos, éstos son básicamente artefactos que se desplazan por el interior del oleoducto impulsados por la presión del crudo o gas. De acuerdo al fin que se busca se pueden distinguir 3 tipos: raspatubos; para limpiar internamente la tubería, de tierra y otro tipo de materia que pueda llegar a deposi

tarse en la tubería; calibradores, para detectar deformaciones tales como abolladuras; electromagnéticos para detectar variaciones en el espesor de pared producidos por corrosión interna o externa. Los raspatubos son utilizados como se dijo para limpiar interiormente la línea de depósitos provenientes de los hidrocarburos transportados, a fin de restaurar la capacidad original del oleoducto. También puede usarse para difundir un inhibidor de corrosión a lo largo de la línea o para retardar la corrosión interna reduciendo la cantidad de material corrosivo dentro de ella. Los cochinos actualmente en uso son metálicos, de plástico y en el caso de los detectores están equipados con delicados equipos electrónicos.

Las trampas de diablos, las hay receptores y de lanzamiento de los cochinos, los cuales son similares excepto en el arreglo de sus componentes. Ambos tienen un barril bastante grande para disminuir la dificultad de insertar o remover el dispositivo de limpieza o medición. Cada uno tiene sus ventos y drenes, así como también una salida de desague mediante un juego de válvulas permite una operación segura tanto para el personal operador como para los dispositivos. La fig. (II.1. J) muestra un arreglo típico de trampas. Los calibradores se pasan generalmente antes del detector electromagnético para tener la seguridad de que las deformaciones que tiene la tubería son admisibles en el sentido de que no dañará al segundo detector.

El detector electromagnético permite detectar disminuciones en el espesor de pared o lo largo de la tubería en los 360° de cada sección transversal de la misma.

Esta información es importante para la planificación del mantenimiento

to preventivo del oleoducto. De acuerdo a la misma, se deberá reparar para mantener la línea en óptimas condiciones de operabilidad y seguridad, aquellos tramos en que el espesor de pared haya disminuido por debajo del espesor correspondiente a la presión de operación.

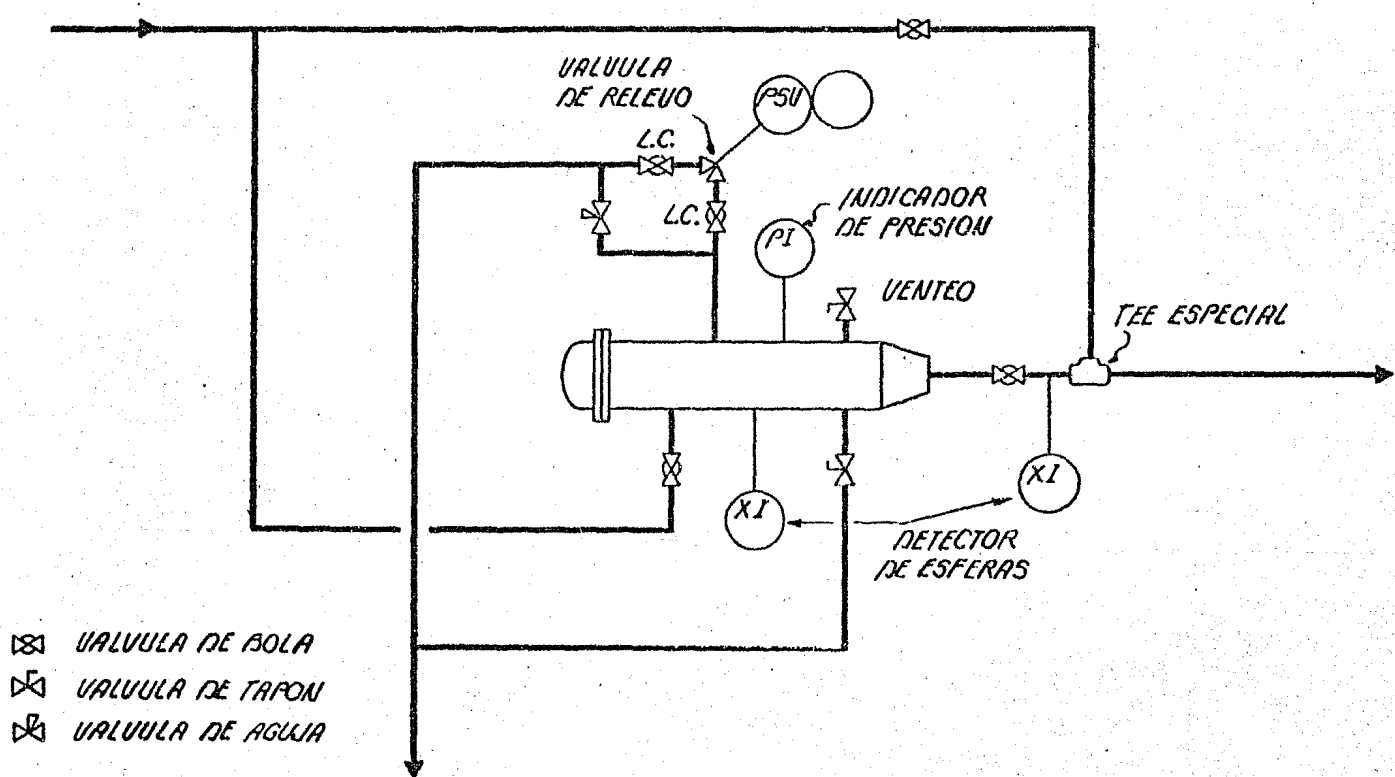


Fig. II.1 J

ESQUEMA TIPICO DE UN LANZADOR DE DIABLOS

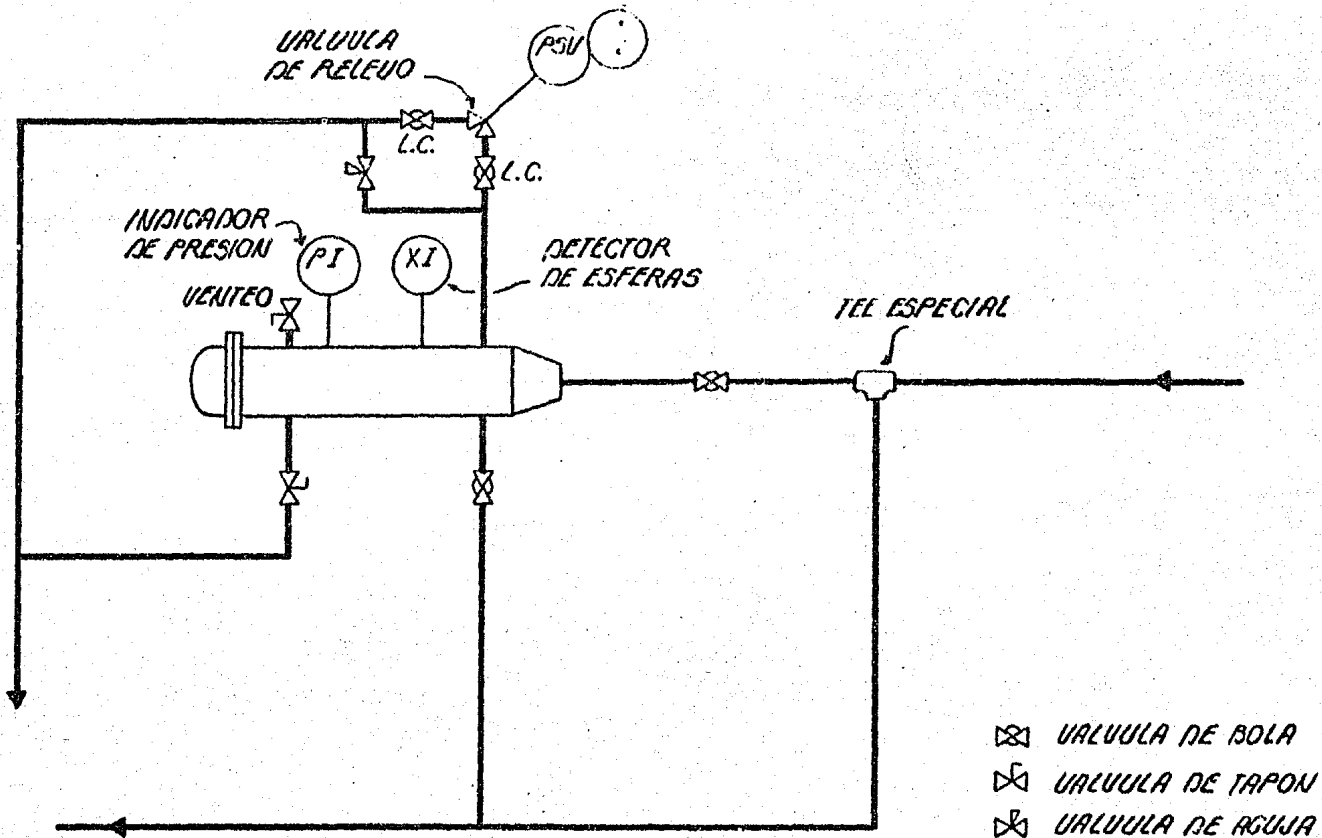


FIG II.1.5

ESQUEMA TIPICO DE UN RECEPTOR DE DIABLOS

Como en todo sistema operativo, un oleoducto debe de disponer de sus sistemas de seguridad para protección tanto del mismo como de las partes — que interaccionan con él, (operadores, máquinas, poblaciones, etc.). De esta manera, se van a analizar a continuación los diferentes elementos a los cuales se debe prestar especial atención al diseñar un sistema de transporte de hidrocarburos; describiendo básicamente los criterios de diseño en tuberías, los riesgos específicos a que están sometidos durante su operación y dando algunas recomendaciones a éstos, apegados en algunos casos a normas o estándares y en otros, en base a la experiencia obtenida a través de los años.

COMPONENTES QUIMICOS DE LA TUBERIA

El material universalmente usado para tuberías en la industria petrolera es el acero al carbón. Los componentes básicos y sus límites en composición varía de acuerdo a los siguientes límites:

Carbono: 0.27% máximo

Manganeso: De 0.3 a 1.15% máximo

Fósforo: De 0.045 a 0.080%

Azufre: 0.06 máximo

Los tubos pueden ser con o sin costura, estando limitados éstos últimos en diámetros menores de 24 pulgadas.

En lo que a conexiones se refiere, el material varía de acuerdo al rango de presiones a las cuales aquellas van a estar sometidas, así:

Hierro fundido para presiones hasta 150 Lbs/in²

Acero fundido para presiones de 150 lbs/in² a 2500 lbs/in²

Acero forjado para presiones de 1000 a 6000 lbs/in²

AHORROS EN TUBERIAS

Cuando disminuye en algunos puntos la presión de trabajo en el oleoducto puede hacerse cambios de grado y espesores de un diámetro nominal en la tubería. Esto ahorrará una diferencia en precio por tonelada.

El cambio de grado (tapering) o la disminución del espesor (Telescoping) nunca deberán hacerse arbitrariamente. El diseñador debe considerar los efectos posibles de las presiones generadas en un transiente, by passes en estaciones, cierres accidentales de válvulas, así también deben considerarse la necesidad de tubería más pesada en lugares de nivel más bajos o en el cruce de ríos y en instalaciones de estaciones intermedias futuras.

El cruce de ríos de las líneas es una tarea frecuentemente difícil. Muchos factores deben tomarse en cuenta como son tanto los técnicos como los económicos antes de que una decisión satisfactoria pueda hacerse.

Deben llevarse a cabo reconocimientos preliminares para ver las posibilidades de llevar las líneas por puentes elevados, así como los sitios más probables para hacer el cruce.

Los sitios más favorables para cruzar ríos no deben ser sobre una línea recta entre los puntos preestablecidos por la tubería.

Hay que obtener el derecho de vía en puentes y carreteras para atravesar con un puente suspendido o por una línea sumergida. Para esto último de

en considerarse algunos factores como son: la corrosividad del agua del río o de estuario, las características del suelo en las proximidades.

Las consideraciones de usos y otros factores proporcionan los elementos para determinar la apropiada profundidad para una línea sumergida, si es posible se tomó en cuenta o qué requerimientos en estructura es necesaria para cruzarlo por un puente elevado.

La mayoría de los cruces de ríos se hace a través de líneas sumergidas, pero si son ríos profundos y estrechos se harán a través de un puente con estructura suspendida.

El derecho de vía lo constituye no sólo el derecho que tiene una empresa para utilizar una franja de terreno, sino también esa misma franja a ambos lados del oleoducto, de unos 60 metros de ancho aproximadamente con una carretera paralela a la línea.

El derecho de vía sirve durante la construcción para abrir la ruta por donde será tendido el oleoducto y durante la operación para proteger las instalaciones, la comunidad, y permitir el acceso del personal encargado del mantenimiento.

Los riesgos específicos pueden ser ocasionados por la invasión del derecho de vía por parte de la comunidad en las zonas que el oleoducto atraviesa áreas pobladas, invasión motivada generalmente por el crecimiento demográfico. Esta invasión se materializa bien con la construcción de viviendas que sirven por su uso como carreteras. En el primer caso, ello puede ocasionar una rotura del oleoducto, daños a terceros y hasta accidentes fatales.

En el segundo caso también se pueden ocasionar daños a la instalación por choques de vehículos contra la línea, etc.

Para prevenir estos riesgos se hace un mantenimiento constante de - derecho de vía, en especial a la carretera que bordea la línea, lo que facilita a la vez los trabajos del personal de inspección y reparación.

Como prevención de los riesgos originados por la invasión, se hacen contactos con organismos oficiales a efectos de hacer cumplir las disposiciones legales vigentes.

PARAMETROS DE DISEÑO EN UN OLEODUCTO

Los parámetros que se toman en cuenta para el diseño en un oleoducto son:

- Presión
- Temperatura
- Influencias de medio ambiente
- Efectos dinámicos
- Sobrecargas
- Cargas por expansión y contracción térmica

PRESIONES INTERNAS DESARROLLADAS EN UN OLEODUCTO

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

La presión interna máxima de diseño debe ser mayor o igual que la —

presión máxima de trabajo más la sobrepresión por golpe de ariete.

Desde el punto de vista de diseño, algunos factores influyen en la presión de trabajo en la línea, éstas son cubiertas con detalle en algunos códigos, como el American Standard Code for Pressure Piping (ASCPP).

Las tablas API para tuberías de transporte dan dimensiones, pesos, propiedades físicas, tolerancias, presiones de prueba y otros datos sobre la tubería. Así como el ANSI B-31-C sobre Bridas y tuberías.

La selección de la tubería involucra 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 o del fluido, peso de la tubería, capacidad y las presiones generadas por algún transiente. Fuerzas Externas incluyen presiones hidrostáticas soportadas por la tubería en líneas sumergidas, vacíos y soportes.

Los cálculos para tener en cuenta las cargas por expansiones y contracciones térmicas sólo son necesarios cuando existen dudas sobre la adecuada flexibilidad del sistema para soportarlas.

Ello ocurre en el caso de líneas en las que se verifican sustanciales cambios de temperaturas, como sucede en oleoductos de crudo caliente, expuestos a temperaturas ambientales cambiantes.

Las expansiones de la tubería debidos a cambios de presión generalmente no son significativas, en tanto que las elongaciones debido a cambios de temperatura son más importantes. Las presiones generadas debidos a ex-

pansiones del fluido en líneas inactivas y expuestas son comunes pero pueden fácilmente ser eliminadas instalando una pequeña válvula de relevo (6 Loops de Expansión).

PRESIONES DE PRUEBA

Esta es una presión hidrostática a la que se somete la tubería antes de que se ponga en servicio el oleoducto. Se emplea para probar que todo el oleoducto sea capaz de resistir sin fugas o fallas internas, presiones mayores que la presión a que estará sometido durante su operación normal.

La presión de prueba se establece de acuerdo a las normas, como aquella presión requerida para que la tubería esté sometida a una tensión entre 85 y 100% de la tensión de fluencia. La presión de prueba no debe ser menor que 1.25 veces la presión interna de trabajo.

La duración de la prueba es normalmente de 24 horas, debiendo permanecer constante durante esta operación.

Durante la prueba puede hacer oscilaciones en la presión causada - - por variaciones en la temperatura exterior que provoca dilataciones o concentraciones del medio de prueba (agua). Las fugas detectadas deben ser corregidas luego de lo cual la línea debe ser nuevamente probada.

La norma API 1110 "Prácticas recomendadas para pruebas de presión de líneas de hidrocarburos líquidos" regulan este tipo de pruebas.

En años anteriores la tubería fue probada a un 150% o más de la pre-

sión de operación, esto es aconsejable cuando un alto factor de seguridad se requiera.

VALVULAS DE SECCIONAMIENTO

Son válvulas que se colocan en sitios intermedios del oleoducto con el objeto de aislar la sección o tramo a reparar en caso de una rotura o reventón.

La distancia entre ellos se calcula en función del volumen de derrame máxima admisible (o de las normas y estándares establecidos), en caso de un reventón, de acuerdo a la zona que atraviesa la línea y a las facilidades de que se disponga para recoger el derrame.

El riesgo específico lo constituye la falla de una válvula en caso de un reventón, por cuanto al derrame será mayor pudiendo originarse un incendio.

La medida preventiva en este caso consiste en hacer un buen mantenimiento programado para este tipo de válvula, de acuerdo a lo establecido en normas (a este respecto PEMEX tiene una serie de normas específicas, aplicables a cada caso), a fin de asegurar su correcto funcionamiento en cualquier instante.

RIESGOS ESPECIFICOS Y SUS CAUSAS

El riesgo específico a que está sometido el oleoducto en sí lo constituyen las roturas o filtraciones de la tubería.

Dependiendo en qué tramo y en qué momento ocurra tal falla, ésta no afectará sólo a la instalación, sino también al operador, al público y al medio ambiente.

Desde el punto de vista económico, la reparación de la rotura es en general muy costosa.

Las causas que pueden provocar una rotura son las que se describen a continuación o una combinación de las mismas.

Disminución del espesor de pared de la tubería por efectos de la corrosión a través del tiempo.

Sobrepresión brusca por falla operacional, por ejemplo, cierre instantáneo de una válvula, que produce una onda de presión que puede alcanzar valores por sobre la presión de diseño.

Punto débil en una soldadura debido a alguno de los defectos siguientes durante el proceso de soldadura. Porosidad, falta de material de aporte, oclusión de gases, etc.

CONTROL DE RIESGOS

En base al conocimiento que se tiene de los fenómenos que ocasionan los riesgos, se han ido generando las medidas de seguridad y dispositivos para su protección.

A) CORROSION. La corrosión es un ataque electroquímico del material que compone la tubería, que se verifica en determinadas condiciones del medio

en que ésta se encuentra instalada, y cuyo efecto es una disminución progresiva del espesor de la pared de la tubería.

Las condiciones para producir tal ataque electroquímico se dan en tuberías tendidas superficialmente (salvo que estén expuestas a un ambiente marino). A ello se debe que éstas últimas se tiendan sin ningún tipo de protección, excepto el provisto por los soportes que las mantienen suspendidas para evitar el contacto con el suelo que, si bien en diferentes grados, siempre es corrosivo.

Por eso sólo se utilizan, medios de protección en tuberías enterradas o sumergidas.

Existen dos métodos de protección que se describen a continuación:

1) REVESTIMIENTOS: Consisten en general en aislar, con revestimientos orgánicos de alta resistencia eléctrica, el metal de la tubería del suelo y agua. Las condiciones que debe cumplir un revestimiento para ser efectivo son:

Impermeable a la humedad

Resistente a las variaciones de temperatura

Resistente a las tensiones y presiones del suelo o económico de aplicar

De espesor uniforme, sin brechas o grietas

Firmente adherido a la superficie metálica del tubo

No tóxicos

La aplicación del revestimiento requiere previamente preparar la su-

perficie metálica dejandola limpia de herrumbre y petróleo, totalmente seca. Luego, en el caso de asfalto/alquitrán, se aplica una delgada capa de "fondo" (pintura bituminosa para anclaje). A continuación una capa de asfalto o alquitrán reforzado con fibra de vidrio y finalmente papel de asbesto en espiral para proteger el revestimiento de los golpes.

También se utilizan como revestimientos el polietileno, el polipropileno y las resinas termoplásticas. Para aplicar éstas, la limpieza debe ser más esmerada (metal blanco) luego de limpiar el tubo es necesario precalentarlo en un horno para después aplicarle la resina con pistolas a presión.

En el caso de tuberías sumergidas se utiliza generalmente asfalto, alquitrán o acabados epóxicos y concreto con una malla metálica concéntrica con el tubo y atrapada en el concreto para aumentar su consistencia. El concreto se coloca para evitar la flótabilidad y como protección mecánica contra golpes.

La inspección del revestimiento se debe hacer visualmente y con un detector de alto voltaje. Los defectos detectados deben ser corregidos.

2) PROTECCION CATODICA. En la superficie del metal de una tubería, - por influencia del medio más o menos corrosivo en que está aislada, se forman pequeñas celdas galvánicas causando el ataque electroquímico en las zonas anódicas (anódicas).

La protección catódica incrementa el potencial del medio que circunda la tubería, evitando así la formación de áreas anódicas.

El incremento de potencial se logra introduciendo un flujo de corriente al medio, que circulando por la tubería la protege.

La introducción de la corriente eléctrica al medio se consigue de dos maneras:

Por corriente impresa

Por ánodos de sacrificio

La corriente impresa requiere de una fuente externa y de un electrodo o ánodo auxiliar, generalmente de grafito o de hierro que se encuentra localizado algo distante de la tubería a proteger.

El potencial mínimo necesario para proteger la tubería es de $\varnothing.85V$. Este método tiene la ventaja de suplir elevados amperajes y voltajes dando gran protección por unidad de superficie. Sin embargo tiene la desventaja de sus elevados costos de instalación y mantenimiento y que puede causar interferencia.

El método de ánodos de sacrificio es idéntico al anterior, con la diferencia que la corriente del medio a la tubería se logra a través de una reacción electroquímica.

El ánodo es de un material menos noble (más electronegativo) que el material que se requiere proteger.

Las ventajas de este método son: su bajo costo de instalación, no causa interferencia y no necesita fuentes de corriente externa; las desventajas -

son su potencial limitado, la limitación en el área protegida, y su menor duración.

B) SOLDADURAS

1) PUNTO DEBIL EN UNA SOLDADURA. Los defectos en una soldadura, que se traducen en puntos débiles de la misma, representan siempre un riesgo potencial de reventones en los oleoductos.

Para prevenir la presencia de defectos en las soldaduras así como los accidentes que pudieran presentarse durante los trabajos de soldadura, se adaptan una serie de procedimientos y medidas de seguridad basadas en las normas API STD 1104 "Normas de soldadura en tuberías y API-RP 2009 "Recomendaciones de seguridad en soldadura y corte en soporte".

Dentro de aquellos procedimientos se establece el método a seguir y los electrodos a utilizar en la soldadura, de acuerdo al material y espesor de pared de la tubería que se va a soldar.

Se les exige a los contratistas el cumplimiento de los mismos principios y regulaciones de seguridad industrial que rigen para el personal de las empresas exponiéndose de lo contrario a ser eliminado el registro de contratistas. Dentro de esas normas se les exige proveer a sus trabajadores con los equipos e implementos de seguridad a satisfacción del supervisor a cargo de la obra. Se le obliga también a estar dotado del equipo contra incendio apropiado para el riesgo existente.

2) INSPECCION DE SOLDADURAS. La calidad de las soldaduras es comprobada por métodos no destructivos tales como ultrasonido o radiografía, que no

afectan sus propiedades ni su uso posterior.

La inspección radiográfica es el método más usado, lográndose las placas radiográficas por el contacto de una película sensible a los rayos X con la soldadura, permitiendo el flujo de rayos a través de ambas.

Algunos defectos pueden ser corregidos renovando las partes defectuosas y soldando nuevamente. La norma API 1104 fija los estándares de aceptación, rechazándose las soldaduras que no cumplan con los mismos.

El número de radiografías a realizar se establece normalmente en las especificaciones del trabajo, dependiendo de la región que atraviesa el oleoducto. Es usual que en áreas despobladas se fije radiografiar el 10% de las soldaduras realizadas por cada soldador. En áreas pobladas se exige radiografiar el 100% de las soldaduras, lo mismo que en cruces de carreteras o en túneles.

En las uniones es probable que puedan inducir a la concentración de esfuerzos, para ello es necesario dar el tratamiento de revelado de esfuerzos.

NORMAS QUE REGULAR LOS OLEODUCTOS

En la industria petrolera como en cualquier otra, existen una serie de normas que regulan la construcción, operación y mantenimiento de oleoductos, así como las dimensiones, propiedades físicas y químicas de los materiales que los componen, atendiendo a su intercambilidad y que a su vez van recogiendo la experiencia obtenida a través de los años y los avances tecnológicos que continuamente se obtienen como resultado de las investigaciones.

Las instituciones más importantes que realizan esta labor se detallan a continuación:

- ANSI - American National Standard Institute.
- API - American Petroleum Institute.
- ASME - American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM - American Society of Testing Materials.
- AWS - American Welding Society
- MSS - Manufactures Standarization Society of the Valve and Fittings Industry.
- NFPA - National Fire Protection Association.
- SSL - Steel Structure Painting Council
- ASHO - American Standard State Higway Officials.

Las normas más importantes relacionadas con oleoductos y zonas de almacenamientos son las siguientes:

NORMA DE PEMEX. Aplicable para diseño, operación y mantenimiento, la cual es una recopilación de las normas siguientes:

*ANSI 31.4. Aplicable al diseño, selección de materiales, construcción, Inspección, Mantenimiento y Prueba de sistema de transporte de hidrocarburos líquidos.

API std 5L - Tuberías de Acero

API std 5LX - Tuberías de acero de alta resistencia

API SP-6D - Valores en general

API 650 - Tanques soldados para almacenamiento de petróleo.

API 12L. Calentadores de petróleo

API 1104 - Soldaduras en tuberías

API 1105 - Construcción de oleoductos

API 1107 - Mantenimiento de oleoductos

API 2009 - Recomendaciones de seguridad en soldadura

API 2021 - Sistemas contra incendio en tanques de almacenamiento

API 2200 - Reparaciones en oleoductos y gasoductos

II.3. PERFIL DE PRESIONES EN OLEODUCTOS

LÍNEAS DE GRADO HIDRAULICO Y ENERGIA

Los conceptos de líneas de grado hidráulico y de energía son útiles en el análisis de problemas de flujo de fluidos. Si, en cada punto a lo largo de una tubería, el término P/ρ se determina y grafica como una línea vertical del centro de la tubería. El lugar y los puntos finales es la línea de grado - hidráulico. Más generalmente, el gráfico de los dos términos:

$$P/\rho + Z$$

La línea de grado hidráulico es la altura que se eleva el líquido en un tubo de vidrio vertical conectado a un piezometro abierto a la línea.

La línea de grado de energía es una línea adicionada a una serie de puntos, marcando la energía disponible para cada punto a lo largo de la tubería como ordenada, si se grafica contra la distancia de la línea como abscisa, con sistiendo del gráfico de:

$$\frac{U^2}{2g} + \frac{P}{\rho} + Z$$

Por la definición, la línea de grado de energía estará siempre por encima de la línea de grado hidráulico por una diferencia del término $U^2/2g$.

Las pérdidas de energía debidos a fricción pueden ser calculadas en una línea de longitud grande, dando valores correctos al factor de fricción. En adición de las pérdidas por fricción, generalmente hay otras pérdidas de naturaleza inicial debidos a cambios de sección, flujo a través de válvulas, etc.

Si consideramos una línea descargando de un tanque, como se muestra en

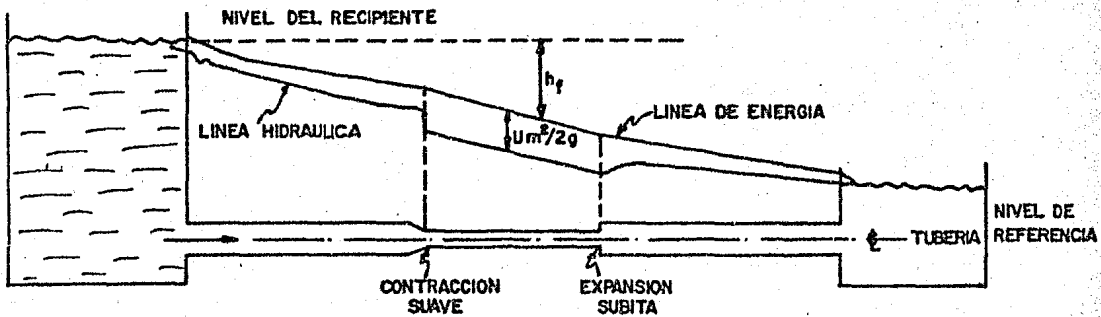


FIG. II. 3. A

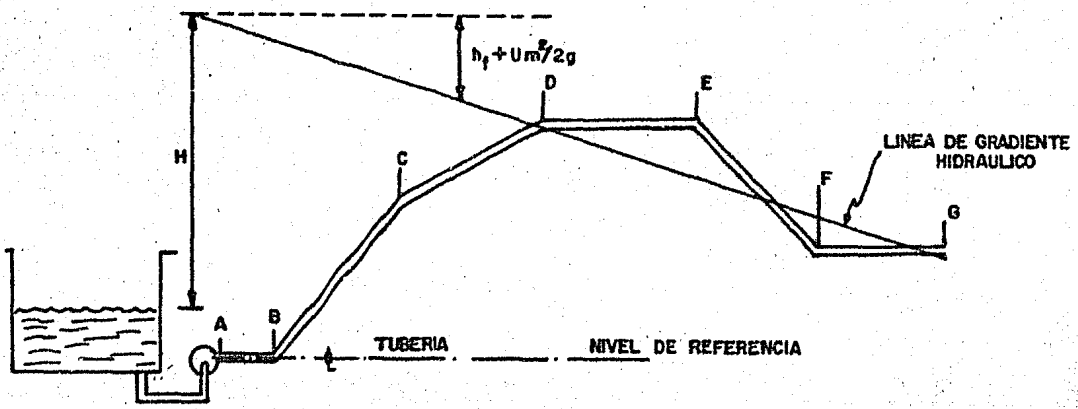


FIG. II. 3. B

la figura (II.3.A), estimaremos la pérdida de cabeza total h_f debido a fricción en algún punto en la tubería, y ajustaremos esta altura abajo del nivel del tanque. El nivel entonces alcanzado, medido arriba del de referencia (generalmente tomado como el centro de la tubería), representa la cabeza total disponible en esa sección de la tubería, por ejemplo, la suma de la cabeza estática representada por el nivel de la misma tubería junto con la cabeza de presión y velocidad del fluido.

La distancia vertical entre las líneas de gradientes de energía e hidráulico representan la energía cinética de la tubería en cada punto. La figura (II.3.A) muestra esas dos líneas para una tubería horizontal con varios cambios de sección.

Si la línea del gradiente hidráulico cae por debajo del nivel de referencia en algún punto, significa que la presión en la tubería estará abajo de la atmosférica en ese punto. Este estado es indeseable por el peligro de producirse paquetes de gases, cavitaciones o vaporizaciones en la línea.

En ocasiones, cuando se tienen líneas de grandes longitudes, las pérdidas por cuestiones menores pueden despreciarse o adicionarse como longitudes equivalentes (cambios de sección o pérdidas a través de accesorios).

Para este caso, el valor de la cabeza velocidad $U^2/2g$ tiene valores pequeños comparadas con el valor de las pérdidas de cabeza $(f(L/D))U^2/2g$, de esta manera puede despreciarse, con lo que se hacen iguales las líneas de gradiente hidráulico con las de energía.

La adición de energía de la bomba al flujo, el cual debe expresarse en la Ecuación de energía mecánica (Bernoulli) por la inclusión del trabajo de la

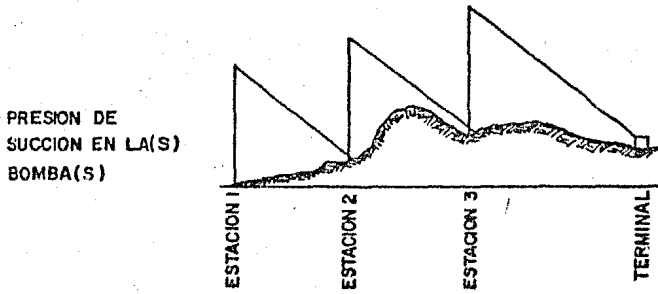
bomba. Así, la línea de grado hidráulico se eleva grandemente en una bomba.

La figura (II.3.B.) representa una porción de una tubería entre dos estaciones de bombeo A y G. El diagrama muestra un perfil del gradiente para la tubería. Debe suponerse en este caso particular que la escala vertical es exagerada y que las pérdidas por fricción debe tomarse como proporcional a la distancia horizontal sin llegar a tener grandes errores. Con esas presiones el gradiente hidráulico debe dejarse como una línea recta. Se puede apreciar que la presión estática de la tubería cae abajo de la presión atmosférica alrededor del punto E, tal que el arreglo mostrado no es satisfactorio.

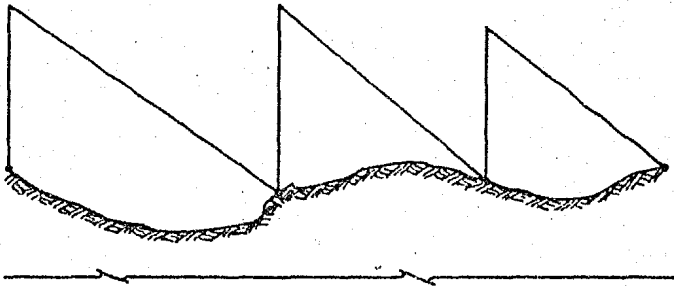
GRADIENTE HIDRAULICO EN OLEODUCTOS

El gradiente hidráulico es un perfil que muestra la presión o cabeza a lo largo de la tubería puntualmente. Este gradiente está sobre el perfil topográfico. Para el caso del flujo de un líquido con velocidad uniforme a través de la tubería de diámetro constante, el gradiente hidráulico o gradiente de presión es una línea recta el cual representa solamente las pérdidas de presión debidas a la fricción. Estas, bajo esas condiciones, varían directamente con la longitud. Para visualizar más detalladamente este concepto, se grafica el gradiente hidráulico como ordenada expresado ya sea en pies de líquido o en psi. y en la abscisa como parámetro la longitud en kms, mts, pies o millas (dependiendo de cual sea el caso en las unidades utilizadas).

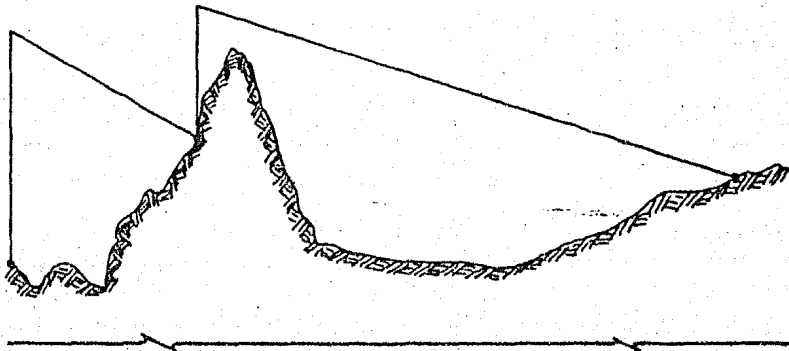
Para preparar el esquema del gradiente hidráulico, la estación de bombeo No. 1 se localiza en el punto correspondiente sobre el perfil topográfico. La presión de descarga de la bomba se traza en la escala vertical. La pendiente del gradiente hidráulico está determinado por la caída de presión por unidad de longitud.



a) TIPICA SOLUCION GRAFICA PARA COLOCACION DE ESTACIONES EN UN OLEODUCTO.



b) PERFIL TOPOGRAFICO IDEAL PARA UTILIZAR BOMBAS EN SERIE EN LAS ESTACIONES.



c) PERFIL TOPOGRAFICO PARA UTILIZAR BOMBAS EN PARALELO EN LAS ESTACIONES.

FIG. II. 3. C.

El perfil topográfico establece la cabeza estática (diferencia de alturas), sea esta positiva o negativa en las bombas de las estaciones subsiguientes. Por lo general, donde se interceptan el gradiente hidráulico y el perfil topográfico es la localización teórica de la siguiente estación de bombeo pero si en esta estación, la succión se toma directamente desde la línea, es necesario mantener alguna presión sobre el cabezal de succión, generalmente 25 psi para equipo centrífugo. Esto es necesario para mantener el NPSH disponible -- arriba del NPSH requerido por las bombas.

También, si la línea va a tanques de almacenamiento, es necesario mantener la presión a la llegada igual o aproximadamente igual a la presión hidrostática máxima de los tanques (nivel máximo). La fig. II.3.C representa -- una gráfica típica del perfil de presiones o gradiente hidráulico en oleoductos.

Aquí el gradiente se grafica en pies por milla vs la longitud expresado en millas. El gradiente se calcula para el crudo, diámetro y flujo específico. Es conveniente indicar la presión de operación máxima, la cual debe o no debe ser la misma en la descarga de la estación.

El gradiente puede utilizarse en dos cosas: En el diseño del oleoducto, para establecer los puntos más probables donde se localizarán las estaciones, iniciando con una presión de descarga en la estación No. 1 y graficando el perfil; o en condiciones de operación, para determinar las condiciones a las que está trabajando el oleoducto, con presión de descarga y flujo específicos.

En algunos diseños, especialmente cuando se encuentra un perfil muy accidentado, se hace necesario fijar ciertas estaciones claves en lugares accesibles o cerca de líneas de energía eléctrica disponibles y entonces la localización de las otras estaciones se hace por ensayo y error.

Este no es un proceso difícil con la ayuda de las computadoras. Normalmente, una estación se mueve suficientemente corriente arriba para mantener una presión de succión de al menos 25 psi.

En el desarrollo lógico de un sistema de transporte de hidrocarburos líquidos, se hace necesario instalar estaciones intermedias (Booster) para elevar la presión, cuando se manejan diferentes crudos o flujos y llegue con suficiente presión a la siguiente estación, (en la que normalmente no llegaría el flujo, si estarían operando a condiciones normales).

Estas estaciones son localizadas en el balance hidráulico, es decir, donde se obtiene la presión mínima en el extremo corriente abajo, la cual estará localizada en un punto intermedio entre la estación de bombeo anterior y la siguiente, si el terreno estuviera esencialmente nivelado.

Es útil calcular una serie de presiones entre una estación y otra. Para determinar la presión en algún punto x, analíticamente puede expresarse como sigue:

$$P_x = P_1 - PL + (E_1 - E_x) \frac{S_g}{2.31}$$

donde:

P_x = presión en psi (o su equivalente) en el punto x

- P_1 = presión en psi (o su equivalente) a la descarga de la estación
 L = longitud, en millas (o su equivalente), de la estación al punto x
 E_1 = elevación en pies de líquido (o su equivalente) de la estación
 E_x = elevación en pies de líquido (o su equivalente) en el punto x
 S_g = densidad relativa del crudo
 P = pérdidas por fricción por millas (o su equivalente)

CABEZA TOTAL

Esta es la suma algebraica de la cabeza estática más la cabeza por fricción más la cabeza a la succión si la hay. La cabeza estática de un sistema es la presión equivalente a la diferencia en elevación entre la estación inicial y la estación siguiente o en algún punto intermedio que requiera determinarse. El perfil topográfico del terreno entre las estaciones, dictaminará la presión mínima en el cual puede establecerse el flujo. La cabeza por fricción es la presión requerida para vencer la resistencia al flujo de un fluido específico, en la tubería. Nótese que en el establecimiento de la Ec. de Bernoulli se está eliminando la cabeza velocidad, ya que en una línea de longitud apreciable no es significativa.

El cálculo de las cabezas disponibles para vencer la fricción es importante para la determinación de la capacidad de flujo en la tubería.

CAPITULO III

CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL FENOMENO

Los problemas de flujo a régimen no permanente son de gran importancia porque pueden causar altas presiones, ruido, cavitación y vibración más allá de las determinadas por el análisis de flujo a régimen en estado estacionario. De hecho, los problemas creados por el transiente hidráulico son más severos para los sistemas de transporte de fluidos líquidos.

El análisis de flujo inestable en sistemas de tuberías puede dividirse en dos grandes categorías. La primera llamada "surge" o columna de fluido rígida, teoría que trata 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. Las ecuaciones que describen este tipo de flujo son generalmente ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales pueden resolverse en forma analítica o con técnicas numéricas. Este enfoque es fácil de aplicar y siempre será considerado como una posibilidad para aproximar los problemas adecuadamente que se tengan bajo consideración.

En la segunda categoría de problemas se tienen los efectos elásticos, tradicionalmente conocidos como golpe de ariete, teoría en la cual la elasticidad del fluido y las paredes de la tubería se toman en cuenta en los cálculos. Las ondas de presión originadas por los cambios de velocidad se propagan en todo el sistema a una velocidad que depende directamente de esas propiedades elásticas.

La teoría elástica la cual es más precisa, refleja el comportamiento de un sistema de flujo inestable. El análisis se basa en la solución de un sistema de dos ecuaciones diferenciales parciales no lineales. Como consecuencia, el análisis es más complejo y difícil de manejar que la utilizada en

la teoría Inelástica.

Streeter y Wylie (27) han demostrado que con la ayuda de las computadoras digitales, el método de las características puede ser aplicado para resolver el sistema de ecuaciones de una manera relativamente general y fácil de entender.

Antes del análisis hecho a través de las computadoras, las ecuaciones generales que describen el fenómeno fueron simplificadas de alguna manera para poder dar solución por medios algebraicos, gráficos y aritméticos. Los términos no lineales fueron eliminados, el término por fricción fue aproximado o eliminado del todo. El establecimiento de las condiciones límites (a la frontera) e iniciales fue al principio difícil de hacer y entendido por muy pocos.

Hoy, con las técnicas de análisis más modernas, incluyendo métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales parciales ha sido posible la solución de problemas de flujo no permanente.

Así, el proceso de flujo no permanente mediante la teoría elástica está representado por una ecuación de movimiento (o momentum) y una ecuación de continuidad. Su solución nos llevan a ecuaciones de perturbaciones de ondas que se propagan en flujo y presión en todo el sistema de tubería.

Algunos términos más comunes que encontrarán en el desarrollo de esta tesis, se definirán.

FLUJO ESTACIONARIO (O ESTABLE) Y FLUJO INESTABLE

Si las condiciones de flujo tales como presión y velocidad en un punto no cambian con respecto al tiempo, entonces diremos que el flujo será estacionario o estable. Por el contrario, si las condiciones cambian con el tiempo, el flujo será no permanente. Estrictamente hablando, el flujo turbulento al igual que el flujo a dos fases son no permanente donde las condiciones en cualquier punto están cambiando continuamente. Por lo tanto, si consideramos valores promedios sobre períodos cortos de tiempo, esos flujos son estacionarios si las condiciones promedios no cambian con el tiempo. El flujo permanente es un caso particular del flujo no permanente.

FLUJO TRANSIENTE

Cuando las condiciones de flujo están cambiando de una condición estable a otra, se le denominará flujo no permanente.

FLUJO UNIFORME Y NO UNIFORME

Si la velocidad es constante con respecto a la dirección axial dentro de una tubería a algún tiempo dado, el flujo será uniforme, en tanto que si la velocidad varía con la distancia, el flujo es no uniforme.

SEPARACION DE COLUMNA

Si la presión en una tubería cae por debajo de la presión de vapor de líquido que circula a través de él, entonces se formarán cavidades en el líquido y la columna de líquido se separa presentándose en esa instante condiciones de flujo a dos fases.

SURGE

El término "surge" se refiere a esas situaciones de flujo inestable -

que pueden ser analizadas considerando al fluido como incomprensible y las pa redes del conducto como rígidas.

Los "surges" son los mejor conocidos en el transiente de presiones ge nerados en un oleoducto. Un "surge" es la transformación de energía cinética en energía potencial, ocurriendo cuando el flujo en una tubería se reduce.

Un surge potencial es la elevación instantánea de la presión que re-- resulta si el flujo se reduce instantáneamente (reducción de la velocidad del fluido). Las presiones registradas en función del tiempo debidas al surge -- presentan las formas de la Fig. (III.1.A).

EMPAQUE DE LA TUBERIA

En ambas curvas de la Fig. III.1.A. hay dos zonas de aumentos de pre-- sión. La primera zona corresponde al paro de flujo y continua por una segun-- da zona de elevación de la presión más suave. Esta suavización en la eleva-- ción de la presión mostrada en la segunda zona, corresponde al empaque de la - tubería, la cual ocurre cuando algún fluido es bombeado a través de la tube-- ría corriente arriba y se permite fluir una menor cantidad de líquido corrien-- te abajo. Es decir, se aumenta la capacidad de almacenamiento de una tubería, después que se ha iniciado un estado transiente, con un aumento de presión.

ATENUACION

La primera zona en el aumento de la presión es llamado el frente de - onda. Una deformación se muestra en la Fig. III.1.B.; observándose, como el - frente de onda se propaga a lo largo de la tubería. El "surge" de la onda -- mostrado aquí fue iniciado por el paro de la estación en 10 segundos.

Las deformaciones muestran que los aumentos de presión cuando la onda se propaga es pequeña para el mismo lapso de tiempo. Este es el fenómeno de atenuación. No existirá en una tubería sin fricción. Por lo tanto, la atenuación se podrá despreciar en un sistema con distancia corta la cual permite despreciar las pérdidas por fricción. En otras palabras, la velocidad diferencial a través del frente de onda se reduce cuando la onda se propaga a cualquier dirección, esto nos lleva a una reducción en la amplitud del "surge", refiriéndose a esta reducción como la atenuación.

RAREFACCION

En el lado corriente abajo de un dispositivo de paro de flujo (válvula, etc.) se observa una caída de presión. El patrón de la caída de presión es simétrica al patrón del aumento de presión descrita anteriormente, asegurando que la continuidad sea respetada.

Esta caída de presión y su propagación (recuérdese que se atenúa cuando se propaga) es una presión transiente conocida como una rarefacción, especialmente cuando se utiliza para neutralizar un surge.

En otras palabras, el flujo en las estaciones de bombeo debe reducirse por el paro de una bomba o por el cierre de una válvula. Con la reducción del flujo en la estación corriente arriba, se producirá una onda negativa, la cual viajará a la estación corriente abajo. Esta onda nulifica parte de la elevación de la presión causada por la indisposición de la estación corriente abajo.

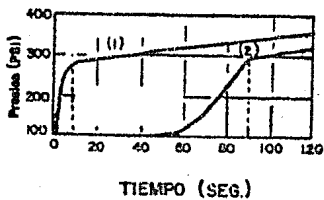
EFECTO PIRAMIDAL

El efecto piramidal es un fenómeno de superposición de las presiones transientes. Si el cierre de una válvula en el sentido de generar un aumento de presión, se produce una caída de presión en el lado corriente abajo y una elevación de la presión en el lado corriente arriba. Los efectos resultantes son presiones transientes iguales a las variaciones de presión generados por la acción de la válvula sumadas al aumento de presión original pasando a través de la válvula.

Por ejemplo, en una instalación típica de una válvula, la presión corriente arriba será duplicada; es decir, los surges positivos iguales están siendo generados uno sobre el otro, uno debido al surge pasando a través de la válvula, y el otro debido al efecto de estrangulamiento de la válvula.

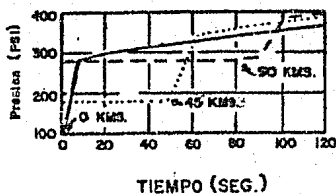
El efecto piramidal del aumento de presión advierte en la succión de una estación de bombeo a través del cual un surge pasa. En la Fig. - - (III.1.C.) ocurre un aumento gradual de presión arriba de los 320 segundos cuando una estación de bombeo para. El primer aumento de presión se genera por el cierre de una válvula de la tubería principal en el lado corriente abajo de la estación de bombeo. Después de los 320 segundos, el surge causado por el paro de la estación se suma al aumento de la primera presión. Esto es un típico efecto piramidal.

Si deseamos mostrarlo de una manera más simple, podremos decir que la superposición de un estado transiente de presión sobre otro es un efecto piramidal o en el caso de que una tubería fuese empacada debido al cierre de una válvula colocada corriente abajo o debido a la falla de potencia en

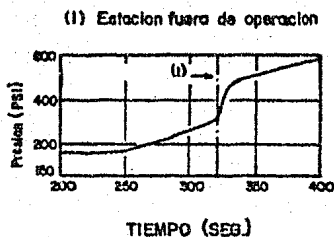


- (1) Pare de bomba en 10 Seg.
- (2) Cierre de valvula en 90 Seg.

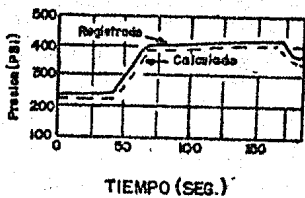
FIG. III. IA INESTABILIDAD INICIAL



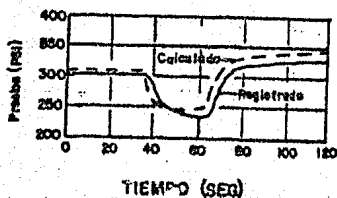
(B) ATENUACION



(D) EFECTO PIRAMIDAL



(E) INESTABILIDAD Y REFLECCION



(C) RAREFACCION

las bombas de una estación corriente abajo y las bombas de la estación corriente arriba fueran arrancadas, entonces la presión debido al arranque se adicionará a la presión (ya alcanzada) debido al empacamiento de la tubería.

III.2. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

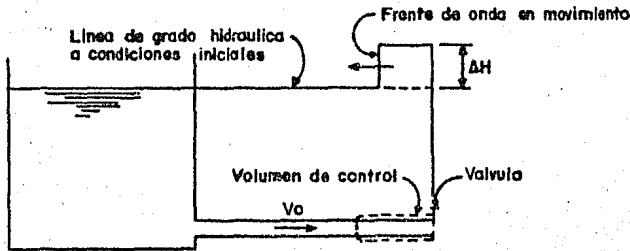
Aquí, se describirá brevemente y en una forma sencilla el fenómeno - que se presenta al provocar una perturbación al sistema, la cual generará - un estado no permanente.

La descripción del fenómeno se basará en aspectos físicos que suceden y se mostrará su representación matemática más fundamental; esto se hace con el fin de introducirnos a lo que ocurre cuando se genera un "golpe de Ariete". En capítulos posteriores se podrá apreciar mejor los modelos matemáticos y su obtención en una forma más rigurosa, los cuales rigen sobre el fenómeno.

CAMBIOS DE PRESIÓN CAUSADOS POR CAMBIOS DE VELOCIDAD INSTANTANEOS

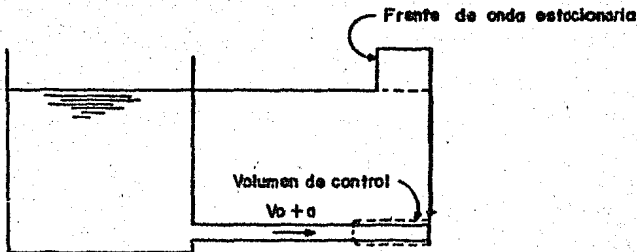
Consideremos el sistema de tubería de la Fig. (III.2.1.) en el cual un fluido está fluyendo con una velocidad V_0 y una presión inicial corriente arriba de la válvula de P_0 . Si la válvula cambia de posición instantáneamente en el tiempo $t = 0$, la velocidad del fluido cambiará a $V_0 + \Delta V$, la presión en la válvula será $P_0 + \Delta P$, la densidad del fluido ρ_0 cambiará a $\rho_0 + \Delta \rho$, y una onda de presión de magnitud ΔP viajará en la dirección corriente arriba. Designaremos a la velocidad de propagación de la onda de presión (comúnmente llamada velocidad de onda) por " a ", y, para simplificar la derivación, supondremos que la tubería es rígida, es decir, su diámetro no cambiará debido a los cambios de presión.

La situación de flujo inestable de la Fig. III.2.1.a se convierte en una condición estable por imposiciones, en el volumen de control de la velocidad " a " en la dirección corriente abajo. Esto es equivalente a suponer que un observador está viajando en la dirección corriente arriba con velocidad a . (ver la diferencia de derivada total y parcial en la definición de la Ec.



Velocidad	V_0	$V_0 + \Delta V$
Densidad	ρ_0	$\rho_0 + \Delta \rho$
Presion	P_0	$P_0 + \Delta P$

(a) FLUJO NO PERMANENTE



Velocidad	$V_0 + a$	$V_0 + \Delta V + a$
Densidad	ρ_0	$\rho_0 + \Delta \rho$
Presion	P_0	$P_0 + \Delta P$

(a) FLUJO TRANSIENTE CONVERTIDO A PERMANENTE POR LA IMPOSICION DE LA VELOCIDAD a .

FIG. III.2.1 Aumento de presión en una tubería debido a la reducción instantánea de la velocidad

de Momentum, es decir cuando el observador no viaja con la onda). Para este observador, el movimiento del frente de la onda le parece estacionaria. La Fig. III.2.1.b y las velocidades de entrada y salida del flujo en el volumen de control son $(V_0 + a)$ y $(V_0 + \Delta V + a)$ respectivamente.

Consideremos una distancia X , y una velocidad V , como positivas en la dirección corriente abajo. Entonces la velocidad de cambio del momentum en la dirección X positiva es:

$$\begin{aligned} & \rho_0 (V_0 + a) A [(V_0 + \Delta V + a) - (V_0 + a)] \\ & = \rho_0 (V_0 + a) A \Delta V \end{aligned} \quad \text{III.2.1}$$

Despreciando la fricción, la fuerza resultante, F , actuando sobre el fluido en el volumen de control (o elemento de volumen) en la dirección positiva, es:

$$\begin{aligned} & \rho_0 A - (\rho_0 + \Delta \rho) A ; \text{ es decir :} \\ & F = -\Delta \rho A \end{aligned} \quad \text{III.2.2}$$

Recordando la segunda Ley de movimiento de Newton, la velocidad de cambio de momentum con respecto al tiempo es igual a la fuerza neta. Por lo tanto, siguiendo las ecs. III.2.1. y III.2.2. tendremos:

$$\Delta \rho = -\rho_0 (V_0 + a) \Delta V \quad \text{III.2.3}$$

Posteriormente veremos que en la mayoría de los casos de condiciones transiente, a es mucho mayor que V_0 . Por consiguiente es posible despreciar lo.

Definiendo:

$$P = \rho g H \quad \text{III.2.4}$$

donde: H es la cabeza de presión en pies de líquido, y la ecuación (III.2.3.) puede describirse como:

$$\Delta H = -\frac{a}{g} \Delta V \quad \text{III.2.5}$$

$$\Delta P = -\rho_0 a \Delta V \quad \text{III.2.6}$$

El signo negativo en el lado derecho de la ecuación (III.2.5.) indica que la presión aumenta con la reducción de la velocidad (es decir para ΔV negativo, ΔP es positivo) y viceversa. También debe notarse que la Ecuación (III.2.5.) fue derivada para el caso de cambios de velocidad ocurriendo en el extremo corriente abajo de una tubería y que el frente de la onda se mueve en la dirección corriente arriba. Procediendo similarmente, podemos probar que, si la velocidad fue cambiada en el extremo superior de la tubería (corriente arriba) y la onda se movió en la dirección corriente abajo, entonces tendremos:

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta V \quad \text{III.2.7}$$

Nótese que no hay signo negativo en el lado derecho de la Ecuación (III.2.7.). Esto muestra que en este caso existe un aumento de presión para un incremento en la velocidad y una disminución en la presión con un decremento en la velocidad. Previamente supusimos el cambio en la densidad del fluido a $\rho_0 + \Delta \rho$ como resultado del cambio de presión.

PROPAGACION DE LA ONDA Y SU REFLECCION EN UNA TUBERIA

Consideremos el sistema mostrado en la Fig. III.2.2., donde las condiciones del flujo son estables en el tiempo $t = 0$, la válvula se cierra instantáneamente. Si el sistema se supone sin fricción, entonces la cabeza de presión a lo largo de la línea a las condiciones iniciales es H_0 , sean la distancia x y la velocidad 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 como sigue:

1) $0 < t \leq L/a$ (Fig. III.2.2. a y b)

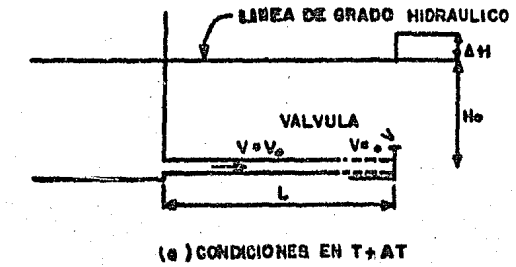
Tan pronto como la válvula se cierra, la velocidad del flujo en la válvula se reduce a cero, lo cual ocasionará una elevación en la presión de $\Delta H = + (a/g)Vo$. De este aumento de presión, la tubería se expandirá (en las Fig. III.2.2., el diámetro de la tubería a condiciones iniciales se muestran por líneas punteadas), el fluido se comprime incrementando su 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 la energía cinética se convertirá en energía elástica (de presión). Si a es la velocidad de la onda del golpe de Ariete y L es la longitud de la tubería, entonces en el tiempo $t = L/a$, a lo largo de la línea, la tubería se expande, la velocidad del flujo es cero y la cabeza de presión es $H_0 + \Delta H$

2) $L/a < t \leq 2L/a$ (Fig. III.2.2. c y d)

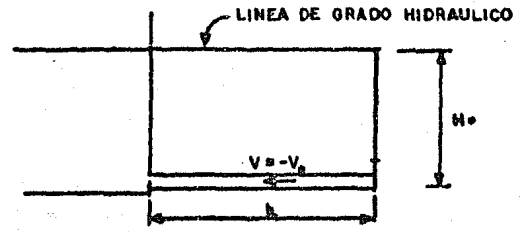
Como el nivel del recipiente es constante, las condiciones son inestables en el fondo del mismo cuando la onda lo alcanza, porque la presión en una sección del lado del recipiente es H_0 mientras que en la sección adyacente en la tubería es $H_0 + \Delta H$. De esta diferencial de presión, el fluido comenzará a fluir de la tubería al recipiente con una velocidad $-Vo$. Entonces, la velocidad cambiará de 0 a $-Vo$, lo cual provoca que la presión caiga de $H_0 + \Delta H$ a H_0 . En otras palabras una onda negativa viajará hacia la válvula tal que la presión atrás de la onda (es decir, en el lado corriente arriba) es H_0 y la velocidad del fluido es $-Vo$. En $t = 2L/a$, la cabeza de presión en toda la línea es H_0 , y la velocidad del fluido es $-Vo$.

3) $2L/a < t \leq 3L/a$ (Fig. III.2.2. e y f).

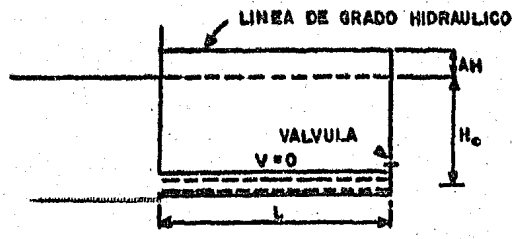
Puesto que la válvula está completamente cerrada, una velocidad negativa, no podrá mantenerse en la válvula. Por lo tanto, la velocidad cambiará instantáneamente de $-Vo$ a 0 . Esto es, porque la presión reduce a $H_0 - \Delta H$, y una onda negativa se propagará corriente arriba. Detrás de esta onda, la



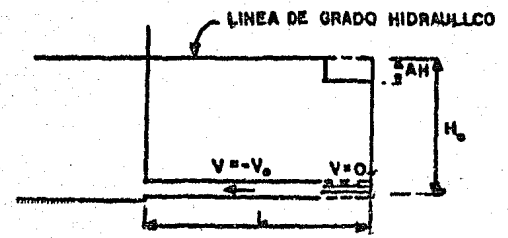
(a) CONDICIONES EN $T + \Delta T$



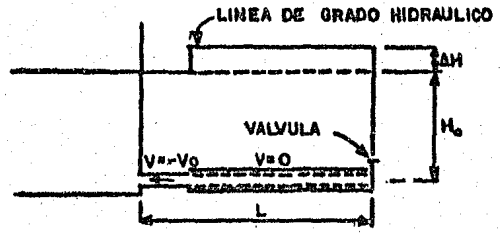
(b) CONDICIONES EN $T = \frac{2L}{c}$



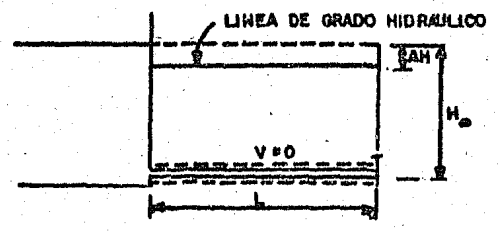
(c) CONDICIONES EN $T = \frac{L}{c}$



(d) CONDICIONES EN $T = \frac{2L}{c} + \Delta T$



(e) CONDICIONES EN $T = \frac{L}{c} + \Delta T$



(f) CONDICIONES EN $T = \frac{3L}{c}$

FIG. III. 22 PROPAGACION DE LAS ONDAS DE PRESION CAUSADAS POR EL CIERRE INSTANTANEO DE UNA VALVULA

presión es $H_0 - \Delta H$, y la velocidad del fluido es cero. En el tiempo $t = 3L/a$, la cabeza de presión en toda la tubería es $H_0 - \Delta H$ y la velocidad del fluido es de cero.

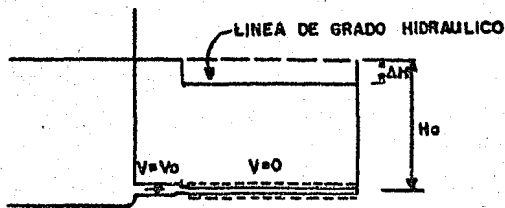
4) $3L/a < t \leq 4L/a$ (Fig. III.2.2. g y h).

Tan pronto como esta onda negativa alcanza el recipiente, una condición no balanceada se crea de nuevo en el extremo superior (corriente arriba, es decir en la unión tubería - recipiente). Ahora la presión es mayor en el lado del recipiente que en el lado de la línea. Por lo tanto, el fluido comenzará a fluir hacia la válvula con una velocidad V_0 , y la cabeza de presión se restablece a H_0 . En el tiempo $t = 4L/a$, la cabeza de presión en toda la línea es de H_0 y la velocidad del flujo es V_0 . Entonces, las condiciones en la tubería son las mismas que las que tenía en las condiciones iniciales ($t = 0$ ó régimen estable).

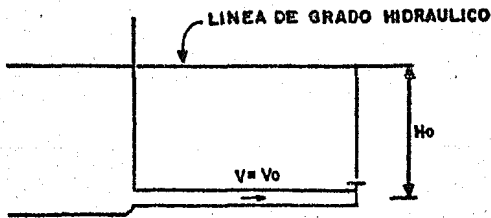
Como la válvula está completamente cerrada, la secuencia de eventos comenzará de nuevo en $t = 4L/a$. La Fig. III.2.2. ilustra la secuencia a lo largo de la línea, en tanto que la Fig. III.2.3., nos muestra las variaciones de la presión en la válvula con el tiempo. Como supusimos que el sistema es sin fricción, este proceso continuará y el ciclo se repetirá en un intervalo de $4L/a$. Este intervalo después del cual las condiciones se repiten se le llama el período teórico de la línea.

En sistema físicos reales, las ondas de presión se disipan debido a las pérdidas por fricción cuando la onda se propaga en la tubería, y el fluido comenzará a detenerse después de un corto tiempo.

Si las pérdidas por fricción se toman en cuenta, entonces las variaciones de la presión en la válvula con el tiempo se muestra en la Fig. III.



(g) CONDICIONES EN $T = \frac{3L}{a} + \Delta T$



(h) CONDICIONES EN $T = \frac{4L}{a}$

FIG. III.2.2 (CONTINUA)

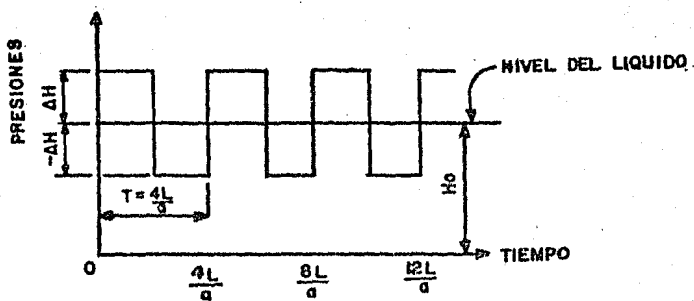


FIG. III.2.3 VARIACION DE LA PRESION EN LA VALVULA DESPRECIANDO LAS PERDIDAS POR FRICCION

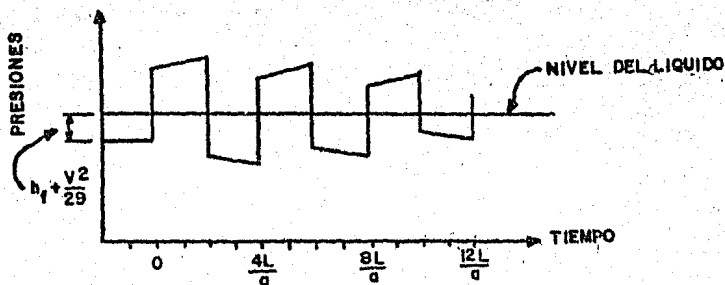


FIG. III. 2.4 VARIACION DE LA PRESION EN LA VALVULA CONSIDERANDO LAS PERDIDAS POR FRICCION

III.3. CAUSAS QUE PUEDEN PROVOCAR SOBREPRESIONES EN EL OLEODUCTO.

CAUSAS MAS COMUNES

Como definimos previamente, cuando las condiciones de flujo cambian de un estado a otro, nos estamos refiriendo a un estado transiente. En otras palabras, las condiciones de transiente son iniciadas siempre que las condiciones a regimen permanente sean perturbadas. Esta perturbación pueden ser causadas por cambios (accidentes o planeadas) de velocidad en el flujo debido al ajuste de los instrumentos de control; actividad realizada ya sea manualmente o a través de un controlador; y por los cambios en la entrada o salida del flujo a un sistema.

Los ejemplos más comunes de las causas de un estado transiente, y por ser los más peligrosos que pueden presentarse por las altas y bajas presiones generadas dentro de un sistema son:

- 1) Cambios súbitos en el flujo por Cierre o Abertura de una Válvula.
- 2) Arranque de bombas en un sistema
- 3) Paro programado de 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
- 6) Ruptura de la tubería

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 ines

tabilidad en el sistema. Las condiciones en los cambios de velocidad del líquido provocará un aumento (o disminución) de la presión en el interior de la tubería. Dependiendo de cómo se lleve a cabo el movimiento del cierre (o abertura) de la válvula será la dimensión de las presiones generadas. En algún momento dado, estas presiones pueden exceder a las presiones de diseño del oleoducto, lo cual ocasionará una ruptura sobre la tubería. Como consecuencias pueden originarse desastres tanto sociales, ambientales como económicos. Social porque en la ruptura puede provocarse un siniestro, y si éste se produce en las cercanías de una población; en el cruce de una carretera o en cualquier campamento de cuadrillas en mantenimiento traerá fatales consecuencias. Ambiental por el daño ecológico que se produce en el derrame.

Económico porque deberá de recolectarse el crudo derramado y enviarse a almacenamiento; además, el parar todo un sistema de transporte de hidrocarburos y de esta manera detener la producción en las refinerías por el crudo no suministrado.

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

Por lo general las presiones de diseño del oleoducto se tomará 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 desarrollada en actividades de campo a este respecto o por medio de ecuaciones empíricas obtenidas de bibliografía.

2) El arranque de un sistema de bombeo cuando el oleoducto anteriormente ya ha sido operado, generalmente se hace arrancando la estación de bombeo final y retrocediendo hasta la estación de origen. Como antes habíamos señalado, que en cada estación de bombeo se encuentra una zona de almacenamiento con sus bombas de trasiego; pues éstas mismas nos sirven para suministrar suficiente presión a la succión, con el crudo almacenado, a las bombas de alta capacidad.

Considerando que el oleoducto está presionado, entonces, con el sistema de comunicación entre estaciones se establece el arranque de la siguiente estación (anterior) y así sucesivamente se irán arrancando hasta poner todo el oleoducto en operación.

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

El arranque inicial de un oleoducto lógicamente se desarrolla de atrás hacia adelante.

3) El paro programado del sistema de bombeo por alguna causa o razón, se desarrolla en sentido contrario que el que se lleva a efecto en el arranque de un sistema el cual ya ha estado en operación.

En esto hay que tener especial cuidado en la forma que se desarrolla el paro, ya que esto pudo asemejarse a una falla de potencia de una estación de bombeo, y por consiguiente provocará una caída de presión a la descarga. La dimensión alcanzada por esta caída de presión puede llevarnos a obtener en algunos puntos del oleoducto presiones de vacío, la cual provocará que la tubería esté sujeta al peligro de un colapso, es decir que la tubería se estreche (ver separación de columna en capítulos posteriores).

Por otro lado, además puede haber una similitud con el cierre de una válvula colocada al 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 paseando 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; originándose de esta forma condiciones de flujo no permanente.

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 ac

ccionadores por falla en el suministro de potencia. 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 de fluido a través de la bomba como de la inercia de las partes en movimiento (impulsor). Esta energía usualmente es pequeña comparada con la requerida para mantener las condiciones de flujo a la descarga, siendo entonces reducida la velocidad de rotación de la bomba rápidamente.

Cuando se reduce la velocidad de la bomba, el flujo de 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 formarán ondas de presión en el lado de la descarga, las cuales se reflejarán rápidamente a través del sistema. Las consecuencias que ocurren posteriormente pueden mejor apreciarse en el capítulo VI que nos habla al respecto. A manera de introducirnos al problema podemos decir que para la determinación de las condiciones del transiente en las bombas y la tubería subsecuente a la falla en el accionador tres efectos deben ser considerados, como son: las características de las bombas, la inercia del accionador y el fenómeno del golpe de ariete generado en la tubería.

5) Los cambios en las condiciones de operación en las estaciones de bombeo deben evaluarse ya que al cambiar de un régimen de flujo a otro, provocarán condiciones de inestabilidad en el oleoducto. Por la experiencia se ha podido observar que las condiciones de operación en un sistema de transporte se están cambiando continuamente; ya sea por las necesidades y demanda que se requieren cubrir o por el régimen de producción alcanzado.

6) La ruptura de líneas generalmente son producidas por la abolladura o raspadura de la tubería por acciones externas; éstas suelen ser ejecutadas al realizarse mantenimiento al oleoducto, ya sea haciendo limpieza al corredor de la tubería o por otras causas, con lo cual entran en operación maquinaria pesada; como son tractores, gruas, camiones, etc., los que al estar trabajando pueden accidentalmente "tocar" la tubería provocando una abolladura o raspadura. Con esto se ha disminuido el espesor de la tubería, y por consiguiente la presión de trabajo en ese punto y como anteriormente señalamos que siempre un oleoducto estará sujeto a condiciones de flujo no permanente, entonces puede provocarse una ruptura en la tubería. Esto también puede aplicarse a una tubería con alta corrosión donde su espesor se ha disminuido.

CAPITULO IV

TEORIA GENERAL DEL ESTADO NO PERMANENTE

Cuando en una tubería circula un líquido las leyes que rigen los cambios de presión y flujo dependen de las condiciones bajo la cual ocurre el movimiento. Si el fluido es considerado incompresible, la Ecuación de Euler a regimen no permanente puede considerarse. Por otro lado, cuando el movimiento varía rápidamente de un instante a otro, los cambios de presión que ocurren dentro de la tubería, hacen que la ecuación de Euler ya no pueda aplicarse. Tales cambios de presión son referidos como el golpe de Ariete por el sonido que acompaña frecuentemente el fenómeno.

SUPOSICIONES

Para obtener las leyes físicas de la teoría de la columna rígida, el efecto de los cambios en el flujo son considerados primero para una tubería de sección uniforme. Es deseable presentar inicialmente la teoría en forma sencilla, suponiendo que:

- 1) El fluido es incompresible
- 2) Las paredes de la tubería son independientes de las presiones generadas.
- 3) La línea permanece llena de líquido todo el tiempo y la presión mínima en el interior está en exceso (arriba) de la presión de vapor del fluido.
- 4) La velocidad del fluido en la dirección x de la tubería (axial) es uniforme sobre la sección transversal.
- 5) La presión es uniforme sobre la sección transversal de la tubería y es igual a la presión en el centro de la línea.
- 6) Las cabezas de velocidad pueden despreciarse (línea de grado hidráulico igual a la línea de grado de energía).

Los problemas complejos en el transporte de líquidos a través de tuberías que involucran esos casos en que el momentum del fluido en movimiento debe estar considerado en el balance de fuerzas como un término significativo. El procedimiento para definir un conjunto de ecuaciones en una secuencia de causa y efecto para un sistema debe ser una labor formidable; por lo tanto, si aplicamos un enfoque sencillo combinado con la comprensión fundamental del problema se podrá obtener su solución.

DERIVACION DE LA ECUACION GENERAL DE MOMENTUM A REGIMEN NO PERMANENTE

TE

Del análisis anterior, es claro que los cambios de velocidad en una tubería son más lentos que el tiempo en que se propaga una onda elástica a través del sistema, entonces la teoría de la columna rígida puede aplicarse. Cuando los efectos elásticos son ignorados, el desarrollo de una ecuación apropiada es relativamente fácil de obtener. La Ecuación resultante es la de flujo unidireccional en estado no permanente. Las ecuaciones en dos o en tres dimensiones no tienen aplicación práctica para el flujo en tuberías, además que el manejo de las ecuaciones resultan demasiado complicado, obteniéndose al final resultados similares, si es que se considera en una sola dirección.

La Ecuación de flujo transiente, conocida como la Ecuación de Euler se deriva aplicando la segunda ley de Newton a un pequeño elemento de volumen (ver Fig. IV.4.A.) considerando una sola dirección de las líneas de corriente.

$$\sum F = m a = m \frac{dv}{dt}$$

IV.4.1.

Sustituyendo las componentes de las fuerzas que actúan sobre el elemento y masa de la Fig. (IV.4.A.) en la ecuación anterior, obtenemos:

$$P \Delta A - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x \right) \Delta A - W \sin \theta - \zeta \Delta x \pi d = \frac{W}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.2.}$$

En donde los primeros términos son las contribuciones de las fuerzas de presión en el elemento, el tercer término es la contribución de acuerdo a su posición del mismo elemento de volumen y el cuarto término son los esfuerzos provocados por un flujo en movimiento a través del elemento de volumen.

Después de algunas manipulaciones algebraicas, obtenemos la Ecuación de Euler unidimensional.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{4 \zeta}{f d} = \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.3.}$$

Expandiendo el elemento de volumen de la tubería a la dimensión total de la sección transversal de la misma e introduciendo la velocidad promedio V tendremos una ecuación más accesible.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{4 \zeta_0}{f D} = \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.4.}$$

Donde D = es el diámetro de la tubería y ζ_0 son los esfuerzos en la pared.

También, la expresión para el esfuerzo ζ no es útil aplicarla directamente, sustituyendo una relación de ζ por el factor de fricción de Darcy - Weisbach f . El resultado de esta sustitución será:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{f}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.5.}$$

aproximadamente una línea recta entre la superficie de líquido del recipiente y la salida de la tubería (despreciando las pérdidas) bajo condiciones de flujo a régimen permanente.

La Ecuación describiendo este flujo se obtiene por la Integración de la Ecuación (IV.4.6.) con respecto a x.

$$\int_L -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dx - \int_L \frac{dz}{dx} dx - \int_L \frac{f}{2gD} V^2 dx = \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}$$

En una tubería horizontal de diámetro constante la integración se hace fácilmente porque $(dz/dx) = \beta$ (pendiente) y V es una función solamente de tiempo.

También supondremos que el valor de f en flujo no permanente es la misma que para la de flujo permanente a una velocidad igual al valor en el instante inicial. El resultado es:

$$\frac{p_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} - \frac{fL}{2gD} V^2 = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.7.}$$

La ecuación diferencial que representa el problema es:

$$H_0 - \frac{p_2}{\rho} - \frac{fL}{2gD} V^2 = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.8.}$$

Desafortunadamente, $(p_2 \text{ y } V)$ son variables, dependientes, de esta manera, requeriremos de otra ecuación.

La segunda ecuación se obtiene con una ecuación de energía a través de la válvula

$$\frac{p_2}{\rho} = K_L \frac{V^2}{2g} \quad \text{IV.4.9.}$$

Donde K_L es el coeficiente de pérdida en la válvula. Sustituyendo esta ecuación en la Ecuación IV.4.8. obtendremos:

$$H_0 - \left(K_L + \frac{fL}{D} \right) \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.10}$$

Si K_L fuera una constante, la integración procedería de inmediato pero, K_L es una función de la abertura de la válvula. Además, complica el problema el hecho que no hay una ecuación directa que relacione K_L al tiempo o a la velocidad. Por consiguiente, la solución a la ecuación diferencial debe ser numéricamente.

La aproximación será escribir la ecuación en forma de diferencias finitas. Con un cierre de válvula específico, el valor de K_L se conocerá en cualquier tiempo y lo supondremos constante sobre cada intervalo de tiempo Δt . Una forma de la ecuación será:

$$V(t + \Delta t) = V(t) + g \frac{\Delta t}{L} \left[H_0 - \left(K_L(t) + \frac{f(t) L}{D} \right) \frac{V^2(t)}{2g} \right]$$

Donde cada una de las variables del lado derecho de la ecuación será evaluada en el tiempo t .

Que desde luego hay un límite de aplicabilidad a su aproximación que puede verse con la Ecuación IV.4.8. Cuando el tiempo de cierre de la válvula es rápido, dv/dt viene a ser totalmente grande y, en el límite, tiende a infinito. De acuerdo a la ecuación IV.4.8., en el límite $B/p \rightarrow \infty$ también. Este es el punto en el cual la teoría de la columna rígida falla para dar resultados aceptables y es necesario establecer la teoría elástica por su dependencia en los problemas individuales y la precisión en el análisis requerido.

El modelo mostrado, se aplicó a un sistema sencillo, pero pueden desarrollarse modelos más complicados tanto como se requiera desde la implementación con uniones de tuberías, tuberías en serie, en paralelo, arreglo de bombas, etc.

Cuando se incluye el disparo de la(s) bomba(s) es necesario agregar las ecuaciones tanto la que relaciona el torque desarrollado por las mismas (par motor - bomba), como la velocidad de rotación, el movimiento de Inercia, la curva característica (cabeza-flujo). Este proceso se podrá apreciar en capítulos posteriores al aplicar la otra teoría.

CONSIDERACION DEL EFECTO DE LAS PERDIDAS POR FRICCION POR CAUSAS MENORES

Si las pérdidas por causas menores (contracción y expansión, etc.) - en arreglo del sistema surten gran efecto sobre los resultados finales, entonces deben tomarse en cuenta e incorporarse en el análisis. Para una sola tubería esto puede hacerse por dos caminos. En el primero método la tubería se divide en tramos y cada porción se establece separadamente con las dos soluciones acopladas en el punto de la pérdida vía una ecuación de energía. El segundo método incluye las pérdidas menores en la ecuación diferencial con el término de fricción. Esto puede hacerse incluyendo en el término de fricción, el factor de fricción o simplemente agregándole un término separado.

Suponiendo que las pérdidas menores pueden representarse como $h_L = K_L (V^2/2g)$, esas dos técnicas dan el siguiente resultado modificando la Ecuación IV.4.7., respectivamente.

$$\frac{P_1}{\rho} - \frac{P_2}{\rho} - \frac{f'L}{2gD} V^2 = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.11.}$$

donde:

$$f' = f + K_L \frac{D}{L} \quad \text{donde } K_L = f_{\text{menores}} \frac{L}{D} \quad \text{IV.4.12.}$$

y

$$\frac{P_1}{\rho} - \frac{P_2}{\rho} - \left(\frac{fL}{D} + K_L \right) \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{IV.4.13.}$$

No es importante usar el método tradicional de longitud equivalente para presentar las pérdidas menores. Esta técnica suma longitudes equivalentes a la longitud de la tubería y el subsecuente aumento de la masa del líquido distorcionando el verdadero comportamiento dinámico del sistema.

Si el arreglo del sistema es complejo, la técnica previa puede aplicarse a los componentes individuales del sistema. El segundo método se recomienda con la técnica del cálculo de F^1 para distribuir las pérdidas menores a lo largo de la tubería. Después de que esto se ha realizado, el análisis proseguirá dependiendo del arreglo.

LIMITACIONES DE LA TEORIA

La teoría de la columna rígida supone que las paredes de la tubería son rígida y que el líquido es incompresible. Consecuentemente, los cambios de presión en la entrada son percibidos inmediatamente en toda la tubería (transmisión de la onda de presión instantáneamente). Considerando el ejemplo de la válvula para los cierres lentos esta teoría proporciona un medio sencillo para determinar las sobrepresiones generadas; es decir con el movimiento lento se generarán menores presiones que las producidas por un movimiento rápido, en la que la teoría elástica da mejores resultados.

IV.2. TEORIA DE LA COLUMNA ELASTICA

Para situaciones en que se presentan cambios súbitos de velocidades y en donde la tubería es de una longitud relativamente grande, las propiedades elásticas de la tubería y del líquido entran en el análisis.

Las ecuaciones de flujo no permanente derivadas anteriormente no pueden ser utilizadas, porque ellas no incluyen los efectos elásticos. Emplearemos el principio de las ecuaciones de momentum y de conservación de masa para desarrollar un conjunto apropiado de ecuaciones que pueden describir el fenómeno.

El flujo no permanente a través de ductos se representan por las ecuaciones dinámicas de momentum y continuidad. Las derivaciones de esas ecuaciones se desarrollan a continuación.

SUPOSICIONES

Las siguientes suposiciones se hacen en la derivación de las ecuaciones.

- 1) El flujo en el ducto se efectúa en una sola dirección (un solo componente en las coordenadas) y la distribución de velocidades es uniforme sobre la sección transversal del conducto.
- 2) Las paredes del conducto y el fluido son linealmente elásticos; es decir, el esfuerzo es proporcional a la tensión. Esto es cierto para la mayoría de los conductos tales como las tuberías de metal y concreto.
- 3) Las fórmulas para calcular las pérdidas por fricción a regimen —

permanente en tuberías son válidas durante el estado no permanente. La validés de esta suposición todavía no ha sido verificada. Calculando la fricción frecuente-dependiente, Zielke ha desarrollado un procedimiento para flujos - laminares e Hiroe propone un procedimiento empírico para flujo turbulento. Por lo tanto, esos procedimientos son demasiado complicados y molestos para - usos generales y no los discutiremos.

DERIVACION DE LAS ECUACIONES GENERALES A REGIMEN NO PERMANENTE

A) ECUACION DINAMICA

Utilizaremos la siguiente notación: Distancia (x), flujo (Q), Velocidad (V), y son consideradas positivas en la dirección corriente abajo (ver Fig. IV.5.A.) y H es la cabeza piezométrica a centro de línea del conducto sobre un nivel de referencia.

Consideremos un elemento horizontal de fluido teniendo una área transversal A y una diferencial de longitud dx, como se muestra en la Fig. IV.5.A. Si la cabeza piezométrica y la velocidad a la distancia x son H y V, entonces sus valores correspondientes en x+ dx será H+ (∂H/∂x) dx y V + (∂V/∂x) dx - - respectivamente. En la dirección x, tres fuerzas actúan sobre el elemento F₁, F₂ y S. Donde F₁ y F₂ son las fuerzas debido a la presión, mientras que S es la fuerza constante debido a fricción. Si ρ es la densidad del fluido, A = el Area de sección transversal, Z = altura del conducto sobre un nivel de referencia, entonces:

$$F_1 = \rho A (H - Z) \tag{IV.5.1}$$

$$F_2 = \rho (H - Z + \frac{\partial H}{\partial x} dx) A \tag{IV.5.2}$$

Si aplicamos la fórmula de Darcy - Weisbach para calcular las pérdidas por fricción entonces el esfuerzo constante será:

$$S = \frac{f}{g} \frac{V^2}{R} \tag{IV.5.3}$$

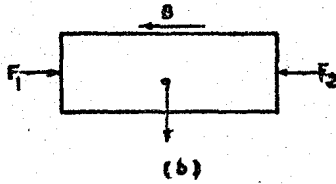
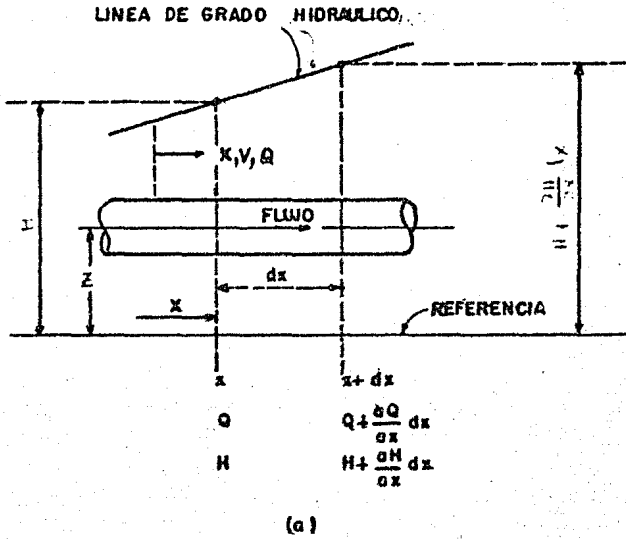


FIG IV.5 A MODELO PARA LA ECUACION DINAMICA

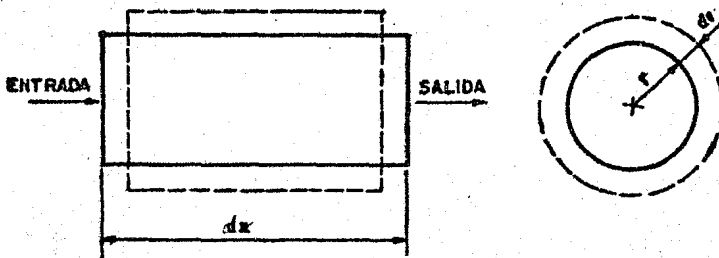


FIG IV.5. B MODELO PARA LA ECUACION DE CONTINUIDAD

Donde, g es la aceleración de la gravedad, f es el factor de fricción y D es el diámetro de la tubería. La fuerza resultante F , actuando sobre el elemento está dado por la ecuación

$$F = F_1 - F_2 - S \tag{IV.5.4.}$$

Sustituyendo, las expresiones para F_1 , F_2 y S de las Ecuaciones (IV.5.1.) hasta la (IV.5.3.) en la Ec. IV.5.4. obtenemos:

$$F = - \int A \frac{\partial H}{\partial x} dx - \frac{f V^2 \pi D}{g} dx \tag{IV.5.5.}$$

De la segunda ley de movimiento de Newton (una expresión de esta ley es la Ecuación de Movimiento, que establece que un pequeño elemento de volumen que se mueve con el fluido es acelerado por las fuerzas que actúan sobre él). Vemos, que el Balance de cantidad de movimiento es totalmente equivalente a la segunda ley.

$$\text{Fuerza} = \text{Masa} * \text{Aceleración} \tag{IV.5.6.}$$

Para el elemento de fluido considerado:

$$\text{Masa del elemento} = \frac{f}{g} A dx \tag{IV.5.7.}$$

$$\text{Aceleración del elemento} = \frac{dv}{dt}$$

Sustituyendo (IV.5.7.) y (IV.5.6.) en (IV.5.6.) y dividiendo por $fA dx$ obtenemos:

$$\frac{dv}{dt} = - g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{f V^2}{2D} \tag{IV.5.8.}$$

De la definición de una derivada total:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} \tag{IV.5.9.A.}$$

6 de la derivada substancial

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{IV.5.9.B.}$$

Sustituyendo la Ec. (IV.5.9.B.) en la Ec. (IV.5.8.) y reorganizándolas, obtendremos:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V^2}{2D} = \phi \quad \text{IV.5.10}$$

En la mayoría de los problemas de transiente, el término $V (\partial V / \partial x)$ es más pequeño que el término $\partial V / \partial t$. Por consiguiente, este puede despreciarse. Para evaluar el retroceso de flujo, la expresión V^2 en la Ec. (IV.5.10.) debe escribirse como $V/|V|$, en el que $|V|$ es el valor absoluto de V . Rearreglando la ecuación IV.5.10. en términos de flujo, Q obtenemos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q / |Q| = \phi \quad \text{IV.5.11.}$$

En las Ecs. (IV.5.3.) (IV.5.5.) (IV.5.8.) (IV.5.10.) y (IV.5.11.), la fórmula de Darcy-Weisbach se ha utilizado para calcular las pérdidas por - - fricción.

B) ECUACION DE CONTINUIDAD

1) CONSIDERACION EN UN ELEMENTO DE VOLUMEN

Consideramos el elemento de volumen mostrado en la figura (IV.5.B.).

El volumen del fluido que entra V_{in} y el que sale V_{out} durante una diferencial de tiempo dt es:

$$V_{IN} = V \pi r^2 dt \quad \text{IV.5.12.}$$

$$= \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} dx \right) \pi r^2 dt \quad \text{IV.5.13.}$$

Donde r = radio de la tubería. El aumento en el volumen del fluido, dV_{IN} durante el tiempo dt es:

$$\begin{aligned} dV_{IN} &= V_{IN} - V_{OUT} \\ &= -\frac{\partial V}{\partial x} dx dt \pi r^2 \end{aligned} \quad \text{IV.5.14.}$$

El cambio de presión, dP , durante la diferencial de tiempo dt es --
($\partial p / \partial t$) dt .

Este cambio de presión causará la expansión o contracción radial de -- las paredes del conducto y que el elemento de fluido aumente o disminuya debido a la compresibilidad del fluido (ver. Fig. IV.5.b.).

Consideremos primero el cambio de volumen dV_r , debido a la expansión radial o concentración del conducto. Para simplificar la derivación, estaremos despreciando las elongaciones o contracciones del elemento de fluido debido a los efectos de la relación de Poisson. Si se interesa en la Ec. de continuidad incluyendo esos efectos vea la referencia No. 7.

El esfuerzo radial (σ) debido a la presión en el ducto está dada por la ecuación

$$\sigma = Pr/e \quad \text{IV.5.15.}$$

Donde e = espesor de la pared del conducto. Por lo tanto, los cambios en el esfuerzo radial, $d\sigma$, causado por una dP deben expresarse como:

$$d\sigma = dP \frac{r}{e} = \frac{\partial P}{\partial t} dt \frac{r}{e} \quad \text{IV.5.16.}$$

Donde el radio r se ha incrementado a $r + dr$, el cambio en la deformación será:

$$d\epsilon = \frac{dr}{r} \quad \text{IV.5.17.}$$

Si las paredes del conducto se suponen una elasticidad lineal, entonces:

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad \text{IV.5.18.}$$

Donde, E = es el módulo de elasticidad de Young's. Sustituyendo la expresión para $d\sigma$ y $d\epsilon$ de las Ecs. IV.5.16. y IV.5.17. en la Ec. IV.5.18. obtenemos:

$$E = \frac{(\partial p / \partial t) dt (r/e)}{dr/r} \quad \text{IV.5.19.}$$

6

$$dr = \frac{\partial p}{\partial t} \frac{r^2}{eE} dt \quad \text{IV.5.20.}$$

El cambio en el elemento de volumen debido a la expansión radial o con tracción del conducto es:

$$dv_r = 2\pi r \, dx dr \quad \text{IV.5.21.}$$

Sustituyendo para dr de la Ec. IX.5.20. obtenemos:

$$dv_r = 2\pi \frac{\partial p}{\partial t} \frac{r^3}{eE} dt dx \quad \text{IV.5.22.}$$

Ahora derivaremos una expresión para los cambios en volumen, dV , debidos a la compresibilidad del fluido.

CAMBIOS DE VOLUMEN DEL LIQUIDO

El volumen inicial del elemento del fluido es:

$$V = \pi r^2 dx \quad \text{IV.5.23.}$$

Por el aumento de presión durante el viaje de la onda (de presión), - el volumen de líquido en la sección se comprimirá ligeramente a una densidad mayor. La ecuación que describe esta relación está definida por el módulo de elasticidad, el cual puede encontrarse en cualquier texto de mecánica de fluidos.

$$K = - \frac{dP}{\frac{dV}{V}} \quad \text{IV.5.24.}$$

donde

K = módulo de elasticidad de líquido y P y V es la presión y volumen, respectivamente. Podemos hacer que $dP \approx \Delta P$ (K es relativamente constante sobre un amplio rango de presión), entonces la Ecuación será:

$$dV = -\Delta P \frac{dA}{K} \quad \text{IV.5.25.}$$

Donde dV es el cambio de volumen de líquido en la sección de la tubería dL como resultado de un cambio de presión ΔP .

3) CAMBIOS DE VOLUMEN DE LA TUBERIA

Por los aumentos de presión en la tubería, ésta se expande, por lo tanto, hay más espacio disponible para almacenar masa de líquido. Cuando la tubería se expande radialmente también debe expandirse axialmente así, ambos, contribuyen en el cambio de volumen de la tubería que serán evaluados.

Antes de comenzar, es importante recordar que hay una interconexión o relación entre el esfuerzo de las paredes de la tubería en dos direcciones — perpendiculares. Si un material de tensiona; en una dirección, una cantidad ϵ_1 , entonces una tensión ϵ_2 ocurrirá en la dirección perpendicular (tal que -

el material está libre de tensión sin desarrollar esfuerzos en esa dirección), así que $\epsilon_2 = \mu \epsilon_1$, donde μ es la relación de Poisson. Si hay una restricción - para la tensión en cualquier dirección causada por una limitante o por un esfuerzo aplicado, la relación es más complicada. En algunos casos, Timoshenko aplica para tuberías de paredes delgadas:

$$\sigma_1 = \frac{\epsilon_1 + \mu \epsilon_2}{1 - \mu^2} E \quad \text{o} \quad \epsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \mu \sigma_2) \quad \text{IV.5.2.6a.}$$

$$\sigma_2 = \frac{\epsilon_2 + \mu \epsilon_1}{1 - \mu^2} E \quad \text{o} \quad \epsilon_2 = \frac{1}{E} (\sigma_2 - \mu \sigma_1) \quad \text{IV.5.2.6b.}$$

Donde σ_1 y ϵ_1 son el esfuerzo y la tensión, respectivamente, en la dirección paralela al eje de la tubería (axial) y σ_2 y ϵ_2 son los valores en la dirección circunferencial (radial). E es el módulo de elasticidad del material de la tubería.

En el caso de las ondas del golpe de Ariete, hay generalmente esfuerzo y tensión residentes en la tubería antes del paso de la onda. Por lo tanto, escribiremos las ecuaciones anteriores en forma incrementada.

$$\Delta \sigma_1 = \frac{\Delta \epsilon_1 + \mu \Delta \epsilon_2}{1 - \mu^2} E \quad \text{o} \quad \Delta \epsilon_1 = \frac{1}{E} (\Delta \sigma_1 - \mu \Delta \sigma_2) \quad \text{IV.5.27.a.}$$

$$\Delta \sigma_2 = \frac{\Delta \epsilon_2 + \mu \Delta \epsilon_1}{1 - \mu^2} E \quad \text{o} \quad \Delta \epsilon_2 = \frac{1}{E} (\Delta \sigma_2 - \mu \Delta \sigma_1) \quad \text{IV.5.27.b.}$$

Los cambios en volumen por estrechamiento radial son: (de la Ec. IV.

5.21.)

$$dV_c = \pi D \frac{dD}{2} dL$$

donde

$$\pi dD = \pi D \Delta \epsilon_2$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores obtenemos:

$$dV_c = \frac{1}{2} \pi D^2 \Delta \epsilon_2 dL \quad \text{IV.5.28.}$$

Los cambios en el volumen causados por estrechamientos longitudinales son:

$$dV = \frac{\pi D^2}{4} \Delta \epsilon_1 dL$$

Sumando las dos ecuaciones dan el cambio de volumen total

$$dV = \frac{\pi D^2}{2} dL \left(\frac{\Delta \epsilon_1}{2} + \Delta \epsilon_2 \right) \quad \text{IV.5.30.}$$

Los cambios de los esfuerzos circunferenciales en las paredes de la tubería causados por ΔP son:

$$\Delta \sigma_2 = \frac{\Delta P D}{2e}$$

Donde e es el espesor de la pared de la tubería así la Ec. (IV.5.27b) será:

$$\frac{\Delta P D}{2e} = \frac{\Delta \epsilon_2 + \mu \Delta \epsilon_1}{1 - \mu^2} E \quad \text{IV.5.31.}$$

Desafortunadamente, las condiciones de restricción axial de la tubería determinan $\Delta \sigma_1$. Por ejemplo, bajo condiciones estáticas si la tubería fuera ensanchada en algún punto y liberada a las tensiones axiales, el esfuerzo axial sería:

$$\Delta \sigma_1 = \frac{\Delta P D}{4e}$$

Por lo tanto, las condiciones dinámicas de una situación de golpe de Ariete causarían a la tubería a tensionarse axialmente en una forma dinámica donde la inercia es importante. Así, algunas válvulas, accesorios, etc. en adición al peso de la tubería misma, debe ser desplazada por los cambios de presión. La tubería debe sujetarse por soportes. Para determinar el valor de $\Delta \sigma_1$, tendremos que resolver un complejo acoplamiento de ecuaciones relacionando la dinámica del fluido a lo difícil de la dinámica misma.

Se sugiere que la dinámica de la tubería se desprece y la ecuación anterior para $\Delta \sigma_1$ se utilice. Porque este tipo de restricción es rara y por-

que éstas no tienen un impacto excesivo sobre las velocidades de las ondas en las tuberías típicas, no nos interesaremos en fijar propiamente este tipo de restricciones.

Por otro lado, si la tubería fuera sujeta rígidamente para prevenir tensiones axiales entonces $\Delta \sigma_r = 0$ porque $\Delta \epsilon_r = 0$. Si, por lo tanto, la tubería tiene juntas de expansión en toda su longitud, entonces $\Delta \sigma_r = 0$ y $\Delta \epsilon_r$ no tiene importancia. Continuando con Wylie y Streeter, identificaremos los casos anteriores como caso (a), (b) y (c).

En un sentido práctico, las restricciones en la tubería caen entre cualquiera de esos valores.

4) VELOCIDADES DE LA ONDA DEL GOLPE DE ARIETE

En suma, de lo antes descrito, además del módulo de elasticidad del fluido $\left(\frac{1}{K}\right)$, la velocidad de onda del golpe de ariete depende de las propiedades elásticas, como también de las restricciones externas. Las propiedades elásticas incluyen el diámetro del ducto, el espesor de la pared y la elasticidad del material; las restricciones externas incluyen el tipo de soportes y la libertad del ducto para moverse en la dirección axial. El módulo de elasticidad del fluido depende de la temperatura, presión y de la cantidad de gases disueltos. Se ha demostrado que las velocidades de ondas cambian cerca del uno por ciento cada 5°C.

Así de esta manera, podemos escribir en forma convencional la velocidad de onda.

$$a = \frac{[K/\rho]^{1/2}}{[1 + \frac{K}{E} \frac{D}{e} (c)]^{1/2}}$$

IV.5.32.

La velocidad de onda en este trabajo es definida como la velocidad relativa a un observador en reposo con respecto a la tubería más que la velocidad relativa con un observador que se mueve con el fluido.

donde:

$C = 5/4 - \mu$ para el caso de la restricción (a)

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

$C = 1.0$ para el caso de la restricción (c)

K = Módulo de elasticidad del fluido

ρ = Densidad del fluido

E = Módulo de elasticidad del material (young's)

D = Diámetro de la tubería

e = Espesor de la tubería

Indicando que esta ecuación aplica solamente a tuberías de pared delgada donde D/e generalmente es mayor a 40.0

La Tabla IV.1. muestra algunos valores de los módulos de elasticidad de Young's y de la relación de poisson's para materiales

La tabla IV.2. presenta los módulos de elasticidad (K) y densidad de ciertos fluidos.

Por otra parte, para evaluar los esfuerzos axiales en la pared de la tubería antes y después del golpe para los tres casos serán:

Caso (a): Para ensanchamiento de la tubería en cualquier punto y libre a las tensiones axiales:

$$\text{Antes del golpe: } \sigma_2 = \frac{P_i D}{2e}$$

donde P_i = presión en el punto i de la tubería

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sigma_2 \quad \text{asi:} \quad \Delta \sigma_2 = \frac{\Delta P_i D}{2e}, \quad \Delta \sigma_1 = \frac{1}{2} \Delta \sigma_2$$

$$\Delta P = \Delta H \gamma / 144$$

ΔP = aumento de presión en el punto i

Después del golpe.

$$\sigma_2 = \sigma_2 + \Delta \sigma_2 \quad \sigma_1 = \sigma_1 + \Delta \sigma_1$$

Caso (b) si el ensanchamiento de la tubería fuera rígido para prevenir tensiones axiales entonces

Antes del golpe

$$\sigma_2 = \frac{P_i D}{2e} \quad \sigma_1 = \mu \sigma_2$$

Después del golpe

$$\sigma_2 = \sigma_2 + \Delta \sigma_2 \quad \sigma_1 = \mu \sigma_2$$

Caso (c) tubería con juntas de expansión:

Antes del golpe

$$\sigma_2 = \frac{P_i D}{2e} \quad \sigma_1 = \phi$$

$$\Delta \sigma_2 = P_i D / 2e \quad \Delta \sigma_1 = \phi$$

Después del golpe

$$\sigma_2 = \sigma_2 + \Delta \sigma_2 \quad \sigma_1 = \phi$$

Así mismo, puede evaluarse el porcentaje de aumento en el diámetro de

la tubería causado por los aumentos (o disminución) de presión: Para los tres casos tenemos:

$$100 \frac{dD}{D} = 100 \Delta \epsilon_2 = \frac{100}{E} (\Delta \sigma_2 - \mu \Delta \sigma_1)$$

Así

$$\% \text{ cambio} = \frac{100}{E} (\Delta \sigma_2 - \mu \Delta \sigma_1)$$

Para cada caso hay que realizar las combinaciones anteriormente descritas para $\Delta \sigma_2$ y $\Delta \sigma_1$.

TABLA V.1. MODULO DE ELASTICIDAD Y RELACION DE POISSON'S PARA
ALGUNOS MATERIALES DE TUBERIAS

Acero	$E = 30 \times 10^6$ psi	0.30
Fierro moldeado	$E = 24 \times 10^6$ psi	0.28
Cobre	$E = 16 \times 10^6$ psi	0.30
Aluminio	$E = 10.5 \times 10^6$ psi	0.33
PVC	$E = 4 \times 10^5$ psi	0.45
Plástico con fibra de vidrio reforza- do (PFV)	$E_2 = 4.0 \times 10^6$ psi	0.27 - 0.30
	$E_1 = 1.3 \times 10^6$ psi	0.20 - 0.24
Asbesto cemento	$E = 3.4 \times 10^6$ psi	0.30
Concreto	$E = 57,000 f'_c$	0.30

donde $f'_c = 28$ días de esfuerzo.

TABLA V.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD DE LÍQUIDOS COMUNES A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Líquidos	Temperatura (°C)	Densidad (LB/FT ³)	Módulo de Elasticidad (PSI) * 10 ⁻³
Benceno	15	54.93	152.290
Alcohol etílico	0	49.32	191.45
Glicerina	15	78.66	642.52
Keroseno	20	50.19	191.45
Crudo (petróleo)	15	56.18	217.56
Agua	20	62.36	317.63
Agua de mar	15	63.99	329.23

5) OBTENCIÓN DE LA ECUACION DE CONTINUIDAD

Del módulo de elasticidad de un fluido, $(\frac{1}{K})$, y sustituyendo para V - de la Ec. IV.5.23. y notando que $dP = \frac{\partial p}{\partial t} dt$, la Ec. IV.5.24. viene a ser:

$$dVc = \frac{\partial p}{\partial t} \frac{dt}{K} r^2 dx \quad \text{IV.5.33.}$$

Si suponemos que la densidad del fluido permanece constante, entonces, siguiendo la Ley de la conservación de masa:

$$dVin + dVc = dVr \quad \text{IV.5.34.}$$

Sustituyendo las expresiones para dVin, dVc y dVr de las Ecs. IV.5.14., IV.5.22 y IV.5.33 en la ecuación anterior y dividiendo por $\pi r^2 dx dt$ obtenemos:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial r}{\partial E} \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{IV.5.35.}$$

6

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} \left(\frac{\partial r}{\partial E} + \frac{1}{K} \right) = \phi \quad \text{IV.5.36.}$$

Y de la definición de a (velocidad de onda), Ec. (IV.5.32.), recordando que $P = \rho g H$, reorganizando los términos, y sustituyendo $Q = VA$, la Ec. IV.5.

36. viene a ser:

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = \phi \quad \text{IV.5.37.}$$

PANORAMA GENERAL DE LAS ECUACIONES DINAMICA Y DE CONTINUIDAD

La Ecuación dinámica (IV.5.11.) y la Ecuación de continuidad (IV.5.37.) son un conjunto de Ecuaciones diferenciales parciales de primer orden. En esas ecuaciones, hay dos variables independientes x y t y dos variables dependientes Q y H. Otras variables, A y D, son características del sistema y no

varían con el tiempo. Aunque, la velocidad de onda a , depende de las características del sistema, pruebas de laboratorio muestran que significativamente se reduce cuando disminuye la presión, aun cuando ésta permanece arriba de la presión de vapor. El factor de fricción varía con el número de Reynolds. Por lo tanto f se considera constante porque los efectos de tales variaciones en las condiciones del estado transiente son despreciables.

Las discusiones acerca del tipo de Ecuaciones de la IV.5.11. y IV.5.37. se determinará a continuación.

Donde los términos no lineales en las Ecuaciones IV.5.11. y IV.5.37. involucran sólo la primera potencia de las derivadas, las ecuaciones son llamadas cuasi - lineal. Esas ecuaciones deben además ser clasificadas como, elípticas, hiperbólicas o parabólicas como sigue:

Las Ecuaciones IV.5.11. y IV.5.37. expresadas en forma matricial tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = - [B(Q, H)] \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} - [G(Q, H)]$$

Donde

$$B = \begin{bmatrix} \phi & gA \\ \frac{a^2}{gA} & \phi \end{bmatrix} \quad \text{IV.5.38.}$$

y

$$G = \begin{bmatrix} \frac{f(Q,Q)}{2gA} \\ \phi \end{bmatrix} \quad \text{IV.5.39.}$$

El eigenvalor, λ , de la matriz B determina el tipo de conjunto de ecuaciones.

La Ecuación característica de la matriz B es:

$$\lambda^2 - a^2 = \phi \quad \text{IV.5.40.}$$

Por lo tanto

$$\lambda = \pm a$$

IV.5.41.

Donde \underline{a} es real, ambos eigenvalores son reales y distintos, y por consiguiente la Ec. (IV.5.11.) y IV.5.37. forman un conjunto de Ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas.

CAPITULO V

**METODO DE SOLUCION A LAS ECUACIONES DE LA TEORIA
ELASTICA**

Los detalles del METODO DE LAS CARACTERISTICAS se analizarán en esta sección. Se derivarán las ecuaciones que predigan el comportamiento de un transiente en una tubería por la teoría de la columna elástica (golpe de Ariete) y se desarrollarán las condiciones a la frontera (límites) para algunos sistemas simples bajo condiciones que puedan crear efectos de inestabilidad (perturbación) en el oleoducto.

Se presentarán los criterios de convergencias y estabilidad para alcanzar la solución por el método de diferencias finitas, y un procedimiento para el análisis de los sistemas de transporte de líquidos.

Trataremos de eliminar, en la derivación de las ecuaciones para su solución, las matemáticas avanzadas. Teniendo un conocimiento elemental de las ecuaciones diferenciales parciales seremos capaces de seguir el desarrollo de esas ecuaciones.

1) SOLUCION APROXIMADA POR EL METODO DE LAS CARACTERISTICAS.

DERIVACION DE LA SOLUCION

Vimos que las ecuaciones de continuidad y de movimiento forman dos - - ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas cuasilineal en términos de dos variables dependientes (velocidad ó flujo y presión ó cabeza) y de dos variables independientes, como son el tiempo y la longitud de la tubería. A partir del método de las características podemos transformar estas dos ecuaciones diferenciales parciales en cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias.

En vista de que no estamos familiarizados con este método de transfor

mación como una técnica de solución, vemos adecuado aplicar el método utilizando la versión de aproximaciones a las ecuaciones totales (IV.5.10) y (IV.5.37). En forma simplificada serían las ecuaciones (IV.5.11.) y (IV.5.37.). Las ecuaciones simplificadas se obtienen por la eliminación del término de la variación espacial de V y P siempre que los términos espacial y el tiempo aparecen en la misma ecuación, porque en general, la variación espacial es mucho menor que la variación con respecto al tiempo (es decir el término $V \partial V / \partial x$ ó $Q \partial Q / \partial x$, esto se aplica a tuberías de paredes relativamente poco rígidas).

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

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q/Q = \phi \quad \text{V.2.1.}$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + g A \frac{\partial H}{\partial t} = \phi \quad \text{V.2.2.}$$

Como los problemas en las tuberías por golpe de Ariete se analizan desde el punto de vista de velocidades y presiones o cabezas, es conveniente desarrollar toda la teoría en función de estas variables. De esta manera las ecuaciones V.2.1. y V.2.2. expresadas en estas últimas variables serán:

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} V/V = \phi \quad \text{V.2.3.}$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = \phi \quad \text{V.2.4.}$$

Estas ecuaciones son combinadas linealmente usando un multiplicador λ , de la siguiente manera:

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad \text{V.2.5.}$$

o en forma global:

$$L = \lambda \left[\frac{\partial H}{\partial x} \frac{g}{\lambda} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[\frac{\partial V}{\partial x} \frac{\lambda a^2}{g} + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + \frac{f}{2D} V/V = \phi \quad \text{V.2.5.A.}$$

Si $H = H(x, t)$ y $V = V(x, t)$ son soluciones de las ecuaciones (V.2.3.) y (V.2.4.) entonces las derivadas totales deben expresarse como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{V.2.6.}$$

y

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{V.2.7.}$$

Nótese que estas ecuaciones vienen de la definición que un observador se mueve con el fluido 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, examinando la ecuación (V.2.5.A.) y las ecuaciones (V.2.6.) y (V.2.7.) podemos notar que si definimos el multiplicador λ como:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \lambda \frac{a^2}{g} \quad \text{V.2.8.}$$

La ecuación (V.2.5.A.) vendrá a ser una ecuación diferencial ordinaria con esta definición y utilizando las expresiones de las ecuaciones (V.2.6.) y (V.2.7.) obtenemos:

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV}{2D} \quad \text{V.2.9.}$$

La solución de la ecuación (IIV.2.8.) produce dos valores particulares de:

$$\lambda \frac{a^2}{g} = \frac{g}{\lambda} ; \quad \lambda^2 a^2 = g^2 \Rightarrow \lambda^2 = \frac{g^2}{a^2}$$

En donde

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad \text{V.2.10}$$

Sustituyendo esos valores de λ en la ecuación V.2.8., la manera particular en que x y t se relacionan es:

$$\frac{dx}{dt} = \pm \frac{g}{g/a} = \pm a \quad \text{V.2.11.}$$

Esto muestra los cambios en posición de una onda relacionada a los cambios en el tiempo por la velocidad de propagación de la onda \underline{a} . Cuando el valor positivo de λ se utiliza en la ecuación V.2.8. el valor positivo de λ debe utilizarse en la ecuación V.2.9., entonces:

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V/V = \emptyset$$

6

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V/V = \emptyset \quad \text{V.2.12.}$$

Si:

$$\frac{dx}{dt} = a \quad \text{V.2.13.}$$

De manera similar para un valor negativo de λ . La sustitución de ese valor λ en la ecuación V.2.9. nos producirá:

$$-\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V/V = \emptyset$$

6

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V/V = \emptyset \quad \text{V.2.14.}$$

Si

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad \text{V.2.15.}$$

El hecho que la relación entre x y t en la ecuación (V.2.12.) debe satisfacer la (V.2.13.), esto ha provocado que se le conozca como la ecuación característica de la (V.2.12.). Siguiendo un razonamiento similar para las

ecuaciones (V.2.14.) y (V.2.15.), así la (V.2.15.) es la ecuación característica de la (V.2.14.).

Entonces, siendo que la ecuación (V.2.12.) es válida si la (V.2.13.) - se satisface y al igual que la ecuación (V.2.14.) es válida si la (V.2.15.) se satisface por las restricciones dadas por las ecuaciones (V.2.13.) y (IV.2.15.) hemos transformado las ecuaciones diferenciales parciales en diferenciales ordinarias en la variable independiente tiempo (t).

Porque las ecuaciones (V.2.12.) y (V.2.14.) aplican solamente a lo largo de la característica apropiada, es más fácilmente ver la situación gráficamente. Esto se hace dibujando en el plano coordinado para las variables independientes $x-t$.

Como a generalmente es constante para una tubería, la ecuación (V.2.13.) se grafica como una línea recta en el plano $x-t$ y de igual forma la ecuación (V.2.15.), ambos presentan dos líneas rectas de pendientes $\pm a$. Matemáticamente, esas líneas dividen el plano $x-t$ en dos regiones, la cual debe ser el 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. Una perturbación puede ser causada por el cierre de una válvula. Por ejemplo, una perturbación en el punto A (fig. V.1.) alcanzará al punto P después de un incremento de tiempo (Δt). Las líneas trazadas en el plano $x-t$ se llaman las líneas características, siendo la línea característica p con pendiente positiva referida como la línea C^+ y la de pendiente negativa referida como la línea C^- .

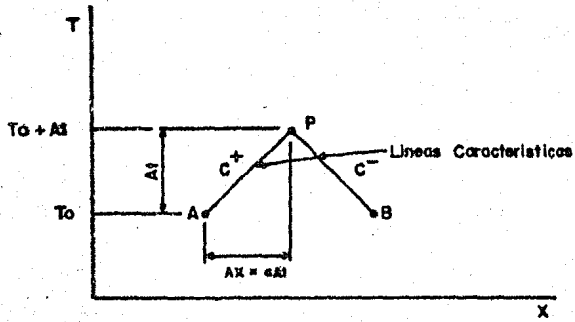


FIG V.1 Líneas características en el plano X-T

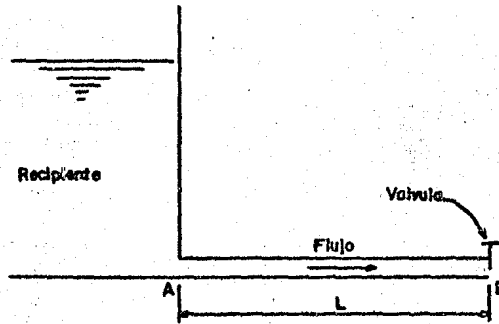


FIG.V.2 Representación sencilla para el fenómeno

Antes de presentar un procedimiento para resolver las ecuaciones V.2.12. y V.2.14., primero se analizará el significado físico de las líneas características en el plano $x-t$. Para facilitar el análisis consideraremos una sola tubería mostrada en la Fig. V.2.

Las ecuaciones V.2.12. y V.2.14. son válidas a lo largo de la tubería (es decir; para $0 < x < L$) y en los extremos se requieren condiciones límites especiales (es decir; en $x = 0$ y en $x = L$) Fig. V. 3. En el ejemplo bajo consideración, hay una cabeza constante en el tanque en el extremo superior, es decir; en $x = 0$ y otro valor en el extremo inferior (en $x = L$), y las condiciones del transiente se producen por el cierre de una válvula. Supondremos que hay flujo permanente en la tubería en el tiempo $t = 0$, cuando la válvula se cierra instantáneamente. Esta reducirá el flujo a cero y el resultado será un aumento de presión en la misma. De este aumento de presión, una onda de presión viajará en la dirección corriente arriba. Si la trayectoria de esta onda se grafica en el plano $x-t$, sería representada por la línea BP mostrada en la Fig. V.4. Es claro que las condiciones en la región I depende solamente en las condiciones iniciales porque las condiciones límites en la corriente arriba no cambiarán, mientras que en la región II dependen de las condiciones impuestas por las condiciones corriente abajo. Entonces, la línea característica BP separa los 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 Fig. V.5., la línea característica AC separa las regiones influenciadas por las condiciones corriente arriba y las iniciales, y la línea BC separa las regiones influenciadas por las condiciones corriente abajo e iniciales. En otras palabras, las líneas características en el plano $x-t$ representan la trayectoria de las perturbaciones iniciadas en varios lugares (puntos o localizaciones) en el sistema.

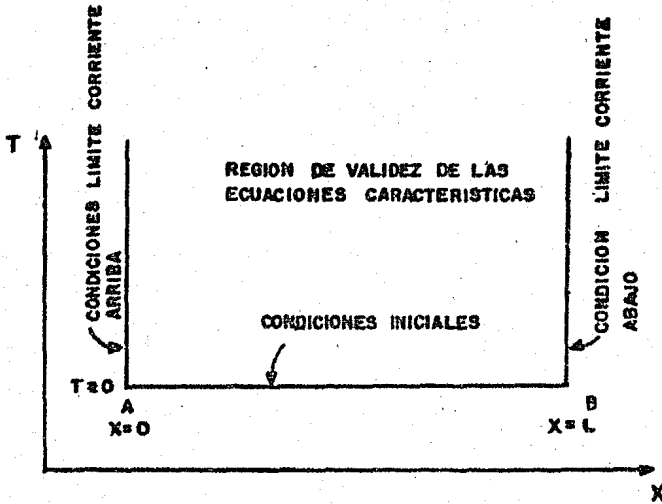


FIG. V.3 REGION VALIDA DEL METODO DE LAS CARACTERISTICAS

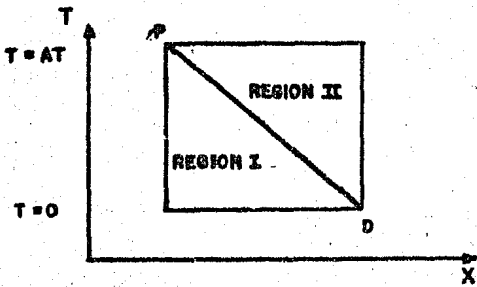


FIG. V.4 EXCITACION EN EL LIMITE CORRIENTE ABAJO

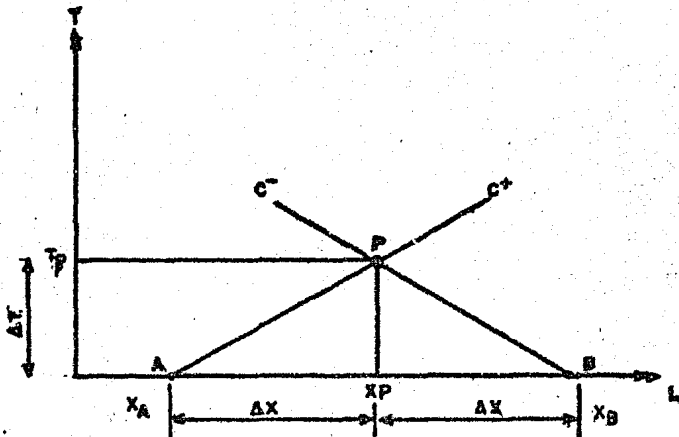
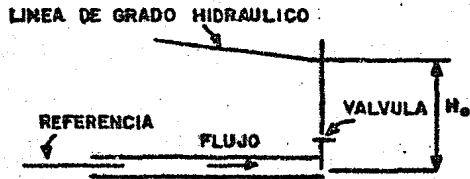
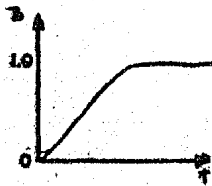


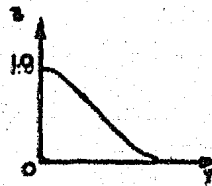
FIG. 5.5 EL PLANO X vs T QUE MUESTRA LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES CARACTERISTICAS.



(a)



(b) ABERTURA



(c) CIERRE

FIG. 5.8 VALVULA COLOCADA CORRIENTE ABAJO

Para resolver las Ecs. V.2.12. hasta V.2.15., varios esquemas por diferencias finitas se han propuestos: Streeter, Wylie, usan una técnica de primer orden; Evangelisti sugiere un método corrector predictor; y Lister emplea ambos esquemas en primer y segundo orden por diferencias finitas. Porque los intervalos de tiempo usados en la resolución de esas ecuaciones para problemas prácticos son generalmente pequeños, una técnica de primer orden su gerida por Streeter y Wylie es suficientemente precisa y es discutida aquí. Por otra parte, si las pérdidas por fricción son grandes, entonces una aproximación por primer orden deben producir resultados inestables. Para esos casos, un método de corrector predictor o una aproximación de segundo orden se utiliza para evitar inestabilidad a la solución por diferencias finitas.

Refiriéndonos a la Fig. V.1., las condiciones en el tiempo $t = t_0$ se conocen (por ej. en $t = \beta$ esas son las condiciones iniciales a régimen permanente o han sido calculadas para un incremento de tiempo anterior (o previo).

SOLUCION NUMERICA POR DIFERENCIAS FINITAS

Si una tubería se divide en N tramos iguales, cada Δx es un incremento en longitud como se muestra en la fig. (V.2.). Un incremento de tiempo se calcula como, $\Delta t = \Delta x/a$ y la ecuación (V.2.13.) se satisface por una pendiente positiva de la malla, representada por la línea característica H-P. Si las variables dependientes V y H son conocidas en el punto A, entonces la ecuación (V.2.12.), la cual es válida a lo largo de la línea característica C^+ , puede integrarse entre los límites A y P y de este modo expresarla en términos de las variables dependientes V y H en el punto P.

La ecuación (V.2.14.) se satisface por una pendiente negativa de la malla, mostrada por la línea B-P. La integración de la ecuación característica \bar{C} (V.2.14.) a lo largo de B-P, con condiciones conocidas en el punto B y no conocidas en el punto P, nos llevan a una segunda ecuación en términos de las mismas variables (V y H) en el punto P.

Una solución simultánea nos producirá condiciones en el tiempo y posición en el plano x-t en el punto P.

Las ecuaciones diferenciales ordinarias pueden ser ahora expresadas en forma de diferencias finitas.

Así la ecuación (V.2.12.) será:

$$\frac{V_p - V_A}{t_p - t_A} + \frac{g}{a} \frac{H_p - H_A}{t_p - t_A} + \frac{f}{2D} \frac{V_A}{V_A} = 0 \quad \text{V.2.16.}$$

Y la ecuación (V.2.14.):

$$\frac{V_p - V_B}{t_p - t_B} - \frac{g}{a} \frac{H_p - H_B}{t_p - t_B} + \frac{f}{2D} \frac{V_B}{V_B} = 0 \quad \text{V.2.17.}$$

Considerando a la velocidad de la onda (a) constante a lo largo de la tubería, cada una de las ecuaciones características puede ser integrada para dar:

$$\Delta x = a \Delta t \quad \text{V.2.18.}$$

De esta manera, las ecuaciones (V.2.16.) y (V.2.17.) pueden expresarse como:

Para C^+ :

$$(V_p - V_A) + \frac{g}{a} (H_p - H_A) + \frac{f}{2D} \Delta t \quad V_A/V_A = \phi \quad \text{V.2.19.}$$

Y para C^- :

$$(V_p - V_B) - \frac{a}{g} (H_p - H_B) + \frac{f}{2D} \Delta t \quad V_B/V_B = \phi \quad \text{V.2.20.}$$

Una cuestión interesante se presenta en la integración del término de fricción en ambas ecuaciones (V.2.12.) y (V.2.14.). Si tenemos en forma general que:

$$\frac{f}{2D} V/V/dt$$

Y para poder integrar este término a lo largo de sus condiciones de aplicación (A-P) y (B-P) podemos realizar una integración aproximada. Una aproximación de primer orden es satisfactoria para aplicarse en muchos problemas.

En esta aproximación se considera constante a la variación de la fricción (f) con respecto a la velocidad. Cuando el término de fricción es importante, como se discutirá más adelante, esta aproximación ya no es válida.

De aquí que la aproximación nos quedaría de la siguiente forma:

Aplicada para C^+ : en forma de función.

$$\int_{t_A}^{t_P} f(V) dt \approx f(V_A) (t_P - t_A) = f(V_A) \Delta t$$

Así que, ya aplicada sería:

$$\frac{f}{2D} V/V/dt \approx \frac{f}{2D} V_A/V_A/\Delta t$$

De igual manera puede aproximarse para la ecuación característica C^- .

De las ecuaciones (V.2.19.) y (V.2.20.) tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas H_P y V_P , hay que resolverlas simultáneamente para conocer los valores V y H en el punto P , siendo que ya conocemos los valores en una etapa anterior (puntos A y B).

Esas dos ecuaciones relacionadas algebraicamente, describen la propagación transiente de la presión y flujo en la tubería. De aquí, que, despejando H_P de las ecuaciones (V.2.19.) y (V.2.20.) obtenemos:

Para C^+ :

$$H_P = H_A - \frac{a}{g} (V_P - V_A) - \frac{a}{g} f \frac{\Delta t}{2D} V_A/V_A \quad \text{V.2.21.}$$

Para C^- :

$$H_P = H_B + \frac{a}{g} (V_P - V_B) + \frac{a}{g} f \frac{\Delta t}{2D} V_B/V_B \quad \text{V.2.22.}$$

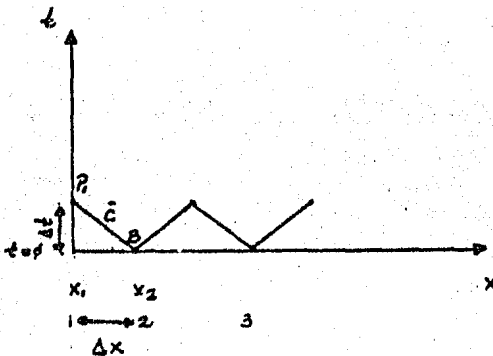
Ya que dividimos la tubería en N secciones, entonces cada sección será $\Delta X = L/N$. Ahora, como ΔX es fijo, Δt puede calcularse de la ecuación - -

(V.2.18.). Por lo tanto, es posible construir una malla característica como se muestra en la fig. (V.6.).

Los puntos de la malla a lo largo de la abscisa x representa puntos - específicos de Δx a lo largo de la tubería y los valores de V y H en esos - puntos sobre la abscisa representan las condiciones iniciales ($t = 0$). Las cuales generalmente están dados a condiciones de flujo a régimen permanente en la tubería. Para alcanzar el punto P_2 de la malla a través de un Δt en la tubería es necesario resolver simultáneamente las ecuaciones (V.2.19.) y (V.2.20.) siendo conocidas las variables V_A, V_B, H_A, H_B, f y D en una etapa anterior ($t = 0$) y de esta forma podemos determinar el punto P_2 en la tubería.

El procedimiento descrito para el punto P_2 puede continuarse hasta - que los valores de V y H en los puntos P_2 hasta P_N sean determinados. Ahora nos queda por calcular los puntos P_1 y P_{N+1} , los valores de V y H en estos - puntos deben determinarse con la ayuda de las condiciones límites.

En $x = 0$ de la tubería, tenemos que solamente puede aplicarse la - ecuación C-6 (V.2.20.), de esta manera debemos de relacionarla con otra ecuación entre los puntos X_1 y X_2 como podemos ver en la figura siguiente:



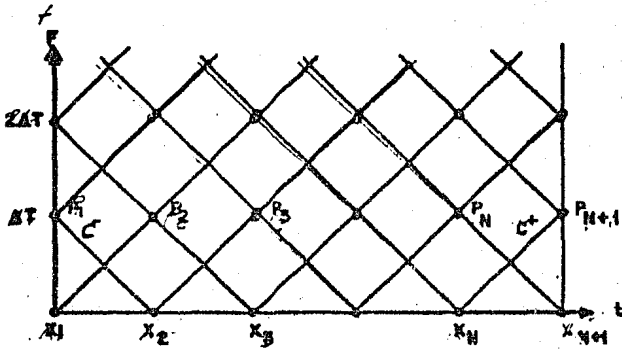


FIG. V. 6 MALLA CARACTERISTICA DE UNA TUBERIA CON UNA VALVULA AL EXTREMO

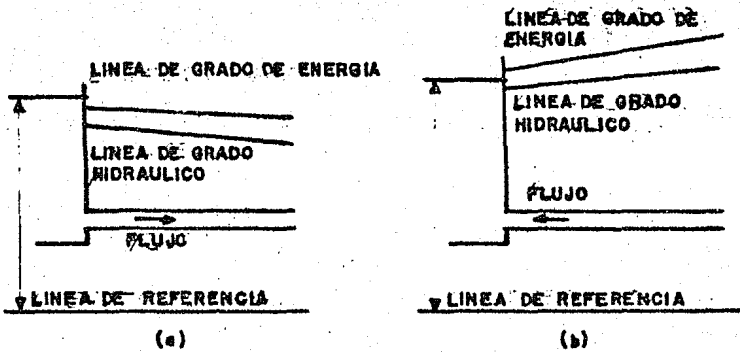
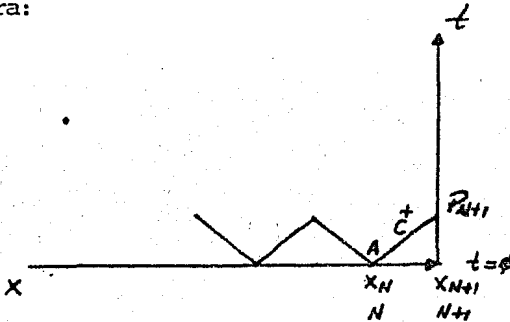


FIG. V. 7 RECIPIENTES A NIVEL CONSTANTE

La condición a la frontera en $x = 0$ debe proporcionar otra ecuación en H_{p1} y/o V_{p1} para resolverlas simultáneamente con la ecuación C^- .

La misma situación y requerimiento existe en $X = L$ de la tubería, - siendo la diferencia de la anterior de aquí se aplica la ecuación C^+ como se muestra en la figura:



En forma general, se puede decir que las condiciones a la frontera - se pueden establecer con H_p conocido (a través de una ecuación) en los nodos 1 ó $N+1$ y calcularse V_p en los nodos 1 ó $N+1$ de acuerdo con la ecuación característica aplicable (C^+ ó C^-) o puede ser al revés, conocerse V_p y determinarse H_p . Hay casos donde necesariamente se involucran H_p y V_p , en estos - casos hay que resolver ambas ecuaciones simultáneamente.

Después que las condiciones a la frontera se han establecido, entonces las cabezas y velocidades en todos los puntos (nodos) de la malla a $t = \Delta t$ pueden calcularse. Los valores obtenidos se utilizan para dar solución a - las ecuaciones para los valores de V y H 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). El resultado es un conjunto de valores de H y V a intervalos discretos de tiempo para los nodos $N + 1$ en la tubería.

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

ESTABLECIMIENTO DE LA SOLUCION NUMERICA

En la sección anterior se han desarrollado las ecuaciones en diferencias finitas, el cual nos permitirá calcular los valores de H y V en las intercepciones de las características C^+ y C^- . Los valores de H y V en los extremos de la tubería fueron determinados usando las condiciones a la frontera. Quedando ahora el establecer un procedimiento para la solución, tal que una técnica computarizada pueda utilizarse.

Observando primero las Ecuaciones V.2.19. y V.2.20. para las intercepciones interiores de la malla, resolveremos esas ecuaciones para V_p y H_p .

$$V_p = \frac{1}{2} \left[(V_A + V_B) + \frac{g}{a} (H_A - H_B) - \frac{f}{2D} \Delta t (V_A/V_A + V_B/V_B) \right] \quad \text{V.2.23.}$$

$$H_p = \frac{1}{2} \left[\frac{a}{g} (V_A - V_B) + (H_A + H_B) - \frac{a}{g} \frac{f}{2D} \Delta t (V_A/V_A - V_B/V_B) \right] \quad \text{V.2.24.}$$

Las condiciones a la frontera en cada extremo de la tubería se ajustan a las condiciones impuestas externamente con velocidades y/o presión. Para entender cómo manejar las condiciones límites, examinaremos algunos casos comunes.

ESTABLECIMIENTO EN 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. Esas son desarrolladas, resolviendo las ecuaciones (V.2.21.) y (V.2.22.) y las condiciones impuestas por los límites. Cabe hacer notar que, cada condición a la frontera resulta independiente de las otras condiciones límites y del cálculo de los puntos interiores.

Condiciones a la frontera sencillas se desarrollan en esta sección, - mientras que condiciones a la frontera más complicadas se derivarán posterior_{mente}.

a) VALVULA COLOCADA CORRIENTE ABAJO

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

$$V_o = (C_d A_v^2)_o \sqrt{2gH_o}$$

El subíndice "o" indica las condiciones a regimen permanente, C_d es el coeficiente de descarga de la válvula, H_o es la cabeza corriente arriba de la válvula y A_v es el área de abertura de la válvula.

Una ecuación similar puede aplicarse para el estado transiente como:

$$V_{PN+1} = C_d A_v^2 \sqrt{2g H_{PN+1}}$$

Si dividimos la ecuación a regimen permanente con la ecuación transiente, tomando raíces a ambos lados y definiendo la relación de abertura de la válvula (Z) como:

$$Z = (C_d A_v) / (C_d A_v)_o$$

De aquí obtenemos:

$$V_{PN+1}^2 = (V_o Z)^2 \frac{H_{PN+1}}{H_o} \quad \text{V.3.7.}$$

De esta expresión y con la ecuación (V.2.21.) podemos obtener las condiciones a la frontera en el punto N+1. Si se desea ver esquemáticamente la

colocación de la válvula pueden referirse a las fig. (V.2.) y (V.8.).

Otra manera de obtener las condiciones límites es que la variación de la velocidad en la válvula fuese conocido y que una expresión para H pueda hallarse. Suponiendo que la válvula se cierra de una manera en la cual provoque la reducción de la velocidad en una forma lineal desde V_0 hasta cero en T_c segundos (tiempo de cierre).

La ecuación para V_{pN+1} será:

$$V_{pN+1} = V_0 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right), \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (V.3.8a.)$$

Y

$$V_{pN+1} = 0, \quad t \geq t_c \quad (V.3.8b.)$$

La ecuación para H_{pN+1} será, resolviendo simultáneamente las ecuaciones (V.2.21.) y (V.3.8a. y b):

$$H_{pN+1} = H_N - \frac{a}{g} (V_{pN+1} - V_N) - \frac{a}{g} \frac{f}{2D} \Delta t \frac{V_N}{V_N} \quad (V.3.9.)$$

Valida para cualquier valor de V_{pN+1} (incluyendo cero). Más adelante volveremos a referirnos a esta situación.

b) CONDICION PARA UNA BOMBA DE VELOCIDAD CONSTANTE

Esta condición a la frontera ofrece la complejidad adicional de una condición límite conteniendo a H y V. Esta ecuación de condición debe resolverse simultáneamente con la ecuación C⁻ (V.2.22.) para obtener el valor de $H=1$ y V_{p1} . De igual manera cuando obtuvimos el punto P de la malla.

Supondremos que la cabeza HP de la bomba puede ser representada adecuadamente por una ecuación cuadrática en el flujo.

$$H_p = A Q^2 + B Q + C$$

Donde Q es el flujo a través de la bomba. Las Q's de esta ecuación pueden reemplazarse por V_{p1} y el aumento de la cabeza H_p puede sumarse al valor suministrado por la altura de succión de la bomba (caso donde la bomba succiona de un recipiente muy cercano) para dar el valor de H_{p1} . La ecuación modificada de la bomba puede expresarse como:

$$H_{p1} = A V_{p1}^2 + B V_{p1} + C \quad (V.3.10.)$$

Donde el valor de la C incluye el valor de la altura de succión. Es importante puntualizar que esta curva es siempre concava hacia abajo y con una pendiente disminuyendo con el aumento del flujo, entonces $A < 0$, $B < 0$ y $C > 0$. Esos signos serán utilizados para desarrollar el procedimiento computacional. Cuando la ecuación (V.3.10.) se resuelve simultáneamente con la Ecuación C' - (V.2.22.), la eliminación de H_{p1} da:

$$V_{p1} - V_2 - \frac{g}{a} (A V_{p1}^2 + B V_{p1} + C) = \frac{g}{a} H_2 - f \frac{\Delta L}{2D} \frac{V_2^2}{V_2} - \phi$$

Rearreglando, obtenemos:

$$\frac{g}{a} A V_{p1}^2 + \left(\frac{g}{a} B - 1 \right) V_{p1} + (V_2 + \frac{g}{a} C + \frac{g}{a} H_2 - f \frac{\Delta L}{2D} \frac{V_2^2}{V_2}) = \phi \quad (V.3.11.)$$

Como vemos, aquí también se obtiene una ecuación cuadrática en V_{p1} . La manera de llegar a la solución se alcanza utilizando la fórmula para resolver la ecuación cuadrática, y de aquí V_{p1} puede calcularse.

Sustituyendo el valor obtenido de V_{p1} en la ecuación (V.3.10.) obten^{dr}emos el valor de H_{p1} .

Como un detalle adicional, es interesante notar que si una válvula - check fuera instalada a la descarga de la bomba, tendríamos que checar el -- signo de V_{p1} . Si V_{p1} fuera negativo (flujo inverso), cambiaríamos a $V_{p1} = -\beta$ y calcularíamos H_{p1} de la ecuación (V.2.22.), y no de la (V.3.10.) (bomba -- fuera de operación y por lo tanto la válvula check pasaría a ser la condición límite).

TRANSFORMACION DE LAS ECUACIONES DEL MODELO A EXPRESIONES PARA UN PRO^{CE}DIMIENTO COMPUTACIONAL.

El enfoque para resolver el problema que estamos utilizando es relati^{va}mente fácil pasarlo a expresiones que puedan interpretarse en un lenguaje - de computadora. Si una tubería se divide en N secciones, los nodos entre las secciones pueden ser enumeradas secuencialmente desde 1 a N+1 comenzando con el extremo $x = \beta$, e igualando los subíndices en nuestras ecuaciones a las va^{ri}bles indicadas en el lenguaje de computadora, se puede expresar las ecuacio^{ne}s (V.2.19.) y (V.2.20.) como:

C^+

$$(V_{p1} - V_{i-1}) + \frac{g}{a} (H_{p1} - H_{i-1}) + \frac{f}{2D} \Delta L V_{i-1} / |V_{i-1}| = \beta \quad (V.3.12.)$$

Y

C^-

$$(V_{p1} - V_{i+1}) - \frac{g}{a} (H_{p1} - H_{i+1}) + \frac{f}{2D} \Delta L V_{i+1} / |V_{i+1}| = \beta \quad (V.3.13.)$$

Las ecuaciones para los valores interiores de V_p y H_p (ecuaciones (V.2.23.) y (V.2.24.)) se expresan como:

$$V_{pi} = \frac{1}{2} \left[(V_{i-1} + V_{i+1}) + \frac{g}{a} (H_{i-1} - H_{i+1}) - \frac{f \Delta t}{2D} (V_{i-1}/V_{i-1} + V_{i+1}/V_{i+1}) \right] \quad (V.3.14.)$$

$$H_{pi} = \frac{1}{2} \left[(H_{i-1} + H_{i+1}) + \frac{a}{g} (V_{i-1} - V_{i+1}) - \frac{f \Delta t}{2D} (V_{i-1}/V_{i-1} - V_{i+1}/V_{i+1}) \right] \quad (V.3.15.)$$

Que cumplen para $2 \leq i \leq N$. Para las condiciones a la frontera previamente propuestas, las ecuaciones resultantes (V.3.1.) a (V.3.11.) deben modificarse simillarmente. Por lo tanto, cuando ciertas condiciones a la frontera requieren solución simultánea de dos ecuaciones para obtener los valores H y V , el álgebra debe utilizarse y prepararse para el programa de computadora. Una técnica apropiada a modo de ilustración es la condición a la frontera impuesta por una bomba de velocidad constante, la cual nos guía a la ecuación (V.3.11.).

ESTRUCTURA BASICA DEL PROGRAMA

Se realizó un programa de computadora básico, el cual puede ser modificado para representar un número de situaciones diferentes. El programa tiene fácil acceso y manejo.

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

En suma, el programa lee la información básica, genera los valores de H y V en los puntos de intercepción a lo largo de la tubería y entonces comienza los cálculos a régimen transiente. Los puntos interiores de la malla son calculados con las ecuaciones (V.3.14.) (V.3.15.). Las condiciones a la frontera se utilizan para obtener los valores de H y V en los extremos de la tubería. El proceso completo comienza de nuevo usando los valores calculados de H_p y V_p en la etapa anterior. El proceso continúa con un "loop" hasta que el tiempo alcanza un T máximo. Antes de que la ejecución se 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 de transiente con otras condiciones límites, es necesario sólo cambiar partes del programa, el cual ya tiene una estructura fija. Ocasionalmente, la entrada al programa se altera para incluir nuevos parámetros.

2) ANALISIS DEL TERMINO DE FRICCIÓN EN LA ECUACION DINAMICA

(TERMINO DE LA INTEGRACION $\frac{f}{2D} V/dt$)

En situaciones de flujo inestable en donde las pérdidas de energía debidas a efectos viscosos son muy importantes, el tratamiento del término de fricción por una aproximación de primer orden, es inadecuado. Esto sucede en oleoductos, o en casos donde las velocidades sean muy altas.

Los resultados usando la aproximación de primer orden en estos casos darán resultados imprecisos, o en casos extremos una inestabilidad en la so-

lución. Como una opción de segundo término para este caso puede mejorarse reduciendo el incremento en el tiempo.

Un criterio de estabilidad para el esquema de primer orden sería:

$$f \Delta t \bar{V} \leq 1 \quad (V.4.1.)$$

Donde \bar{V} es un promedio de las velocidades.

Si utilizamos la aproximación de segundo orden de la forma:

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx \approx \frac{1}{2} [f(x_0) + f(x_1)] (x_1 - x_0) \quad (V.4.2.)$$

Esta ecuación de segundo orden aplicada a lo largo de la línea característica C^+ entre A y P Ecuación (II.2.12.) y otra aplicada a la línea característica C^- entre B y P Ecuación (II.2.14.) obtenemos:

Para C^+

$$\frac{g}{a} \int_{HA}^{Hp} dH + \int_{VA}^{Vp} dV + \int_{tA}^{tp} \frac{f}{2D} V/V/dt = \phi$$

Integrando

$$\frac{g}{a} (Hp - HA) + (Vp - VA) + \frac{f}{2D} * \frac{1}{2} [VA + Vp] \cdot VA + Vp / (tp-tA) = \phi$$

De aquí que

$$\frac{g}{a} (Hp - HA) + (Vp - VA) + \frac{f \Delta t}{4D} [VA + Vp] \cdot VA + Vp / = \phi \quad (V.4.3.)$$

Para C^-

$$-\frac{g}{a} \int_{HB}^{Hp} dH + \int_{VB}^{Vp} dV + \int_{tB}^{tp} \frac{f}{2D} V/V/dt = \phi$$

Integrando

$$\frac{g}{a} (Hp - HB) - (Vp - VB) - \frac{f \Delta t}{4D} [VB + Vp] \cdot VB + Vp / = \phi \quad (V.4.4.)$$

Al igual que en la aproximación de primer orden tenemos dos ecuaciones con dos variables desconocidas (H_p y V_p) para evaluarse en los puntos interiores, es decir en el siguiente incremento de tiempo, siendo conocidas las de la etapa anterior, puntos (A y B).

Para esto, restaremos la ecuación (V.4.4.) de la ecuación (V.4.3.) y - despejandola para una sola variable (V_p).

$$\frac{g}{a} (H_p - H_B) - (V_p - V_B) - \frac{f \Delta t}{2D} (V_B + V_p) / V_B + V_p / - \frac{g}{a} (H_p - H_A) - (V_p - V_A) - \frac{f \Delta t}{2D} (V_A + V_p) / V_A + V_p / = 0$$

De aquí que la función quedaría como:

$$F = \frac{g}{a} (H_B - H_A) + (2V_p - V_A - V_B) + \frac{f \Delta t}{2D} \left[\frac{(V_A + V_p)}{V_A + V_p} + \frac{(V_B + V_p)}{V_B + V_p} \right] = 0 \quad (V.4.5.)$$

Para obtener la solución en V_p , de la ecuación anteriormente desarrollada, la llamaremos la función F, si aplicamos un método numérico, por ejemplo un Newton-Rapson.

$$V_{pk+1} = V_{pk} - \frac{F}{dF/dv_{pk}}$$

Donde

$$\frac{dF}{dV_{pk}} = 2 + \frac{f \Delta t}{2D} \left[\frac{1}{V_A + V_{pk}} + \frac{1}{V_B + V_{pk}} \right] \quad (V.4.6.)$$

De aquí obtenemos el valor de V_p para cada uno de los puntos interiores.

Sustituyendo los valores de V_p en la ecuación característica C^+ (puede hacerse también en la ecuación característica C^-) para obtener los valores de H_p , de manera que si lo expresamos en esa forma tendremos

$$H_p = H_A - \frac{a}{g} (V_p - V_A) - \frac{f \Delta t}{2D} \frac{a}{g} (V_A + V_p) * / V_A + V_p /$$

Y en forma computacional

$$H_{pi} = H_{i-1} - \frac{a}{g} (V_{pi} - V_{i-1}) - \frac{fa \Delta t}{2gD} (V_{i-1} + V_{pi}) * / V_{i-1} + V_{pi} / \quad (V.4.7.)$$

Para comenzar el procedimiento iterativo para la obtención de V_p en los puntos interiores, el primer valor se obtiene aplicando la aproximación de primer orden, Ecuación (V.3.14.), y el factor de fricción se calcula entre los puntos de las velocidades V_A y V_B como una media de estas velocidades en cada uno de los puntos interiores.

Otro método que puede aplicarse a resolver esta situación es el método corrector-predicor que consume menor tiempo de máquina, pero que en este trabajo no lo discutiremos.

3) DESARROLLO DEL METODO DE SOLUCION DE LAS ECUACIONES COMPLETAS

DERIVACION DE LA SOLUCION

En la sección anterior, se utilizaron las ecuaciones de continuidad y movimiento simplificadas y se les dio solución. Esto es casi siempre inadecuado cuando se aplica a transientes en tuberías de paredes relativamente rígidas, por lo tanto, deben preverse los casos donde se tienen materiales más flexibles en que es necesario utilizar las ecuaciones fundamentales completas. Es decir, en estos casos el término $V (\partial V / \partial x)$ ya no es tan insignificante comparado con el término $\partial V / \partial t$ y no puede eliminarse tan fácilmente. En esta sección obtendremos una solución general a las ecuaciones obtenidas completamente por el mismo METODO DE LAS CARACTERISTICAS.

De las ecuaciones del modelo completo para el transiente por la teoría de la columna elástica.

Ecuación dinámica

$$\frac{dV}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} V|V| = 0$$

Y Ecuación de continuidad

$$a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{dH}{dt} = 0$$

En sí, estas ecuaciones en forma desglosada vienen a ser:

Recordando que:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} =$$

Donde:

$$\frac{dx}{dt} = V$$

6

$$\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

y

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} = V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t}$$

Donde $P = gH$

De aquí que; de la Ecuación dinámica

$$V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} V/V = \emptyset \quad (V.5.1.)$$

Siendo $g \frac{dz}{dx} = a$ la fuerza neta debido a los efectos gravitorios (pendientes). (Energía potencial).

Y de la Ecuación de continuidad, tendremos:

$$a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + g V \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial t} = \emptyset \quad (V.5.2.)$$

Estas dos ecuaciones (V.5.1.) y (V.5.2.) expresadas en forma de ecuaciones diferenciales parciales determinan el comportamiento total de un transiente a través de una tubería por la teoría de la columna elástica.

De nuevo, para aplicar el método de las características utilizaremos el multiplicador λ a la Ecuación dinámica y sumándola a la de continuidad:

$$L = \lambda \left[V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} V/V \right] +$$

$$a^2 \frac{\partial V}{\partial x} + g V \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial t} = \emptyset \quad (V.5.3.)$$

De aquí:

$$\lambda v \frac{\partial v}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v}{\partial t} + \lambda g \frac{\partial H}{\partial x} + g \lambda \frac{dz}{dx} + \lambda \frac{f}{2D} vN/ + a^2 \frac{\partial v}{\partial x} + g v \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

Reagrupando los términos de la ecuación de una manera particular obten_{dr}emos:

$$\left[\lambda \frac{\partial v}{\partial t} + (\lambda v + a^2) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \left[g \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \left\{ \lambda + v \right\} \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \lambda g \frac{dz}{dx} + \lambda \frac{f}{2D} vN/ = 0$$

De esta ecuación para el primer término

$$\left[\lambda \frac{\partial v}{\partial t} + (\lambda v + a^2) \frac{\partial v}{\partial x} \right] = \lambda \frac{dv}{dt} \tag{V.5.40.}$$

$$\text{si } \lambda \frac{dx}{dt} = \lambda v + a^2 \tag{V.5.4b.}$$

Y para el segundo término:

$$\left[g \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \left\{ \lambda + v \right\} \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] = g \frac{dH}{dt} \tag{V.5.5a.}$$

$$\text{si } \frac{dx}{dt} = (\lambda + v) \tag{V.5.5b.}$$

Reescribiendo las ecuaciones de restricciones para $\frac{dx}{dt}$ obtendremos:

$$\frac{dx}{dt} = v + \frac{a^2}{\lambda}$$

Y

$$\frac{dx}{dt} = \lambda + v$$

De aquí que:

$$\frac{dx}{dt} = v + \frac{a^2}{\lambda} = \lambda + v$$

Así:

$$\lambda^2 = a^2 \text{ ó } \lambda = \pm a$$

Por lo tanto, nuestras ecuaciones características son, en este caso:

$$\frac{dx}{dt} = v + a \text{ y } \frac{dx}{dt} = v - a$$

De manera que, expresando las ecuaciones en forma de diferenciales totales con sus restricciones tenemos:

Para C^+ .

$$\frac{dv}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{a} v \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} v/v = 0 \quad (\text{V.5.6.})$$

Si y solo si $\frac{dx}{dt} = v + a \quad (\text{V.5.7.})$

Para C^- :

$$\frac{dv}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{a} v \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} v/v = 0 \quad (\text{V.5.8.})$$

Si y sólo si $\frac{dx}{dt} = v - a \quad (\text{V.5.9.})$

De aquí vemos que, las ecuaciones diferenciales ordinarias son totalmente similares como las del caso del procedimiento aproximado. Por lo tanto, la importante distinción es que ahora las líneas características en plano $x - t$, las cuales fueron constantes en el método aproximado, son ahora curvas y sus -

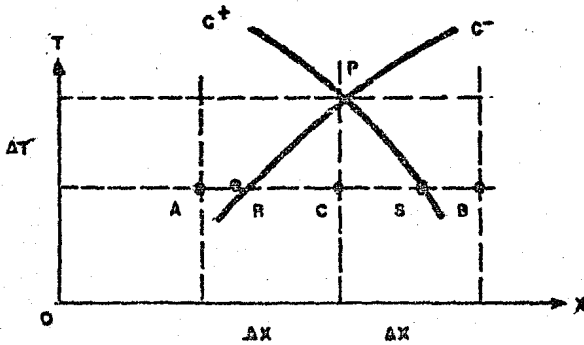


FIG. V. 9 REPRESENTACION GRAFICA DE LAS LINEAS CARACTERISTICAS POR LA SOLUCION DE LAS ECUACIONES NO SIMPLIFICADAS (COMPLETAS)

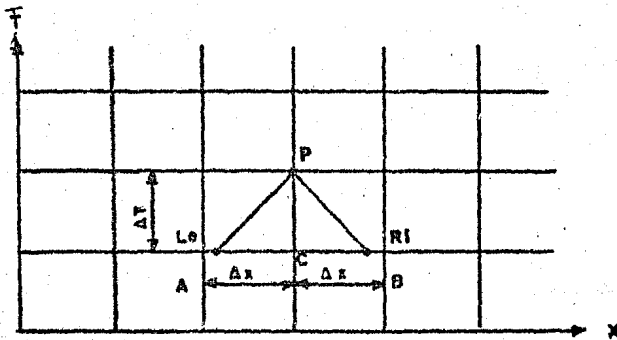


FIG. V. 10 INTERPOLACION GRAFICA DE LOS VALORES DE H Y V SOBRE LA MALLA. (METODO COMPLETO)

pendientes son una función de $V(x,t)$ ver figura V.9. Este resultado introduce algunas complicaciones en el procedimiento de la solución numérica.

LA SOLUCION NUMERICA

Si utilizamos una aproximación de primer orden para el término de fricción en la integración y aplicando el método de diferencias finitas a la integración de las ecuaciones obtendremos:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = V + a$$

Antes de continuar con el procedimiento, se discutirá los dos enfoques que se les pueden dar a la solución de las ecuaciones por la integración de diferencias finitas. Los dos enfoques concebibles son:

- 1) El intervalo de tiempo variable
- 2) El intervalo de tiempo especificado

En el primero, el elemento de tiempo varía en cada cálculo. Por lo tanto, para expresar los resultados a un tiempo dado requiere la extrapolarción entre las condiciones dinámicas calculadas.

Con el segundo, el elemento de tiempo es constante. Su incremento está regido por los tramos de tubería del sistema establecidos.

Más adelante veremos, qué condiciones a la frontera deben satisfacer cualquier enfoque que se aplique a la solución numérica.

Al igual que en el procedimiento de solución aproximado se tomará el enfoque del intervalo de tiempo especificado. Entonces:

$$\frac{\Delta x}{V+a} = \Delta t$$

Ahora, continuando con el procedimiento para la solución numérica, - primero supondremos que podemos aproximar las curvas características como líneas rectas sobre cada incremento de tiempo (Δt). Esta suposición parece cumplirse porque $a \gg V$ (por lo general, los valores para a en los oleoductos se tienen dentro del rango de 2000 a 4000 ft/seg. mientras que la velocidad tiene rangos de 4 a 8 ft/seg), por lo tanto, se nota que las pendientes de cada línea característica, generalmente es ligeramente diferente que cualquier otra. El problema está en hacer la aproximación por diferencias finitas a las ecuaciones diferenciales como vemos en la figura (V.10.). Este espaciamiento de la malla Δx por Δt ha sido ajustada y después hay que establecer el procedimiento de encontrar el valor de V y H en el punto P . Las curvas características que interceptan en el punto P son aproximadas por líneas rectas. La pendiente de las líneas rectas son determinadas por los valores conocidos de velocidad en un incremento de tiempo anterior. Es importante notar que las líneas características pasando a través de P no atraviesan los puntos de la malla A y B , pero pasan a través de $t =$ líneas constantes en algún punto L y R entre ellos.

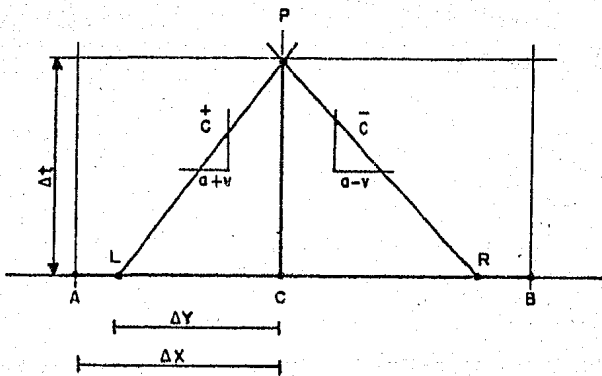
En este caso la aproximación por diferencias finitas a la ecuación - (V.5.6.) y (V.5.8.) serán:

$$\frac{V_p - V_L}{\Delta t} + \frac{g}{a} \frac{H_p - H_L}{\Delta t} - \frac{g}{a} V_L \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} \frac{V/V}{L} = \beta \quad (V.5.10.)$$

y

$$\frac{V_p - V_R}{\Delta t} - \frac{g}{a} \frac{H_p - H_R}{\Delta t} + \frac{g}{a} V_R \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} \frac{V/V}{L} = \beta \quad (V.5.11.)$$

La dificultad que se presenta, por supuesto, es que los valores de VL, HL, VR, HR no son conocidos. Por lo contrario, los valores de VA, HA, VB, HB y BC y HC son conocidos. Los valores desconocidos de H y V en los puntos L y R pueden ser estimados por interpolación. En este caso, utilizaremos una interpolación lineal y el siguiente esquema muestra las relaciones.



La solución simultánea de las ecuaciones (V.5.10.) y (V.5.11) para V_p y H_p nos lleva a obtener:

$$V_p = \frac{1}{2} \left[(V_L + V_R) + \frac{g}{a} (H_L - H_R) + \frac{g}{a} \Delta t (V_L - V_R) \text{ Sen } \phi - \frac{f \Delta t}{2D} (V_L/V_L + V_R/V_R) \right] \quad (V.5.12.)$$

$$H_p = \frac{1}{2} \left[(H_L + H_R) + \frac{g}{a} (V_L - V_R) + \frac{g \Delta t}{a} (V_L + V_R) \sin \theta - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{2D} (V_L/V_L - V_R/V_R) \right] \quad \text{V.5.13.}$$

Donde $\sin \theta = \frac{dz}{ds}$ (positiva para pendientes de tubería de arriba hacia abajo). El esquema para lenguaje de computadora se hace similarmente al procedimiento que se desarrolló para el método aproximado.

LA MALLA $\Delta x - \Delta t$

Por la curvatura variable de las líneas características y porque hemos decidido representar cada una como una línea recta sobre pequeños intervalos de tiempo, nos enfrentamos con el problema para calcular Δx y Δt . Siempre es posible calcular a un Δx y Δt para una línea característica, sin tener que interpolar. Por lo tanto, es también obvio que la consecuencia de esta aproximación es una directa confusión de las Δx 's y las Δt 's que sería imposible seguir la trayectoria y detectar en dónde y cuándo estaría pasando algo.

Parece más apropiado seleccionar una malla uniforme en espacio y tiempo, el cual minimizará la interpolación y retendrá todas las ventajas de sencillez en la programación y asociado con la interpretación de los datos con el método aproximado. Este método es referido como la malla característica "rectangular". El procedimiento lógico a seguir es integrar la ecuación característica tomando a V constante (correspondiendo a nuestras suposiciones anteriores de pendientes constante). El resultado son dos ecuaciones para las características.

$$\Delta x = \Delta t / v + a /$$
$$\Delta x = \Delta t / v - a /$$

El valor de Δx está determinado por el número de secciones en que hemos seleccionado dividir la tubería. Ya que nuestro procedimiento de interpolación implica que los puntos R y L están entre los puntos A y B, debemos seleccionar un Δt tan pequeño que siempre nos garantice que esto así suceda; - las ecuaciones anteriores sugieren que:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\text{Max}/a+v/}$$

Donde $\text{Max}/a+v/$ es el valor absoluto máximo esperado de la suma de la velocidad de la onda y la velocidad del flujo. Si la localización de los puntos R y L caen fuera de los puntos de la malla A y B, los problemas de estabilidad numérica y los problemas de precisión comenzará a desarrollarse. Esos problemas son asociados con la discusión sobre la llamada "zona de no garantía", i.e., donde los puntos de R y L caen fuera de los puntos de la malla, - la información de las zonas de no garantía están influenciadas en los valores de H_p y V_p . Este es un procedimiento numérico impropio, porque las perturbaciones no tienen el tiempo para alcanzar el punto P. Como resultado, esto debe garantizarse para prevenir los resultados no precisos.

ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

La estructura del programa para el método de las características riguroso es similar en muchos aspectos al programa desarrollado con el método - - aproximado. Las principales diferencias ocurren en la inclusión en las ecua-

ciones de las pendientes en la tubería y el procedimiento de la interpolación lineal aplicado a las líneas características.

Comparando con el método aproximado sugiere que para situaciones donde $\Delta \gg V$, el método aproximado y el riguroso dan esencialmente los mismos resultados, pero en los sistemas de análisis más complicados la combinación de las condiciones de la frontera internas requieran un procedimiento de interpolación del plano x-t independientemente del método utilizado. En este trabajo se optó por utilizar el método riguroso porque puede ser aplicable a cualquier sistema en estudio, porque ya tiene implícito el procedimiento de interpolación y porque también incluye el término de las pendientes en las ecuaciones características.

Uno de los problemas a que nos enfrentamos aquí está en la optimización del incremento de tiempo (Δt) en la malla, ya que por un lado tenemos que asegurar la estabilidad y por el otro el ahorro en los incrementos para llegar al tiempo máximo.

Ahora bien, como el incremento de distancias (Δx) ya ha sido especificado, el programa checará que el intervalo de tiempo satisfaga la condición de estabilidad.

4) ALGUNOS EFECTOS DE LOS PARAMETROS EN LOS RESULTADOS DE LA SOLUCION

Es útil e informativo ver los efectos sobre los resultados arrojados en la solución del problema de alguno de los parámetros del modelo. Los resultados analizados aquí muestran que los efectos de fricción, el número de

tramos en que será dividida la tubería para el estudio, la pendiente de la tubería y los efectos de variación de la velocidad tienen influencia sobre la solución. También se mostrará la inestabilidad numérica y las impresiones en la interpolación.

EFECTOS DEL NUMERO DE TRAMOS (N) SELECCIONADO

Parece ser razonable esperar que a mayor tramos en que se divida la tubería, mayor precisión obtendremos en los resultados. Es sorprendente, entonces, descubrir que la selección de N (tramos) tiene pequeños efectos sobre la estabilidad numérica. Por ejemplo, cuando se analiza el transiente generado a bajas velocidades (5fps), los valores para las presiones generadas máximas y mínimas difieren en un dos por ciento para N bajos (N = 3) y N altos (18); concluyéndose que a cambios lentos de velocidades la diferencia es despreciable. Con esto podemos minimizar el tiempo de computo.

Hay dos puntos que se indicarán. Primero, excepto en el caso de cambios de velocidades rápidos hay una ganancia pequeña utilizando valores de N grande (tramos grandes). Segundo, para una dada corrida de tiempo (TMAX) el número de punto de la malla varía con N^2 y asimismo el costo de la simulación computacional. Por consiguiente, evitaremos hacer N tan pequeño que resulte que Δt sea demasiado grande para dar buenos resultados para las condiciones límites como ocurre en el movimiento de la válvula.

EFECTOS DE LAS PENDIENTES

Los efectos de las pendientes en los resultados son importantes, máximo en un oleoducto donde el perfil topográfico generalmente muestra terrenos muy accidentados. Para resolverlo, es posible utilizar tuberías en serie pa-

ra obtener una mayor precisión en las presiones generadas a lo largo de todo el oleoducto.

INESTABILIDAD NUMERICA E IMPRECISION

Anteriormente se estableció que Δt se tomara suficientemente pequeño para asegurar que los puntos R y L caigan entre los puntos A y B para todas las situaciones. Sino, la inestabilidad numérica se puede presentar, así como también las imprecisiones en los resultados computacionales.

Para demostrar esos problemas, se utilizó un sistema sencillo como es el caso del cierre de una válvula en un recipiente. El valor de Δx se fijó, la válvula súbitamente se cerró y el valor de Δt fue calculado tal que los puntos L y R coincidieran (interpolación mínima). A valores altos de Δt causa que L se mueva fuera de A y posiblemente R se mueva fuera de B y la inestabilidad numérica ocurrirá. Sustancialmente a pequeños valores de Δt causa que los puntos R y L se mueven en la dirección del punto C, de este modo nos lleva a errores en la interpolación.

Para mostrar estos efectos podemos apreciarlos a través de la figura (V.11.) en la que se toman como referencias varios incrementos de tiempo, desde el valor óptimo o normal a otros menores y mayores que él. Notése que para un valor de $\Delta t = 0.9 \Delta t_0$, el error en la interpolación lo ha causado en las esquinas del gráfico H vs t. Para $\Delta t = 1.02 \Delta t_0$, los resultados no son demasiado diferentes al de la corrida con Δt normal ($\Delta x \approx \Delta t / (a + V)$). En cambio, cuando se aumenta $\Delta t = 1.10 \Delta t_0$, la solución comienza a dispararse. Este resultado es numéricamente inestable y se ve que debe seguirse la restricción de estabilidad ($\Delta t \leq \Delta x \text{ MAX } (a + V)$).

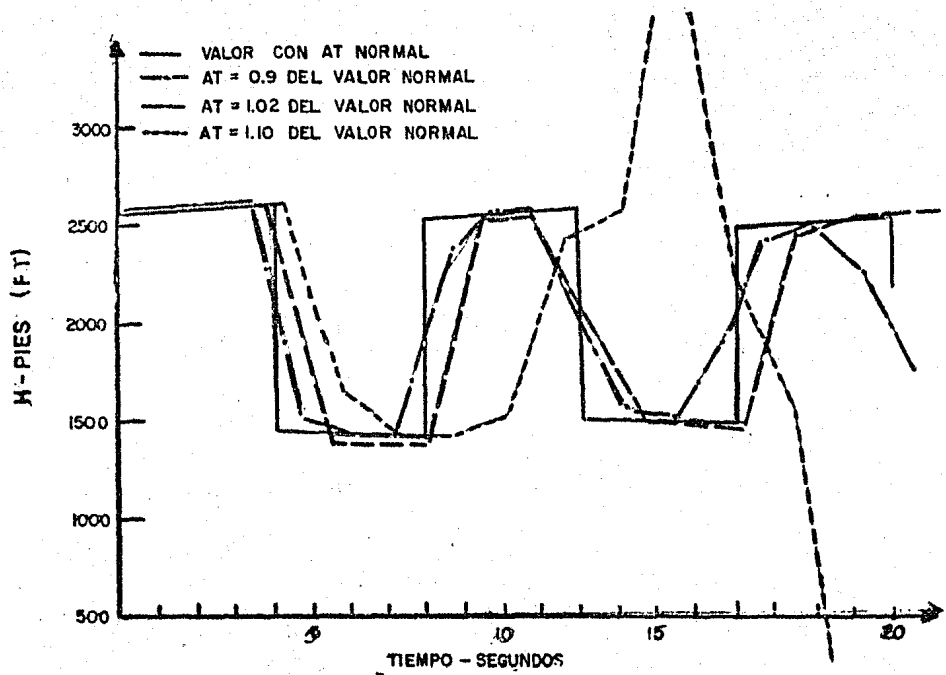


FIG. V. II INESTABILIDAD NUMERICA EN UNA TUBERIA CON CIERRE SUBITO DE UNA VALVULA CON VARIOS VALORES DE AT

Por otro lado, cuando Δt es demasiado pequeño que el requerido (normal), el resultado no es la inestabilidad, pero sí la imprecisión en la interpolación (R y L muy cerca del punto C). Entonces para evitarnos cualquier problema, el parámetro Δt será controlado tal que minimice a la interpolación, pero que mantenga a los puntos R y L dentro de los puntos A y B.

VERIFICACION EXPERIMENTAL

Como las condiciones del transiente serán analizadas, predichas y calculadas por una computadora digital por el método de solución de las características en este trabajo, es indispensable asegurarnos cuáles han sido los resultados que se han obtenido al aplicar este método.

En la literatura han aparecido diversos trabajos comparando los resultados experimentales con los resultados aplicados a tuberías de paredes rígidas y las de paredes relativamente rígidas (PVC), a los aplicados a tuberías enterradas.

De todos esos estudios se ha encontrado por medio de la verificación experimental que las variaciones de presión pueden ser determinadas con una precisión mayores al 5%.

La figura (V.12.) nos muestra la comparación entre la teoría y lo experimentado aplicado a un oleoducto de 34 pulgadas, la velocidad de propagación de la onda fue calculada dentro de un 2% del valor medido durante las pruebas. Los aumentos de presión en el frente de la onda y las determinadas fueron aproximadas arriba de un 5%.

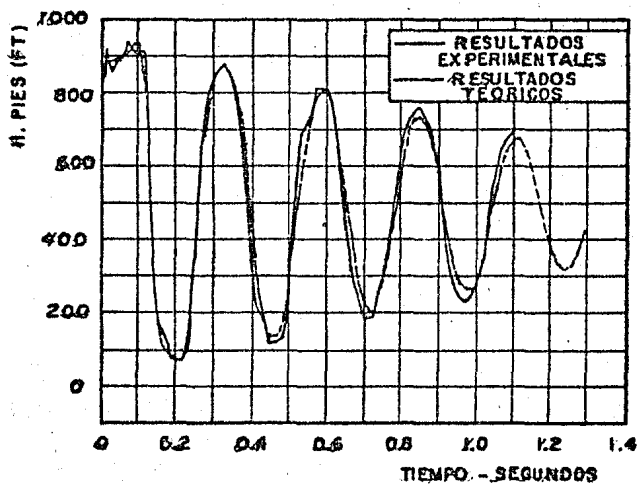
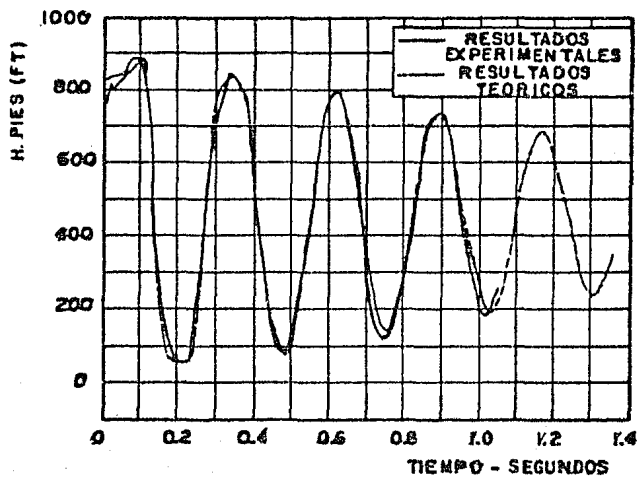
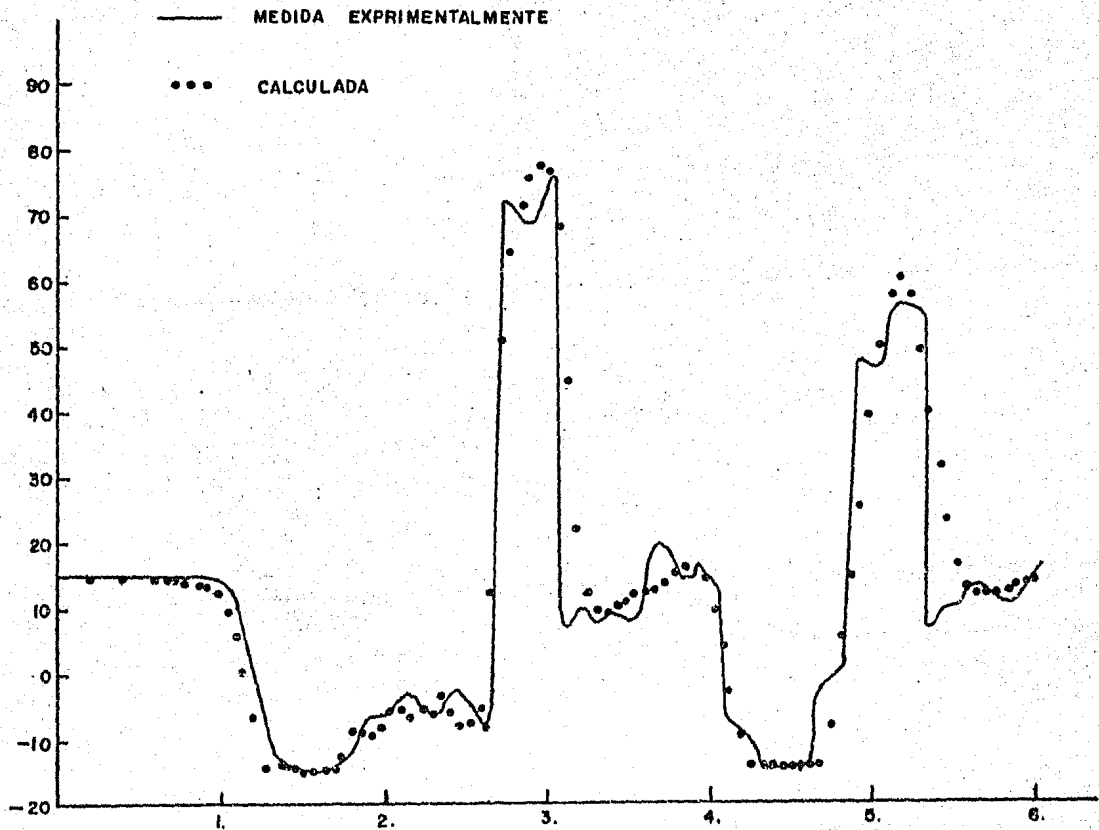
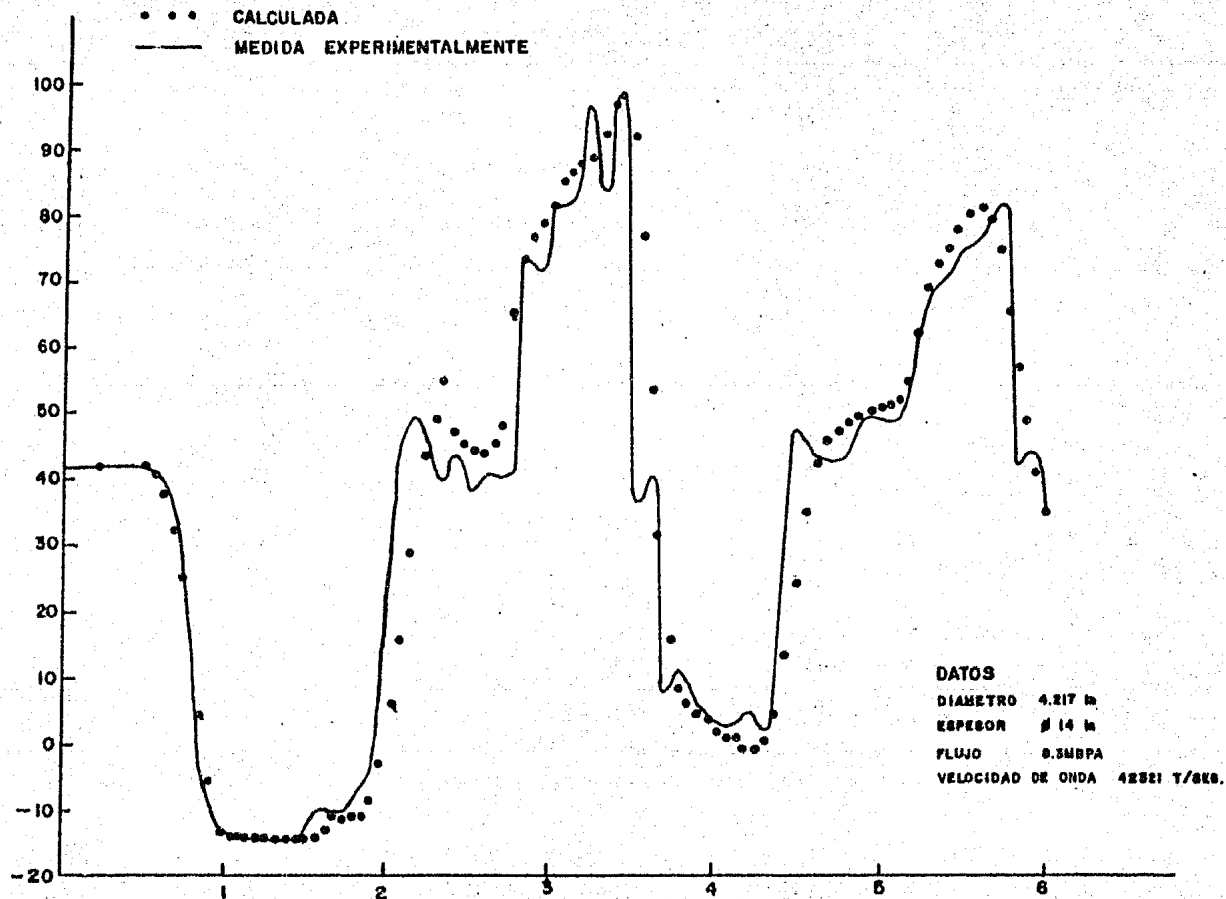


FIG. 12 COMPARACION DE RESULTADOS ENTRE VALORES OBTENIDOS POR LA TEORIA Y POR LOS EXPERIMENTALES.





CAPITULO VI

ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES A LA FRONTERA EN
EL OLEODUCTO

Hasta ahora se ha trabajado con sistemas relativamente sencillos, estableciendo sus condiciones límites a cada una de las situaciones que se analizaron. Por otro lado, en la tubería de un oleoducto teniendo una variación muy grande en pendientes sobre el perfil topográfico se hace necesario implementar condiciones a la frontera para tuberías en serie que nos puedan absorber todos los cambios de dirección que pueda sufrir el oleoducto. Además debe proveerse las posibles fuentes de excitación que puedan provocar un estado transiente en los extremos de la tubería.

.1) TUBERIAS EN SERIE.

Si modelamos el oleoducto como una tubería en serie, en donde cada tramo de tubería transporta el mismo flujo a regimen permanente, pero que tiene sus propios valores de velocidades, diámetro, velocidad de onda, pendientes, etc.

CONDICIONES LIMITES (A LA FRONTERA) EN LAS UNIONES DE LAS TUBERIAS.

El método de solución de las características aplicadas a cada tubería en serie se obtiene de manera similar a las desarrolladas para las condiciones sencillas. La diferencia principal es que ahora son condiciones a la frontera internas; en las uniones en cada tramo, la cual debe especificarse para la solución completa. Con esto queremos decir que aparte de las condiciones a la frontera requeridas en los extremos de la tubería provocadores de la inestabilidad dentro del sistema son necesarias las condiciones que se generan en las uniones. En las condiciones límites internas debe emplearse dos ecuaciones adicionales para combinarlas con las ecuaciones características y así obtener las cuatro variables desconocidas en las uniones de la tubería.

La situación se muestra en el esquema de la figura (VI.1.). En este caso, se supone que las pérdidas por contracciones y expansiones son despreciables. La ecuación a lo largo de la línea característica C^+ es:

$$C^+: \quad V_{p1} = VA_1 + \frac{g}{a_1} HA_1 - \frac{1}{2} f_1 \frac{\Delta t}{D_1} VA_1 / VA_1 / + \frac{g}{a_1} \Delta t VA_1 \text{ SEN } \theta_1 - \frac{g}{a_1} H_{p1} \quad (\text{VI.1.1.})$$

O en forma simplificada

$$V_{p1} = C_3 - C_4 H_{p1} \quad (\text{VI.1.2.})$$

donde

$$C_3 = VA_1 + \frac{g}{a_1} HA_1 - \frac{1}{2} f_1 \frac{\Delta t}{D_1} VA_1 / VA_1 / + \frac{g}{a_1} \Delta t VA_1 \text{ SEN } \theta$$

y

$$C_4 = \frac{g}{a_1}$$

La ecuación para la línea característica C^- es:

C^- :

$$V_{p2} = V_{B2} - \frac{g}{a_2} H_{B2} - \frac{1}{2} \frac{f_2 \Delta t}{D_2} V_{B2} / V_{B2} / - \frac{g}{a_2} \Delta t V_{B2} \text{ SEN } \theta_2 + \frac{g}{a_2} H_{p2} \quad (\text{VI.1.3.})$$

También, expresándola en forma simplificada:

$$V_{p2} = C_1 + C_2 H_{p2} \quad (\text{VI.1.4.})$$

Donde

$$C_1 = V_{B2} - \frac{g}{a_2} H_{B2} - \frac{1}{2} \frac{f_2 \Delta t}{D_2} V_{B2} / V_{B2} / - \frac{g}{a_2} \Delta t V_{B2} \text{ SEN } \theta_2$$

Y

$$C_2 = \frac{g}{a_2}$$

Podemos apreciar, de las ecuaciones (VI.1.2.) y IV.1.4.) que tenemos cuatro variables no conocidas con dos ecuaciones. Las dos ecuaciones que nos faltan las obtenemos de la ecuación de continuidad y la de energía.

Para aplicar la ecuación de continuidad en el punto P1 de la tubería 1 y en el punto P2 de la tubería 2 supondremos que ambos puntos están extremadamente cercanos y que no habrá acumulación de masa (empaquetamiento de fluido), de acuerdo con la teoría de la columna rígida. Como resultado de esto, obtendremos:

$$V_{p1} A_1 = V_{p2} A_2 \quad (\text{VI.1.5.})$$

La aplicación de la ecuación de energía despreciando las pérdidas que pudieran existir por expansiones y contracciones (apreciables cuando se unen dos tuberías de diámetro diferentes), así:

$$H_{p1} = H_{p2} \quad (\text{VI.1.6.})$$

Estas condiciones internas pueden aplicarse de una manera similar si se requieren a otras situaciones que puedan provocar perturbaciones internas dentro del sistema, como puede ser el caso de ruptura de una línea, válvulas colocadas internamente, etc. Si es el caso de una válvula la caída de presión a través de ella será incluida en la expresión de la ecuación (VI.1.6.).

Resolviendo las ecuaciones (VII.2.), (VII.4.), (VII.5.) y (VI.1.6.) si simultáneamente obtenemos la siguiente ecuación expresada para los valores de cabezas en los límites internos.

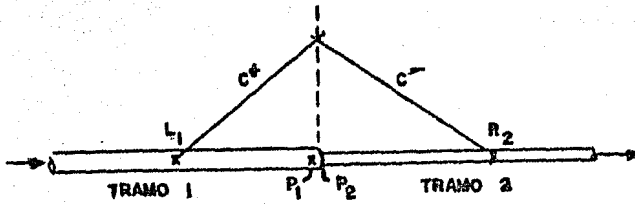


FIG. VI. 1 / TUBERIA EN SERIE

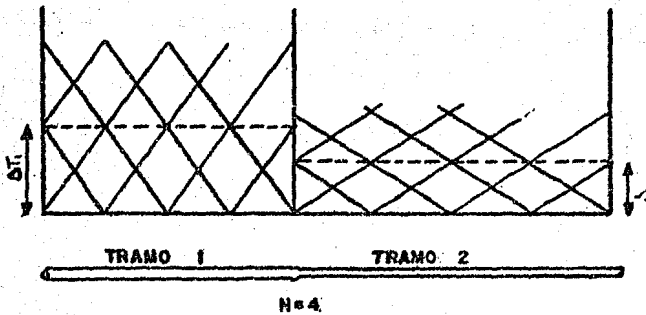


FIG. VI. 2 EL PLANO X-T PARA TUBERIAS EN SERIE
CON IGUAL NUMERO DE DIVISIONES

$$H_{p1} = H_{p2} = \frac{C_3 A_1 - C_1 A_2}{C_2 A_2 + C_4 A_1} \quad (\text{VI.1.7.})$$

Para obtener los valores de las velocidades en el punto P1 y P2, éstas son calculadas introduciendo el valor de HP1 y HP2 obtenidos de la ecuación (VI.1.7.) en las ecuaciones (VI.1.2.) y (VI.1.4.).

CALCULO DEL INCREMENTO DE TIEMPO (Δt).

En el análisis anterior hemos supuesto que Δt es el mismo en cada tubería. Esto pocas veces es cierto; de manera que es importante observar cuidadosamente este aspecto del problema. La fórmula para calcular Δt con el método riguroso de las características como ya lo habíamos expresado es;

$$\Delta t = \frac{L}{N(V+a)} \quad (\text{VI.1.8.})$$

Porque cada tramo de un sistema de tuberías en serie generalmente tiene diferentes longitudes, velocidades y velocidades de onda, es obvio que si aplicamos estrictamente esta ecuación (aun utilizando diferentes N's en cada tubería), obtendremos diferentes valores de Δt en cada sección. Como ejemplo, nos referiremos a un sistema de dos tuberías mostradas en la figura - - (VI.2.). En este ejemplo, se utilizaron N's iguales para calcular Δt en cada sección. El resultado en las condiciones límites internas es que las líneas características (C^+ y C^-) de las dos tuberías no se interceptan en los límites internos en el mismo punto sobre el plano x-t. Además, porque es poco probable que podamos encontrar dos valores de N's que den idénticos Δt en las dos tuberías. Por lo tanto, debemos tratar de encontrar otra estrategia.

La figura (VI.3.) exhibe otro enfoque basado en nuestro conocimiento de cómo interpolar cuando las líneas características no se interceptan en los puntos de la malla. Podemos reducir el valor de Δt en un tramo de tubería al valor de la Δt del otro tramo, de este modo superamos nuestro problema de comparar los valores de Δt 's en los límites interiores. Por consi-

guiente esto se hace con el peligro de introducir serias imprecisiones en la interpolación en los tramos de tubería.

Existe una técnica para reducir este error de interpolación sin perder compatibilidad en las condiciones límites internas. Esto se hace aumentando el valor de N en la tubería con esto Δt debe disminuir. La figura (VI.4.) - muestra los efectos de este enfoque. En la práctica N se aumenta hasta que uno de los puntos de intercepción en las líneas características A ó B, se muevan fuera de los puntos de la malla. El siguiente valor de N pequeño se utiliza entonces para dividir la tubería. El algoritmo utilizado para encontrar estos valores de N es:

$$N_j = \frac{L_j}{\Delta t \min (V_j + A_j)} \quad (VI.1.9.)$$

En la máquina, si se trunca con el valor entero obtenido dará el valor propio de N máximo. Este enfoque proporciona la mínima cantidad de interpolación para seleccionar los valores de N. Si la interpolación se fija demasiado grande, entonces un valor de N grande generalmente nos llevará a pocas interpolaciones en las otras secciones.

.2) V A L V U L A S

De todas las situaciones de transiente, las que se presentan con mayor frecuencia son las del movimiento en válvulas. Por virtud de la restricción de flujo, el cierre de válvulas crea aumentos de presión en el sistema, lo cual causa que el flujo desacelere. Diferentes tipos de válvulas crean diferentes maneras de sobrepresiones, las que son determinadas por el procedimiento del cierre como también del diseño mecánico de la válvula.

En sentido tradicional, para flujo permanente, la caída de presión a través de la válvula está caracterizado por la ecuación:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

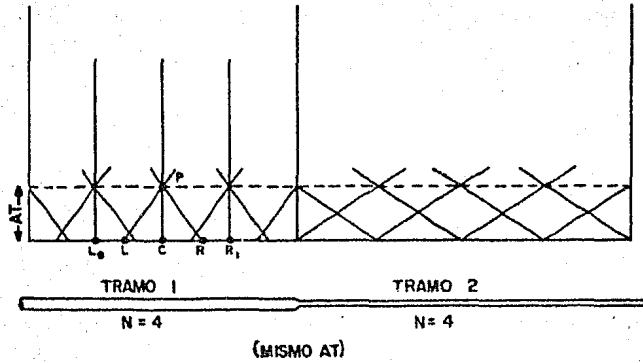


FIG. VI.3 EL PLANO X-T CON AT's IGUALES Y MAXIMAS INTERPOLACIONES

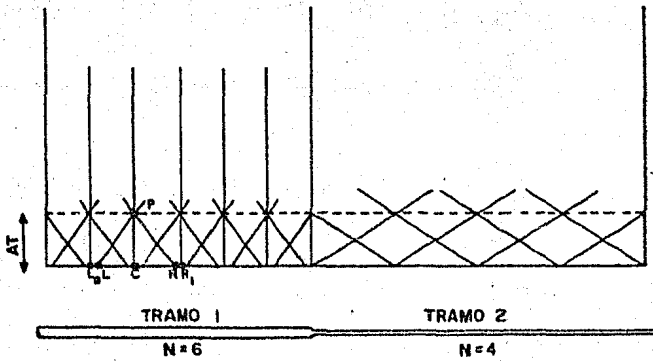


FIG. VI.4 EL PLANO X-T CON VARIABLES VALORES DE N'S Y CON INTERPOLACIONES MINIMAS

Donde h_L son las pérdidas de cabeza, V es la velocidad en la tubería (no la velocidad a través de la abertura de la válvula) y K_L es el coeficiente de pérdidas. Algunas veces sólo se dispone información en las cuales se dan las pérdidas a través de la válvula solamente en dos o en tres posiciones del vástago (abertura). Es importante poder utilizar esta información para resumir una variación continua de K_L en todo el rango de abertura (del 0% al 100%).

En todos los casos las pérdidas de presión instantáneas a través de la válvula se supondrán no afectarse por las condiciones de flujo no permanente es decir, dependerá solamente de la posición del vástago en la válvula. Las características de la válvula son proporcionadas por los fabricantes. Teniendo siempre presente esto, si se conoce el movimiento del vástago de la válvula como una función del tiempo, y si K_L es la función de la posición del vástago entonces se puede desarrollar una ecuación que represente las pérdidas de presión a través de la válvula y ser utilizada como una condición límite en nuestro método de solución de las características. En seguida veremos cómo este enfoque puede proporcionarnos soluciones para los problemas del golpe de ariete.

VALVULAS EN EL INTERIOR DE LA LINEA

Si una válvula en el interior de una tubería se programa para abrir y cerrar como una función del tiempo, se generarán las sobrepresiones. El procedimiento de solución es similar al enfoque utilizado para tuberías en serie excepto que las presiones en cada lado de la válvula no son iguales. La figura (VI.5.) muestra la situación típica de una condición límite en una válvula.

De nuevo, tenemos cuatro variable no conocidas y necesitamos cuatro ecuaciones. Las ecuaciones son:

TRAMO I

$$C^+ V_{pI} = C3 - C4 H_{pI} \quad (\text{VI.I.10.})$$

TRAMO II

$$C^- V_{pII} = C1 + C2 H_{pII} \quad (\text{VI.I.11.})$$

CONTINUIDAD

$$V_{pI} = V_{pII} \quad (\text{VII.12.})$$

ENERGIA

$$H_{pI} = H_{pII} + K_L \frac{V_{pII}^2}{2g} \quad (\text{VI.I.13.})$$

La combinación de las ecuaciones (VI.I.10.) a (VI.I.12.) y substituyendo en la ecuación (VI.I.13.), expresada en el término de V_{p2} obtenemos:

$$V_{pII}^2 + \frac{2g}{K_L} \left(\frac{1}{C2} + \frac{1}{C4} \right) V_{pII} - \frac{2g}{K_L} \left(\frac{C1}{C2} + \frac{C3}{C4} \right) = 0 \quad (\text{VI.I.14.})$$

Para resolver la ecuación cuadrática, definiremos:

$$B = 2g \left(\frac{1}{C2} + \frac{1}{C4} \right)$$

$$C = 2g \left(\frac{C1}{C2} + \frac{C3}{C4} \right)$$

Así es que la ecuación (VI.I.14.) será:

$$V_{pII}^2 + \frac{B}{K_L} V_{pII} - \frac{C}{K_L} = 0$$

Siendo su solución:

$$V_{pI} = V_{pII} = \frac{B}{2K_L} \left(-1.0 + \sqrt{1.0 + \frac{4CKL}{B^2}} \right) \quad (\text{VI.I.15.})$$

Esta ecuación es válida cuando el flujo está en la dirección original. Si la solución de la ecuación (VII.15.) da un valor negativo de V_{pII} , tendremos que resolver para el flujo inverso. El resultado será:

$$V_{pI} = V_{pII} = \frac{B}{2K_{L,REV}} \left(1.0 - \sqrt{1.0 - \frac{4.0 CK_{L,REV}}{B^2}} \right) \quad (VI.I.16.)$$

Nótese que las líneas características C^+ y C^- son determinadas por las condiciones de flujo estable y no necesitan ser definidas como resultado de flujo inverso temporal. Por lo tanto, las pérdidas de presión de la válvula para flujo inverso son generalmente diferentes que las presentadas para las de flujo normal. Además es probable que ello sea difícil de encontrar, así que se hace necesario utilizar las características de pérdidas de flujo en la dirección positiva.

CALCULO DE K_L

Se calculará a K_L como una función del tiempo. Por lo general existen pruebas disponibles para las válvulas en las que detallan a K_L como una función de la posición del vástago; es decir una tabla donde se representan las características de pérdidas de la válvula K_L (coeficiente de pérdidas) contra el porcentaje de abertura de la válvula. Generalmente, vienen representados de dos a tres puntos en todo el rango de abertura, por lo tanto, se hace necesario realizar una interpolación para que nos pueda generar la tabla a cualquier punto de abertura.

Las características de pérdidas de presión a través de las válvulas se expresan de dos maneras. Una es por el coeficiente de pérdida K_L como ya lo hemos discutido; y el otro método es utilizar la función Z , donde Z es definido como

$$Z = \sqrt{\frac{K_{L,0}}{K_L}} \quad (VI.I.17.)$$

Donde K_{L0} es el coeficiente cuando la válvula está completamente abierta. Esta forma adimensional tiene la ventaja de variación entre $1/\beta$ y β . y es preferida por muchos. Porque los datos de las pérdidas de presión ocurrirán en ambas formas, y además porque fácilmente se pasa de una forma a otra, este trabajo utilizará la forma común de K_L .

Comenzaremos por sintetizar K_L como una función de la posición para la situación donde hay poca información del coeficiente de pérdida. En este ejemplo, consideraremos una válvula de compuerta donde sus coeficientes son conocidos sólo para cuatro posiciones. Lo que hay que hacer es graficar K_L y $1/K_L$ como una función del porcentaje de abertura con los valores de la tabla (VI.1.). Los resultados se muestran en la figura (VI.5.).

El problema es encontrar valores de K_L cerca del cierre (la curva se dispersa). Para evitar esto, trabajaremos solamente con $1/K_L$ la cual cubre todo el rango de abertura. Además, apreciamos que $1/K_L$ es el término que aparece en nuestro análisis de la Ecuación (VII.16.).

Posteriormente si construimos una tabla de $1/K_L$ para ciertos incrementos de abertura de la válvula podremos leer de la gráfica. Los resultados se muestran en la tabla (VI.2.)

Ahora, si las características del cierre de la válvula se conocen es decir, si la posición del vástago de la válvula (porcentaje de abertura) es una función del tiempo, necesitamos solamente leer de la tabla (VI.2.) para encontrar el valor de $1/K_L$ y resolver la ecuación apropiada a un incremento de tiempo. Para representar esto en un programa de computadora debe establecerse un procedimiento de interpolación entre los valores proporcionados de $1/K_L$ vs % de abertura. En los programas desarrollados para esta tesis se implementan

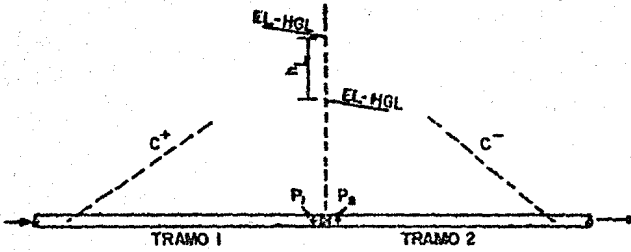


FIG.VI.5 VALVULA EN UNA TUBERIA DE DIAMETRO UNIFORME

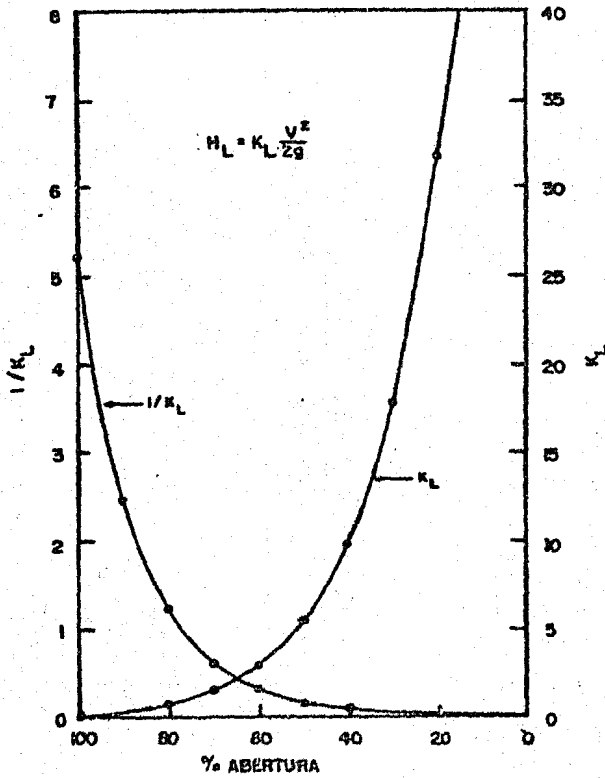


FIG.VI.6 K_L Y $1/K_L$ COMO FUNCION DEL PORCENTAJE DE ABERTURA

TABLA VI.1. COEFICIENTE DE PERDIDAS PARA UNA VALVULA DE COMPUERTA

% ABERTURA	K_L	$1/K_L$
100	0.19	5.27
75	1.15	0.87
50	5.6	0.18
25	24.0	0.04

TABLA VI.2. $1/K_L$ PARA INCREMENTIOS EN % DE ABERTURA MAS UNIFORMES

% ABERTURA	$1/K_L$
100	5.27
90	2.50
80	1.25
70	0.625
60	0.333
50	0.179
40	0.100
30	0.0556
20	0.0313
10	0.0167
0	0.0

taron dentro de los mismos la ejecución de interpolaciones lineal que frecuen-
temente es adecuada y la parabólica (utilizando una ecuación de segundo gra-
do) que es suficiente para cubrir cualquier caso. El tratamiento de las ecua-
ciones para la interpolación no serán discutidos.

Con respecto a cómo encontrar los valores de K_L a ciertas posiciones —
del vástago, generalmente los fabricantes (por ejemplo FISHER) reportan estos
datos como CV's de las válvulas. Se ha encontrado conveniente en la indus-
tria de válvulas expresar la capacidad y las características de flujo de las
válvulas en términos del coeficiente de flujo Cv. El coeficiente Cv de una —
válvula se define como el flujo de agua a 60°F, en GPM, que provoca una caída
de presión de una libra/pulg.² a través de ella.

De aquí podemos relacionar, el coeficiente Cv con el coeficiente de —
pérdida a través de la válvula como:

$$K_L = \frac{891 d^4}{Cv^2}$$

Donde, d es el diámetro en plgs.

De otra manera, si únicamente se conociera el valor de K_L a una cieta -
posición, como es el caso de las válvulas operadas manualmente; la aproxima-
ción que se realizaría es relacionar linealmente con los otros porcentajes de
abertura desde abertura cero con K_L igual a cero hasta el punto conocido.

EFECTOS DE LAS CARACTERISTICAS DEL CIERRE DE UNA VALVULA SOBRE LAS PRE- SIONES GENERADAS.

La utilización de las válvulas como generadores de sobrepresiones tie-
nen un impacto sustancial de todas las causas que puedan generar condiciones
de transiente. Este efecto es más pronunciado con las válvulas de compu-

tas donde las válvulas debe estar casi cerradas antes de generar suficiente - pérdidas de presión para flujos lentos. El resultado es que, para un sistema sencillo (recipiente-tubería), el tiempo de cierre lineal de una válvula debe ser sustancialmente mayor a $2 L/a$ para reducir las apreciables sobrepresiones de golpe de ariete por debajo del valor calculado para un cierre súbito.

A) SEPARACION DE UNA COLUMNA DE LIQUIDO

La generación de altas presiones en una tubería por un golpe de ariete, pueden causar peligro. Además, generalmente se conoce que las bajas presiones, bajo ciertas circunstancias, pueden causar el colapso de una tubería con paredes delgadas o esas con altas cargas externas. Este caso que comunmente no se entiende se refiere como la separación de columna.

B) CAUSAS DE UNA SEPARACION DE COLUMNA

Cuando el golpe de ariete causa que las presiones en ciertos puntos de la línea se aproximen a la presión de vapor del líquido, comienzan a generarse gases en solución y drásticamente afectan el comportamiento del fluido. Si la caída de la presión es suficientemente severa causa que la presión local alcance la presión de vapor, entonces el líquido flashara (vaporizara, - cavitará), formando grandes paquetes de gases no disueltos y vapores de líquido. A este fenómeno se le llama separación de columna de líquido.

Como consecuencia existen cambios sustanciales en la velocidad de onda por los gases generados y las burbujas de vapor que afectan la elasticidad - del líquido. Además, el hecho que la columna de líquido se ha separado significa que nuestra técnica de análisis no puede aplicarse directamente.

Siempre que la presión en algún punto de la tubería caiga por debajo de la presión ejercida sobre el líquido en la línea, la presión de saturación se alcanza y los gases disueltos comenzarán a formarse. Este es una razón para instalar válvulas de relevo cuando esto se presenta, ya que la tubería puede en algún momento dado contraerse (chuparse). La cantidad de vaporización depende de la caída de presión.

Un ejemplo sencillo de una separación de columna puede encontrarse corriente abajo en el cierre súbito de una válvula. Después del cierre de la válvula, la presión justo corriente abajo de la válvula forzará la caída del valor requerido de presión para que la columna de líquido en movimiento baje su velocidad a cero. Si la caída de presión requerida causa que la presión alcance la presión de vapor del líquido, entonces se presentará la separación de la columna como se muestra en la figura (VI.7.).

Se han hecho muchos análisis acerca de cómo afecta este fenómeno sobre las ecuaciones que describen el golpe de ariete. Ya que los cambios en la velocidad de la onda nos llevan a grandes interpolaciones con el método de solución de la malla rectangular, algunos autores sugieren utilizar el método donde las líneas características sean aproximadas hasta donde sea posible para minimizar los errores en la interpolación y la inestabilidad.

Una vía de solución que se ha dado cuando se presenta el fenómeno con pequeñas vaporizaciones es la de utilizar velocidades de onda más bajas. En la que se toma en cuenta las densidades de los fluidos.

El Programa desarrollado en este trabajo cuando se presenta este fenómeno envía mensajes indicando que se ha generado una columna de separación finalizando su ejecución, no sin antes darnos un perfil de condiciones de presiones generadas.

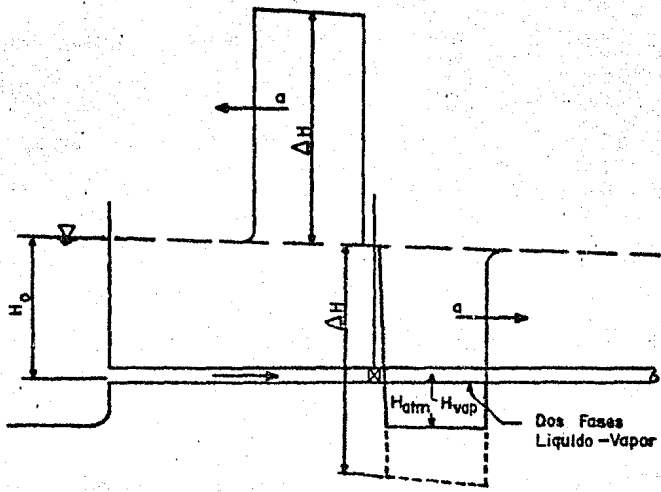


FIG. VI.7 Separación de la columna de líquido debido a un cierre súbito

.3) LAS ESTACIONES DE BOMBEO DENTRO DE LA GENERACION DE SOBREPRESIONES (GOLPE DE ARIETE)

La primera parte de esta sección estará enfocada a una revisión de la teoría de Bombas, así como el uso de las relaciones de Similaridad. Los tipos de bombas que se considerarán estarán únicamente aplicadas a centrífugas y de flujo axial, no se hablará sobre otros tipos.

El arranque o paro de bombas causan transiente en las instalaciones de bombeo. Ya que la cabeza de la(s) bomba(s) y su flujo dependen de la velocidad de la bomba; la rapidez en esos cambios del estado transiente serán considerados. Para este propósito, se desarrollarán condiciones límites especiales para las bombas. Además, se presentará el análisis del transiente causado por varias bombas en operación. Por último se considerarán algunos criterios que pueden tomarse en cuenta para el diseño de un sistema.

CONDICIONES DE TRANSIENTE CAUSADAS POR BOMBAS EN OPERACION

Durante el arranque de una bomba (si es demasiado grande), la válvula a la descarga, generalmente se cierra para reducir la carga eléctrica (voltage) en el motor de la bomba y cuando el motor ha alcanzado una cierta velocidad, la válvula se abre gradualmente. Usualmente en un procedimiento de un paro normal, la válvula en el lado de la descarga se cierra lentamente, y entonces la potencia suministrada al motor de la bomba se corta.

Los transientes causados por fallas súbitas de bombas generalmente son severas y la tubería debe estar diseñada para aguantar las presiones generadas (negativas y positivas) por esas operaciones. Después de la falla, la velocidad de la bomba, se reduce, donde la inercia de ésta, generalmente es

pequeña comparada con la del líquido en la tubería en el lado de la descarga; siempre y cuando no esté localizada una válvula a la descarga para evitar flujo hacia la bomba (válvula check). Porque el flujo y la cabeza de bombeo se reducen, se propagarán ondas negativas de presión corriente abajo de la tubería de descarga y ondas de presión positivas corriente arriba en el lado de la succión.

Para el caso de una bomba sin válvula de retención de flujo (check); el flujo en la tubería de descarga se reduce rápidamente a cero y entonces (el flujo) retrocederá a través de la bomba aun cuando ésta esté girando en la dirección normal. En estas condiciones la bomba se dice estar operando en la zona de disipación de energía. Por este retroceso de flujo, la velocidad en la bomba baja rápidamente, llegando a un punto donde para momentáneamente, y entonces si continua el retroceso, la bomba operará como una turbina pudiendo alcanzar velocidades contrarias que puedan desflechar a la bomba. Si el perfil de la tubería es tal que en el estado transiente la línea de grado hidráulico cae por abajo de la tubería en algún punto, ocurrirán las presiones de vacío y la columna de líquido en la tubería deberá de separarse. Un choque de columnas de líquido se producirá cuando las dos columnas se encuentren posteriormente. En la etapa de diseño, deberán preverse la posibilidad de que se provoque una separación de columna de líquido y, si es necesario, deberán tomarse medidas para corregirlas.

TEORIA Y OPERACION DE BOMBAS PARA SU REPRESENTACION MATEMATICA

El análisis teórico del flujo a través de bombas y su diseño es una disciplina compleja, sofisticada que requiere mucha experiencia. No nos introduciremos a detalles; pero si mostraremos cómo ciertas ecuaciones fundamentales

pueden darnos una gran visión.

La relación entre el flujo (Q) y la cabeza (H) en la frontera deben conocerse para desarrollar las condiciones límites. El flujo de una bomba centrífuga depende de la velocidad rotacional, N, en tanto que la cabeza y la velocidad rotacional en el estado transiente dependen del torque, T, el momento combinado de inercia del par motor-bomba, I, y de la velocidad del líquido entrando al impulsor de la bomba. Entonces cuatro variables Q, H, N y T serán relacionadas para representar matemáticamente el comportamiento de una bomba en el estado transiente.

Generalmente se disponen de las curvas características de la (s) bomba (s) en la zona de su funcionamiento pero es difícil conseguir, a menos que se compre la información a fabricante, los datos característicos de la bomba en la zona de disipación de energía y turbina, cuando se opere sin la válvula, ya que la válvula permite aislar a la (s) bomba (s) del estado transiente generado. Esta información les sirve a otras especialidades de ingeniería para realizar el análisis de vibraciones en la (s) bomba (s).

Como es usual colocar estas válvulas a la descarga en el transporte de líquido en la industria petrolera, nuestro análisis eliminará el comportamiento mostrado de las bombas en las dos zonas posteriores a las causas generadas del transiente.

FUNDAMENTOS

La ecuación fundamental aplicable a operaciones de bombeo es la ecuación de momento

$$\sum M_o = Q \rho (r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t}) \quad (VI.2.1.)$$

Donde ΣM_o es la suma de los momentos de la presión, esfuerzos y fuerzas del fluido alrededor del eje de la bomba; Qf es la masa de flujo y rVt es el momento del componente tangencial del vector velocidad del impulsor. Porque la sumatoria de los momentos (ΣM_o) es el torque ejercido por la bomba sobre el fluido podemos reemplazar este término por el símbolo más convencional de expresión T. Se notará que otras fuerzas que actúan sobre el fluido son despreciables o tienen momentos con valor a cero (por ejemplo: sino hay prerotación del fluido a la entrada en el ojo del impulsor; es decir, el fluido trae una velocidad de giro igual a cero o la influencia que puedan tener la presiones de entrada y salida, etc.). Consecuentemente podemos citar que el torque ejercido por el impulsor sobre el fluido es:

$$T = Q f (r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t}) \quad (\text{VI.2.2.})$$

Ahora es posible desarrollar una expresión para la cabeza producida por la bomba. Usando la ecuación convencional de potencia del fluido

$$\text{Potencia} = Q f H_p'' \quad (\text{VI.2.3.})$$

Donde H_p'' es la energía suministrada por cada libra de fluido; igualando con la ecuación de potencia mecánica

$$\text{Potencia} = T w \quad (\text{VI.2.4.})$$

Donde w es la velocidad angular de la bomba en rad/seg, así tenemos:

$$H_p'' = \frac{w}{g} (r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t}) \quad (\text{VI.2.5.})$$

El valor de H_p'' incluye aumentos de energía potencial, cinética y de presión. Vemos que el término H_p'' no es la cabeza incrementada a través de la bomba. En la aplicación de la ecuación (VI.2.1.) suponemos que la velocidad a la entrada y salida del impulsor de la bomba es uniforme en dirección y mag

nitud. Porque las aspas del impulsor realizan trabajo sobre el fluido, ocurrirán diferencias de presión en los lados opuestos de las aspas.

Como resultado, la cabeza se expresa como

$$H_p^i = \frac{W}{g} (C_2 \sqrt{2} V_{2t} - C_1 V_{1t}) \quad (VI.2.6.)$$

Donde $H_p^i < H_p^a$, pudiendo relacionar ambas cabezas con una eficiencia de las aspas como:

$$H_p^i = \eta H_p^a$$

Donde el factor η dependerá del número de aspas, generalmente tiene un valor alrededor de 0.7. El valor de H_p^i a través del impulsor debe ajustarse con las pérdidas reflejadas entre el lado de la succión y el lado de la descarga. El valor resultante es $H_p < H_p^i$ y este valor (de H_p) es el término incluido en la ecuación unidimensional de Bernoulli

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + H_p = Z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_{l1-2} \quad (VI.2.7.)$$

6

$$H_p = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} - \left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} \right) + \sum h_{l1-2}$$

Con algunos ajustes, dependiendo de la bomba y el fabricante, el valor de H_p es el mostrado sobre la curva característica de la bomba.

A) POTENCIA Y EFICIENCIA EN BOMBAS

La potencia suministrada por el trabajo de bomba está dada generalmente en horsepower (caballos de fuerza) con el símbolo BHP (o potencia al freno). Por las pérdidas que se tienen solamente una fracción (del 70% al 90%) de esta potencia se suministra al fluido en la tubería. La eficiencia glo-

bal de la bomba está dada como:

$$e = \frac{Q \rho H_p}{550 \text{ BHP}} \quad (\text{VI.2.8.})$$

Este valor se encuentra por pruebas de laboratorio a diferentes condiciones de operación.

Las pérdidas entre el trabajo desarrollado por la bomba y la potencia final suministrada al fluido en la tubería son el resultado de muchas causas. Por mencionar algunas, tenemos: pérdidas mecánicas por fricción en los sellos, empaques, etc. Todas esas causas extraen energía y reducen la eficiencia en la bomba.

B) LEYES DE SIMILARIDAD

Aplicaremos las leyes de similaridad a situaciones de golpe de ariete causadas por fallas en el sistema de bombeo. Los principios de similaridad nos permiten predecir cabezas, flujos y torques sobre un amplio rango de velocidades cuando solamente usamos la información para una sola velocidad.

Para el caso de los números adimensionales muy conocidos, por ejemplo, el número de Reynolds, el número de Froude, etc., es interesante reconocer que en el caso de bombas, la similaridad cinemática toma precedencia sobre la similaridad dinámica. En la similaridad cinemática el campo de velocidades en el modelo y prototipo son idénticos. Porque las bombas son operadas a una velocidad determinada por el motor y no afectadas por el flujo, entonces debemos seleccionar los flujos, los cuales dan relaciones idénticas de velocidad a velocidades del impulsor; para esto, podemos decir que dos bombas serán homologas si son geoméricamente similares y las trayec-

torias del flujo de corriente a través de ellas son similares. Las velocidades de flujo son proporcionales a Q/D^2 y las velocidades del impulsor son — proporcionales a ND donde D es el diámetro del impulsor y N es la velocidad rotacional en RPM. La similaridad cinemática requiere que esas relaciones — sean constantes, las cuales dan las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q}{N D^3} = \text{Constante} \quad (\text{VI.2.9.})$$

Porque los efectos viscosos son importantes en las bombas, es deseable tener la equivalencia del número de Reynolds en el modelo. En términos de — flujos, la ecuación es:

$$\frac{ND^2}{\nu} = \frac{Q}{D\nu} = \text{Constante} \quad (\text{VI.2.10.})$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del fluido.

Ahora vemos que las ecuaciones (VI.2.9.) y (VI.2.10.) deben satisfacerse, inicialmente podemos despreciar los efectos viscosos que generalmente — son pequeños comparados con los efectos inerciales debido al alto grado de — turbulencia que entran a la bomba. Así podemos eliminar una relación adimen— cional (Ecuación VI.2.10.). De esta manera, con la ecuación (VI.2.9.) la — cual nos muestra directamente las relaciones entre el aumento de cabeza y la potencia requerida entre el modelo y el prototipo. Por lo tanto, pueden decirse ecuaciones apropiadas usando las relaciones de la teoría básica. La ecuación (VI.2.6.) muestra que el aumento de cabeza es proporcional a la velocidad de la bomba, diámetro y velocidad de flujo, o en forma de ecuación.

$$H_p \propto ND \frac{Q}{D^2}$$

Reemplazando Q por ND^3 de la ecuación (VI.2.9.) y reduciendo términos obtenemos:

$$\frac{H_p}{N^2 D^2} = \text{Constante} \quad (\text{VI.2.11.})$$

Si los mismos argumentos se aplican a la ecuación (VI.1.2.) para el torque, tenemos:

$$T \propto Q f D \frac{Q}{D^2}$$

Utilizando otra vez la ecuación (VI.2.9.) se obtiene

$$\frac{T}{f N^2 D^5} = \text{Constante} \quad (\text{VI.2.12.})$$

Usando la relación $BHP \propto T\omega$, nos da una relación para la potencia:

$$\frac{BHP}{f N^3 D^5} = \text{Constante} \quad (\text{VI.2.13.})$$

Esas relaciones pueden utilizarse para predecir cambios en el flujo, - cabeza y potencia requerida por bombas de diferentes tamaños (impulsores) o para bombas funcionando a diferentes velocidades. La aplicación más interesante se presenta en las situaciones del golpe de ariete cuando la potencia de una bomba falla y la misma comienza a desacelerar. En este caso, el desaceleramiento de la bomba es un prototipo de escala 1:1 (mismo tamaño) con cambios sucesivos de velocidades. Bajo esas condiciones usaremos las reglas de similitudes como el mejor estimado del funcionamiento de la bomba a cualquier velocidad.

Por otro lado, si los efectos viscosos no pueden ser despreciados como en el caso de líquidos muy viscosos, es necesario tomar en cuenta el número de Reynolds (ND^2/ν), así tendremos que para cada número de Reynolds tendremos una relación del torque y la cabeza.

CARACTERÍSTICAS Y FALLA DE POTENCIA

El corte súbito del suministro de energía hacia la bomba producirá una falla de potencia. En este caso, la bomba comenzará a desacelerar con la caída de presión en el lado de la descarga y aumentándola en el lado de la succión. De esta manera, las características de la bomba definen la variación de la velocidad con el tiempo después de la falla.

El golpe de ariete resultante puede guiarnos a tener en la tubería generaciones tanto de altas como de bajas presiones. Es importante, por lo tanto, ser capaces de analizar esta situación y determinar las presiones para prever los problemas que nos pueda acarrear.

A) FALLA DE BOMBAS

Después del corte de energía en la bomba, cambian sus características de las condiciones iniciales (cabeza, flujo y torque). Entonces los puntos característicos para otras velocidades de rotación pueden encontrarse usando las relaciones de similaridad para bombas homologas.

Para diferentes velocidades de rotación (giro), las características de las bombas se muestran como en la fig. (VI.8.) donde cada curva se calcula de la curva original (N_0) utilizando la ecuación (VI.2.9.) y (VI.2.11.). Se nota que en nuestras aplicaciones, D es la misma en todo el regimen de velocidades (misma bomba) así es que se pueden modificar las ecuaciones a la siguiente forma:

$$\frac{Q}{N} = \text{Constante}$$

(VI.2.14.)

$$\frac{H_p}{N^2} = \text{Constante} \quad (\text{VI.2.15.})$$

$$\frac{T}{N^2} = \text{Constante} \quad (\text{VI.2.16.})$$

Las curvas de las velocidades N_1 , N_2 , etc., pueden generarse seleccionando puntos a lo largo de la curva inicial (N_0) y utilizando las ecuaciones:

$$Q_1 = Q_0 \frac{N_1}{N_0} \quad (\text{VI.2.17.})$$

$$H_{p1} = H_{p0} \left(\frac{N_1}{N_0} \right)^2 \quad (\text{VI.2.18.})$$

De hecho, usando la misma Q_0 y H_{p0} y variando N , podemos generar un gran número de puntos, cada uno en una curva característica diferente. Todos esos puntos caen en una forma parabólica (C_0) pasando a través del origen. Si el procedimiento se repite para los puntos C-1, C-2, C-3, etc. sobre la curva original, entonces el conjunto completo de las curvas características de la bomba pueden obtenerse y graficarse.

Cuando sucede la falla se generan los cambios de velocidades en la bomba, una línea puede trazarse sobre el diagrama característico de la fig. - - (VI.8.) la cual representa la cabeza y el flujo a diferentes velocidades.

Por supuesto la progresión de la falla está determinada por la inercia rotacional de las partes móviles y el torque ejercido por el líquido sobre el impulsor, así como también por la hidráulica de la tubería.

Dos tipos de situaciones generales se muestran en la fig. (VI.8.). La primera situación ocurre cuando la altura estática (Static lift) es relativa

mente pequeña y la fuerza gravitacional está ayudando al proceso a detenerlo. Como consecuencia, el flujo a través de la bomba cae a cero rápidamente mientras que una fija cabeza positiva en la bomba existe. Entonces ocurre el retroceso de flujo a través de la bomba a menos de que se instale una válvula check en la tubería.

La segunda situación en la que la tubería a la descarga es bastante larga y una gran porción de la cabeza generada por la bomba se utiliza para vencer las pérdidas por fricción en la tubería. Cuando se corta la potencia en esta configuración, la gran inercia del fluido en la tubería desaparece lentamente, la mayor parte por el efecto viscoso; la bomba tiende a desacelerar lentamente y la cabeza cae a cero antes de que el flujo lo haga. En este punto el flujo retrocede hacia la bomba. Si se coloca una línea de bypass alrededor de la bomba instalándola con dos válvulas checks como se muestra en la figura (VI.9.), puede evitarnos que el retroceso del flujo pase por la bomba.

Es evidente que ahora, en general, hay cuatro posibles configuraciones de flujo a través de la bomba:

- 1) El líquido fluye corriente abajo (dirección positiva) a través de la bomba y ésta también gira en su misma dirección.
- 2) El flujo ocurre en dirección contraria a la vez que la bomba gira en su dirección inicial (disipación de energía).
- 3) La bomba y flujo están en sentido contrario (turbina).
- 4) Finalmente ocurre que el flujo tiene dirección positiva mientras que la bomba está girando en dirección negativa.

La posibilidad de que ocurran las cuatro configuraciones depende de la existencia de by passes, válvula check y válvulas de control en el sistema de bombeo. En general, y como habíamos señalado solamente se disponen los datos de la configuración uno (1) de fabricantes. Si se espera que la bomba opere en cualquiera de esas otras configuraciones, entonces se requerirán pruebas especiales para obtener las características del comportamiento.

El siguiente desarrollo matemático se supone, primero que existe una válvula check en la tubería de descarga y, si la bomba es de un largo tramo de tubería de succión, podremos incorporarle un by pass hacia adelante, la cual abrirá cuando la cabeza baje a cero, bajo las condiciones de flujo. Entonces siempre estaremos operando en la configuración uno (1).

B) ESTABLECIMIENTO DE LAS ECUACIONES

A lo largo de cada una de las parábolas pasando a través de C-2, C-1, C₀, C+1, etc., en la fig. (VI.8.) los valores de Q/N y HN^2 son constante. Es posible, ahora, representar los datos totales característicos de la bomba de la fig. (VI.8.) sobre una sola curva. La misma razón se aplica a los datos del torque T/N^2 . Un ejemplo típico se muestra en la fig. (VI.10.). Para de mostrar cómo los datos de la fig. (VI.8.) pueden calcularse, considere una cabeza H a un flujo y velocidad dada. Si se conoce la velocidad (N), calcule Q/N , lea de la fig. (VI.10a.) un valor de H/N^2 y entonces determine el valor de H. Ahora, para encontrar el cambio de velocidad (N), debemos utilizar la información del torque y el momento de inercia polar del sistema.

Nótese que en la curva característica H/N^2 vs Q/N , fig. (VI.10.) tiene

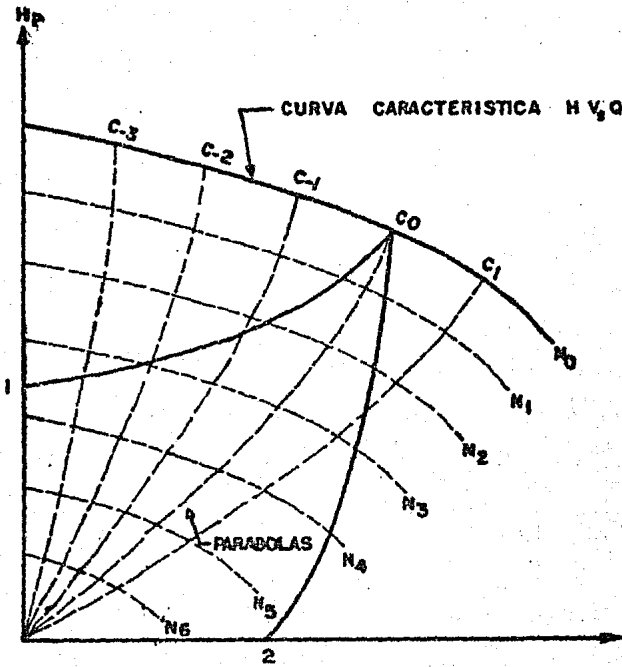


FIG. VI 8 CURVAS MULTICARACTERISTICA PARA UNA BOMBA A VARIAS VELOCIDADES

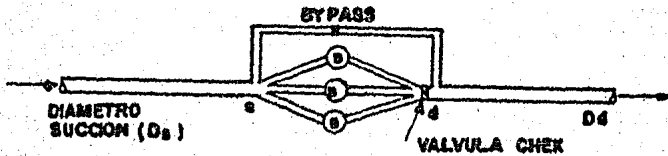


FIG. VI 9 CONFIGURACION TIPICA PARA BOMBAS BOOSTER EN PARALELO

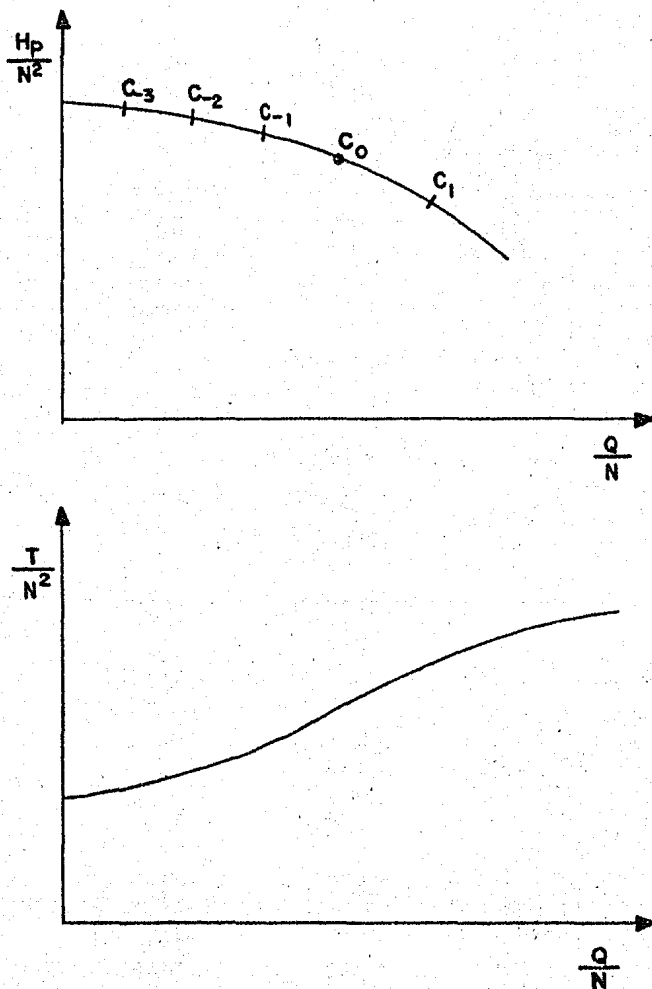


FIG.VI.10 CURVAS TÍPICAS H_p/N^2 Y T/N^2 PARA UNA BOMBA.

una forma muy similar a la curva característica, H vs Q a velocidad constante; fig. (VI.8.) siendo una curva para cada velocidad.

Si tomamos un sistema de bombas idénticas en paralelo en una tubería, como se muestra en la fig. (VI.9.). De aquí vemos que existen cinco variables no conocidas (una vez que las nuevas velocidades han sido calculadas).

Las ecuaciones son las siguientes:

En el lado de la succión; cumpliendo la línea característica C^+ :

$$V_{ps} = C1 - C2 H_{ps} \quad (VI.2.19.)$$

Recordando que: (igual que para una válvula en el interior de la línea).

$$C1 = V_{i-1} + \frac{g}{a} H_{i-1} - \frac{1}{2} \frac{f \Delta t}{D} V_{i-1}/V_{i-1}/$$

$$C2 = \frac{g}{a}$$

Y en el lado de la descarga; cumpliendo la línea característica C^- .

$$V_{pd} = C3 + C4 H_{pd} \quad (VI.2.20.)$$

Donde

$$C3 = V_{i+1} - \frac{g}{a} H_{i+1} - \frac{1}{2} \frac{f \Delta t}{D} V_{i+1}/V_{i+1}/$$

La ecuación de continuidad:

$$V_{ps} A_s = V_{pd} A_d \quad (VI.2.21.)$$

6

$$V_{ps} = V_{pd} = N_{pu} V_p$$

Donde, N_{pu} = número de bombas operando

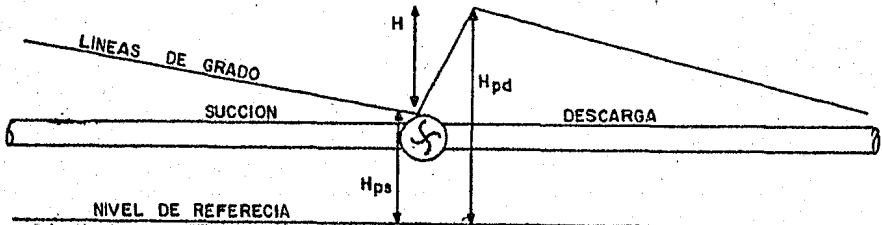
La ecuación de energía

$$H_{pd} = H_{ps} + H \quad (VI.2.22.)$$

Y la curva característica de la bomba

$$H = f(Q) = F'(V_p \text{ só}) \quad (VI.2.23.)$$

El sistema puede analizarse por la siguiente fig.



Aquí se tienen cinco ecuaciones con cinco incógnitas. Recordando que la ecuación (VI.2.23.) puede expresarse en forma polinomial del orden que me-

se ajuste. Como ahora hay que tomar en cuenta las variaciones de velocidad se debe construir una tabla de valores de Q/N vs H/N^2 .

En el caso de un sistema de bombas en serie, las ecuaciones que deben considerarse para los cambios son:

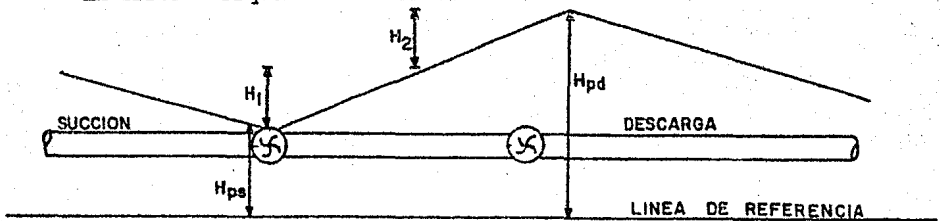
Ecuación de Energía

$$H_{pd} = N_p H + H_s = H_1 + H_2 + H_s \quad (\text{VI.2.24.})$$

Ecuación de continuidad

$$V_{ps} = V_{pd} \quad (\text{VI.2.25.})$$

El sistema esquemáticamente será:



Y el sistema se resuelve de igual forma que para el arreglo de bombas en paralelo.

C) CALCULO DE LOS CAMBIOS DE VELOCIDAD

El establecimiento de las ecuaciones en la sección anterior, se basa sobre la premisa que se conozca la nueva velocidad de rotación del impulsor en el tiempo y que se calculen los nuevos valores de cabezas y flujos. Esta velocidad de rotación se encuentra calculando el desaceleramiento del torque y evaluando los cambios de velocidad de rotación sobre un intervalo de tiempo.

Las partes giratorias del sistema (bomba, motor) tienen un momento de inercia rotacional. Y porque el impulsor de la bomba gira para imprimir velocidad al líquido a través del torque suministrado por el motor, su inercia rotacional también debe estimarse después de la falla; además del alcanzado por el motor después de la falla; estos valores no son fáciles de obtener. Para el caso del motor el cálculo del valor está en función de su geometría y se complica más aún si es una turbina. Sino se tienen valores como tales, ya sean proporcionados por fabricantes o por pruebas; pueden estimarse valores que nos produzcan un paro total entre 5 seg. a 25 seg., dependiendo del tamaño y potencia de las bombas, después de la falla. Este dato es necesario, sino el análisis no tiene ningún sentido.

Bajo condiciones a regimen permanente, el torque proporcionado por el motor se equilibra con la resistencia del torque del fluido ejercido via fuerzas de presión sobre las aspas del impulsor. El torque de un sistema giratorio es igual al producto de la aceleración angular por el momento polar de inercia del sistema. Puesto que el suministro del torque se corta después de la falla, no hay un torque externo sobre la bomba. El torque desacelerado (o contratorque) es el torque de la bomba; es decir, la resistencia del torque del sistema (fluido) desacelera la bomba, entonces.

$$T = I \frac{d\omega}{dt}$$

6

$$T = \frac{2\pi}{60} I \frac{dN}{dt} \quad (\text{VI.2.26.})$$

Donde, I es el momento rotacional del sistema, es decir, el combinado por la bomba, motor, eje y líquido entrando en el impulsor de la bomba, W y N son las velocidades de giro de la bomba, en rad/seg y en RPM, respectivamente.

Para encontrar los cambios de velocidades se debe integrar la Ecuación (VI.2.26.)

$$\int \frac{dN}{N} = \frac{60}{2\pi I} \int dt$$

No se conoce como varía T con respecto al tiempo en cada punto; así es que mejor se toman incrementos pequeños de tiempo (Δt), donde T es constante en los anteriores incrementos de tiempo; es decir, igual a la Ec. (VI.2.4.):

$$T = \frac{BHP}{W} = \frac{60}{2\pi} \frac{BHP}{N(t)}$$

Donde: BHP es la potencia y obtenida por la Ecuación (VI.2.8.)

Incorporando esta aproximación, entonces las nuevas velocidades de giro se podrán calcular como:

$$N(t + \Delta t) = N(t) - \frac{60}{2\pi I} T(t) \Delta t \quad (VI.2.27.)$$

Con esto, la nueva velocidad puede determinarse explícitamente usando un valor del torque a una velocidad conocida por las curvas de T/N^2 vs Q/N . Ahora es posible a proceder con el cálculo para las cabezas y el flujo.

D) SOLUCION DE LAS ECUACIONES

Por sencillez en la solución del conjunto de ecuaciones de (VI.2.19.) a (VI.2.23.) se representa a $H_p = f(Q)$ como una función lineal. En otras palabras, el gráfico de H_p/N^2 vs Q/N será una secuencia en segmentos de línea recta (ver fig. VI.11.).

La ecuación de la línea recta sobre un rango de Q/N es:

$$\frac{H_p}{N^2} = \left[\frac{H_A - H_B}{Q_A - Q_B} \frac{Q}{N} + H_B - Q_B \frac{H_A - H_B}{Q_A - Q_B} \right] Nst$$

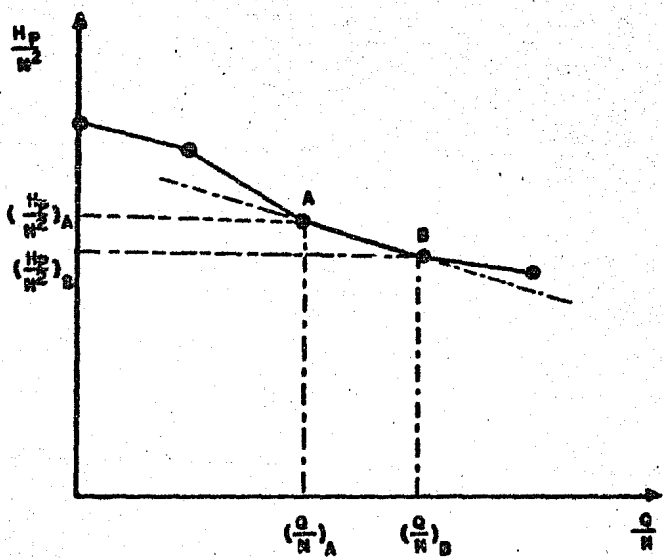


FIG. III REPRESENTACION LINEAL DE VALORES
DE $\frac{H_p}{N^2}$ VS $\frac{Q}{N}$

Donde N_{st} es el número de etapas para cada una de las bombas. Resumiendo esta ecuación; se obtiene:

$$\frac{H_p}{N^2} = \left[C_7 \frac{Q}{N} + C_8 \right] N_{st} \quad (VI.2.29.)$$

Donde

$$C_7 = \frac{H_A - H_B}{Q_A - Q_B}$$

$$C_8 = \left[H_B - Q_B \frac{H_A - H_B}{Q_A - Q_B} \right]$$

Ahora se puede combinar la Ecuación (VI.2.29.) con las otras ecuaciones. El resultado de tales combinaciones son:

$$V_{pd} = \frac{\frac{C_1}{C_2} + N_{st} \frac{N^2 C_8 + C_3/C_4}{\frac{1}{C_4} + \frac{A_d}{C_2 A_s} - \frac{N C_7 A_d N_{st}}{N_{pu}}}}{\quad} \quad (VI.2.30.)$$

Donde N_{pu} es el número de bombas en paralelo. Si $V_{pd} > \beta$, entonces las ecuaciones (VI.1.19.) a (VI.2.23.) pueden utilizarse para encontrar las incógnitas restantes.

Además se debe checar H_p . Si $H_p < \beta$, entonces se hace $H_p = \beta$ y $H_{ps} = H_{pd}$ y se calcula el flujo de las siguientes ecuaciones.

$$V_{pd} = \frac{C_1 C_4 + C_2 C_3}{C_2 + C_4 \frac{A_d}{A_s}} \quad (VI.2.31.)$$

$$V_{ps} = \frac{A_d}{A_s} V_{pd} \quad (VI.2.32.)$$

Las ecuaciones (VI.2.31.) y (VI.2.32.) pueden utilizarse para encontrar los valores de H_{ps} y H_{pd} .

Si, por consiguiente, V_{p1} es negativo, entonces $V_{ps} = V_{pd} = \beta$ y las - - ecuaciones (VI.2.19.) y (VI.2.20.) se utilizan para calcular H_{ps} y H_{pd} . También se debe checar Q/N y si se está fuera del intervalo A-B, un conjunto nuevo de coeficiente C_7 y C_8 deben calcularse y el proceso de solución debe repetirse.

FALLA DE UNA O MAS BOMBAS OPERANDO EN UNA ESTACION

Hasta ahora se han establecido las ecuaciones que rigen cuando las bombas fallan simultáneamente en una estación. Ocasionalmente se hace necesario encontrar la presión resultante del paro de una o más bombas de una estación. El efecto generalmente es de menor significancia que la que ocurre cuando las bombas fallan simultáneamente. Se tomarán las ecuaciones (VI.2.19.) hasta -- (VI.2.35.) para aplicarlas a un sistema operando en paralelo y supondremos -- que cada bomba tiene a la descarga una válvula check.

A) ESTABLECIMIENTO DE LAS ECUACIONES PARA FALLAS DE UNA O MAS BOMBAS OPERANDO EN PARALELO

Si nos referimos de nuevo a la fig. VI.9. para una aplicación típica de bombas en paralelo, vemos que las ecuaciones VI.2.19. y VI.2.20, VI.2.21. y VI.2.22. permanecen igual; es decir, no cambian. La ecuación VI.2.23. debe - de modificarse porque no todas las bombas pararán después de la falla.

Si N_{fa} es el número de bombas fallando, entonces la nueva velocidad de las N_{fa} 's será dada por la ecuación VI.2.27. como:

$$N = N(t) - \frac{60}{2\pi} T(t) \Delta t$$

Cada una de las bombas que fallan generan cabezas de acuerdo a la ecuación VI.2.29.

$$H_p = N^2 \text{Nst} \left(C_{7fa} \frac{Q_{fa}}{N} + C_{8fa} \right) \quad (\text{VI.2.33.})$$

Donde Q_{fa} es el flujo a través de cada una de las bombas en desaceleración. Las bombas que continúan operando generan cabezas de acuerdo a la ecuación.

$$H_p = N_o^2 \text{Nst} \left(C_7 \frac{Q}{N_o} + C_8 \right) \quad (\text{VI.2.34.})$$

Por supuesto, el aumento de cabeza a través de las bombas en paralelo debe ser igual al aumento de cabeza en cada bomba. El flujo a través de cada una de las bombas debe satisfacer esta necesidad. Entonces, igualando las ecuaciones VI.2.33. y VI.2.34. dan la relación que existen entre los flujos en la falla y la velocidad inicial de las bombas.

$$Q_{fa} = \frac{N}{C_{7fa}} \left[\left(\frac{N_o}{N} \right)^2 \left(C_7 \frac{Q}{N_o} + C_8 \right) - C_{8fa} \right] \quad (\text{VI.2.35.})$$

Con la ecuación de continuidad (VII.2.21.), se puede relacionar el flujo de las bombas con el flujo en la tubería a la descarga.

$$N_{fa} Q_{fa} + (N_{pu} - N_{fa}) Q = V_{pd} A_d \quad (\text{VI.2.36.})$$

Combinando esas ecuaciones con las ecuaciones III.2.19 a VI.2.22. se obtiene la siguiente ecuación para V_{pd} .

$$V_{pd} = \frac{\left(\frac{C_1}{C_2} \right) + \left(\frac{C_3}{C_4} \right) \left(\frac{N_{fa}}{N \text{Nst} C_{7fa}} + \frac{N_{pu} - N_{fa}}{N_o \text{Nst} C_7} \right) + \frac{N_{fa} N C_{8fa}}{C_{7fa}} + \frac{N_{pu} - N_{fa} N C_8}{C_7}}{\left(\frac{1}{C_4} + \frac{A_d}{A_s C_2} \right) \left(\frac{N_{fa}}{N \text{Nst} C_{7fa}} + \frac{N_{pu} - N_{fa}}{N_o \text{Nst} C_7} \right) - A_d} \quad (\text{VI.2.37.})$$

Si $V_{pd} > \beta$, entonces se debe cerrar las bombas que están fallando para ver si las válvulas check están cerradas. Para cumplir con esto, se debe calcular Q_{fa} de la ecuación siguiente.

$$Q_{fa} = \frac{\left(\frac{1}{C_4} + \frac{Ad}{ASC_2} \right) V_{pd} - \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_3}{C_4} + N^2 N_{st} C_8 f_a}{N N_{st} C_7 f_a} \quad (VI.2.38.)$$

Si $Q_{fa} < \theta$, entonces el cálculo para V_{pd} debe hacerse de nuevo con las bombas fallando y las válvulas check cerradas.

$$V_{pd} = \frac{\frac{C_1}{C_2} + \frac{C_3}{C_4} + N_{st} N_0^2 C_8}{\frac{1}{C_4} + \frac{Ad}{ASC_2} - \frac{N_0 C_7 Ad N_{st}}{N_{pu} N_{fa}}} \quad (VI.2.39.)$$

El cálculo de las cabezas y los valores de los flujos se hace como antes de que existiera la falla. A las válvulas check para cada bomba; cuando cierran en la falla, no se les permite abrir después de que su bomba correspondiente ha fallado. Por el contrario, en las bombas en operación, sus válvulas pueden reabrirse.

ARRANQUE DE BOMBAS

El transiente causado por el arranque de bombas son difíciles de calcular con precisión. Una razón de esto, es porque frecuentemente existe aire en la tubería de descarga. Otro problema es que la aceleración de la bomba no sólo depende del flujo a través de ella, sino también del tipo de accionador acoplado a la bomba.

Como se señaló con anterioridad, cuando grandes bombas se arrancan sin tener válvulas de control a la descarga producirán altas presiones, específicamente si el motor es del tipo de inducción y la bomba se arranca sobre la línea con la carga de la columna de líquido y sin reducción del voltaje.

El transiente causado por el arranque de bombas debe analizarse, selec

cionando un tiempo de arranque, T_s y suponiendo que la velocidad de la bomba aumenta linealmente de cero a la velocidad de bombeo en el tiempo T_s . El fabricante del motor puede proporcionar el tiempo que toma el motor para alcanzar la velocidad de bombeo.

Si se conoce la velocidad de arranque de la bomba desde cero hasta N en el tiempo T_s , entonces debe calcularse la cabeza de bombeo, así como el flujo de la bomba. Para este caso, los datos para las características, del torque y del momento de Inercia del par motor-bomba no son necesarios para el análisis.

Por las incertidumbres que se tienen acerca de la variación de la velocidad de arranque con el tiempo (hay ocasiones en que al tiempo de arranque proporcionado por el fabricante del motor debe disminuirse cerca de un 30% para obtener un valor más real), debe analizarse el arranque de bombas, suponiendo que las bombas alcanzan su velocidad normal de operación instantáneamente. Esta aproximación dará presiones más severas que un análisis más preciso y redundará en la obtención de resultados más conservativos.

A) ESTABLECIMIENTO DE ECUACIONES

El enfoque para el establecimiento de las ecuaciones será el mismo que se aplicó para la falla de una o más bombas. Si nos referimos de nuevo a la fig. VI.9. como esquema de trabajo podemos definir las siguientes ecuaciones, adicionales a las ecuaciones VI.2.19. a VI.2.22.:

$$H_p = N_o^2 N_{st} \left(C_7 \frac{Q}{N_o} + C_8 \right) \quad (VI.2.40.)$$

$$V_{pd} Ad = N_{ru} Q \quad (VI.2.41.)$$

Donde N_{ru} es el número de bombas funcionando en ese instante.

La solución de estas ecuaciones dan

$$V_{pd} = \frac{C_1 + C_3 - N_o N_{st} C_8}{C_2 + C_4} + \frac{A_d}{A_{sC2}} + \frac{1}{C_4} + \frac{N_o N_{st} C_7 A_d}{N_{ru}} \quad (VI.2.42.)$$

Las variables que restan por calcularse pueden obtenerse a través de las ecuaciones VI.2.19. a VI.2.22. y las ecuaciones VI.2.40. y VI.2.41. (observar siempre que en la presentación de este trabajo, por facilidad, estamos expresando las ecuaciones con variables ya conocidas (o calculadas) como constantes (C_1 , C_2 , C_3 , etc.) y de esta manera evitar perdernos en el cálculo de las variables no conocidas (o por calcular).

Ahora bien, porque en el arranque de las bombas no hay razón de esperar que ocurra flujo inverso, por lo tanto no se tomarán restricciones en el procedimiento de cálculo. Si la tubería a la descarga está bajo una cabeza estática antes del arranque, entonces no habrá flujo en la tubería hasta que la cabeza de la bomba exceda esta cabeza estática. Esta condición puede ser incluido en el análisis de las ecuaciones suponiendo que $V_{pd} = 0$ (ecuación VI.2.42.) hasta que H_{pd} (ecuación VI.2.22.) exceda sobre el valor de la cabeza estática.

La magnitud del aumento de presión depende del incremento de flujo — cuando la bomba fuerza a abrir la válvula check y comienza a haber movimiento del líquido. Sin aire en la tubería de descarga, los aumentos de presión creados generalmente no son grandes. Por consiguiente, para bombas con grandes cabezas de paro, generarán grandes presiones.

El aumento de presión en el arranque, debe reducirse como una primera instancia, si se tiene válvula a la descarga, cerrando dicha válvula hasta que la bomba alcance una determinada cabeza, y por otra parte, si no se tiene válvula debe reducirse el voltaje suministrado al motor.

CAPITULO VII

**APLICACION DEL MODELO AL OLEODUCTO NUEVO TEAPA - VENTA
DE CARPIO - TULA**

DESCRIPCION

El oleoducto Nuevo Teapa - Venta de Carpio - Tula es un sistema de transporte de crudo que alimenta a las refinarias de Atzacapotzalco, D.F. y la de Tula, Hidalgo. Es un oleoducto de 30 pulgadas de diámetro nominal con una especificación de la tubería API STD. 5 L grado X65. Las estaciones que componen dicho oleoducto son:

<u>Estación No.</u>	<u>LOCALIZACION</u>
1	Nuevo Teapa, Ver.
2	Arroyo Claro, Ver.
3	Arroyo Moreno, Ver.
4	Zapoapita, Ver.
5	Maltrata, Ver.
6	San Martín T., Pue.
7	Venta de Carpio, Edo. de Méx.

La estación de Nuevo Teapa es una estación de bombeo que distribuye el crudo que recibe de las zonas de producción como son el procedente de la Sonda de Campeche con un tipo de crudo maya, la que envía vía Dos Bocas, Tabasco. La de la zona de Cárdenas, Tabasco con un tipo de crudo ligero o la de la zona de la Venta. Tabasco con un crudo tipo terciario y el despuntado proveniente del complejo de Cangrejera. La red de distribución de esta estación la comprenden, el oleoducto a Venta de Carpio, Tula, el oleoducto a Salina Cruz, Oax. y el oleoducto a Poza Rica, Ver.

La estación de Nuevo Teapa, Ver. puede hacer mezclas de los diferentes tipos de crudo que le llegan a los grados API que se les especifiquen en las refinarias.

La figura VI.3.A. muestra un esquema típico de los componentes de la estación No. 1, como son: la zona de filtrado, la zona de mezclado, la zona de envíos de diablos, o la figura VI.3.B. que muestra una típica instrumentación de una estación de bombeo del oleoducto a Venta de Carpio - Tula.

Se analizará el comportamiento hidráulico del oleoducto Nuevo Teapa - Venta de Carpio - Tula, entre el tramo comprendido entre la estación No. 1 de Nuevo Teapa, Ver. (Km 0+000) y la estación No. 3 en Arroyo Moreno, Ver. - (Km 272 + 860) para determinar la variación de la presión, debido a diferentes cambios en las condiciones a los que puede estar sujeta.

DESARROLLO

Se han desarrollado programas de computadora basados en la teoría elástica analizada a través de esta tesis. En sí, la estructura principal del programa no cambia, únicamente lo que se reemplaza son las ecuaciones que introducen condiciones de inestabilidad al sistema (condiciones límites).

BASE DE DATOS

La base de datos que se utilizó para este estudio, es la siguiente:

Perfil topográfico.- se muestra en el plano adjunto.

Especificación de la tubería.- API STD 5L GRADO X65.

Diámetro Nominal.- 30 plg.

Espesor promedio.- 0.286 plg.

Propiedades de Crudo:-

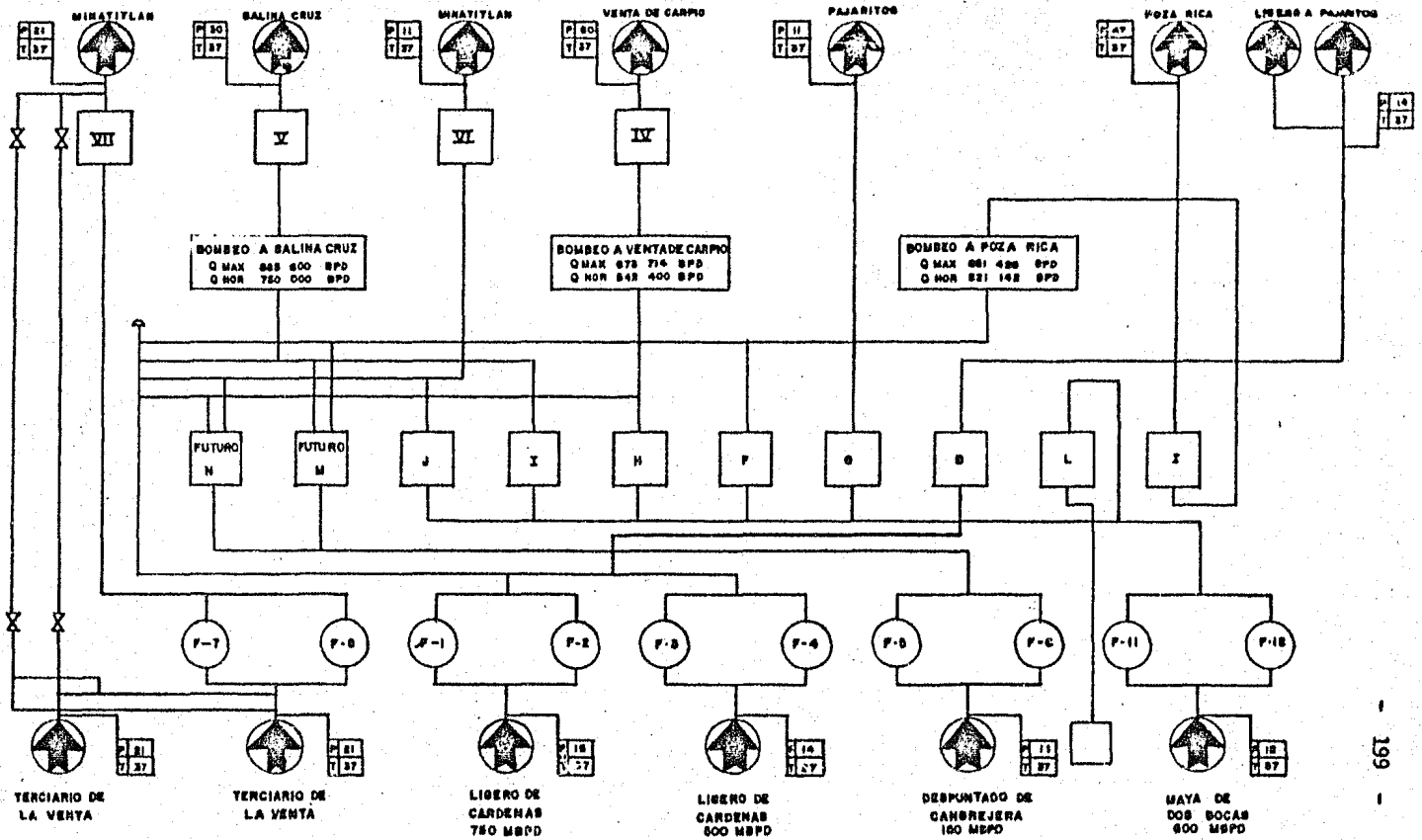
Peso específico = 60.9

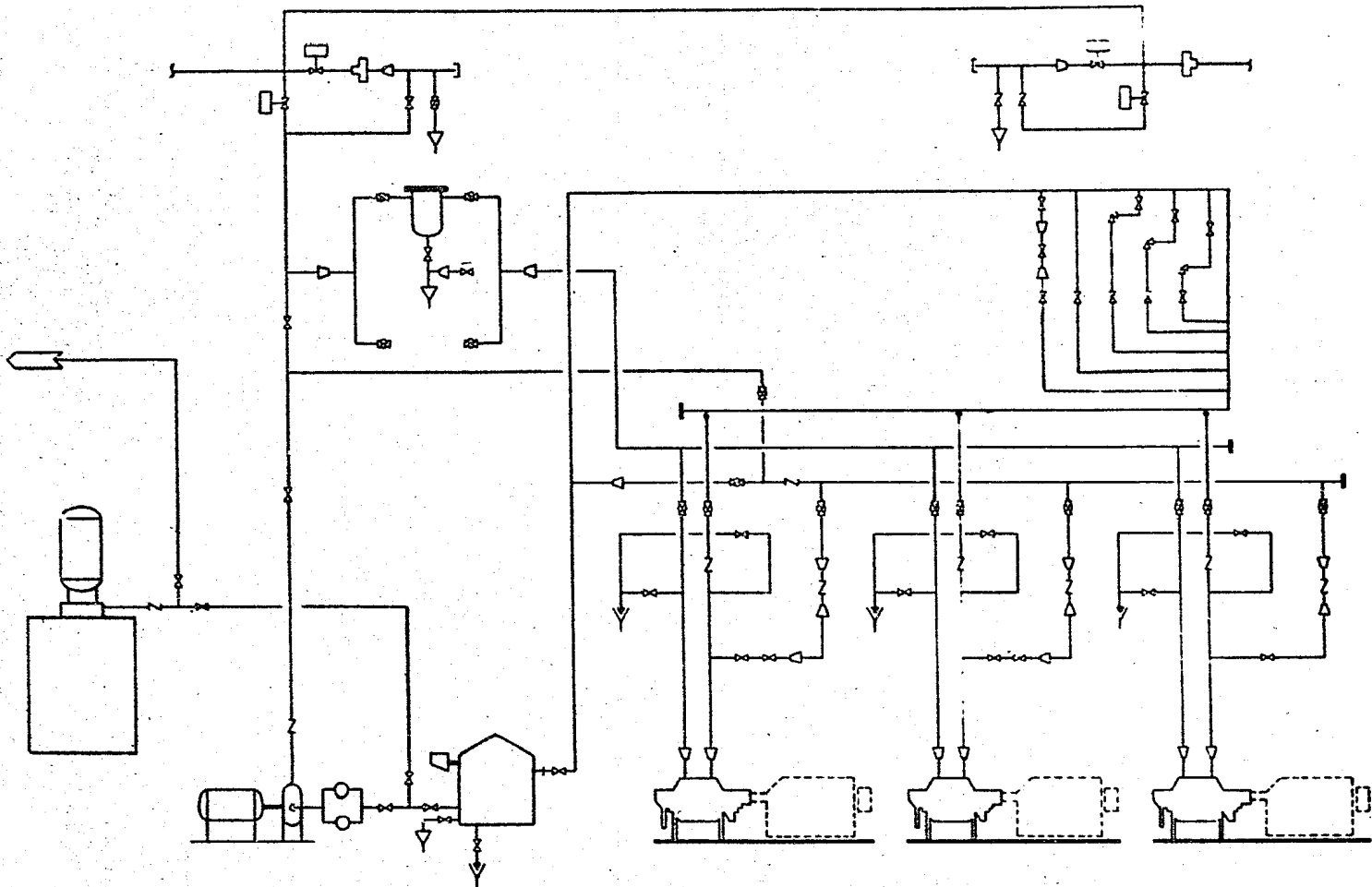
Viscosidad = 11.0 cp

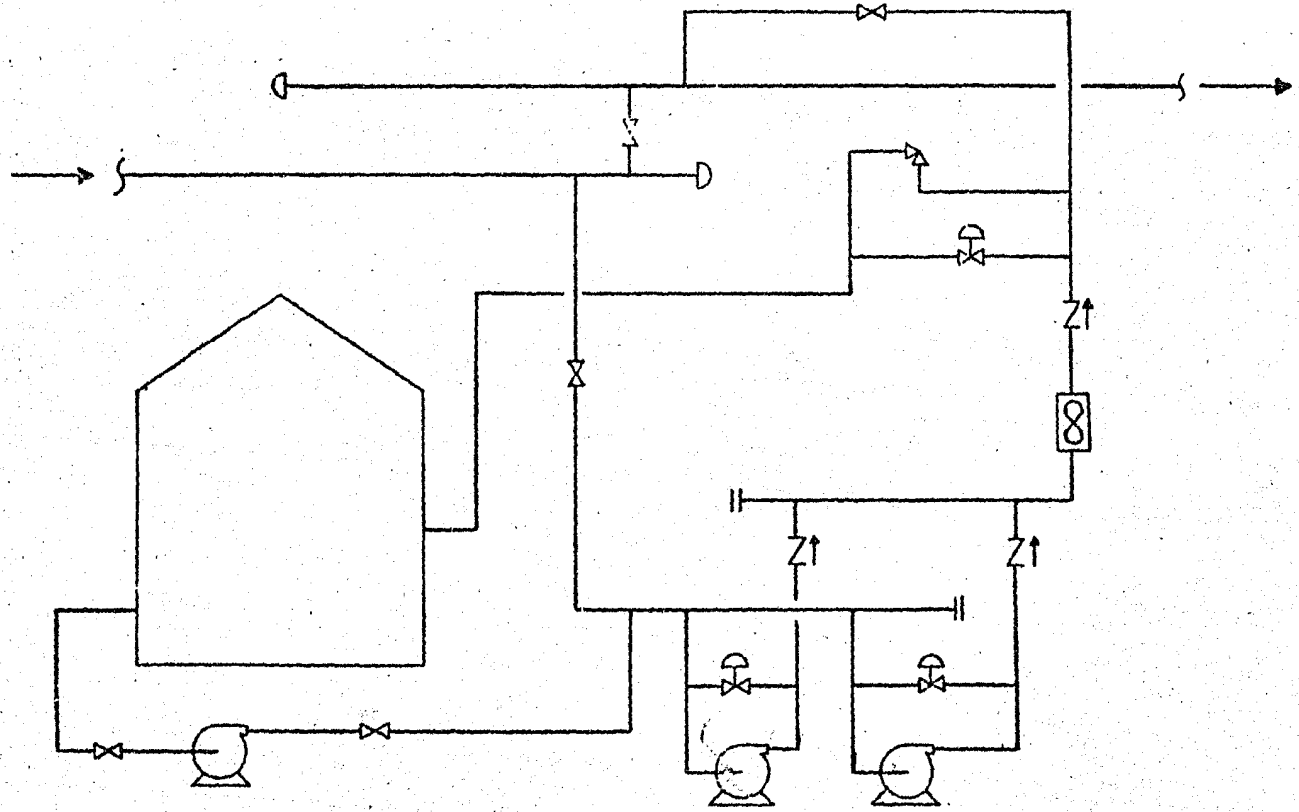
Módulo de Elasticidad volumétrica = 225 000 psi

Presión de Vapor = 0.2 psig

FIG. VI. 3A

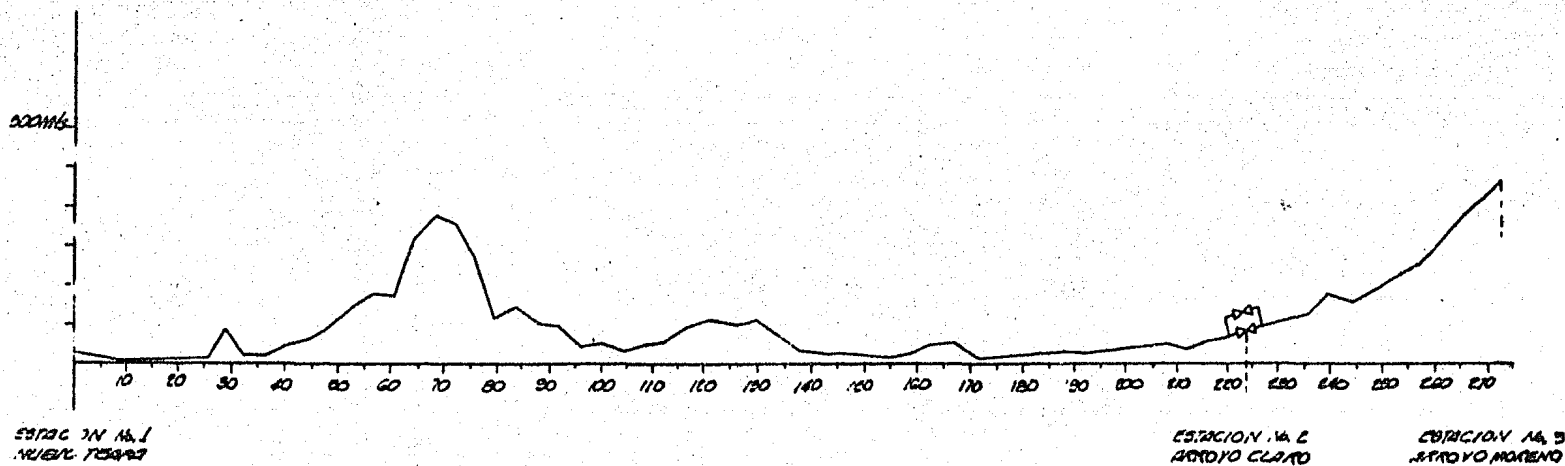






ARREGLO TIPICO DE ESTACIONES

PERFIL TOPOGRAFICO DEL OLEODUCTO NUEVO TEAPA-VENTA DE JARRO-TULA
 TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LA ESTACION DE
 NUEVO TEAPA A LA ESTACION DE ARROYO MORENO



Condiciones de operación:-

Estas fueron obtenidas con una visita a las estaciones de bombeo que se analizará: De la Estación No. 1 a la Estación No. 2

Flujo Volumétrico Manejado = 260 MEPD

Presión a la descarga en la Est. No. 1 = 802.7 psi

Presión a la succión en la Est. No. 1 = 42.61 psi

Presión de succión en la Est. No. 2 = 298.03 psi

Número de bombas en operación = 2

Hay ocasiones, por el bajo flujo manejado, que la estación No. 2 se by pasea; es decir, que de la estación No. 1 se envía directamente a la estación No. 3. He aquí sus condiciones de operación:

Flujo volumétrico manejado = 200 MEPD

Presión a la descarga en la Est. No. 1 = 866.03 psi

Presión a la succión en la Est. No. 1=42.61 psi

Presión de succión en la Est. No. 3 = 289.79 psi

Temperatura promedio de operación = 86°F

Con esta base, iniciaremos a calcular las diferentes condiciones de trabajo del oleoducto, los cuales mostraremos en el siguiente capítulo.

DETERMINACION DEL PERFIL DE PRESIONES EN EL OLEODUCTO A REGIMEN PERMANENTE

Se desarrolló un programa que pueda calcular el perfil de presiones en

tre estación y estación, así como también determina las condiciones bajo las cuales están operando las estaciones de bombeo.

El programa está estructurado de tal forma que pueda evaluarse las presiones por la trayectoria que sigue el oleoducto. Toma las caídas de presión tanto por altura como por fricción. La tubería puede ir hacia arriba, hacia abajo (pendientes positivas o negativas) o estar en posición horizontal; también pueden colocarse diferentes diámetros a lo largo del oleoducto.

Para esto, el programa fue diseñado para colocar las tuberías por tramos en serie, con una capacidad hasta de 30 tramos entre estación y estación con los consiguientes 3 ϕ diámetros diferentes. Además, cada tramo a su vez es dividido en subtramos, con capacidad igual a la de los tramos.

El programa es capaz de resolver para N estaciones en operación. El arreglo de las bombas en las estaciones son en paralelo; arreglo que se manejará en el problema tratado en esta tesis.

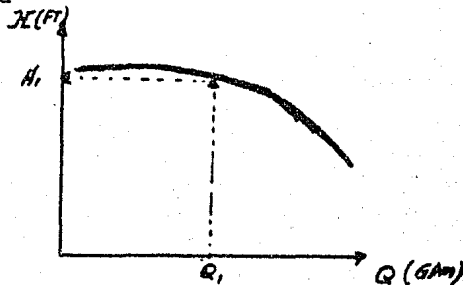
El programa al inicio nos calcula para la estación inicial o estación No. 1 el flujo que enviará, así como la presión a la descarga, proporcionando para esto, la presión de succión de esta estación o presión bajo la cual operará y la presión que se desea obtener en la siguiente estación. Debe proporcionársele el perfil topográfico de todo el oleoducto o si se quiere nada más para las estaciones indicadas.

Con las curvas de las bombas en las estaciones y a través de un método numérico (Richmond o Wegstein) determinan flujo y presión a la descarga; con

esto, especifica las condiciones de la primera estación y comienza a determinar todo el perfil de presiones y así continua con los cálculos.

El procedimiento general es el siguiente:

- 1) Con la curva de la(s) bomba(s) y con un gasto inicial determina la cabeza de descarga



- 2) Calcula la caída de presión

$$h_i = 0.0311 \frac{f_i L_i Q_i^2}{d_i^5}$$

donde:

i = tramo

Q = flujo en GPM

d = diámetro en plg

L = longitud en pies

h = caída de presión en pies de líquido

2a) Calculando el factor de fricción con la siguiente ecuación válida para todos los regímenes de flujo.

$$\frac{1}{f_i} = \left\{ \left[\left(2.547 \ln \left(\frac{1}{0.888/Re^{0.1} + 0.27 \frac{E_i/D_i}} \right) \right) \right]^{16} + \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \right\}^{1/8}$$

3) Compara la presión a la llegada deseada con la presión de llegada calculada. Si converge a un resultado favorable con un cierto error especificado, se dirige al punto (5), sino continua.

4) Calcula la cabeza que se obtiene a través de un Bernoulli.

$$H = H_d - H_s \quad d = \text{descarga}$$
$$s = \text{succión}$$

Con

$$H_d = 4.2d + H_{fd} + P \text{ llegada (144)}/f$$

Y a través del método numérico del intervalo medio calcula un nuevo valor de H (cabeza) y determina qué flujo se está manejando, irse al punto (1) en la gráfica, pero en sentido contrario.

5) Calcula con el flujo y cabeza de convergencia, las condiciones bajo las cuales está operando la estación de bombeo inicial.

6) Calcula los perfiles de presión a lo largo del oleoducto.

7) Para la estación siguiente toma la presión de succión determinando en el paso No. 6 como la presión de llegada y con el mismo flujo, determina qué cabeza de bomba se tiene y cuál es la presión de descarga y posteriormente va calculando los perfiles de presión con el perfil topográfico existente para esa otra estación y así sucesivamente.

Cabe señalar que en las estaciones de bombeo se determinan una serie de condiciones bajo las cuales están operando las bombas; por citar algunas, el NPSH disponible y requerido, si el segundo es mayor que el primero, el --

programa envía un mensaje y hace una finalización, así como si existen presiones negativas en las tuberías; número de bombas, sistema de arreglo de las bombas, etc.

Con respecto a los perfiles de presión, nos da la longitud, las presiones puntuales a diferentes unidades y las presiones obtenidas únicamente por pérdidas por fricción (H).

Para el caso del sistema en estudio (oleoducto Nuevo Teapa - Venta de - Carpío - Tula), las bombas pueden operar a diferentes velocidades, el programa contempla esta flexibilidad.

CAPITULO VIII

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo, se dan los resultados arrojados por los programas de computadora que se desarrollaron para determinar el perfil de condiciones a las que puede estar sujeta la tubería. Es decir, las condiciones — tanto a régimen permanente como las no permanente, analizando las causas — que pueden introducir inestabilidad en el oleoducto.

Por último, analizaremos los resultados de manera que pueda visualizarse fácilmente el fenómeno que ocurre dentro de la tubería.

REGIMEN PERMANENTE

RESULTADOS DEL PROGRAMA QUE DETERMINA EL PERFIL DE PRESIONES.

El programa, el cual ya se ha indicado su estructura nos proporcionará las condiciones bajo las cuales está operando el oleoducto normalmente. Estas fueron obtenidas con una visita a campo, las que ya se especificaron como la base de datos para el estudio. De manera que, la primera lista de resultados serán los que se refieran a la operación de la estación de Nuevo Teapa hasta la Estación de Arroyo Moreno, incluyendo la Estación de Arroyo Claro. Es decir, al caso donde no se by pasea la Estación No. 2, con un flujo volumétrico de operación de 260 MBPD.

Los resultados que se obtuvieron pueden apreciarse en los anexos, de los cuales pueden designarse algunos de importancia.

ESTACION No. 1

PRESION DE SUCCION = $3 \text{ KG/cm}^2 = 42.66 \text{ psi}$

PRESION A LA DESCARGA = $56.4 \text{ KG/cm}^2 = 802.0 \text{ psi}$

NUMERO DE BOMBAS EN OPERACION = 2

VELOCIDAD DE LAS BOMBAS = 5825 RPM

POTENCIA = 2500 HP

CAIDA DE PRESION POR FRICCION = 1185.17FT = 461.7 psi

CAIDA DE PRESION POR ALTURA = 108.26FT = 42.18 psi

FLUJO DE LIQUIDO = 7583.32 GPM

FACTOR DE FRICCION = 0.0199

ESTACION No. 2

PRESION DE SUCCION = $20.96 \text{ KG/cm}^2 = 298.0 \text{ psi}$

PRESION DE LA DESCARGA = $72.42 \text{ KG/cm}^2 = 1029.8 \text{ psi}$

NUMERO DE BOMBAS EN OPERACION = 2

VELOCIDAD DE LAS BOMBAS = 5740 RPM

POTENCIA = 2500 HP

CAIDA DE PRESION POR FRICCION = 256.38FT = 99.88 psi

CAIDA DE PRESION POR ALTURA = 597.12FT = 232.64 psi

ESTACION No. 3

PRESION DE SUCCION = 49.02 KG/cm^2 = 697.06 psi

El perfil de presiones a lo largo del oleoducto puede fácilmente ser localizado con la ayuda del perfil topográfico que aparece en el -- -- -- anexo, de esta forma, pueden indicarse las presiones de operación localizadas puntualmente a lo largo de la tubería.

Para este caso, también se evaluó la condición de que la Estación -- -- -- de Arroyo Claro estuviera operando a una velocidad de rotación mayor -- -- -- (5825 RPM), es decir, igual a la velocidad de operación de la primera Estación. Los resultados son los siguientes:

ESTACION No. 1

Igual a la condición anterior.

ESTACION No. 2

PRESION DE SUCCION = 20.96 KG/cm^2 = 298.0 psi

PRESION A LA DESCARGA = 74.36 KG/cm^2 = 1057.4 psi

NUMERO DE BOMBAS = 2

VELOCIDAD DE LAS BOMBAS = 5825 RPM

POTENCIA = 2500 HP

ESTACION No. 3

PRESION DE SUCCION = 50.97 KG/cm^2 = 724.8 psi

Para el caso donde se by pasea la Estación de Arroyo Claro, es decir; cuando se saca de operación la Estación No. 2 y se envía directamente el crudo de la Estación de Nuevo Teapa a la Estación de Arroyo Moreno, con un flujo volumétrico manejado de 200 MBPD. (Esta condición suele trabajar se comunmente en las estaciones). He aquí los resultados más significativos y para más detalles remitase al anexo (Condición No. 3 y 4).

ESTACION No. 1

PRESION DE SUCCION	= 3 KG/cm ² = 42.66 psi
PRESION A LA DESCARGA	= 60.96 KG/cm ² = 866.85 psi
NUMERO DE BOMBAS	= 2
VELOCIDAD DE LAS BOMBAS	= 5825 RPM
POTENCIA	= 2243.86 HP
CAIDA DE PRESION POR FRICCION	= 901.43 FT = 351.2 psi
CAIDA DE PRESION POR ALTURA	= 705.38 FT = 274.82 psi
FLUJO VOLUMETRICO	= 5833.32 GPM
FACTOR DE FRICCION	= 0.021

ESTACION No. 3

PRESION DE SUCCION	= 16.86 KG/cm ²
--------------------	----------------------------

Para cuando se opera a una velocidad diferente tenemos:

ESTACION No. 1

PRESION DE SUCCION	= 3 KG/cm ² = 42.66 psi
PRESION DE LA DESCARGA	= 60.51 KG/cm ² = 860.45 psi
NUMERO DE BOMBAS	= 2
VELOCIDAD DE LAS BOMBAS	= 5740 RPM
POTENCIA	= 2243.86 HP

ESTACION No. 3

PRESION DE SUCCION	= 16.47 KG/cm ² = 234.2 psi
--------------------	--

Como ya se ha mencionado, la tubería de un oleoducto debe ser segura, confiable y operar en el punto de máxima eficiencia para un consumo mínimo de energía.

De la evaluación de las condiciones de bombeo en las Estaciones se puede apreciar que el oleoducto está operando con un arreglo de bombas en paralelo, esto puede lógicamente observarse si se compara el perfil topográfico a la que estará dispuesto el oleoducto. Por un lado, se sabe que una estación de bombeo tiene mayor flexibilidad cuando sus bombas operan con un arreglo en serie. Ahora bien, las cuestiones por señalarse es ¿porqué no siempre operamos en serie si nos da mayor flexibilidad? y ¿Cuándo seleccionar un arreglo de otro? Para poder discutir sobre el asunto, es conveniente recordar sobre el gradiente hidráulico, el cual se utiliza para establecer las presiones en la tubería, la potencia requerida en las estaciones, así como el número de estaciones y número de bombas; esto hecho en base a una capacidad dada y a una velocidad óptima (en forma global). El gradiente hidráulico nos permite además, determinar el arreglo de las bombas.

En las operaciones en serie, donde cada bomba entrega toda su capacidad ($Q_1 = Q_2 \dots$), genera presiones parciales ($H_1+H_2 \dots$) y suministra al sistema una presión total tiene considerablemente mayor flexibilidad de operación que las instaladas en paralelo. Las bombas en paralelo menos flexibles, donde cada unidad genera presiones máximas ($H_1 = H_2 = \dots$) y entregan una mayor capacidad al sistema ($Q_1 + Q_2 + \dots$).

Para la primera cuestión planteada, es razonable afirmar que cuando las pérdidas por fricción son la mayor proporción en la contribución de la cabeza total requerida por la estación, las bombas en serie serán seleccionadas porque en el caso de que una bomba falle, la capacidad en el sistema se mantiene al disminuir la cabeza total, lo cual no nos provocará problema alguno.

Cuando la presión estática se hace la mayor proporción en la cabeza total requerida, las bombas en paralelo se seleccionarán, y de nuevo si una bomba falla, la tubería mantiene la presión suministrada al sistema al disminuir su capacidad. Para establecer el modo de operación más apropiado de un oleoducto pueden darse las siguientes reglas de dedo:

EN SERIE: Pérdidas por fricción $> 50\%$ de la cabeza total requerida.

EN PARALELO: Cabeza estática $> 50\%$ de la cabeza total requerida

Aplicando a nuestro caso, y de esta manera confirmar las reglas obtenemos:

Para la operación de la Estación No. 1 y No. 3 (condición No. 3 del Anexo):

Cabeza Total en operación	=	2112.28	FT
Cabeza por fricción	=	351.27	FT
Cabeza estática	=	364.2	FT
Cabeza Total Requerida	=	715.47	FT

de donde:

Cabeza total Requerida $*0.5 = 357.73$ FT, así la cabeza estática es $> 50\%$ de la Cabeza Total Requerida; entonces podemos seleccionar un arreglo en paralelo.

Habrán ocasiones que estas reglas no se cumplan, esto se deberá a dos hechos básicamente; como son: A políticas que se llevaron a efecto por parte del cliente y a estar operando a condiciones diferentes de las que fue diseñado el oleoducto.

ANEXOS

CONDICION No. 1

OPERACION DE LAS ESTACIONES

- NUEVO TEAPA
- ARROYO CLARO
- ARROYO MORENO

CON VELOCIDADES DE ROTACION

ESTACION No. 1 = 5825 RPM

ESTACION No. 2 = 5740 RPM

FLUJO VOLUMETRICO = 260 M3PD = 7583.32 GPM

* DATOS GENERALES DEL SISTEMA *

NUMERO DE ESTACIONES	=	2
NUMERO DE TRAMOS DE TUBERIA	=	20
NUMERO DE SECTORES POR TUBERIA	=	10
ALTURA DE SECCION EN LA ESTACION NO. 1	=	109.32 FT
ALTURA EN LA ESTACION NO. 2	=	108.20 FT

* DATOS GENERALES DEL FLUIDO *

FLUIDO	=	agua
TEMPERATURA	=	60.00 F
VISCOSIDAD	=	11.70 CP
DENSIDAD RELATIVA A 60 D.F.	=	.990
PRESION DE VAPOR	=	.20 PSIA

ESTACIONES DE LA TUBERIA

ESTACION	D	L	ELEVACION	F	ELEVACION DE LA TUBERIA
TUBERIA 1	D = 29.43 IN	L = 29524. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 10.0 FT
TUBERIA 2	D = 29.43 IN	L = 54331. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = -42.7 FT
TUBERIA 3	D = 29.43 IN	L = 11286. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = -41.4 FT
TUBERIA 4	D = 29.43 IN	L = 24049. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 101.7 FT
TUBERIA 5	D = 29.43 IN	L = 52441. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = -10.4 FT
TUBERIA 6	D = 29.43 IN	L = 15249. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 187.0 FT
TUBERIA 7	D = 29.43 IN	L = 13123. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 111.1 FT
TUBERIA 8	D = 29.43 IN	L = 25121. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 247.1 FT
TUBERIA 9	D = 29.43 IN	L = 12566. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 557.0 FT
TUBERIA 10	D = 29.43 IN	L = 24377. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 534.8 FT
TUBERIA 11	D = 29.43 IN	L = 13976. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 134.5 FT
TUBERIA 12	D = 29.43 IN	L = 35993. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 197.6 FT
TUBERIA 13	D = 29.43 IN	L = 12604. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 20.3 FT
TUBERIA 14	D = 29.43 IN	L = 15289. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 42.7 FT
TUBERIA 15	D = 29.43 IN	L = 54199. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = -7.3 FT
TUBERIA 16	D = 29.43 IN	L = 15289. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 127.9 FT
TUBERIA 17	D = 29.43 IN	L = 12894. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 192.3 FT
TUBERIA 18	D = 29.43 IN	L = 42192. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 127.9 FT
TUBERIA 19	D = 29.43 IN	L = 39370. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = -16.4 FT
TUBERIA 20	D = 29.43 IN	L = 41119. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = -26.9 FT
TUBERIA 21	D = 29.43 IN	L = 14276. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 36.1 FT
TUBERIA 22	D = 29.43 IN	L = 118734. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = -32.2 FT
TUBERIA 23	D = 29.43 IN	L = 13123. FT	F = .0199		ELEVACION DE LA TUBERIA = 29.5 FT

AMPLIO DE FORTES EN PARALELO

CADA BOMBA TIENE

VELOCIDAD DE LA BOMBA

CADA BOMBA TIENE UN CONECTOR DE 11 (11)

11 TAPAS

11 RPM

11 75.2 LU-F 75.2

1-11	1/2 TAPAS=FI	11P/2TAPAS
1 1/2	2700.0	1700.00
2 1/2	2650.0	2000.00
3 1/2	2590.0	2200.00
4 1/2	2400.0	2600.00
5 1/2	2100.0	2800.00
6 1/2	1900.0	2800.00

ESTACION NO. 1
 CONDICIONES EN LAS ESTACIONES DE BOMPEO
 SERVICIO ESTACIONARIO

TORNILLO (CM/AIS)	CENTRIFICAS
SISTEMA DE LOMIAS	EN PARALELO
NUMERO DE UNICALES EN OPERACION	= 2
NUMERO DE STAFAS	= 1
DIAMETRO EXTERIOR FUENTE (PULG)	= 10 1/2
DIAMETRO INTERIOR FUENTE (PULG)	= 10 1/2
EFICIENCIA AL FRENO (ERAND HOPSEPOLER)	= 2308.90 HP
CABEZA DE LA ESCPA (H)	= 1998.21 FT
CABEZA DE SUCCION (HS)	= 119.32 FT
CABEZA DE DESCARGA (HD)	= 2057.59 FT
FLUJO TOTAL DE LIQUIDO (Q)	= 7583.32 GPM
VELOCIDAD DE ROTACION (N)	= 5825.00 RPM
VELOCIDAD ESPECIFICA (NS)	= 1223. RPM
VELOCIDAD ESPECIFICA DE SUCCION (NS)	= 3792.
EFICIENCIA EN LA OPERACION (E)	= 80.5 %
PUNTO DE MAXIMA EFICIENCIA	**CABEZA (H) = 1806.95 FT
	**FLUJO (Q) = 81.1 %
	= 4337.03 GPM
DIAMETRO DEL IMPULSOR	= 10 5/8 IN
DIAMETRO MAXIMO DEL IMPULSOR	= 11 3/4 IN
ACCION DEL	= TURBINA DE GAS
VELOCIDAD DEL VAPOR (PSHT OFF)	= 9500.00 GPM
VELOCIDAD DEL VAPOR (PSHT OFF)	= 2253.75 FT

=====
 ESTACION NO. 100
 PERFIL DE PRESIONES EN LA YUGA
 REGIMEN ESTACIONARIO
 =====

LONGITUD (M)	FT	PRESIONES (PSI)	PRESION FRIC (IN/CH=2)	PRESION FRIC (PSI)	VELOCIDAD (F/SEG)
TRAMO = 1					
0	2057.59	802.07	56.80	802.07	3.577
1.0	2057.10	801.88	56.39	800.22	3.577
2.0	2056.61	801.69	56.38	798.37	3.577
3.0	2056.12	801.50	56.36	796.51	3.577
4.0	2055.63	801.31	56.35	794.66	3.577
5.0	2055.13	801.12	56.34	792.81	3.577
6.0	2054.64	800.93	56.32	790.96	3.577
7.0	2054.17	800.74	56.31	789.10	3.577
8.0	2053.68	800.55	56.30	787.25	3.577
9.0	2053.19	800.36	56.28	785.40	3.577
10.0	2052.70	800.17	56.27	783.54	3.577
TRAMO = 2					
11.0	2052.70	800.17	56.27	783.54	3.577
12.0	2043.83	796.71	56.33	780.14	3.577
13.0	2034.96	793.25	55.78	776.73	3.577
14.0	2026.09	789.80	55.54	773.32	3.577
15.0	2017.22	786.34	55.30	769.91	3.577
16.0	2008.35	782.88	55.05	766.50	3.577
17.0	1999.48	779.42	54.81	763.09	3.577
18.0	1990.61	775.96	54.57	759.68	3.577
19.0	1981.74	772.51	54.33	756.27	3.577
20.0	1972.87	769.05	54.08	752.86	3.577
21.0	1964.00	765.59	53.84	749.45	3.577
TRAMO = 3					
22.0	1964.00	765.59	53.84	749.45	3.577
23.0	1947.87	759.30	53.80	745.74	3.577
24.0	1931.74	753.02	52.95	742.04	3.577
25.0	1915.61	746.73	52.51	737.33	3.577
26.0	1899.48	740.44	52.77	732.62	3.577
27.0	1883.34	734.16	51.63	728.91	3.577
28.0	1867.21	727.87	51.19	725.20	3.577
29.0	1851.11	721.58	50.74	721.49	3.577
30.0	1835.00	715.30	50.30	717.79	3.577
31.0	1818.85	709.01	49.86	714.08	3.577
32.0	1802.73	702.73	49.42	710.37	3.577
TRAMO = 4					
33.0	1802.73	702.73	49.42	710.37	3.577
34.0	1786.67	696.44	48.98	706.66	3.577
35.0	1770.60	690.15	48.54	702.95	3.577
36.0	1754.54	683.86	48.10	699.24	3.577

TRAMO = 5

31.9	1824.48	715.10	50.29	716.33	3.577
32.7	1842.42	718.20	50.51	734.62	3.577
33.4	1850.36	721.29	50.72	733.32	3.577
34.1	1858.30	724.39	50.94	731.01	3.577
34.9	1866.24	727.48	51.16	730.30	3.577
35.6	1874.18	730.58	51.38	728.79	3.577
36.3	1882.11	733.67	51.59	727.28	3.577

TRAMO = 6

36.3	1882.11	733.67	51.59	727.28	3.577
37.9	1853.33	722.45	50.81	723.99	3.577
39.5	1824.55	711.23	50.02	720.70	3.577
41.1	1795.76	700.01	49.23	717.40	3.577
42.7	1766.98	688.79	48.44	714.11	3.577
44.3	1738.19	677.57	47.65	710.82	3.577
45.9	1709.41	666.35	46.86	707.53	3.577
47.5	1680.62	655.13	46.07	704.24	3.577
49.1	1651.84	643.91	45.28	700.95	3.577
51.7	1623.05	632.69	44.49	697.65	3.577
52.3	1594.27	621.46	43.70	694.36	3.577

TRAMO = 7

52.3	1594.27	621.46	43.70	694.36	3.577
52.8	1585.90	618.20	43.47	693.40	3.577
53.3	1577.53	614.94	43.24	692.44	3.577
53.7	1569.16	611.68	43.02	691.48	3.577
54.2	1560.80	608.42	42.79	690.52	3.577
54.6	1552.43	605.16	42.56	689.56	3.577
55.1	1544.06	601.90	42.33	688.60	3.577
55.6	1535.70	598.63	42.10	687.64	3.577
56.0	1527.33	595.37	41.87	686.68	3.577
56.5	1518.96	592.11	41.64	685.73	3.577
57.2	1510.59	588.85	41.41	684.77	3.577

TRAMO = 8

57.0	1510.59	588.85	41.41	684.77	3.577
57.4	1502.22	585.58	41.18	683.81	3.577
57.8	1507.16	587.51	41.32	683.12	3.577
58.2	1505.44	586.84	41.27	682.30	3.577
58.6	1503.72	586.17	41.22	681.47	3.577
59.0	1502.00	585.50	41.17	680.65	3.577
59.4	1500.28	584.83	41.13	679.83	3.577
59.8	1498.57	584.16	41.08	679.00	3.577
60.2	1496.85	583.49	41.03	678.18	3.577
60.6	1495.13	582.82	40.99	677.35	3.577
61.0	1493.41	582.15	40.94	676.53	3.577

TRAMO = 9

61.0	1493.41	582.15	40.94	676.53	3.577
61.7	1486.82	577.89	39.94	674.95	3.577
62.5	1480.23	573.62	38.93	673.38	3.577
63.3	1473.63	569.36	37.93	671.80	3.577
64.0	1467.04	565.09	36.93	670.22	3.577
64.9	1460.45	560.83	35.92	668.65	3.577
65.8	1453.86	556.57	34.92	667.07	3.577
66.7	1447.27	552.31	33.92	665.49	3.577
67.1	1440.68	548.04	32.91	663.92	3.577
67.9	1434.09	543.78	31.91	662.34	3.577
68.6	1427.50	539.51	30.91	660.76	3.577

TRAMO = 10

68.6	1427.50	539.51	30.91	660.76	3.577
69.7	1420.91	535.25	29.91	659.18	3.577
70.4	1414.32	530.98	28.91	657.60	3.577
71.0	1407.73	526.71	27.91	656.02	3.577

TRANO 51L

TRANO 51I

TRANO 51J

TRANO 51K

TRANO 51L

70.2	1112.93	441.47	31.05	657.61	3.577
70.6	1133.79	441.76	31.08	656.82	3.577
70.9	1135.04	442.48	31.11	656.03	3.577
71.1	1136.30	442.84	31.15	655.24	3.577
71.7	1137.56	443.44	31.18	654.45	3.577
72.1	1138.82	443.93	31.22	653.66	3.577
72.5	1140.08	444.42	31.25	652.88	3.577
72.5	1140.08	444.42	31.25	652.88	3.577
73.2	1176.18	458.49	32.24	651.35	3.577
74.0	1212.20	472.66	33.23	649.82	3.577
74.7	1248.38	488.64	34.22	648.29	3.577
75.4	1284.48	500.71	35.21	646.76	3.577
76.2	1320.59	514.78	36.20	645.23	3.577
76.9	1356.69	528.85	37.19	643.70	3.577
77.7	1392.79	542.93	38.18	642.17	3.577
78.4	1428.89	557.00	39.17	640.64	3.577
79.2	1464.99	571.07	40.16	639.11	3.577
79.9	1501.10	585.15	41.15	637.58	3.577
79.9	1501.10	585.15	41.15	637.58	3.577
80.3	1492.94	581.97	40.93	636.70	3.577
80.8	1484.78	578.79	40.70	635.83	3.577
81.2	1476.63	575.61	40.48	634.95	3.577
81.6	1468.47	572.43	40.26	634.07	3.577
82.0	1460.32	569.25	40.03	633.19	3.577
82.5	1452.16	566.07	39.81	632.32	3.577
82.9	1444.01	562.89	39.58	631.44	3.577
83.3	1435.85	559.71	39.36	630.56	3.577
83.7	1427.69	556.53	39.14	629.69	3.577
84.2	1419.54	553.35	38.91	628.81	3.577
84.2	1419.54	553.35	38.91	628.81	3.577
85.4	1430.42	557.60	39.21	628.30	3.577
86.6	1441.31	561.84	39.51	627.79	3.577
87.8	1452.19	566.08	39.81	627.28	3.577
89.0	1463.08	570.33	40.11	626.77	3.577
90.3	1473.96	574.57	40.41	626.26	3.577
91.5	1484.85	578.81	40.70	625.75	3.577
92.7	1495.73	583.06	41.00	625.24	3.577
93.9	1506.62	587.30	41.30	624.73	3.577
95.1	1517.50	591.54	41.60	624.22	3.577
96.3	1528.39	595.78	41.90	623.71	3.577
96.3	1528.39	595.78	41.90	623.71	3.577
98.7	1528.39	595.78	41.78	622.92	3.577
98.7	1528.39	595.78	41.78	622.92	3.577
97.1	1519.85	592.46	41.66	622.12	3.577
97.5	1515.38	589.79	41.55	621.33	3.577
97.9	1511.31	589.13	41.43	620.53	3.577
98.3	1507.34	587.46	41.31	619.74	3.577
98.7	1502.77	585.80	41.20	618.95	3.577
99.1	1498.50	584.13	41.08	618.15	3.577
99.4	1494.23	582.47	40.96	617.36	3.577
99.8	1489.96	580.81	40.84	616.56	3.577
100.2	1485.69	579.14	40.73	615.77	3.577
100.2	1485.69	579.14	40.73	615.77	3.577
100.7	1487.42	579.47	40.73	615.81	3.577
101.2	1489.96	581.80	40.74	615.85	3.577
101.4	1492.19	581.43	40.75	615.89	3.577

	102.1	1479.22	582.07	40.98	591.93	3.577
	102.5	1496.35	582.30	41.02	590.97	3.577
	103.0	1498.48	584.13	41.08	590.01	3.577
	103.5	1500.62	584.96	41.14	589.05	3.577
	103.9	1502.75	585.79	41.19	588.09	3.577
	104.4	1504.88	586.62	41.25	587.13	3.577
	104.9	1507.01	587.45	41.31	586.17	3.577
TRAND #15	104.9	1507.01	587.45	41.31	586.17	3.577
	106.5	1465.16	578.94	40.71	582.77	3.577
	108.2	1463.32	578.42	40.11	579.37	3.577
	109.8	1441.87	561.90	39.51	575.97	3.577
	111.5	1419.62	553.39	38.92	572.57	3.577
	113.1	1397.77	544.87	38.32	569.17	3.577
	114.6	1375.92	536.35	37.72	565.77	3.577
	116.4	1354.08	527.84	37.12	562.37	3.577
	118.1	1332.23	519.32	36.52	558.96	3.577
	119.7	1310.38	510.80	35.92	555.56	3.577
	121.4	1288.53	502.29	35.32	552.16	3.577
TRAND #16	121.4	1288.53	502.29	35.32	552.16	3.577
	121.9	1288.74	502.09	35.31	551.20	3.577
	122.3	1287.55	501.90	35.30	550.24	3.577
	122.8	1287.06	501.71	35.28	549.28	3.577
	123.1	1286.56	501.52	35.27	548.33	3.577
	123.7	1286.07	501.33	35.26	547.37	3.577
	124.2	1285.58	501.14	35.24	546.41	3.577
	124.7	1285.09	500.94	35.23	545.45	3.577
	125.1	1284.60	500.75	35.21	544.49	3.577
	125.6	1284.10	500.56	35.20	543.53	3.577
	126.0	1283.61	500.37	35.19	542.57	3.577
TRAND #17	126.0	1283.61	500.37	35.19	542.57	3.577
	126.4	1279.57	498.79	35.08	541.76	3.577
	126.8	1275.52	497.21	34.97	540.95	3.577
	127.2	1271.48	495.64	34.85	540.14	3.577
	127.6	1267.43	494.06	34.74	539.33	3.577
	128.0	1263.39	492.48	34.63	538.52	3.577
	128.4	1259.34	490.91	34.52	537.71	3.577
	128.8	1255.29	489.33	34.41	536.91	3.577
	129.2	1251.26	487.75	34.30	536.10	3.577
	129.6	1247.21	486.18	34.19	535.29	3.577
	130.0	1243.17	484.60	34.08	534.48	3.577
TRAND #18	130.0	1243.17	484.60	34.08	534.48	3.577
	130.0	1243.17	484.60	34.08	534.48	3.577
	131.2	1233.81	487.58	34.29	531.83	3.577
	132.4	1224.45	490.56	34.50	529.18	3.577
	133.8	1215.10	493.54	34.71	526.54	3.577
	135.1	1205.74	496.52	34.92	523.89	3.577
	136.4	1196.38	499.50	35.13	521.24	3.577
	137.7	1187.03	502.48	35.34	518.59	3.577
	139.0	1177.67	505.46	35.55	515.95	3.577
	140.2	1168.31	508.44	35.76	513.30	3.577
	141.5	1158.95	511.42	35.96	510.65	3.577
	142.8	1149.60	514.40	36.17	508.00	3.577
TRAND #19	142.8	1149.60	514.40	36.17	508.00	3.577
	142.8	1149.60	514.40	36.17	508.00	3.577
	144.0	1134.31	517.38	36.38	505.35	3.577
	145.2	1119.02	520.36	36.59	502.70	3.577
	146.4	1103.74	523.34	36.80	500.05	3.577

	147.4	1298.45	508.15	35.59	498.12	3.577
	148.8	1293.16	504.09	35.45	495.65	3.577
	150.0	1287.87	502.03	35.30	493.18	3.577
	151.2	1282.58	499.97	35.16	490.71	3.577
	152.4	1277.30	497.91	35.01	488.24	3.577
	153.6	1272.01	495.85	34.87	485.77	3.577
	154.8	1266.72	493.78	34.72	483.30	3.577
TRAND = 20	154.8	1266.72	493.78	34.72	483.30	3.577
	156.1	1261.41	488.75	34.57	480.72	3.577
	157.3	1240.49	481.71	34.02	478.14	3.577
	158.6	1227.47	478.68	33.65	475.56	3.577
	159.9	1215.06	473.64	33.31	472.98	3.577
	161.1	1202.04	468.61	32.95	470.40	3.577
	162.4	1189.22	463.57	32.60	467.82	3.577
	163.6	1176.31	458.54	32.25	465.24	3.577
	164.9	1163.39	453.50	31.89	462.66	3.577
	166.1	1150.47	448.47	31.54	460.08	3.577
	167.4	1137.56	443.43	31.18	457.50	3.577
TRAND = 21	167.4	1137.56	443.43	31.18	457.50	3.577
	167.8	1142.09	445.20	31.31	456.61	3.577
	168.2	1146.63	446.97	31.43	455.72	3.577
	168.7	1151.17	448.74	31.54	454.83	3.577
	169.1	1155.70	450.51	31.68	453.94	3.577
	169.5	1160.24	452.28	31.81	453.05	3.577
	170.0	1164.78	454.05	31.93	452.15	3.577
	170.4	1169.32	455.81	32.05	451.26	3.577
	170.8	1173.85	457.58	32.18	450.37	3.577
	171.3	1178.39	459.35	32.30	449.48	3.577
	171.7	1182.93	461.12	32.43	448.59	3.577
TRAND = 22	171.7	1182.93	461.12	32.43	448.59	3.577
	175.3	1157.65	451.27	31.73	441.14	3.577
	178.9	1132.37	441.41	31.04	433.69	3.577
	182.6	1107.09	431.56	30.35	426.24	3.577
	186.2	1081.81	421.70	29.66	418.79	3.577
	189.8	1056.53	411.85	28.96	411.33	3.577
	193.4	1031.25	401.99	28.27	403.88	3.577
	197.0	1005.97	392.14	27.58	396.43	3.577
	200.7	980.69	382.28	26.88	388.98	3.577
	204.3	955.41	372.43	26.19	381.53	3.577
	207.9	930.13	362.57	25.50	374.08	3.577
TRAND = 23	207.9	930.13	362.57	25.50	374.08	3.577
	208.3	929.98	362.52	25.49	373.26	3.577
	208.7	929.84	362.46	25.49	372.43	3.577
	209.1	929.69	362.41	25.49	371.61	3.577
	209.5	929.55	362.35	25.48	370.79	3.577
	209.9	929.40	362.29	25.48	369.96	3.577
	210.3	929.26	362.24	25.47	369.14	3.577
	210.7	929.11	362.18	25.47	368.32	3.577
	211.1	928.97	362.12	25.47	367.49	3.577
	211.5	928.82	362.07	25.46	366.67	3.577
	211.9	928.68	362.01	25.46	365.85	3.577
TRAND = 24	211.9	928.68	362.01	25.46	365.85	3.577
	213.1	912.07	355.61	25.01	358.29	3.577
	214.4	895.35	349.21	24.56	350.72	3.577
	215.6	878.64	342.82	24.11	343.16	3.577

316.9	863.03	736.62	23.66	355.60	3.577
318.1	846.01	730.02	23.21	353.09	3.577
319.4	830.20	724.62	22.78	350.48	3.577
320.6	813.78	717.22	22.31	347.99	3.577
321.8	797.37	710.62	21.86	345.35	3.577
323.1	780.96	704.43	21.41	342.79	3.577
324.3	764.56	298.03	20.96	340.13	3.577

H (DE GRAFICA) = 1877.06 FT

CAIDA DE PRESION = 256.3877 FT

 * DATOS GENERALES DE TUBERIA *

TUBERIA 1 D = 29.43 IN L = 37859. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 1.0 FT
 TUBERIA 2 D = 29.43 IN L = 13123. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 48.6 FT
 TUBERIA 3 D = 29.43 IN L = 15289. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 127.3 FT
 TUBERIA 4 D = 29.43 IN L = 41835. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 91.9 FT
 TUBERIA 5 D = 29.43 IN L = 51378. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 255.9 FT

***** DATOS DE BOMBAS *****

NUMERO DE BOMBAS EN PARALELO = 2
 CADA BOMBA TIENE = 1 ETAPAS
 VELOCIDAD DE LA BOMBA = 5700.0 RPM
 CADA BOMBA TIENE UN MOMENTO DE INERCIA DE = 5875.2 LB-FT²

Q-GPM	H/ETAPAS	P/ETAPAS
1000.0	2700.0	1700.00
2000.0	2650.0	2000.00
3000.0	2570.0	2200.00
4000.0	2400.0	2400.00
5000.0	2100.0	2800.00
5300.0	1700.0	2800.00

DATOS GENERALES DEL SISTEMA

NUMERO DE ESTACIONES	= 2
NUMERO DE TRAMOS DE TUBERIA	= 5
NUMERO DE BOMBANOS POR TUBERIA	= 10
CABEZA DE SUCCION EN LA ESTACION NO. 2	= 764.84 FT
ALTURA EN LA ESTACION NO. 2	= 197.12 FT

DATOS GENERALES DEL FLUIDO

FLUIDO	= CRUDO
TEMPERATURA	= 86.00 ° F
VISCOSIDAD	= 11.00 CP
DENSIDAD RELATIVA A 60 ° C/F	= 0.900
PRESION DE VAPOR	= 0.00 PSIG

 * DATOS GENERALES DE TUBERIA *

TUBERIA 1 D = 29.43 IN L = 3789. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 0.0 FT
 TUBERIA 2 D = 29.43 IN L = 13123. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 48.6 FT
 TUBERIA 3 D = 29.43 IN L = 15289. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 127.3 FT
 TUBERIA 4 D = 29.43 IN L = 41635. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 92.9 FT
 TUBERIA 5 D = 29.43 IN L = 51378. FT F = .0199 ELEVACION DE LA TUBERIA = 258.9 FT

***** DATOS DE BOMBAS *****

NUMERO DE BOMBAS EN PARALELO = 2
 CADA BOMBA TIENE = 1 ETAPAS
 VELOCIDAD DE LA BOMBA = 5740.0 RPM
 CADA BOMBA TIENE UN MOMENTO DE INERCIA DE = 9875.0 LB-FT**2

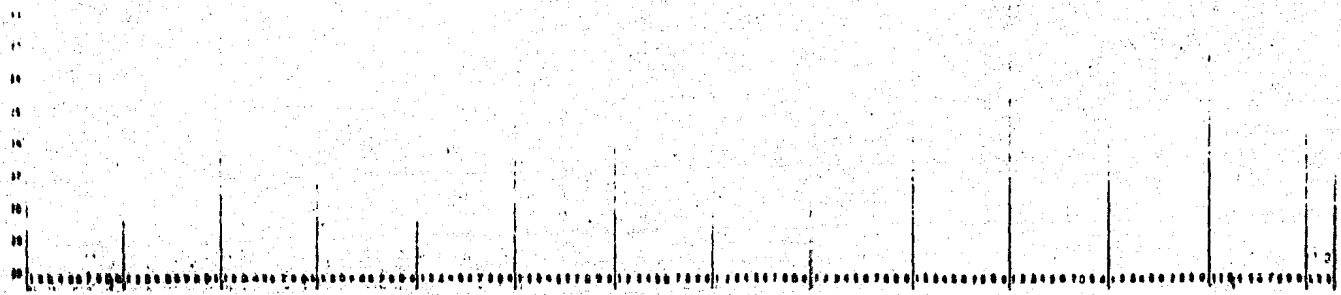
G-RPM	M/ETAPAS	P/ETAPAS
1000.0	2700.0	1700.00
1200.0	2650.0	2000.00
1400.0	2570.0	2200.00
1600.0	2400.0	2600.00
1800.0	2100.0	2800.00
2000.0	1700.0	2800.00

* DATOS GENERALES DEL SISTEMA *

NUMERO DE ESTACIONES	=	2
NUMERO DE TRAYE DE TUBERIA	=	5
NUMERO DE ELDTAMOS POR TUBERIA	=	10
CABEZA DE SECCION EN LA ESTACION NO. 2	=	764.84 FT
ALTURA EN LA ESTACION NO. 3	=	597.13 FT

* DATOS GENERALES DEL FLUIDO *

FLUIDO	=	agua
TEMPERATURA	=	66.00 L F
VISCOSIDAD	=	11.00 CP
DENSIDAD RELATIVA A 60 C.F.	=	1.00
PRESSION DE VAPOR	=	1.00 PSIG



```

=====
*** ESTACION NO. 2 ***
=====
CONDICIONES EN LAS ESTACIONES DE BOMBEO
=====
REGIMEN ESTACIONARIO
=====

```

TIPO DE BOMBAS	=CENTRIFUGAS
SISTEMA DE BOMBAS	=EN PARALELO
NUMERO DE LINEAS EN OPERACION	= 2
NUMERO DE ETAPAS	= 1
NPSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD) DISPONIBLE	= 764.13 FT
NPSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD) REQUERIDO	= 94.05 FT
POENCIA AL FRENO (BRAKE HORSEPOWER)	= 2300.90 HP
CABEZA DE LA BOMBA (H)	= 1377.06 FT
CABEZA DE SUCCION (HS)	= 764.54 FT
CABEZA DE DESCARGA (HD)	= 2441.40 FT
FLUJO TOTAL DE LIQUIDO (QT)	= 7583.12 GPM
VELOCIDAD DE ROTACION (N)	= 5740.00 RPM
VELOCIDAD ESPECIFICA (NS)	= 1239. PPM
VELOCIDAD ESPECIFICA DE SUCCION (S)	= 3727.
EFICIENCIA EN LA OPERACION (E)	= 80.5 %
PUNTO DE MAXIMA EFICIENCIA	**CABEZA (H) = 1702.05 FT ***FLUJO (Q) = 811.1 GPM = 4387.03 GPM
DIAMETRO DEL IMPULSOR	= 10 5/8 IN
DIAMETRO MAXIMO DEL IMPULSOR	= 11 3/4 IN
ACCIONADOR	=TURBINA DE GAS
FLUJO DE PARO (SHUT OFF)	= 800.00 GPM
CABEZA DE PARO (SHUT OFF)	= 2300.01 FT

=====
 *** ESTACION NO. 2 ***
 =====
 PERFIL DE PRESIONES EN LA TUBERIA
 =====
 REGIMEN ESTACIONARIO
 =====

*** LONGITUD *** (INMS)	*** P.PESIONES *** (PSII)	*** P.PESIONES *** (KG/CM**2)	*** PRESION FRIC *** (PSI)	VELOCIDAD (FV/S06)
TRAMO = 1				
.L	2641.00	1029.73	72.41	1029.73
1.2	2630.65	1025.46	72.11	1027.35
2.3	2619.69	1021.19	71.81	1024.97
3.5	2608.74	1016.92	71.51	1022.60
4.6	2597.78	1012.65	71.21	1020.22
5.8	2586.82	1008.38	70.91	1017.84
6.9	2575.87	1004.11	70.61	1015.46
8.1	2564.91	999.83	70.31	1013.08
9.2	2553.96	995.56	70.01	1010.71
10.4	2543.00	991.29	69.71	1008.33
11.5	2532.04	987.02	69.41	1005.95
TRAMO = 2				
11.5	2532.04	987.02	69.41	1005.95
11.5	2522.06	983.13	69.14	1003.13
12.3	2512.07	979.24	68.86	1000.30
12.7	2502.08	975.34	68.59	1000.48
13.1	2492.10	971.45	68.32	1002.66
13.5	2482.11	967.56	68.04	1001.83
13.9	2472.12	963.66	67.77	1001.01
14.3	2462.14	959.77	67.49	1000.19
14.7	2452.15	955.88	67.22	999.36
15.1	2442.16	951.99	66.95	998.54
15.5	2432.18	948.09	66.67	997.72
TRAMO = 3				
15.5	2432.18	948.09	66.67	997.72
16.0	2423.26	944.52	66.70	996.76
16.5	2414.34	940.94	66.73	995.80
16.9	2405.42	949.36	66.76	994.84
17.4	2416.51	948.78	66.79	993.88
17.9	2427.59	948.20	66.82	992.92
18.3	2438.67	950.62	66.85	991.96
18.8	2449.75	951.05	66.88	991.00
19.3	2440.83	961.47	66.91	990.04
19.7	2441.91	961.89	66.94	989.08
20.2	2443.00	962.31	66.97	988.12
TRAMO = 4				
20.2	2443.00	962.31	66.97	988.12
21.0	2434.91	961.11	66.94	985.52
22.7	2426.82	960.11	66.92	982.94
24.0	2418.73	959.11	66.97	980.30

26.5	2327.55	907.31	63.80	975.09	3.577
27.8	2304.86	898.31	63.17	972.98	3.577
29.1	2291.37	889.30	62.54	969.88	3.577
30.3	2250.28	880.30	61.91	967.27	3.577
31.6	2235.19	872.30	61.27	964.67	3.577
32.9	2212.10	862.30	60.64	962.06	3.577
32.9	2212.10	862.30	60.64	962.06	3.577
34.4	2169.70	845.78	59.48	958.84	3.577
36.0	2127.31	829.25	58.32	955.61	3.577
37.6	2084.92	812.73	57.15	952.39	3.577
39.1	2042.53	796.20	55.99	949.16	3.577
40.7	2000.14	779.68	54.83	945.94	3.577
42.3	1957.75	763.15	53.67	942.72	3.577
43.8	1915.35	746.63	52.51	939.49	3.577
45.4	1872.94	730.10	51.34	936.27	3.577
47.0	1830.57	713.58	50.18	933.04	3.577
48.5	1788.18	697.05	49.02	929.82	3.577

TRAND = 8

SEOF

SEOF IGNORED = IN CONTROL MODE

CONDICION No. 2

OPERACION DE LAS ESTACIONES:

- NUEVO TEAPA
- ARROYO CLARO
- ARROYO MORENO

CON VELOCIDADES DE ROTACION

ESTACION No. 1 = 5825 RPM

ESTACION No. 2 = 5825 RPM

FLUJO VOLUMETRICO = 260 MBPD = 7583.32 GPM

NOTA: Aquí se muestran los resultados únicamente de la Estación No. 2, ya que las condiciones para la Estación No. 1 son las mismas que se obtuvieron en el caso anterior.

```

=====
*** ESTACION NO. 2 ***
=====
CONEXIONES EN LAS ESTACIONES DE BOMBEO
=====
RECIPEN ESTACIONARIO
=====

```

TIPO DE BOMBAS		=CENTRIFUGAS
SISTEMA DE BOMBAS		=EN PARALELO
NUMERO DE LINEAS EN OPERACION		= 2
NUMERO DE ETAPAS		= 1
PSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD) DISPONIBLE		= 769.13 FT
PSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD) REQUERIDO		= 99.05 FT
POTENCIA AL MOTOR (BRAKE HORSEPOWER)		= 2500.90 HP
CABEZA DE LA BOMBA (H)		= 1948.21 FT
CABEZA DE SECCION INST		= 769.59 FT
CABEZA DE ESCALERA (HD)		= 271.25 FT
FLUJO TOTAL DE LIQUIDO (Q)		= 7583.32 GPM
VELOCIDAD DE ROTACION (N)		= 5025.37 RPM
VELOCIDAD ESPECIFICA (NS)		= 1223.0 RPM
VELOCIDAD ESPECIFICA DE SUCCION (NS)		= 1762.0 RPM
EFICIENCIA EN LA OPERACION (ET)		= 80.5 %
PUNTO DE MAXIMA EFICIENCIA	**CABEZA (H)	= 1800.98 FT
	***FLUJO (Q)	= 4387.33 GPM
DIAMETRO DEL IMPULSOR		= 10 7/8 IN
DIAMETRO MAXIMO DEL IMPULSOR		= 11 3/4 IN
ACCIONADOR		=TURBINA DE GAS
FLUJO DE PARO (SHUT OFF)		= 950.00 GPM
CABEZA DE PARO (SHUT OFF)		= 2253.75 FT

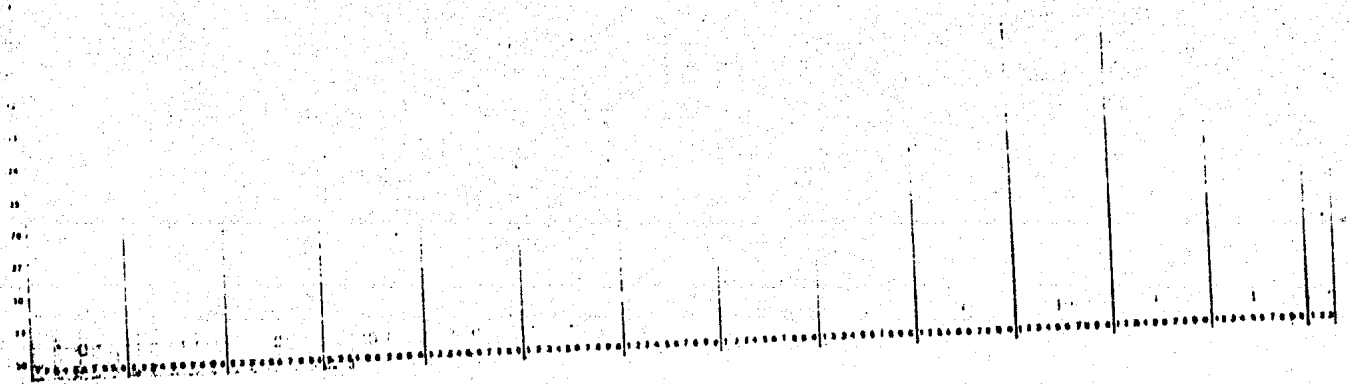
=====
 =====
 *** ESTACION NO. 2 ***
 =====
 PERFIL DE PRESIONES EN LA TUBERIA
 =====
 REGIMEN ESTACIONARIO
 =====

TRAMO =	*** LONGITUD ***	*** PRESIONES ***		*** PRESION FRIC ***	VELOCIDAD	
	(MMS)	(FT)	(PSI)	(KG/CM ²) (PSI)	(FT/SEG)	
1	.0	2712.75	1057.46	74.36	1057.46	3.577
	1.0	2701.79	1053.19	74.06	1055.09	3.577
	2.0	2690.84	1048.92	73.76	1052.71	3.577
	3.0	2679.88	1044.65	73.46	1050.33	3.577
	4.0	2668.93	1040.38	73.16	1047.95	3.577
	5.0	2657.97	1036.11	72.86	1045.57	3.577
	6.0	2647.01	1031.84	72.56	1043.20	3.577
	8.0	2626.06	1027.57	72.26	1040.82	3.577
	9.2	2625.10	1023.30	71.96	1038.44	3.577
	10.4	2614.15	1019.03	71.66	1036.06	3.577
	11.0	2603.19	1014.76	71.36	1033.69	3.577
2	11.0	2603.19	1014.76	71.36	1033.69	3.577
	11.5	2593.23	1010.46	71.09	1032.86	3.577
	12.0	2583.22	1006.17	70.81	1032.04	3.577
	12.7	2573.23	1001.88	70.54	1031.21	3.577
	13.1	2563.24	997.58	70.27	1030.39	3.577
	13.5	2553.26	993.29	69.99	1029.57	3.577
	13.9	2543.27	989.00	69.72	1028.74	3.577
	14.3	2533.28	984.71	69.44	1027.92	3.577
	14.7	2523.30	980.41	69.17	1027.10	3.577
	15.1	2513.31	976.12	68.90	1026.27	3.577
	15.5	2503.32	971.83	68.62	1025.45	3.577
3	15.0	2503.32	971.83	68.62	1025.45	3.577
	16.0	2493.31	967.55	68.35	1024.63	3.577
	16.5	2483.30	963.26	68.08	1023.81	3.577
	16.9	2473.30	958.97	67.81	1023.00	3.577
	17.4	2463.29	954.68	67.54	1022.18	3.577
	17.9	2453.29	950.39	67.27	1021.37	3.577
	18.3	2443.28	946.10	67.00	1020.55	3.577
	18.9	2433.28	941.81	66.73	1019.74	3.577
	19.2	2423.27	937.52	66.46	1018.92	3.577
	19.7	2413.27	933.23	66.19	1018.11	3.577
	20.2	2403.26	928.94	65.92	1017.30	3.577
4	20.0	2403.26	928.94	65.92	1017.30	3.577
	21.0	2393.25	924.65	65.65	1016.49	3.577
	22.0	2383.25	920.36	65.38	1015.67	3.577
	22.7	2373.24	916.07	65.11	1014.86	3.577
	23.0	2363.23	911.78	64.84	1014.04	3.577

TRAMP = 5

25.3	2421.78	644.74	66.79	1105.43	3.577
26.5	2358.69	635.04	65.76	1202.82	3.577
27.8	2375.60	926.74	65.12	1300.22	3.577
29.1	2352.51	917.04	64.49	997.61	3.577
30.3	2329.42	908.04	63.86	995.71	3.577
31.6	2306.33	899.04	63.22	992.40	3.577
32.9	2283.24	890.04	62.59	989.79	3.577
32.5	2283.24	890.04	62.59	989.79	3.577
34.4	2243.85	873.51	61.43	986.57	3.577
36.0	2198.46	856.99	60.27	987.34	3.577
37.6	2156.07	840.46	59.10	980.12	3.577
39.1	2113.67	823.94	57.94	976.90	3.577
40.7	2071.28	807.41	56.78	973.67	3.577
42.3	2028.89	790.89	55.62	970.45	3.577
43.8	1986.50	774.36	54.46	967.22	3.577
45.4	1944.11	757.84	53.29	964.00	3.577
47.0	1901.72	741.31	52.13	960.78	3.577
48.5	1859.33	724.79	50.97	957.55	3.577

REOF
REOF IGNCEE - IN CONTROL MODE



CONDICION No. 3

OPERACION DE LAS ESTACIONES

- NUEVO TEAPA

- ARROYO MORENO

CON VELOCIDADES DE ROTACION

ESTACION No. 1 = 5825 RPM

FLUJO VOLUMETRICO = 200 MBPD = 5833.32 GPM

 DATOS GENERALES DEL SISTEMA

NUMERO DE ESTACIONES	= 1
NUMERO DE TUBOS DE TOLERIA	= 19
NUMERO DE ALTAHOS POR TUBERIA	= 70
ALTEZA DE ACCION EN LA ESTACION No. 1	= 109.38 FT
ALTEZA EN LA ESTACION No. 2	= 705.38 FT

 DATOS GENERALES DEL FLUIDO

FLUIDO	= CRUDO
TEMPERATURA	= 66.00 C F
VISCOSIDAD	= 11.00 CP
DENSIDAD RELATIVA A 60 C.F.	= .960
PRESION DE VAPOR	= .40 PSIG

 * DATOS GENERALES DE TUBERIA *

TUBERIA 1	U = 29.43 1A	L = 04.10 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 0.0 FT
TUBERIA 2	U = 29.43 1A	L = 04.30 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 42.7 FT
TUBERIA 3	U = 29.43 1A	L = 01.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 43.4 FT
TUBERIA 4	U = 29.43 1A	L = 04.40 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 133.7 FT
TUBERIA 5	U = 29.43 1A	L = 02.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 16.4 FT
TUBERIA 6	U = 29.43 1A	L = 05.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 140.0 FT
TUBERIA 7	U = 29.43 1A	L = 03.20 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 146.1 FT
TUBERIA 8	U = 29.43 1A	L = 03.30 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 242.1 FT
TUBERIA 9	U = 29.43 1A	L = 05.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 567.6 FT
TUBERIA 10	U = 29.43 1A	L = 04.20 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 534.8 FT
TUBERIA 11	U = 29.43 1A	L = 03.70 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 134.5 FT
TUBERIA 12	U = 29.43 1A	L = 09.90 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 193.6 FT
TUBERIA 13	U = 29.43 1A	L = 02.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 20.3 FT
TUBERIA 14	U = 29.43 1A	L = 02.80 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 42.7 FT
TUBERIA 15	U = 29.43 1A	L = 04.90 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 73.3 FT
TUBERIA 16	U = 29.43 1A	L = 05.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 127.9 FT
TUBERIA 17	U = 29.43 1A	L = 02.90 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 130.3 FT
TUBERIA 18	U = 29.43 1A	L = 04.90 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 127.9 FT
TUBERIA 19	U = 29.43 1A	L = 09.70 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 73.4 FT
TUBERIA 20	U = 29.43 1A	L = 01.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 140.0 FT
TUBERIA 21	U = 29.43 1A	L = 04.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 30.1 FT
TUBERIA 22	U = 29.43 1A	L = 02.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 72.2 FT
TUBERIA 23	U = 29.43 1A	L = 03.30 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 29.5 FT
TUBERIA 24	U = 29.43 1A	L = 04.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 9.8 FT
TUBERIA 25	U = 29.43 1A	L = 07.00 FT	F = 0.01	ELLEVACION DE LA TUBERIA = 134.5 FT

TUBERIA 04 U = 29.43 IN L = 2322.0 FT F = 0.021 ELEVACION DE LA TUBERIA = 186.8 FT
 TUBERIA 07 U = 29.43 IN L = 2509.0 FT F = 0.021 ELEVACION DE LA TUBERIA = 235.6 FT
 TUBERIA 08 U = 29.43 IN L = 2103.0 FT F = 0.021 ELEVACION DE LA TUBERIA = 200.1 FT
 TUBERIA 09 U = 29.43 IN L = 2177.0 FT F = 0.021 ELEVACION DE LA TUBERIA = 169.2 FT

DATOS LL DUNA65

NUMERO DE ETAPAS EN PARALELO

= 2

CASA MUMBA TILNA

= 1 ETAPAS

VELOCIDAD DE LA BOMBA

= 1825.0 RPM

CASA MUMBA TILNA UN MOMENTO DE INERCIA DE

= 5875.0 LB-FT²

Q-QM	H/ETAPAS-FT	QMP/ETAPAS
10000	17000	170000
20000	25000	250000
30000	35000	350000
40000	40000	400000
50000	45000	450000
60000	50000	500000

```

=====
*****          *** ESTACION No. 1 ***          *****
*****          COMBUSTIBLE DE LAS ESTACIONES DE LORELO *****
*****          MILLIMETROS ESTACIONARIO *****
=====

```

TIPO DE COMBUSTIBLE	=CENTRIFUGA
TIPO DE ESTACION	=EN PARALELO
NÚMERO DE ESTACIONES EN OPERACION	= 2
NÚMERO DE ESTACIONES	= 1
POTENCIA DEL MOTOR (KW) (CANTIDAD DE MOTOR) (CANTIDAD DE MOTOR)	= 148450 FT
POTENCIA DEL MOTOR (KW) (CANTIDAD DE MOTOR) (CANTIDAD DE MOTOR)	= 26000 FT
POTENCIA DEL MOTOR (KW) (CANTIDAD DE MOTOR) (CANTIDAD DE MOTOR)	= 243000 HP
CALORÍA DE LA ESTACION (KW)	= 2110,28 FT
CALORÍA DE LA ESTACION (KW)	= 105,38 FT
CALORÍA DE LA ESTACION (KW)	= 222406 FT
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 5033,32 GPM
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 502000 RPP
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 10100 RPP
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 4763
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 7000
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 104007 FT
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 5000
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 244000 GPM
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 10 5/8 IN
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 11 3/4 IN
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	=TUERINA DE GAS
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 98000 GPM
FLUJO TOTAL DE LA ESTACION (KW)	= 2251,75 FT

```

=====
*** ESTACION No. 1 ***
=====
          PERFIL DE PRESIONES EN LA TUBERIA
=====
          NIVEL EN ESTACIONARIO
=====

```

*** LONGITUD ***		*** POSICION ***		*** PRESION FRIC. ***		VELOCIDAD
(KM)	(FT)	(PSI)	(KG/CM ²)	(PSI)		(FT/SEG)
TRAMO = 1						
0.0	0.0	866.63	60.90	866.03		2.752
0.5	1.6	866.53	60.90	864.87		2.752
1.0	3.3	866.24	60.70	863.71		2.752
1.5	5.0	865.51	60.50	862.55		2.752
2.0	6.6	864.83	60.05	861.40		2.752
2.5	8.2	864.14	59.55	860.24		2.752
3.0	9.8	863.41	59.05	859.08		2.752
3.5	11.5	862.71	58.56	857.92		2.752
4.0	13.1	862.00	58.06	856.76		2.752
4.5	14.8	861.31	57.56	855.60		2.752
5.0	16.4	860.60	57.07	854.44		2.752
TRAMO = 2						
5.5	18.1	860.58	56.57	854.44		2.752
6.0	19.7	860.99	56.07	852.31		2.752
6.5	21.3	861.84	55.57	851.16		2.752
7.0	22.9	862.70	55.07	848.05		2.752
7.5	24.6	863.22	54.57	845.92		2.752
8.0	26.2	863.84	54.07	843.76		2.752
8.5	27.9	864.44	53.57	841.65		2.752
9.0	29.5	865.04	53.07	839.52		2.752
9.5	31.2	865.62	52.57	837.39		2.752
10.0	32.8	866.24	52.07	835.26		2.752
10.5	34.5	866.64	51.57	833.12		2.752
TRAMO = 3						
11.0	36.1	867.04	51.07	831.01		2.752
11.5	37.8	867.24	50.57	828.86		2.752
12.0	39.4	867.75	50.07	826.74		2.752
12.5	41.1	868.31	49.57	824.65		2.752
13.0	42.7	868.80	49.07	822.53		2.752
13.5	44.4	869.41	48.57	820.41		2.752
14.0	46.0	870.04	48.07	818.27		2.752
14.5	47.7	870.97	47.57	816.07		2.752
15.0	49.3	871.52	47.07	813.92		2.752
15.5	51.0	872.04	46.57	811.74		2.752
16.0	52.6	872.64	46.07	809.54		2.752
16.5	54.3	873.24	45.57	807.34		2.752
17.0	55.9	873.84	45.07	805.14		2.752
17.5	57.6	874.44	44.57	802.94		2.752
TRAMO = 4						
18.0	59.2	875.04	44.07	800.74		2.752
18.5	60.9	875.64	43.57	798.54		2.752
19.0	62.5	876.24	43.07	796.34		2.752
19.5	64.2	876.84	42.57	794.14		2.752

	21.4	861.74	861.69	26.52	869.92	2.752
	22.7	871.11	867.35	26.78	823.98	2.752
	23.4	880.54	811.01	27.03	823.03	2.752
	24.1	869.91	814.67	27.29	822.09	2.752
	24.9	859.31	818.31	27.55	841.16	2.752
	25.6	868.69	821.99	27.81	822.20	2.752
	26.4	818.00	825.65	28.06	819.20	2.752
TRAMO = 1						
	26.1	810.00	825.65	28.06	819.24	2.752
	27.4	802.46	815.67	27.30	817.20	2.752
	28.6	806.83	805.60	26.66	816.14	2.752
	41.1	804.21	795.69	25.96	813.08	2.752
	42.7	805.59	785.74	25.25	811.03	2.752
	44.1	809.97	775.71	24.55	808.97	2.752
	45.9	804.36	765.71	23.85	806.91	2.752
	47.6	808.71	755.74	23.15	804.85	2.752
	49.1	812.11	745.75	22.44	802.79	2.752
	50.7	807.49	735.77	21.74	800.71	2.752
	52.3	861.87	725.78	21.04	798.67	2.752
TRAMO =						
	52.1	861.87	725.78	21.04	798.67	2.752
	52.6	858.41	722.88	20.84	798.07	2.752
	53.3	804.98	719.98	20.63	797.47	2.752
	53.7	803.31	717.07	20.43	796.88	2.752
	54.2	802.09	714.17	20.22	796.28	2.752
	54.6	804.64	711.27	20.02	795.68	2.752
	55.1	807.23	708.37	19.81	795.08	2.752
	55.6	809.75	705.46	19.61	794.48	2.752
	56.1	812.31	702.56	19.41	793.88	2.752
	56.6	814.88	699.64	19.21	793.28	2.752
	57.1	817.42	696.76	19.01	792.68	2.752
TRAMO = 2						
	57.1	817.42	696.76	19.01	792.68	2.752
	57.4	815.49	696.44	18.97	792.16	2.752
	57.6	814.57	696.04	18.95	791.65	2.752
	58.1	814.04	695.67	18.92	791.13	2.752
	58.6	813.71	695.31	18.90	790.62	2.752
	59.1	813.78	694.93	18.87	790.11	2.752
	59.4	813.86	694.59	18.85	789.59	2.752
	59.6	813.91	694.25	18.84	789.07	2.752
	60.1	813.93	693.87	18.82	788.56	2.752
	60.6	813.95	693.51	18.77	788.04	2.752
	61.1	813.95	693.14	18.74	787.53	2.752
TRAMO = 4						
	61.6	813.95	693.14	18.74	787.53	2.752
	61.7	813.17	692.47	18.78	786.94	2.752
	62.5	813.00	691.86	18.84	786.35	2.752
	63.1	812.92	691.13	18.86	785.77	2.752
	64.1	812.83	690.46	18.94	785.18	2.752
	64.6	812.73	689.74	19.04	784.58	2.752
	65.6	812.69	689.01	19.14	783.98	2.752
	66.1	812.62	688.24	19.21	783.38	2.752
	67.1	812.54	687.50	19.29	782.78	2.752
	67.6	812.41	686.75	19.37	782.18	2.752
	68.1	812.30	686.00	19.45	781.58	2.752
TRAMO						
	68.1	812.30	686.00	19.45	781.58	2.752
	68.4	812.44	685.24	19.50	780.98	2.752
	68.6	812.54	684.46	19.54	780.38	2.752
	68.8	812.64	683.67	19.59	779.78	2.752

TRAMU = 0

70.4	435.40	559.36	39.35	775.69	752
70.6	447.97	560.34	39.41	775.26	752
70.9	459.49	561.13	39.46	774.71	752
71.1	471.51	561.92	39.52	774.21	752
71.7	483.55	562.70	39.57	773.72	752
72.1	495.58	563.49	39.63	773.23	752
72.5	507.55	564.27	39.68	772.73	752

TRAMU = 1

72.5	519.50	564.27	39.68	772.73	752
73.0	531.51	570.92	40.71	771.78	752
74.0	543.70	583.57	41.74	770.82	752
74.7	555.27	600.21	42.77	769.86	752
75.4	567.04	620.80	43.80	768.91	752
76.0	578.81	637.50	44.83	767.95	752
76.9	590.99	652.15	45.86	767.00	752
77.7	603.50	668.60	46.89	766.04	752
78.4	616.13	680.40	47.92	765.08	752
79.0	628.70	694.09	48.95	764.13	752
79.9	641.26	710.74	49.98	763.17	752

TRAMU = 2

79.9	653.26	710.74	49.98	763.17	752
80.5	665.90	727.88	49.78	762.62	752
81.0	678.65	735.03	49.58	762.07	752
81.4	691.34	742.18	49.38	761.52	752
81.8	704.00	699.31	49.18	760.97	752
82.0	716.70	696.40	48.98	760.43	752
82.5	729.40	693.63	48.78	759.88	752
82.9	742.09	690.70	48.58	759.33	752
83.5	754.77	687.93	48.38	758.78	752
84.0	767.40	685.00	48.18	758.23	752
84.5	780.15	682.23	47.98	757.69	752

TRAMU = 3

84.5	792.15	682.23	47.98	757.69	752
85.4	804.94	679.41	48.34	756.12	752
86.4	817.74	692.00	48.71	754.55	752
87.4	830.54	697.78	49.07	752.98	752
88.0	843.34	702.90	49.43	751.41	752
88.5	856.13	708.15	49.80	749.84	752
89.0	868.93	713.35	50.16	748.27	752
89.7	881.70	718.51	50.53	746.70	752
90.5	894.50	723.70	50.89	745.13	752
91.1	907.30	728.80	51.26	743.56	752
91.8	920.15	734.06	51.62	741.99	752

TRAMU = 4

96.0	932.10	739.06	51.62	741.99	752
96.7	945.00	742.70	51.53	741.50	752
97.1	957.81	751.31	51.43	741.00	752
97.5	970.60	759.90	51.33	740.50	752
97.9	983.40	768.60	51.24	740.00	752
98.3	996.20	777.20	51.14	739.50	752
98.7	1009.00	785.80	51.05	739.01	752
99.1	1021.80	794.50	50.95	738.51	752
99.4	1034.60	803.10	50.85	738.02	752
99.8	1047.40	811.70	50.76	737.54	752
100.0	1060.20	820.30	50.66	737.06	752

TRAMU = 5

100.0	1073.00	828.90	50.56	737.02	752
100.5	1085.80	837.50	50.47	736.52	752
101.0	1098.60	846.10	50.37	736.02	752
101.5	1111.40	854.70	50.27	735.52	752

	100.00	236.00	725.16	510.00	734.62	2.75
	100.00	243.33	728.35	510.00	734.02	2.752
	100.00	246.67	727.54	510.00	733.42	2.752
	100.00	249.99	728.73	510.00	732.82	2.752
	100.00	247.49	729.92	510.00	732.22	2.752
	100.00	245.55	731.11	510.00	731.62	2.752
	100.00	248.66	727.30	510.00	731.02	2.752
TRAMO 2.5						
	100.00	270.00	722.23	510.00	731.02	2.752
	100.00	266.00	725.00	510.00	726.90	2.752
	100.00	244.44	727.82	500.00	726.77	2.752
	100.00	232.87	728.33	49.97	725.64	2.752
	100.00	234.29	723.33	49.94	722.52	2.752
	100.00	7.57	49.00	48.95	720.39	2.752
	100.00	27.71	28.80	48.94	718.26	2.752
	116.00	274.85	661.61	47.93	716.14	2.752
	128.00	279.97	274.36	47.92	714.01	2.752
	129.00	271.39	271.11	46.91	711.88	2.752
	128.00	267.04	659.86	46.91	709.76	2.752
TRAMO 2.6						
	121.00	262.00	419.88	46.91	709.76	2.752
	121.00	267.24	660.00	46.92	709.36	2.752
	122.00	261.67	660.22	46.93	708.96	2.752
	123.00	264.11	660.38	46.94	707.96	2.752
	123.00	264.51	660.55	46.95	707.36	2.752
	123.00	264.96	660.72	46.96	706.76	2.752
	123.00	265.39	660.89	46.96	706.16	2.752
	123.00	265.82	661.05	46.99	705.56	2.752
	123.00	266.25	661.22	46.99	704.96	2.752
	123.00	266.68	661.39	46.51	704.36	2.752
	123.00	267.11	661.56	46.52	703.76	2.752
TRAMO 2.7						
	126.00	267.11	411.50	46.52	703.76	2.752
	126.00	267.54	661.68	46.93	703.25	2.752
	127.00	268.00	661.84	46.94	702.75	2.752
	127.00	267.41	661.74	46.25	702.24	2.752
	127.00	266.82	661.64	46.40	701.74	2.752
	128.00	266.25	661.54	46.00	701.24	2.752
	128.00	267.01	661.99	45.99	700.72	2.752
	128.00	267.42	662.04	45.92	700.22	2.752
	129.00	267.98	662.37	45.81	699.71	2.752
	129.00	268.47	662.10	45.72	699.24	2.752
	129.00	268.95	662.02	45.63	698.76	2.752
TRAMO 2.8						
	131.00	269.43	448.82	45.63	698.76	2.752
	131.00	269.86	662.75	45.91	697.04	2.752
	132.00	269.86	662.76	46.15	695.34	2.752
	133.00	269.86	662.74	46.47	693.73	2.752
	133.00	270.22	662.74	46.74	692.08	2.752
	136.00	270.39	662.86	47.22	690.42	2.752
	137.00	270.37	662.86	47.50	688.76	2.752
	139.00	270.76	662.86	47.54	687.11	2.752
	139.00	270.95	662.86	47.76	685.45	2.752
	141.00	270.34	662.86	48.14	683.80	2.752
	141.00	270.34	662.86	48.42	682.14	2.752
TRAMO 2.9						
	144.00	270.34	662.86	48.92	680.34	2.752
	144.00	270.34	662.86	49.34	678.80	2.752
	144.00	270.34	662.86	49.26	679.03	2.752
	144.00	270.34	662.86	49.18	677.51	2.752

	147.6	1754.67	683.99	40.10	675.90	2.752
	148.0	1751.76	682.80	48.04	678.92	2.752
	150.6	1746.85	681.72	47.94	672.87	2.752
	151.2	1745.93	680.59	47.86	671.33	2.752
	152.4	1741.31	679.45	47.78	669.78	2.752
	153.0	1740.14	678.31	47.70	668.24	2.752
	154.3	1737.26	677.16	47.62	666.69	2.752
TRAMP 2-1						
	156.0	1737.26	677.16	47.64	666.69	2.752
	156.1	1736.78	673.11	47.34	665.08	2.752
	157.5	1710.32	669.04	47.05	663.47	2.752
	158.0	1705.88	664.97	46.76	661.86	2.752
	159.9	1655.45	660.91	46.48	660.24	2.752
	161.1	1605.01	656.84	46.19	658.63	2.752
	162.4	1574.57	652.77	45.91	657.02	2.752
	163.6	1544.14	648.70	45.62	655.41	2.752
	164.5	1513.71	644.63	45.33	653.79	2.752
	166.1	1463.26	640.56	45.05	652.18	2.752
	167.4	1432.82	636.50	44.76	650.56	2.752
TRAMP 2-1						
	167.4	1432.82	636.50	44.76	650.56	2.752
	167.6	1430.24	638.60	44.61	650.01	2.752
	168.4	1401.66	641.70	45.06	649.45	2.752
	168.7	1399.31	642.80	45.20	648.89	2.752
	169.1	1358.40	644.91	45.35	648.33	2.752
	169.5	1359.79	647.01	45.50	647.78	2.752
	170.6	1305.19	649.11	45.63	647.22	2.752
	170.4	1275.56	651.21	45.85	646.66	2.752
	170.3	1275.98	653.32	45.94	646.10	2.752
	171.3	1201.37	655.42	46.09	645.55	2.752
	171.7	1200.76	657.52	46.24	644.99	2.752
TRAMP 2-2						
	171.7	1200.76	657.52	46.24	644.99	2.752
	175.1	1188.65	656.40	45.74	643.33	2.752
	178.9	1158.53	641.40	45.25	635.67	2.752
	182.6	1122.41	636.33	44.75	631.01	2.752
	186.1	1074.29	629.27	44.25	626.35	2.752
	189.0	1040.17	622.21	43.76	621.69	2.752
	193.4	1074.35	615.14	43.26	617.04	2.752
	197.0	1029.93	608.08	42.76	612.38	2.752
	200.7	1054.66	611.02	42.27	607.72	2.752
	204.0	1053.76	613.96	41.77	603.06	2.752
	207.9	1005.56	606.89	41.27	598.40	2.752
TRAMP 2-3						
	207.9	1005.56	606.89	41.27	598.40	2.752
	208.3	1000.26	607.19	41.29	597.88	2.752
	208.7	1000.87	607.40	41.31	597.37	2.752
	209.1	1007.52	607.65	41.33	596.85	2.752
	209.3	1004.10	607.90	41.34	596.34	2.752
	209.9	1004.61	608.15	41.36	595.83	2.752
	210.2	1000.46	608.41	41.38	595.31	2.752
	200.7	1000.11	608.66	41.40	594.80	2.752
	210.1	1000.75	608.91	41.41	594.28	2.752
	211.0	1011.40	609.16	41.43	593.77	2.752
	211.9	1012.05	609.41	41.45	593.25	2.752
TRAMP 2-4						
	211.9	1012.05	609.41	41.45	593.25	2.752
	212.7	1000.35	609.66	41.67	591.65	2.752
	213.2	1004.54	610.54	41.80	590.05	2.752
	213.4	1004.54	610.54	41.80	590.05	2.752
	213.5	1000.19	611.10	41.82	588.44	2.752

	416.9	435.24	567.60	17.94	586.84	2.752
	418.1	442.29	562.22	19.54	585.24	2.752
	420.4	448.34	556.78	19.13	583.64	2.752
	422.0	449.39	551.35	18.77	582.04	2.752
	423.8	451.43	545.91	18.39	580.44	2.752
	425.1	452.48	540.47	18.01	578.85	2.752
	427.1	454.53	535.03	17.63	577.25	2.752
TRAMO = 5						
	428.1	457.53	535.03	17.63	577.25	2.752
	429.5	458.54	531.65	17.19	575.74	2.752
	430.0	459.54	528.27	17.15	574.26	2.752
	432.8	460.52	524.89	16.91	572.77	2.752
	434.0	461.83	521.51	16.67	571.24	2.752
	435.1	462.14	518.13	16.44	569.83	2.752
	436.1	462.51	514.75	16.21	568.31	2.752
	437.4	463.11	511.37	15.96	566.82	2.752
	438.0	463.17	507.99	15.72	565.34	2.752
	439.7	464.53	504.61	15.49	563.85	2.752
	440.9	465.33	501.23	15.25	562.36	2.752
TRAMO = 11						
	440.9	465.33	501.23	15.25	562.36	2.752
	442.1	467.63	497.85	15.00	561.85	2.752
	443.7	469.44	494.00	14.74	561.33	2.752
	445.1	470.74	490.44	14.49	560.82	2.752
	447.0	471.45	486.89	14.24	560.30	2.752
	448.9	472.05	483.31	13.99	559.79	2.752
	450.1	472.66	479.73	13.74	559.27	2.752
	451.7	473.16	476.14	13.49	558.76	2.752
	453.4	473.27	472.56	13.23	558.24	2.752
	455.0	473.37	468.97	12.98	557.73	2.752
	457.9	473.88	465.39	12.73	557.21	2.752
TRAMO = 17						
	457.9	473.88	465.39	12.73	557.21	2.752
	459.5	475.88	461.17	12.73	556.64	2.752
	461.4	477.89	456.95	12.44	556.01	2.752
	463.3	479.89	452.73	12.09	555.41	2.752
	465.7	481.89	448.51	11.95	554.81	2.752
	468.0	482.90	444.29	11.70	554.21	2.752
	470.7	483.90	440.08	11.46	553.61	2.752
	473.1	484.91	435.86	11.11	553.01	2.752
	475.4	485.91	431.64	10.77	552.41	2.752
	478.1	486.92	427.42	10.22	551.81	2.752
	480.5	487.92	423.20	9.76	551.21	2.752
TRAMO = 23						
	480.5	487.92	423.20	9.76	551.21	2.752
	482.0	489.33	419.01	9.71	549.56	2.752
	484.1	490.75	414.81	9.15	547.95	2.752
	486.3	492.16	410.61	8.58	546.32	2.752
	488.9	493.58	406.41	8.02	544.69	2.752
	491.7	495.00	402.21	7.46	543.06	2.752
	494.7	496.41	398.01	6.89	541.43	2.752
	497.9	497.82	393.81	6.33	539.81	2.752
	501.4	499.24	389.61	5.76	538.18	2.752
	505.0	500.65	385.41	5.20	536.55	2.752
	508.7	502.06	381.21	4.63	534.92	2.752
TRAMO = 29						
	508.7	502.06	381.21	4.63	534.92	2.752
	511.0	503.47	377.01	4.06	533.29	2.752
	513.4	504.88	372.81	3.49	531.66	2.752
	515.9	506.29	368.61	2.92	529.87	2.752

163.65	85.09	321.69	11.13	526.82	1.752
165.6	111.80	316.37	12.25	524.88	1.752
168.6	77.31	311.00	11.17	522.82	1.752
168.6	74.04	285.74	10.09	520.80	1.752
169.7	69.71	170.42	19.01	518.79	1.752
171.1	64.40	25.11	17.94	516.77	1.752
172.9	615.14	229.79	16.80	514.76	1.752

SELF

SELF ICMRLD - IL CONTROL MODE
DATA ICMRLD - IL CONTROL MODE

SELF

SELF ICMRLD - IL CONTROL MODE

CONDICION No. 4

OPERACION DE LAS ESTACIONES

- NUEVO TEAPA
- ARROYO MORENO

CON VELOCIDADES DE ROTACION

ESTACION No. 1 = 5740 RPM

FLUJO VOLUMETRICO = 200 MBD = 5833.32 GPM

=====

*** ESTACION No. 1 ***

CONDICIONES EN LAS ESTACIONES DE BOMBO

REGIMEN ESTACIONARIO

=====

TIPO DE BOMBAS	=	CENTRIFUGAS
SISTEMA DE BOMBAS	=	EN PARALELO
NUMERO DE BOMBAS EN OPERACION	=	2
NUMERO DE ETAPAS	=	1
N.P.M. (NET POSITIVE SUCTION HEAD) DISPONIBLE	=	108.96 FT
N.P.M. (NET POSITIVE SUCTION HEAD) REQUERIDO	=	66.00 FT
POTENCIA AL FRENO (BRAKE HORSEPOWER)	=	2293.66 HP
CARGA DE LA BOMBA (H)	=	2090.03 FT
CARGA DE SUCCION (H _S)	=	39.58 FT
CARGA DE RECARGA (H _R)	=	2207.39 FT
VELOCIDAD TOTAL DE FLUJO (Q)	=	5032.32 GPM
VELOCIDAD DE ROTACION (N)	=	5760.00 RPM
VELOCIDAD ESPECIFICA (N _S)	=	1000 RPM
VELOCIDAD ESPECIFICA DE SUCCION (N _{SS})	=	4697
EFICIENCIA EN LA OPERACION (E)	=	75.9 %
PUNTO DE MAXIMA EFICIENCIA	**CABEZA (H)	= 2159.32 FT
	* **FLUJO (Q)	= 945.8
		= 6142.94 GPM
DIAMETRO DEL IMPULSOR	=	10 5/8 IN
DIAMETRO MAXIMO DEL IMPULSOR	=	11 3/4 IN
ACELERADOR	=	TURBINA DE GAS
FLUJO DE PERO (SUITE OFF)	=	600.00 GPM
CARGA DE PERO (SUITE OFF)	=	2100.91 FT

```

=====
*** ESTACION HU. ***
=====
PLANIL LE PREGUNTES EN LA TURCRIA
=====
RESUMEN ESTACIONARIO
=====

```

TRAMO =	LONGITUD (MMS)	IFT	PRELIMINAR (PSI)	EXPRESION (KG/CM ²)	FRIC. (PSI)	VELOCIDAD (FT/SEG)
1	0	227.39	800.47	80.51	860.47	2.752
	5	228.69	800.97	80.55	860.31	2.752
	10	229.99	801.48	80.58	858.15	2.752
	15	231.27	801.98	80.62	856.499	2.752
	20	232.56	802.49	80.65	855.84	2.752
	25	233.84	802.99	80.69	854.68	2.752
	30	235.13	803.49	80.72	853.52	2.752
	35	236.44	804.00	80.76	852.36	2.752
	40	237.74	804.50	80.79	851.20	2.752
	45	239.03	805.01	80.83	850.04	2.752
	50	240.33	805.51	80.87	848.88	2.752
2	0	241.63	806.01	80.87	848.88	2.752
	5	242.93	806.51	80.91	847.72	2.752
	10	244.23	807.01	80.95	846.56	2.752
	15	245.53	807.51	80.99	845.40	2.752
	20	246.83	808.01	81.03	844.24	2.752
	25	248.13	808.51	81.07	843.08	2.752
	30	249.43	809.01	81.11	841.92	2.752
	35	250.73	809.51	81.15	840.76	2.752
	40	252.03	810.01	81.19	839.60	2.752
	45	253.33	810.51	81.23	838.44	2.752
	50	254.63	811.01	81.27	837.28	2.752
3	0	255.93	811.51	81.31	836.12	2.752
	5	257.23	812.01	81.35	834.96	2.752
	10	258.53	812.51	81.39	833.80	2.752
	15	259.83	813.01	81.43	832.64	2.752
	20	261.13	813.51	81.47	831.48	2.752
	25	262.43	814.01	81.51	830.32	2.752
	30	263.73	814.51	81.55	829.16	2.752
	35	265.03	815.01	81.59	828.00	2.752
	40	266.33	815.51	81.63	826.84	2.752
	45	267.63	816.01	81.67	825.68	2.752
	50	268.93	816.51	81.71	824.52	2.752
4	0	270.23	817.01	81.75	823.36	2.752
	5	271.53	817.51	81.79	822.20	2.752
	10	272.83	818.01	81.83	821.04	2.752
	15	274.13	818.51	81.87	819.88	2.752
	20	275.43	819.01	81.91	818.72	2.752
	25	276.73	819.51	81.95	817.56	2.752
	30	278.03	820.01	81.99	816.40	2.752
	35	279.33	820.51	82.03	815.24	2.752
	40	280.63	821.01	82.07	814.08	2.752
	45	281.93	821.51	82.11	812.92	2.752
	50	283.23	822.01	82.15	811.76	2.752

TRAMO = L

TRAMO = 6

TRAMO = 7

TRAMO = 6

TRAMO = 5

11.9	097.94	798.13	56.15	819.30	0.752
12.7	026.67	801.79	56.34	818.92	0.752
13.4	000.70	805.45	56.69	817.97	0.752
14.1	075.65	809.11	56.98	816.53	0.752
14.9	005.51	812.77	57.18	815.59	0.752
15.6	009.82	816.44	57.41	814.64	0.752
16.3	003.01	820.09	57.67	813.70	0.752
16.9	005.81	823.69	57.97	811.70	0.752
17.7	074.19	810.11	56.97	811.64	0.752
19.3	002.57	800.14	56.27	809.50	0.752
21.1	006.95	790.13	55.56	807.52	0.752
22.7	001.33	780.14	54.66	805.47	0.752
24.1	075.74	770.16	54.10	803.91	0.752
25.5	095.09	760.17	53.40	801.35	0.752
27.5	044.47	750.18	52.76	799.29	0.752
29.1	098.85	740.19	52.05	797.23	0.752
30.7	075.25	730.21	51.35	795.17	0.752
32.3	047.64	720.22	50.65	793.11	0.752
32.9	047.61	710.24	50.65	793.11	0.752
33.6	044.50	717.32	50.44	792.52	0.752
34.3	032.72	714.42	50.24	791.92	0.752
35.7	005.27	711.51	50.04	791.32	0.752
36.2	017.83	708.61	49.63	790.72	0.752
36.6	010.38	705.71	49.63	790.12	0.752
37.1	000.98	702.81	49.42	789.52	0.752
37.6	079.49	699.90	49.22	788.92	0.752
38.0	178.05	697.00	49.02	788.32	0.752
38.4	078.00	694.10	48.81	787.72	0.752
38.8	077.40	691.20	48.61	787.12	0.752
39.4	077.10	691.20	48.61	787.12	0.752
39.7	072.25	690.84	48.53	786.60	0.752
40.0	071.30	690.48	48.56	786.09	0.752
40.6	077.38	690.11	48.53	785.57	0.752
41.0	074.94	689.75	48.51	785.06	0.752
41.5	070.59	689.39	48.48	784.54	0.752
41.9	077.59	689.03	48.40	784.03	0.752
42.3	076.67	688.67	48.43	783.51	0.752
42.7	075.74	688.31	48.40	783.00	0.752
43.1	074.81	687.95	48.33	782.48	0.752
43.5	073.89	687.58	48.35	781.97	0.752
44.0	170.89	687.58	48.35	781.97	0.752
44.7	073.81	687.90	47.99	780.96	0.752
45.5	045.70	680.24	48.43	779.95	0.752
46.3	165.06	648.57	45.47	779.01	0.752
46.6	000.53	622.89	44.51	778.02	0.752
47.0	000.50	609.20	43.53	777.04	0.752
47.4	000.04	605.50	42.54	776.05	0.752
47.8	000.00	591.87	41.60	775.06	0.752
48.2	000.00	578.20	40.66	774.08	0.752
48.6	000.00	564.50	39.70	773.09	0.752
49.0	000.00	550.80	38.74	772.11	0.752
49.4	000.00	537.10	37.74	772.11	0.752
49.8	000.00	523.40	36.79	771.61	0.752
50.2	000.00	509.70	35.83	771.12	0.752
50.6	000.00	496.00	34.89	770.63	0.752

	70.4	441.19	554.06	38.90	770.13	2.752
	70.6	443.24	554.78	39.01	769.64	2.752
	71.0	445.25	555.57	39.07	769.10	2.752
	71.3	447.24	556.36	39.12	768.65	2.752
	71.7	449.26	557.14	39.18	768.16	2.752
	72.1	451.27	557.93	39.24	767.67	2.752
	72.5	453.29	558.71	39.29	767.17	2.752
TRAMO = 4						
	73.5	458.29	558.71	39.29	767.17	2.752
	73.6	470.86	571.36	40.32	766.22	2.752
	74.0	508.45	588.01	41.35	765.26	2.752
	74.7	546.04	602.65	42.38	764.31	2.752
	75.4	583.58	617.30	43.41	763.35	2.752
	76.2	621.15	631.95	44.44	762.39	2.752
	76.9	658.72	646.59	45.47	761.44	2.752
	77.7	696.30	661.24	46.50	760.48	2.752
	78.4	733.87	675.88	47.53	759.52	2.752
	78.8	771.44	690.53	48.56	758.57	2.752
	79.9	809.02	705.18	49.59	757.62	2.752
TRAMO = 1						
	79.9	809.02	705.18	49.59	757.62	2.752
	80.3	846.57	720.11	49.59	757.06	2.752
	80.6	879.13	699.47	49.19	756.51	2.752
	81.1	911.68	696.62	48.79	755.96	2.752
	81.4	944.24	693.77	48.79	755.42	2.752
	82.0	976.80	690.92	48.59	754.87	2.752
	82.5	1009.36	688.07	48.39	754.32	2.752
	82.9	1041.92	685.22	48.19	753.77	2.752
	83.3	1074.48	682.37	47.99	753.22	2.752
	83.7	1107.04	679.52	47.79	752.67	2.752
	84.0	1139.60	676.67	47.59	752.13	2.752
TRAMO = 2						
	84.0	1139.60	676.67	47.59	752.13	2.752
	85.4	1172.16	673.82	47.39	751.58	2.752
	86.0	1204.72	670.97	47.19	751.03	2.752
	87.0	1237.28	668.12	46.99	750.48	2.752
	87.9	1269.84	665.27	46.79	749.93	2.752
	89.0	1302.40	662.42	46.59	749.38	2.752
	91.0	1334.96	659.57	46.39	748.83	2.752
	92.7	1367.52	656.72	46.19	748.28	2.752
	93.9	1400.08	653.87	45.99	747.73	2.752
	95.0	1432.64	651.02	45.79	747.18	2.752
	96.0	1465.20	648.17	45.59	746.63	2.752
TRAMO = 3						
	96.0	1465.20	648.17	45.59	746.63	2.752
	96.7	1497.76	645.32	45.39	746.08	2.752
	97.1	1530.32	642.47	45.19	745.53	2.752
	97.5	1562.88	639.62	44.99	744.98	2.752
	97.9	1595.44	636.77	44.79	744.43	2.752
	98.0	1628.00	633.92	44.59	743.88	2.752
	98.7	1660.56	631.07	44.39	743.33	2.752
	99.0	1693.12	628.22	44.19	742.78	2.752
	99.4	1725.68	625.37	43.99	742.23	2.752
	99.8	1758.24	622.52	43.79	741.68	2.752
	100.0	1790.80	619.67	43.59	741.13	2.752
TRAMO = 6						
	100.0	1790.80	619.67	43.59	741.13	2.752
	100.7	1823.36	616.82	43.39	740.58	2.752
	101.0	1855.92	613.97	43.19	740.03	2.752
	101.0	1888.48	611.12	42.99	739.48	2.752

10201	1046031	719.60	40.60	7.9030	..752
10202	1049047	710.79	40.60	728.40	..752
10301	1050101	710.90	40.77	727.80	..752
10302	1055108	723.17	40.80	727.20	..752
10303	1050111	704.30	40.90	726.60	..752
10401	1061120	705.55	41.01	726.00	..752
10402	1064134	706.74	41.11	725.40	..752
10403	1065170	719.50	40.60	724.34	..752
10404	1067110	712.20	40.60	721.21	..752
10405	1060100	705.50	40.50	719.00	..752
10406	1070110	667.77	40.07	710.90	..752
10407	1071140	690.53	40.50	710.01	..752
10408	1072187	643.29	40.35	712.73	..752
10409	1073119	676.00	40.54	713.58	..752
10410	1075171	680.80	40.03	708.40	..752
10411	1097110	641.50	40.52	706.32	..752
10412	1070155	654.30	40.01	704.20	..752
10413	1070155	654.32	40.01	704.20	2.752
10414	1070198	654.45	40.01	703.60	..752
10415	1070191	654.50	40.04	703.00	..752
10416	1071104	654.80	40.35	702.40	..752
10417	1060127	654.99	40.06	701.80	..752
10418	1060170	655.10	40.37	701.20	..752
10419	1061113	655.33	40.38	700.60	..752
10420	1060150	655.49	40.10	700.00	..752
10421	1061199	655.60	40.11	699.40	..752
10422	1062142	655.83	40.12	698.80	..752
10423	1062185	656.00	40.13	698.20	..752
10424	1060180	656.00	40.13	698.20	..752
10425	1070150	654.72	40.34	697.60	..752
10426	1070152	655.45	40.95	697.10	..752
10427	1071115	652.10	40.30	696.60	..752
10428	1060178	650.90	40.77	696.10	..752
10429	1060110	649.61	40.60	695.60	..752
10430	1060125	640.30	40.59	695.10	..752
10431	1060190	647.00	40.51	694.00	..752
10432	1060170	645.81	40.42	694.15	2.752
10433	1060140	644.54	40.33	693.60	..752
10434	1060138	643.20	40.20	693.10	..752
10435	1060110	643.20	40.24	693.10	..752
10436	1060137	647.00	40.50	691.40	..752
10437	1060150	640.20	40.79	689.80	..752
10438	1060170	650.10	40.07	688.17	..752
10439	1060193	649.10	40.30	686.50	..752
10440	1060110	643.10	40.65	684.80	..752
10441	1070110	667.59	40.91	683.21	..752
10442	1060150	641.50	40.19	681.53	..752
10443	1060110	645.00	40.47	679.80	..752
10444	1061107	640.00	40.75	678.20	2.752
10445	1060110	640.00	40.01	676.50	..752
10446	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10447	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10448	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10449	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10450	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10451	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10452	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10453	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10454	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10455	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10456	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10457	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10458	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10459	1060110	640.00	40.00	676.50	..752
10460	1060110	640.00	40.00	676.50	..752

	147.6	179.94	678.43	47.71	670.40	2.752
	148.0	177.36	677.34	47.67	668.86	2.752
	148.4	174.78	676.16	47.55	667.31	2.752
	148.8	171.20	675.03	47.47	665.77	2.752
	149.2	167.62	673.89	47.39	664.22	2.752
	149.6	164.04	672.76	47.31	662.66	2.752
	150.0	160.46	671.62	47.23	661.13	2.752
TRAM 2.0	154.0	171.93	671.62	47.23	661.13	2.752
	155.4	170.50	667.55	46.94	659.51	2.752
	156.8	169.07	663.46	46.66	657.91	2.752
	158.2	167.62	659.42	46.37	656.31	2.752
	159.6	166.18	655.35	46.09	654.68	2.752
	161.0	164.75	651.28	45.81	653.07	2.752
	162.4	163.31	647.21	45.51	651.46	2.752
	163.8	161.87	643.14	45.21	649.84	2.752
	165.2	160.44	639.07	44.94	648.23	2.752
	166.6	159.00	635.00	44.66	646.62	2.752
	168.0	157.56	630.94	44.37	645.01	2.752
TRAM 2.2	167.4	161.55	630.94	44.37	645.01	2.752
	167.8	160.10	626.84	44.07	643.40	2.752
	168.2	158.65	622.74	43.77	641.79	2.752
	168.6	157.20	618.64	43.47	640.18	2.752
	169.0	155.75	614.54	43.17	638.57	2.752
	169.4	154.30	610.44	42.87	636.96	2.752
	169.8	152.85	606.34	42.57	635.35	2.752
	170.2	151.40	602.24	42.27	633.74	2.752
	170.6	150.00	598.14	41.97	632.13	2.752
	171.0	148.55	594.04	41.67	630.52	2.752
	171.4	147.10	589.94	41.37	628.91	2.752
TRAM 2.4	171.7	147.10	589.94	41.37	628.91	2.752
	172.1	145.65	585.84	41.07	627.30	2.752
	172.5	144.20	581.74	40.77	625.69	2.752
	172.9	142.75	577.64	40.47	624.08	2.752
	173.3	141.30	573.54	40.17	622.47	2.752
	173.7	139.85	569.44	39.87	620.86	2.752
	174.1	138.40	565.34	39.57	619.25	2.752
	174.5	136.95	561.24	39.27	617.64	2.752
	174.9	135.50	557.14	38.97	616.03	2.752
	175.3	134.05	553.04	38.67	614.42	2.752
	175.7	132.60	548.94	38.37	612.81	2.752
	176.1	131.15	544.84	38.07	611.20	2.752
	176.5	129.70	540.74	37.77	609.59	2.752
	176.9	128.25	536.64	37.47	607.98	2.752
	177.3	126.80	532.54	37.17	606.37	2.752
	177.7	125.35	528.44	36.87	604.76	2.752
	178.1	123.90	524.34	36.57	603.15	2.752
	178.5	122.45	520.24	36.27	601.54	2.752
	178.9	121.00	516.14	35.97	599.93	2.752
	179.3	119.55	512.04	35.67	598.32	2.752
	179.7	118.10	507.94	35.37	596.71	2.752
	180.1	116.65	503.84	35.07	595.10	2.752
	180.5	115.20	499.74	34.77	593.49	2.752
	180.9	113.75	495.64	34.47	591.88	2.752
	181.3	112.30	491.54	34.17	590.27	2.752
	181.7	110.85	487.44	33.87	588.66	2.752
	182.1	109.40	483.34	33.57	587.05	2.752
	182.5	107.95	479.24	33.27	585.44	2.752
	182.9	106.50	475.14	32.97	583.83	2.752
	183.3	105.05	471.04	32.67	582.22	2.752
	183.7	103.60	466.94	32.37	580.61	2.752
	184.1	102.15	462.84	32.07	579.00	2.752
	184.5	100.70	458.74	31.77	577.39	2.752
	184.9	99.25	454.64	31.47	575.78	2.752
	185.3	97.80	450.54	31.17	574.17	2.752
	185.7	96.35	446.44	30.87	572.56	2.752
	186.1	94.90	442.34	30.57	570.95	2.752
	186.5	93.45	438.24	30.27	569.34	2.752
	186.9	92.00	434.14	29.97	567.73	2.752
	187.3	90.55	430.04	29.67	566.12	2.752
	187.7	89.10	425.94	29.37	564.51	2.752
	188.1	87.65	421.84	29.07	562.90	2.752
	188.5	86.20	417.74	28.77	561.29	2.752
	188.9	84.75	413.64	28.47	559.68	2.752
	189.3	83.30	409.54	28.17	558.07	2.752
	189.7	81.85	405.44	27.87	556.46	2.752
	190.1	80.40	401.34	27.57	554.85	2.752
	190.5	78.95	397.24	27.27	553.24	2.752
	190.9	77.50	393.14	26.97	551.63	2.752
	191.3	76.05	389.04	26.67	550.02	2.752
	191.7	74.60	384.94	26.37	548.41	2.752
	192.1	73.15	380.84	26.07	546.80	2.752
	192.5	71.70	376.74	25.77	545.19	2.752
	192.9	70.25	372.64	25.47	543.58	2.752
	193.3	68.80	368.54	25.17	541.97	2.752
	193.7	67.35	364.44	24.87	540.36	2.752
	194.1	65.90	360.34	24.57	538.75	2.752
	194.5	64.45	356.24	24.27	537.14	2.752
	194.9	63.00	352.14	23.97	535.53	2.752
	195.3	61.55	348.04	23.67	533.92	2.752
	195.7	60.10	343.94	23.37	532.31	2.752
	196.1	58.65	339.84	23.07	530.70	2.752
	196.5	57.20	335.74	22.77	529.09	2.752
	196.9	55.75	331.64	22.47	527.48	2.752
	197.3	54.30	327.54	22.17	525.87	2.752
	197.7	52.85	323.44	21.87	524.26	2.752
	198.1	51.40	319.34	21.57	522.65	2.752
	198.5	49.95	315.24	21.27	521.04	2.752
	198.9	48.50	311.14	20.97	519.43	2.752
	199.3	47.05	307.04	20.67	517.82	2.752
	199.7	45.60	302.94	20.37	516.21	2.752
	200.1	44.15	298.84	20.07	514.60	2.752
	200.5	42.70	294.74	19.77	512.99	2.752
	200.9	41.25	290.64	19.47	511.38	2.752
	201.3	39.80	286.54	19.17	509.77	2.752
	201.7	38.35	282.44	18.87	508.16	2.752
	202.1	36.90	278.34	18.57	506.55	2.752
	202.5	35.45	274.24	18.27	504.94	2.752
	202.9	34.00	270.14	17.97	503.33	2.752
	203.3	32.55	266.04	17.67	501.72	2.752
	203.7	31.10	261.94	17.37	500.11	2.752
	204.1	29.65	257.84	17.07	498.50	2.752
	204.5	28.20	253.74	16.77	496.89	2.752
	204.9	26.75	249.64	16.47	495.28	2.752
	205.3	25.30	245.54	16.17	493.67	2.752
	205.7	23.85	241.44	15.87	492.06	2.752
	206.1	22.40	237.34	15.57	490.45	2.752
	206.5	20.95	233.24	15.27	488.84	2.752
	206.9	19.50	229.14	14.97	487.23	2.752
	207.3	18.05	225.04	14.67	485.62	2.752
	207.7	16.60	220.94	14.37	484.01	2.752
	208.1	15.15	216.84	14.07	482.40	2.752
	208.5	13.70	212.74	13.77	480.79	2.752
	208.9	12.25	208.64	13.47	479.18	2.752
	209.3	10.80	204.54	13.17	477.57	2.752
	209.7	9.35	200.44	12.87	475.96	2.752
	210.1	7.90	196.34	12.57	474.35	2.752
	210.5	6.45	192.24	12.27	472.74	2.752
	210.9	5.00	188.14	11.97	471.13	2.752
	211.3	3.55	184.04	11.67	469.52	2.752
	211.7	2.10	179.94	11.37	467.91	2.752
	212.1	0.65	175.84	11.07	466.30	2.752
	212.5	-0.80	171.74	10.77	464.69	2.752
	212.9	-2.35	167.64	10.47	463.08	2.752

	146.9	441.94	522.10	39.53	581.28	2.752
	148.1	440.33	526.66	39.15	579.68	2.752
	149.4	444.38	531.22	38.70	578.38	2.752
	150.6	440.21	545.79	38.38	576.98	2.752
	151.6	438.17	540.35	38.30	574.88	2.752
	152.1	437.24	534.9	37.62	573.27	2.752
	154.3	438.27	539.47	37.23	571.67	2.752
TRANO = 1	154.3	438.27	539.47	37.23	571.67	2.752
	155.3	439.60	526.69	37.00	570.10	2.752
	156.0	440.93	522.71	36.70	568.70	2.752
	157.8	432.30	519.33	36.52	567.21	2.752
	159.0	433.59	515.95	36.28	565.72	2.752
	160.1	434.92	512.57	36.05	564.24	2.752
	161.3	436.25	509.19	35.81	562.75	2.752
	162.4	437.58	505.81	35.57	561.26	2.752
	163.6	438.91	502.43	35.33	559.74	2.752
	164.7	440.24	499.05	35.10	558.29	2.752
	165.9	441.57	495.67	34.86	556.80	2.752
TRANO = 2	165.9	441.57	495.67	34.86	556.80	2.752
	166.3	442.90	492.29	34.61	555.29	2.752
	166.7	445.31	488.90	34.35	553.77	2.752
	167.2	441.90	484.92	34.10	552.26	2.752
	167.3	442.79	481.33	33.85	550.74	2.752
	167.9	442.59	477.75	33.60	549.23	2.752
	168.3	444.00	474.17	33.35	547.71	2.752
	168.7	447.25	470.58	33.09	546.20	2.752
	169.2	448.91	467.00	32.84	544.68	2.752
	169.5	448.81	463.42	32.59	543.17	2.752
	169.9	449.62	459.83	32.34	541.65	2.752
TRANO = 3	169.9	449.62	459.83	32.34	541.65	2.752
	170.4	451.60	456.25	32.09	540.13	2.752
	170.5	451.60	452.67	31.84	538.61	2.752
	170.6	453.62	449.09	31.59	537.09	2.752
	171.3	455.63	445.51	31.34	535.57	2.752
	171.7	457.65	441.93	31.09	534.05	2.752
	172.0	459.66	438.35	30.84	532.53	2.752
	172.7	461.68	434.77	30.59	531.01	2.752
	173.0	463.69	431.19	30.34	529.49	2.752
	173.6	465.69	427.61	30.09	527.97	2.752
	174.1	467.69	424.03	29.84	526.45	2.752
TRANO = 4	174.1	467.69	424.03	29.84	526.45	2.752
	174.5	469.69	420.45	29.59	524.93	2.752
	174.6	469.69	416.87	29.34	523.41	2.752
	174.7	471.69	413.29	29.09	521.89	2.752
	174.8	473.69	409.71	28.84	520.37	2.752
	174.9	475.69	406.13	28.59	518.85	2.752
	175.0	477.69	402.55	28.34	517.33	2.752
	175.1	479.69	398.97	28.09	515.81	2.752
	175.2	481.69	395.39	27.84	514.29	2.752
	175.3	483.69	391.81	27.59	512.77	2.752
	175.4	485.69	388.23	27.34	511.25	2.752
	175.5	487.69	384.65	27.09	509.73	2.752
	175.6	489.69	381.07	26.84	508.21	2.752
	175.7	491.69	377.49	26.59	506.69	2.752
	175.8	493.69	373.91	26.34	505.17	2.752
	175.9	495.69	370.33	26.09	503.65	2.752
	176.0	497.69	366.75	25.84	502.13	2.752
	176.1	499.69	363.17	25.59	500.61	2.752
	176.2	501.69	359.59	25.34	499.09	2.752
	176.3	503.69	356.01	25.09	497.57	2.752
	176.4	505.69	352.43	24.84	496.05	2.752
	176.5	507.69	348.85	24.59	494.53	2.752
	176.6	509.69	345.27	24.34	493.01	2.752
	176.7	511.69	341.69	24.09	491.49	2.752
	176.8	513.69	338.11	23.84	489.97	2.752
	176.9	515.69	334.53	23.59	488.45	2.752
	177.0	517.69	330.95	23.34	486.93	2.752
	177.1	519.69	327.37	23.09	485.41	2.752
	177.2	521.69	323.79	22.84	483.89	2.752
	177.3	523.69	320.21	22.59	482.37	2.752
	177.4	525.69	316.63	22.34	480.85	2.752
	177.5	527.69	313.05	22.09	479.33	2.752
	177.6	529.69	309.47	21.84	477.81	2.752
	177.7	531.69	305.89	21.59	476.29	2.752
	177.8	533.69	302.31	21.34	474.77	2.752
	177.9	535.69	298.73	21.09	473.25	2.752
	178.0	537.69	295.15	20.84	471.73	2.752
TRANO = 5	178.0	537.69	295.15	20.84	471.73	2.752
	178.1	539.69	291.57	20.59	470.21	2.752
	178.2	541.69	287.99	20.34	468.69	2.752
	178.3	543.69	284.41	20.09	467.17	2.752
	178.4	545.69	280.83	19.84	465.65	2.752
	178.5	547.69	277.25	19.59	464.13	2.752
	178.6	549.69	273.67	19.34	462.61	2.752
	178.7	551.69	270.09	19.09	461.09	2.752
	178.8	553.69	266.51	18.84	459.57	2.752
	178.9	555.69	262.93	18.59	458.05	2.752
	179.0	557.69	259.35	18.34	456.53	2.752
	179.1	559.69	255.77	18.09	455.01	2.752
	179.2	561.69	252.19	17.84	453.49	2.752
	179.3	563.69	248.61	17.59	451.97	2.752
	179.4	565.69	245.03	17.34	450.45	2.752
	179.5	567.69	241.45	17.09	448.93	2.752
	179.6	569.69	237.87	16.84	447.41	2.752
	179.7	571.69	234.29	16.59	445.89	2.752
	179.8	573.69	230.71	16.34	444.37	2.752
	179.9	575.69	227.13	16.09	442.85	2.752
	180.0	577.69	223.55	15.84	441.33	2.752

463.5	826.61	246.14	-2.93	521.29	2.752
445.4	797.34	240.81	-1.86	519.26	2.752
246.0	758.03	294.50	-0.78	517.26	2.752
248.2	718.78	240.14	19.76	515.24	2.752
269.7	679.42	264.86	-8.63	513.23	2.752
171.1	640.17	249.55	17.55	511.21	2.752
172.9	600.88	234.23	16.47	509.20	2.752

SELF
 SELF IGNORED == IN CONTROL MODE
 DATA IGNORED == IN CONTROL MODE

SELF
 SELF IGNORED == IN CONTROL MODE

REGIMEN NO PERMANENTE

En la primera parte se mostrará cómo se comporta el fenómeno al viajar el frente de la onda de presión a través del oleoducto aplicado a un súbito cierre de válvula cuando el sistema está operando normalmente. Esto — con el fin de observar qué resultados se obtienen en la solución del modelo matemático y posteriormente poder interpretarlos.

Teniendo en cuenta esto, pasaremos a la aplicación de problemas más — específicos que pueden ocurrir en un sistema de bombeo, que en nuestro caso será el oleoducto Nuevo Teapa - Venta de Carpio - Tula entre las estaciones No. 1 y la estación No. 3. Aquí manejaremos los puntos más significativos — (críticos), de la información obtenida a través de los resultados arrojados por los programas de computadora y de esta forma hacer más condensada la evaluación.

1) CASO: CIERRE DE VALVULA

Comportamiento del oleoducto de la Estación No. 1 a la Estación No. 2 cuando se cierra súbitamente una válvula sobre la tubería principal en la Estación No. 2. Se analizará el estado no permanente que se genera -- cuando se opera a las condiciones normales; es decir, con un flujo de 260 MBPD.

Probablemente, la causa más común y que mejor conocimiento se tiene es el problema de flujo transiente que se presenta por el movimiento de - válvula. El cierre o abertura de una válvula causan que se generen ondas de presión y hacen que se propaguen a través del sistema. La severidad de la onda de presión depende del tipo de movimiento que se haya ejercido sobre la válvula y además de las propiedades hidráulicas y elásticas del sistema. Como ya se señaló, que bajo ciertas circunstancias el último porcentaje en el movimiento de la válvula durante el proceso de cierre tendrá un efecto de sobrepresionamiento sobre las presiones máximas generadas.

Programaremos que la válvula cierre lentamente para reducir el flujo a cero en un tiempo de 40 segundos.

En el tiempo = θ seg. donde la presión a la descarga de la Estación - No. 1 es de 802 psi y la presión a la succión en la Estación No. 2 es de 298 psi y el perfil de velocidad de 3.58 ft/seg.

Para analizar qué es lo que está ocurriendo en el sistema, observaremos las condiciones que se presentan a lo largo de la tubería, como en los extremos de la misma; es decir, las condiciones a la descarga y succión de las estaciones y además centralizaremos nuestra atención en la válvula para visualizar de qué manera se está introduciendo inestabilidad al sistema por -

la acción del estrangulamiento del flujo y ver qué respuesta tienen las bombas en la estación de Nuevo Teapa operando normalmente.

La velocidad de propagación de la onda de presión fue calculada de acuerdo a la ecuación (VI.5.10.), obteniendo como resultado un valor de 3524 FT/seg. Así es que desde el momento de producirse la inestabilidad, ésta se transmitirá desde la estación No. 2 (donde está localizada la válvula) hasta la estación No. 1 en un tiempo de 208 segundos (3.48 min.), de manera que iremos analizando etapa por etapa que está ocurriendo en la tubería cuando la onda viaja a intervalos de tiempos discretos.

En el esquema No. 1 ($t = 20$ seg.) muestra el efecto cuando la válvula cierra un porcentaje de su abertura dejando pasar el 72% de su flujo total, generando una presión de 348 psi corriente arriba de la válvula. En este tiempo la onda de presión ha viajado 23.3 kms.

A los 41 seg. donde la válvula ya está completamente cerrada, la presión en la válvula aumenta a 471 psi, este aumento se debe a que el fluido todavía continúa fluyendo hacia la válvula (empaquetamiento de la tubería), aunque con una velocidad menor y esta poca energía cinética se convierte en energía de presión agregándose a la que ya se había alcanzado. La onda de presión en este instante ha recorrido 45.7 kms. En la propagación del frente de onda se observa cómo se va deteniendo el flujo, aumentándose las presiones a lo largo de la tubería.

A los 62 seg. la presión en la válvula ha ascendido a 493 psi. Como todavía la onda no ha alcanzado el otro extremo la línea continúa empacándose; es decir, las bombas están forzando a que las condiciones a la descarga permanezcan constante.

A los 250 seg. cuando la onda de presión ya alcanzó la descarga de la Estación No. 1 hace que cambien sus condiciones, es decir, las bombas --
miten una respuesta a las condiciones que detecta a la descarga. La presión de 802 psi la aumenta a 823 psi, lo que hace que la bomba disminuya su flujo de 3791.7 GPM/BOMBA a 3538.4 GPM/BOMBA, ésta es una reacción lógica --
eniendo presente como es la curva característica de las bombas (H vs. Q).

Tómese en cuenta que aquí las bombas no han alcanzado su presión de disparo (SHUT-OFF) ajustada a un valor de 862 psi. En este momento el oleoducto está presionado y está trabajando por arriba de sus condiciones normales de operación. Este oleoducto tiene una presión de trabajo de 1379.3 B/IN**2 (97 KG/cm**2); a menos que se tenga algún punto débil en la tubería (raspadura, abolladura, etc.), en este momento puede desarrollarse una ruptura por estar presionado el oleoducto. Si ésta ocurre, lo que se detectará es que la tubería comienza a depresionarse y que las bombas en la estación No. 1* vayan a operar a sus condiciones normales, mientras que la estación corriente abajo detectará la anomalía al sentir una disminución en la presión de succión, lo que provocará que las bombas; por su sistema de control, entren en recirculación saliéndose de operación del sistema de bombeo. Con la comunicación entre ambas estaciones se podrá determinar que ha ocurrido una falla en el oleoducto. Sino ocurre la falla, el proceso de aumento de presión en el oleoducto continuará.

A los 347 seg. las bombas alcanzaron la presión de disparo y comienzan a disminuir tanto la presión a la descarga como el flujo (ver caso: falla de bombas).

Estamos suponiendo que la presión a la succión no sufre ningún cambio durante toda la simulación.

A los 374 seg. donde las bombas de la Estación No. 1 ya quedaron fuera de operación la presión alcanzada fue de 739 psi con flujo igual a cero y la presión en la válvula es de 744 psi. En este momento comienza a desarrollarse un gradiente de presiones entre las condiciones a la descarga de la Estación No. 1 y los puntos adyacentes, lo que provocará que comience haber retroceso de flujo hacia la Estación.

A los 415 seg., debido al retroceso de flujo, la descarga de las bombas (en las válvulas check) comienzan a soportar una columna de líquido; es decir, después de haber disminuido la presión a la descarga debido al proceso del disparo de las bombas, ésta comienza a aumentar ($P = 740$ psi). Recuerdese que la onda de presión ya rebotó en la Estación No. 1 y se va dirigiendo a la Estación No. 2.

En los siguientes 208 seg. ($t = 624$ seg.) comienza a retroceder el líquido de la tubería hacia la Estación No. 1, llegándose a alcanzar una presión en ésta de 806 psi y a disminuir en la succión de la Estación No. 2 a 706 psi. De esta manera, comienza a desarrollarse una secuencia de eventos en la que el fenómeno (onda) oscila entre una estación y otra (resonancia) amortiguándose por los efectos de fricción.

Debe considerarse que después del disparo de las bombas, éstas ya no vuelven a arrancar durante el ciclo de duración del fenómeno de golpe de ariete.

El resumen de condiciones obtenidas durante la simulación del proceso son escritas al final del análisis. De las que podemos citar las principales como son: las presiones máximas y mínimas registradas puntualmente durante el transiente comparadas con sus presiones normales de operación. De igual forma se expresan en cabezas de líquido respectivos, así como su punto de localización. Al final se obtiene el punto con mayor presión alcan-

zando en todo el oleoducto que en este caso fue de 872.2 psi en el km 212 y se presentó a los 534 seg. Asimismo el punto de menor presión se localizó en la succión de la Estación 2 a las condiciones iniciales ($t = 0$, seg.). De esto podemos inferir que durante la etapa crítica donde se desarrollan las mayores o menores presiones es en el período ($2L/a$) o ciclo del fenómeno), el oleoducto siempre estará sujeto a operar durante el transiente a altas presiones.

El disparo de las bombas se alcanzó a los 347 seg.

Debemos señalar que una cuestión que no hemos abordado es el fijar el tiempo de simulación de todo el proceso; esto debe fijarse en los datos de entrada, pues debemos recordar como se obtiene la solución al problema.

De que manera lo fijamos para que no detengamos el análisis sin que se hayan alcanzado los puntos de máximas y mínimas presiones. Podemos fijarlo que sea mayor al período crítico ($2L/a$); pero habrá sistemas que todavía no lo desarrollen.

Una buena regla de dedo es correr la simulación al menos ($6L/a$) que para nuestro caso fue de 1248 seg.

Con el punto de vista del análisis anterior, estamos en la disposición de abordar otros problemas más específicos que se presentan en los oleoductos.

 DATOS DE ENTRADA

*** DATOS DEL SISTEMA ***

NUMERO DE TRAMOS = 24
 NUMERO DE PARTES EN QUE SE DIVIDIO CADA TRAMO DE TUBERIA = 2
 CABEZAL DE SUCCION QUE SE DESEA OBTENER EN LA ESTACION NO. 2 = 872.8 FT
 PRESION DE VAPOR = 14.9 PSIA
 ALTURA EN LA ESTACION NO. 2 = 109.3 FT
 TIEMPO MAXIMO DEL ANALISIS DEL TRANSIENTE = .0 SEG
 ESCRITURA EN 13 IN INTERVALO DE TIEMPO
 INICIALIZACION DIERACION DEL FLUJO A COND. ESTABLES = 7503.320 GPM

*** DATOS DE LA VALVULA ***

TIEMPO DE CIERRE EN LA PRIMERA ETAPA = 1.00 SEG
 PORCENTAJE DE ABERTURA AL FINAL DE LA PRIMERA ETAPA = 1.00
 TIEMPO EN QUE LA VALVULA ESTA COMPLETAMENTE CERRADA = 40.00 SEG

*** DATOS DE TUBERIA ***

TRAMO 1	D = 29.43 IN	L = 29528 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = .0 FT
	L/A = 8.380 SEG				
TRAMO 2	D = 29.43 IN	L = 54331 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = -42.7 FT
	L/A = 15.419 SEG				
TRAMO 3	D = 29.43 IN	L = 112264 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = -82.9 FT
	L/A = 3.203 SEG				
TRAMO 4	D = 29.43 IN	L = 240494 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = 102.7 FT
	L/A = 6.825 SEG				
TRAMO 5	D = 29.43 IN	L = 529614 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = -16.9 FT
	L/A = 14.988 SEG				
TRAMO 6	D = 29.43 IN	L = 15249 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = 187.0 FT
	L/A = 4.339 SEG				
TRAMO 7	D = 29.43 IN	L = 135234 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = 246.1 FT
	L/A = 3.724 SEG				
TRAMO 8	D = 29.43 IN	L = 251314 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = 242.1 FT
	L/A = 7.132 SEG				
TRAMO 9	D = 29.43 IN	L = 125444 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = 567.6 FT
	L/A = 3.566 SEG				
TRAMO 10	D = 29.43 IN	L = 243774 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = 534.0 FT
	L/A = 6.918 SEG				
TRAMO 11	D = 29.43 IN	L = 13974 FT	F = .0199	VELOC. DE ONDA = 3529 FT/SEG	ELEVACION DE LA TUBERIA = 134.5 FT

L/A = 11.350 SEG

TRAMO 13 D = 29.43 IN
L/A = 3.594 SEG

L = 12564 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 10.3 FT

TRAMO 14 D = 29.43 IN
L/A = 4.339 SEG

L = 15209 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 42.7 FT

TRAMO 15 D = 29.43 IN
L/A = 13.322 SEG

L = 54199 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = -1.3 FT

TRAMO 16 D = 29.43 IN
L/A = 4.339 SEG

L = 15209 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 111.9 FT

TRAMO 17 D = 29.43 IN
L/A = 3.659 SEG

L = 12894 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 104.3 FT

TRAMO 18 D = 29.43 IN
L/A = 13.974 SEG

L = 42192 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 121.9 FT

TRAMO 19 D = 29.43 IN
L/A = 11.173 SEG

L = 39370 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = -16.4 FT

TRAMO 20 D = 29.43 IN
L/A = 13.667 SEG

L = 42109 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = -24.9 FT

TRAMO 21 D = 29.43 IN
L/A = 4.032 SEG

L = 14204 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 36.3 FT

TRAMO 22 D = 29.43 IN
L/A = 13.694 SEG

L = 118734 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = -32.2 FT

TRAMO 23 D = 29.43 IN
L/A = 3.724 SEG

L = 13223 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 24.5 FT

TRAMO 24 D = 29.43 IN
L/A = 11.366 SEG

L = 40825 FT

F = .0199

VELOC. DE ONDA = 3524 FT/SEG

ELEVACION DE LA TUBERIA = 0.8 FT

00000000000000000000

NUMERO DE BOMBAS EN PARALELO = 2

CADA BOMBA TIENE 3 ETAPAS

VELOC. DE LA BOMBA A COND. ESTABLE = 5025.0 RPM

CADA BOMBA TIENE UN MOMENTO DE INERCIA DE 4500.0 LB-FT²

CABEZA DE SUCCION EN LA ESTACION NO. 1 = 1094 FT

Q-RPM	1 ETAPAS-FT	2 ETAPAS
0	2300.0	1400.00
500.0	2300.0	1600.00
1000.0	2300.0	1700.00
1500.0	2300.0	1800.00
2000.0	2250.0	2000.00
2500.0	2150.0	2200.00

ANALISIS DEL TRANSIENTE

SISTEMA "BOMBAS EN PARALELO CON CIERRE DE VALVULA"
ESTUDIO DE CONDICIONES

TIEMPO	COND. SEG.	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	Y (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	Y (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	Y (FT/SEG)
1	TRAMO	.000	2056.	802.	3.50	.200	2057.	801.	3.50	.000	2056.	801.	3.50
		.000	2055.	801.	3.50	.000	2056.	800.	3.50	1.000	2055.	800.	3.50
2	TRAMO	.000	2053.	800.	3.50	.111	2043.	794.	3.50	.222	2033.	797.	3.50
		.333	2023.	780.	3.50	.444	2014.	784.	3.50	.556	2004.	781.	3.50
		.667	1994.	777.	3.50	.778	1984.	773.	3.50	.889	1974.	769.	3.50
		1.000	1964.	765.	3.50								
3	TRAMO	.000	1964.	765.	3.50	.500	1894.	754.	3.50	1.000	1803.	707.	3.50
4	TRAMO	.000	1803.	707.	3.50	.250	1823.	710.	3.50	.500	1843.	718.	3.50
		.750	1843.	724.	3.50	1.000	1882.	733.	3.50				
5	TRAMO	.000	1802.	733.	3.50	.111	1850.	721.	3.50	.222	1810.	708.	3.50
		.333	1786.	694.	3.50	.444	1754.	684.	3.50	.556	1722.	671.	3.50
		.667	1691.	659.	3.50	.778	1659.	646.	3.50	.889	1627.	634.	3.50
		1.000	1595.	621.	3.50								
6	TRAMO	.000	1595.	621.	3.50	.500	1553.	605.	3.50	1.000	1511.	589.	3.50
7	TRAMO	.000	1513.	589.	3.50	.500	1502.	585.	3.50	1.000	1494.	582.	3.50
8	TRAMO	.000	1494.	582.	3.50	.250	1402.	546.	3.50	.500	1311.	511.	3.50
		.750	1219.	472.	3.50	1.000	1124.	439.	3.50				
9	TRAMO	.000	1128.	439.	3.50	.500	1130.	442.	3.50	1.000	1120.	444.	3.50
10	TRAMO	.000	1140.	444.	3.50	.250	1231.	479.	3.50	.500	1321.	515.	3.50
		.750	1411.	550.	3.50	1.000	1501.	585.	3.50				
11	TRAMO	.000	1501.	585.	3.50	.500	1461.	569.	3.50	1.000	1420.	553.	3.50
12	TRAMO	.000	1420.	553.	3.50	.243	1435.	554.	3.50	.286	1451.	565.	3.50
		.429	1446.	571.	3.50	.471	1462.	577.	3.50	.714	1493.	583.	3.50
		.657	1513.	590.	3.50	1.000	1529.	596.	3.50				
13	TRAMO	.000	1529.	596.	3.50	.500	1507.	587.	3.50	1.000	1486.	579.	3.50

TRAMO	14	.000	1486.	579.	3.58	.500	1497.	583.	3.58	1.000	1507.	587.	3.58
TRAMO	15	.000	1507.	587.	3.58	.112	1483.	578.	3.58	.722	1459.	568.	3.58
		.333	1535.	599.	3.58	.840	1410.	549.	3.58	.556	1386.	540.	3.58
		.867	1362.	538.	3.58	.778	1337.	524.	3.58	.889	1313.	512.	3.58
		1.000	1289.	502.	3.58								
TRAMO	16	.000	1289.	502.	3.58	.500	1286.	501.	3.58	1.000	1284.	500.	3.58
TRAMO	17	.000	1284.	500.	3.58	.500	1284.	492.	3.58	1.000	1283.	484.	3.58
TRAMO	18	.000	1243.	484.	3.58	.143	1254.	489.	3.58	.286	1265.	491.	3.58
		.429	1274.	491.	3.58	.571	1287.	501.	3.58	.714	1298.	506.	3.58
		.857	1309.	510.	3.58	1.000	1320.	514.	3.58				
TRAMO	19	.000	1320.	514.	3.58	.167	1311.	511.	3.58	.333	1302.	507.	3.58
		.500	1293.	504.	3.58	.667	1285.	501.	3.58	.833	1276.	497.	3.58
		1.000	1267.	494.	3.58								
TRAMO	20	.000	1267.	494.	3.58	.143	1249.	486.	3.58	.286	1230.	479.	3.58
		.429	1212.	472.	3.58	.571	1197.	465.	3.58	.714	1175.	458.	3.58
		.857	1156.	451.	3.58	1.000	1138.	443.	3.58				
TRAMO	21	.000	1138.	443.	3.58	.500	1161.	452.	3.58	1.000	1183.	461.	3.58
TRAMO	22	.000	1183.	461.	3.58	.044	1171.	456.	3.58	.089	1159.	452.	3.58
		.143	1147.	447.	3.58	.190	1135.	442.	3.58	.238	1123.	438.	3.58
		.286	1111.	433.	3.58	.333	1099.	428.	3.58	.381	1087.	423.	3.58
		.429	1075.	419.	3.58	.476	1063.	414.	3.58	.524	1051.	409.	3.58
		.571	1039.	405.	3.58	.619	1027.	400.	3.58	.667	1015.	395.	3.58
		.714	1003.	391.	3.58	.762	991.	386.	3.58	.810	979.	381.	3.58
		.857	967.	377.	3.58	.905	953.	372.	3.58	.952	943.	367.	3.58
		1.000	930.	363.	3.58								
TRAMO	23	.000	930.	363.	3.58	.500	930.	362.	3.58	1.000	929.	362.	3.58
TRAMO	24	.000	929.	362.	3.58	.143	906.	353.	3.58	.286	882.	344.	3.58
		.429	859.	338.	3.58	.571	835.	325.	3.58	.714	812.	316.	3.58
		.857	788.	307.	3.58	1.000	765.	298.	3.58				

VELOCIDAD EN BOMBAS = 5825.00 RPM
 GASTO POR BOMBAS = 3791.7 GPM

CABEZA DE DESCARGA DE BOMBAS = 2057.85
 CABEZA DE LAISB BOMBAS = 1948.21 FT
 CAIDA DE PRESION POR FRICCIÓN = 1184.05 FT

		N	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)
TIEMPO =	28.80 SEG												
TRAMO	1	.000	2054.	807.	3.58	.200	2057.	801.	3.58	.400	2056.	801.	3.58
		.600	2056.	801.	3.58	.800	2054.	800.	3.58	1.000	2053.	800.	3.58

TRAMO	2	.000 .333 .667 1.000	2053. 2023. 1994. 1964.	800. 788. 771. 765.	3.58 3.58 3.58 3.58	-.111 -.444 -.778	2083. 2014. 1964.	766. 785. 733.	3.58 3.58 3.58	-.222 -.556 -.889	2033. 2004. 1974.	792. 781. 749.	3.58 3.58 3.58
TRAMO	3	.000	1946.	765.	3.58	.500	1804.	734.	3.58	1.000	1803.	703.	3.58
TRAMO	4	.000 .750	1803. 1863.	703. 726.	3.58 3.58	.250 1.000	1823. 1803.	710. 733.	3.58 3.58	-.500	1443.	718.	3.58
TRAMO	5	.000 .333 .667 1.000	1883. 1787. 1691. 1595.	733. 746. 754. 761.	3.58 3.58 3.58 3.58	.333 -.444 -.778	1851. 1755. 1659.	721. 744. 746.	3.58 3.58 3.58	-.222 -.556 -.889	1819. 1723. 1627.	709. 671. 634.	3.58 3.58 3.58
TRAMO	6	.000	1595.	671.	3.58	.500	1553.	605.	3.58	1.000	1511.	589.	3.58
TRAMO	7	.000	1511.	589.	3.58	.500	1502.	585.	3.58	1.000	1494.	582.	3.58
TRAMO	8	.000 .750	1494. 1219.	582. 475.	3.58 3.58	-.250 1.000	1402. 1128.	544. 439.	3.58 3.58	-.500	1311.	511.	3.58
TRAMO	9	.000	1128.	439.	3.58	.500	1134.	407.	3.58	1.000	1140.	404.	3.58
TRAMO	10	.000 .750	1140. 1411.	444. 550.	3.58 3.58	-.250 1.000	1211. 1501.	479. 585.	3.58 3.58	-.500	1321.	515.	3.58
TRAMO	11	.000	1501.	585.	3.58	.500	1460.	569.	3.58	1.000	1420.	553.	3.58
TRAMO	12	.000 .479 .857	1420. 1464. 1513.	553. 571. 589.	3.58 3.58 3.58	-.143 -.571 1.000	1435. 1482. 1529.	559. 577. 596.	3.58 3.58 3.58	-.286 -.714	1451. 1497.	566. 583.	3.58 3.58
TRAMO	13	.000	1529.	596.	3.58	.500	1507.	587.	3.58	1.000	1486.	579.	3.58
TRAMO	14	.000	1486.	579.	3.58	.500	1497.	583.	3.58	1.000	1507.	587.	3.58
TRAMO	15	.000 .333 .667 1.000	1507. 1435. 1342. 1289.	587. 559. 531. 502.	3.58 3.58 3.58 3.58	.111 -.444 -.778	1463. 1410. 1337.	578. 549. 521.	3.58 3.58 3.58	-.222 -.556 -.889	1459. 1386. 1313.	568. 540. 512.	3.58 3.58 3.58
TRAMO	16	.000	1289.	502.	3.58	.500	1286.	501.	3.58	1.000	1284.	500.	3.58
TRAMO	17	.000	1286.	500.	3.58	.500	1244.	492.	3.58	1.000	1243.	484.	3.58
TRAMO	18	.000 .429 .857	1243. 1274. 1309.	484. 497. 514.	3.58 3.58 3.58	-.143 -.571 1.000	1254. 1287. 1320.	489. 501. 514.	3.58 3.58 3.58	-.286 -.714	1265. 1298.	483. 504.	3.58 3.58

		.500	2293.	304.	3.58	.607	2280.	301.	3.58	.286	1230.	479.	3.58
		1.000	2267.	494.	3.58					.714	1175.	458.	3.58
	TRAMO 20	.000	2267.	494.	3.58	.143	2240.	486.	3.58				
		.429	2212.	472.	3.58	.571	2187.	465.	3.58				
		.857	2156.	451.	3.58	1.000	2138.	443.	3.58				
	TRAMO 21	.000	2156.	443.	3.58	.500	2161.	452.	3.58	1.000	2103.	461.	3.58
	TRAMO 22	.000	2183.	441.	3.58	.088	2171.	456.	3.58	.095	2159.	452.	3.58
		.143	2147.	442.	3.58	.190	2139.	442.	3.58	.238	2123.	450.	3.58
		.286	2111.	433.	3.58	.333	2099.	426.	3.58	.381	2087.	424.	3.58
		.429	2075.	419.	3.58	.476	2063.	410.	3.58	.524	2051.	409.	3.58
		.571	2039.	408.	3.58	.619	2027.	400.	3.58	.667	2015.	395.	3.58
		.714	2003.	391.	3.58	.762	1991.	386.	3.58	.810	1979.	381.	3.58
		.857	1967.	380.	3.58	.905	1969.	393.	3.08	.952	1966.	392.	3.01
		1.000	1999.	384.	2.97								
	TRAMO 23	.000	1999.	384.	2.97	.500	2004.	391.	2.94	1.000	2009.	393.	2.90
	TRAMO 24	.000	2009.	393.	2.90	.143	1998.	386.	2.87	.286	1973.	379.	2.84
		.429	1958.	372.	2.80	.571	1938.	366.	2.75	.714	1922.	389.	2.71
		.857	1907.	353.	2.65	1.000	1892.	348.	2.60				

→ VIAJE DE LA ONDA (202.72 KM)

→ VELOCIDAD EN BOMBAS = 5825 LC RPM
 *SALIDA BOMBAS EN OPERACION NORMALMENTE

GASTO POR BOMBA(S) = 3791.7 GPM ←

CIERRE DE VALVULA

TIEMPO = 01.60 SEG

	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	
	TRAMO 1	.000	2058.	802.	3.58	.200	2057.	801.	3.58	.400	2056.	801.	3.58
		.600	2058.	801.	3.58	.800	2054.	800.	3.58	1.000	2053.	800.	3.58
	TRAMO 2	.000	2053.	800.	3.58	.111	2043.	796.	3.58	.222	2033.	792.	3.58
		.333	2024.	786.	3.58	.444	2014.	785.	3.58	.556	2004.	781.	3.58
		.667	1994.	777.	3.58	.778	1984.	773.	3.58	.889	1974.	769.	3.58
		1.000	1965.	765.	3.58								
	TRAMO 3	.000	1965.	765.	3.58	.500	1984.	774.	3.58	1.000	1803.	703.	3.58
	TRAMO 4	.000	1803.	703.	3.58	.250	1823.	710.	3.58	.500	1843.	718.	3.58
		.750	1863.	726.	3.58	1.000	1883.	737.	3.58				
	TRAMO 5	.000	1883.	733.	3.58	.111	1851.	721.	3.58	.222	1819.	709.	3.58
		.333	1787.	694.	3.58	.444	1751.	684.	3.58	.556	1723.	671.	3.58
		.667	1691.	659.	3.58	.778	1659.	644.	3.58	.889	1627.	630.	3.58
		1.000	1595.	621.	3.58								
	TRAMO 6	.000	1595.	621.	3.58	.500	1557.	605.	3.58	1.000	1511.	589.	3.58
	TRAMO 7	.000	1511.	589.	3.58	.500	1502.	545.	3.58	1.000	1494.	582.	3.58

TRAMO	8	.000	2404.	582.	3.58	.250	1427.	546.	3.58	.500	1311.	571.	1.58
		.750	1219.	475.	3.58	1.000	1178.	430.	3.58				
TRAMO	9	.000	1128.	434.	3.58	.500	1138.	442.	3.58	1.000	1140.	444.	1.58
TRAMO	10	.000	1140.	444.	3.58	.250	1231.	479.	3.58	.500	1321.	513.	1.58
		.750	1411.	550.	3.58	1.000	1501.	585.	3.58				
TRAMO	11	.000	1501.	585.	3.58	.500	1441.	569.	3.58	1.000	1420.	583.	1.58
TRAMO	12	.000	1420.	553.	3.58	.143	1435.	559.	3.58	.286	1451.	566.	3.58
		.429	1464.	571.	3.58	.571	1487.	577.	3.58	.714	1497.	583.	1.58
		.857	1513.	589.	3.58	1.000	1529.	596.	3.58				
TRAMO	13	.000	1529.	596.	3.58	.500	1507.	587.	3.58	1.000	1484.	579.	1.58
TRAMO	14	.000	1484.	574.	3.58	.500	1497.	583.	3.58	1.000	1507.	587.	1.58
TRAMO	15	.000	1507.	587.	3.58	.111	1483.	578.	3.58	.222	1459.	566.	1.58
		.333	1434.	559.	3.58	.444	1410.	549.	3.58	.556	1386.	540.	1.58
		.667	1362.	530.	3.58	.778	1337.	521.	3.58	.889	1313.	511.	1.58
		1.000	1289.	502.	3.58								
TRAMO	16	.000	1289.	502.	3.58	.500	1296.	501.	3.58	1.000	1294.	500.	1.58
TRAMO	17	.000	1294.	500.	3.58	.500	1264.	492.	3.58	1.000	1241.	484.	1.58
TRAMO	18	.000	1241.	484.	3.58	.143	1254.	489.	3.58	.286	1265.	493.	1.58
		.429	1274.	497.	3.58	.571	1287.	501.	3.58	.714	1296.	506.	1.58
		.857	1309.	510.	3.58	1.000	1320.	514.	3.58				
TRAMO	19	.000	1320.	514.	3.58	.147	1311.	511.	3.58	.333	1302.	507.	3.58
		.500	1293.	504.	3.58	.667	1265.	501.	3.58	.833	1276.	497.	1.58
		1.000	1241.	499.	3.58								
TRAMO	20	.000	1241.	494.	3.58	.143	1249.	486.	3.58	.286	1230.	479.	1.58
		.429	1212.	472.	3.58	.571	1195.	465.	3.58	.714	1175.	458.	1.58
		.857	1156.	451.	1.58	1.000	1139.	443.	3.58				
TRAMO	21	.000	1139.	443.	3.58	.500	1161.	452.	3.58	1.000	1183.	461.	1.58
TRAMO	22	.000	1183.	461.	3.58	.048	1171.	456.	3.58	.096	1159.	452.	1.58
		.143	1147.	447.	3.58	.100	1155.	447.	3.58	.238	1148.	447.	1.58
		.286	1111.	449.	3.58	.333	1147.	447.	3.58	.581	1139.	444.	1.58
		.429	1131.	441.	3.58	.476	1127.	437.	3.58	.624	1115.	434.	1.58
		.571	1107.	431.	1.02	.619	1090.	426.	2.99	.667	1092.	426.	1.58
		.714	1084.	423.	2.92	.762	1080.	421.	2.98	.810	1074.	419.	1.58
		.857	1069.	417.	2.79	.905	1066.	415.	2.73	.952	1062.	414.	1.58
		1.000	1040.	411.	2.60								
TRAMO	23	.000	1040.	411.	2.60	.500	1075.	416.	2.60	1.000	1088.	424.	1.58

ONDA DE
ADRESION
(130.31 K/Mg)

TRAMO	24	.000	1088.	424.	2.38	.193	1081.	421.	2.28	-256	1077.	420.	2.18
		.429	1078.	420.	1.91	.571	1087.	421.	1.85	-724	1109.	432.	1.26
		.857	1213.	473.	-14	1.000	1213.	471.	1.00	<i>CLEARRE TOTAL</i>			

VELOCIDAD EN BOMBAS = 5825.0 RPM
 OLAS BOMBAS OPERANDO NORMALMENTE

GASTO POR BOMBAS = 3791.7 GPM

TIEMPO =		62.39 SEG											
	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	V (FT/SEG)	
TRAMO	1	.000	2059.	802.	3.58	.200	2057.	801.	3.58	.400	2056.	801.	3.58
		.800	2055.	802.	3.58	.800	2054.	800.	3.58	1.000	2053.	800.	3.58
TRAMO	2	.000	2053.	800.	3.58	.311	2047.	796.	3.58	.222	2033.	792.	3.58
		.333	2029.	788.	3.58	.444	2019.	785.	3.58	.556	2004.	781.	3.58
		.667	1994.	777.	3.58	.778	1964.	773.	3.58	.889	1974.	769.	3.58
		1.000	1964.	769.	3.58								
TRAMO	3	.000	1964.	765.	3.58	.500	1884.	734.	3.58	1.000	1403.	703.	3.58
TRAMO	4	.000	1803.	703.	3.58	.250	1822.	710.	3.58	.500	1843.	718.	3.58
		.750	1863.	726.	3.58	1.000	1883.	733.	3.58				
TRAMO	5	.000	1883.	733.	3.58	.111	1851.	721.	3.58	.222	1819.	707.	3.58
		.333	1787.	694.	3.58	.444	1755.	684.	3.58	.556	1723.	671.	3.58
		.667	1691.	659.	3.58	.778	1659.	646.	3.58	.889	1627.	634.	3.58
		1.000	1595.	621.	3.58								
TRAMO	6	.000	1595.	621.	3.58	.500	1553.	605.	3.58	1.000	1511.	589.	3.58
TRAMO	7	.000	1511.	589.	3.58	.500	1502.	585.	3.58	1.000	1494.	582.	3.58
TRAMO	8	.000	1494.	582.	3.58	.250	1402.	546.	3.58	.500	1311.	511.	3.58
		.750	1219.	473.	3.58	1.000	1129.	439.	3.58				
TRAMO	9	.000	1129.	439.	3.58	.500	1134.	442.	3.58	1.000	1140.	444.	3.58
TRAMO	10	.000	1140.	444.	3.58	.250	1231.	479.	3.58	.500	1321.	515.	3.58
		.750	1411.	550.	3.58	1.000	1501.	585.	3.58				
TRAMO	11	.000	1501.	585.	3.58	.500	1461.	569.	3.58	1.000	1420.	553.	3.58
TRAMO	12	.000	1420.	553.	3.58	.193	1475.	559.	3.58	.286	1451.	545.	3.58
		.429	1466.	571.	3.58	.571	1482.	577.	3.58	.714	1497.	583.	3.58
		.857	1513.	584.	3.58	1.000	1529.	594.	3.58				
TRAMO	13	.000	1529.	594.	3.58	.500	1507.	587.	3.58	1.000	1486.	579.	3.58
TRAMO	14	.000	1486.	579.	3.58	.500	1497.	583.	3.58	1.000	1507.	587.	3.58

BRANCO	13	.000	2507.	981.	3.58	.111	1403.	578.	3.48	.222	1459.	568.	3.58
		.333	2434.	984.	3.58	.484	1410.	549.	3.98	.556	1386.	546.	3.48
		.667	2367.	930.	3.58	.778	1377.	521.	3.58	.889	1213.	512.	3.58
		1.000	2289.	902.	3.58								
BRANCO	14	.000	2289.	902.	3.58	.500	1266.	903.	3.58	1.000	1284.	900.	3.58
BRANCO	17	.000	1284.	900.	3.58	.500	1266.	902.	3.58	1.000	1293.	889.	3.58
BRANCO	18	.000	1293.	884.	3.58	.143	1254.	880.	3.58	.786	1265.	893.	3.58
		.429	1274.	897.	3.58	.371	1267.	801.	3.58	.784	1298.	908.	3.58
		.857	1309.	930.	3.58	1.000	1320.	934.	3.58				
BRANCO	19	.000	1320.	934.	3.58	.167	1311.	911.	3.58	.333	1302.	907.	3.58
		.500	1293.	904.	3.58	.667	1285.	901.	3.58	.833	1276.	897.	3.58
		1.000	1257.	894.	3.58								
BRANCO	20	.000	1267.	894.	3.58	.183	1257.	890.	3.58	.286	1251.	887.	3.58
		.429	1247.	884.	3.70	.571	1229.	879.	3.74	.784	1218.	873.	3.23
		.857	1200.	867.	3.71	1.000	1185.	867.	3.18				
BRANCO	21	.000	1185.	862.	3.18	.500	1211.	872.	3.16	1.000	1239.	883.	3.13
BRANCO	22	.000	1239.	883.	3.13	.048	1231.	880.	3.10	.095	1223.	877.	3.07
		.143	1216.	874.	3.04	.190	1209.	871.	3.00	.238	1203.	869.	2.96
		.286	1197.	867.	2.92	.333	1193.	865.	2.87	.381	1189.	863.	2.81
		.429	1184.	863.	2.79	.476	1185.	862.	2.86	.524	1185.	862.	2.57
		.571	1180.	863.	2.45	.619	1194.	865.	2.70	.667	1206.	870.	2.11
		.714	1228.	878.	1.83	.762	1299.	906.	1.10	.810	1337.	921.	1.68
		.857	1348.	925.	.52	.905	1348.	925.	.45	.952	1346.	925.	1.40
		1.000	1343.	923.	.36								
BRANCO	23	.000	1343.	923.	1.36	.500	1353.	927.	1.32	1.000	1363.	931.	1.28
BRANCO	24	.000	1363.	931.	1.28	.143	1349.	926.	1.24	.286	1338.	920.	1.20
		.429	1321.	915.	1.16	.571	1304.	909.	1.12	.714	1293.	904.	1.08
		.857	1278.	898.	1.04	1.000	1265.	893.	1.00				

km 156.63 ONDA

AUMENTO DE PRESION

VELOCIDAD EN BOMBAS = 5825.0 RPM
 CLASE BOMBAS OPERARI NORMAL RHTC

GASTO POR BOMBAS = 379.7 GPM

TIEMPO =	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)		X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)		X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)		
			(FT/SEG)	(FT/SEG)			(FT/SEG)	(FT/SEG)					
BRANCO	1	.000	2058.	802.	3.58	.200	2057.	801.	3.58	.400	2054.	801.	3.58
		.600	2055.	801.	3.58	.800	2054.	800.	3.58	1.000	2053.	800.	3.58
BRANCO	2	.000	2053.	800.	3.58	.111	2043.	796.	3.58	.222	2033.	792.	3.58
		.333	2024.	786.	3.58	.444	2014.	785.	3.58	.556	2004.	781.	3.58
		.667	1994.	777.	3.58	.778	1984.	773.	3.58	.889	1974.	769.	3.58
		1.000	1964.	765.	3.58								

TRAMO	14	.000	1769.	689.	2.07	.500	1789.	697.	2.04	1.000	1809.	705.	2.00
		.333	1809.	702.	2.00	.115	1792.	698.	1.97	.222	1775.	692.	1.98
		.667	1759.	685.	1.91	.444	1742.	679.	1.88	.556	1725.	672.	1.86
		1.000	1709.	666.	1.83	.778	1692.	659.	1.80	.889	1676.	653.	1.77
			1660.	647.	1.74								
TRAMO	16	.000	1660.	647.	1.74	.500	1667.	650.	1.70	1.000	1675.	653.	1.66
TRAMO	17	.000	1675.	653.	1.66	.500	1684.	646.	1.63	1.000	1652.	644.	1.60
TRAMO	18	.000	1652.	644.	1.60	.143	1672.	651.	1.57	.286	1691.	659.	1.54
		.429	1711.	666.	1.51	.571	1730.	674.	1.48	.714	1749.	682.	1.46
		.857	1769.	689.	1.42	1.000	1789.	697.	1.39				
TRAMO	19	.000	1789.	697.	1.39	.167	1789.	697.	1.35	.333	1790.	697.	1.32
		.500	1791.	698.	1.28	.667	1792.	698.	1.25	.833	1793.	699.	1.22
		1.000	1794.	699.	1.18								
TRAMO	20	.000	1794.	699.	1.18	.143	1784.	695.	1.15	.286	1775.	692.	1.12
		.429	1765.	688.	1.09	.571	1756.	684.	1.06	.714	1747.	680.	1.03
		.857	1737.	677.	1.00	1.000	1728.	673.	.97				
TRAMO	21	.000	1728.	673.	.97	.500	1762.	686.	.93	1.000	1795.	699.	.90
TRAMO	22	.000	1795.	699.	.90	.048	1792.	698.	.87	.095	1789.	697.	.84
		.143	1786.	696.	.81	.190	1783.	695.	.78	.238	1780.	693.	.75
		.286	1777.	692.	.72	.333	1774.	691.	.69	.381	1771.	690.	.66
		.429	1768.	689.	.63	.476	1765.	688.	.60	.529	1762.	686.	.57
		.571	1759.	685.	.54	.619	1756.	684.	.52	.667	1753.	683.	.49
		.714	1750.	682.	.46	.762	1747.	681.	.43	.810	1744.	679.	.40
		.857	1741.	678.	.37	.905	1738.	677.	.34	.952	1735.	676.	.31
		1.000	1732.	675.	.28								
TRAMO	23	.000	1732.	675.	.28	.500	1742.	679.	.25	1.000	1752.	683.	.21
TRAMO	24	.000	1752.	683.	.21	.143	1738.	677.	.18	.286	1724.	672.	.15
		.429	1710.	666.	.12	.571	1696.	661.	.09	.714	1682.	655.	.06
		.857	1668.	650.	.03	1.000	1654.	644.	.00				

VELOCIDAD EN BOMBAS = 5825.0 RPM
 *LASER BOMBAS OPERAN NORMALMENTE

GASTO POR BOMBAS = 3791.7 GPM

TIEMPO = 249.50 SEG	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSII) (FT/SEG)		X	CABEZA (FT)	PRESION (PSII) (FT/SEG)		X	CABEZA (FT)	PRESION (PSII) (FT/SEG)		
			V	V			V	V					
FRENTE DE ONDA EN LA ESTACION (Km D.O)													
TRAMO	1	.000	2113.	823.	1.34	.400	2117.	823.	3.32	.400	2114.	824.	3.28
		.600	2116.	824.	1.24	.400	2117.	825.	3.20	1.000	2119.	825.	3.17
TRAMO	2	.000	2114.	823.	1.17	.111	2111.	823.	3.14	.222	2104.	820.	3.11

		1.000	1834.	715.	1.14								
TRAMO	20	.000	1834.	715.	1.14	.183	1025.	711.	1.01	.286	1815.	707.	1.08
		.429	1828.	704.	1.05	.571	1798.	700.	1.02	.719	1787.	696.	.99
		.857	1778.	693.	.96	1.000	1768.	689.	.93				
TRAMO	21	.000	1768.	689.	.93	.500	1802.	702.	.90	1.000	1836.	715.	.86
TRAMO	22	.000	1836.	715.	.86	.094	1833.	718.	.83	.045	1830.	713.	.80
		.183	1828.	712.	.78	.190	1823.	710.	.75	.238	1820.	709.	.72
		.286	1817.	708.	.69	.333	1814.	707.	.66	.381	1811.	704.	.63
		.429	1808.	705.	.61	.476	1805.	703.	.58	.529	1802.	702.	.55
		.571	1799.	701.	.52	.619	1794.	700.	.49	.667	1794.	699.	.47
		.714	1791.	698.	.44	.762	1788.	697.	.41	.810	1785.	695.	.38
		.857	1782.	694.	.35	.905	1779.	693.	.32	.952	1776.	692.	.30
		1.000	1773.	691.	.27								
TRAMO	23	.000	1773.	691.	.27	.500	1783.	695.	.24	1.000	1793.	699.	.20
TRAMO	24	.000	1793.	699.	.20	.183	1779.	693.	.17	.286	1765.	688.	.15
		.429	1751.	682.	.12	.571	1737.	677.	.09	.719	1723.	671.	.08
		.857	1709.	668.	.05	1.000	1695.	660.	.00				

AUMENTO DE PRESION

VELOCIDAD EN BOMBAS = 5825 D RPM GASTO POR BOMBAS = 3530.4 GPM
 *LAISE BOMBAS ELEVARON LA PRESION A LA DESCARBA

TIEMPO =		X	CABEZA (FT)	PRESION (PSII) (FT/SEG)	Y	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSII) (FT/SEG)	Y	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSII) (FT/SEG)	Y
270.38 SEG													
TRAMO	1	.000	2143.	835.	3.19	.200	2182.	835.	3.20	.400	2144.	835.	3.19
		.600	2146.	836.	3.17	.800	2148.	837.	3.15	1.000	2150.	838.	3.14
TRAMO	2	.000	2150.	838.	3.14	.111	2183.	835.	3.12	.222	2136.	832.	3.10
		.333	2129.	830.	3.08	.444	2123.	827.	3.06	.554	2116.	824.	3.04
		.667	2109.	822.	3.02	.778	2102.	819.	2.99	.889	2096.	816.	2.96
		1.000	2089.	814.	2.94								
TRAMO	3	.000	2089.	814.	2.94	.500	2013.	784.	2.91	1.000	1933.	753.	2.88
TRAMO	4	.000	1933.	753.	2.88	.250	1957.	762.	2.86	.500	1980.	771.	2.83
		.750	2004.	783.	2.80	1.000	2020.	790.	2.78				
TRAMO	5	.000	2020.	790.	2.78	.111	2000.	779.	2.76	.222	1972.	768.	2.73
		.333	1994.	756.	2.71	.444	1918.	747.	2.68	.554	1889.	734.	2.65
		.667	1861.	723.	2.63	.778	1834.	715.	2.61	.889	1807.	704.	2.59
		1.000	1781.	694.	2.57								
TRAMO	6	.000	1781.	694.	2.57	.500	1744.	680.	2.54	1.000	1711.	667.	2.51
TRAMO	7	.000	1711.	667.	2.51	.500	1709.	664.	2.49	1.000	1706.	665.	2.46
TRAMO	8	.000	1706.	665.	2.46	.250	1621.	632.	2.44	.500	1536.	598.	2.41

EL DISPARO

TIEMPO = 353.57 SEC		X	CABEZA (FT)	PRECISION (PSII)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRECISION (PSII)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRECISION (PSII)	V (FT/SEG)
1	TRAMO	.000 .800	1942. 2146.	757. 836.	.37 2.05	.200 .800	2022. 2202.	788. 856.	1.04 2.51	.400 1.000	2089. 2233.	814. 870.	1.59 2.75
2	TRAMO	.000 .333 .667 1.000	2233. 2218. 2204. 2190.	870. 864. 858. 853.	2.75 2.70 2.66 2.61	.111 .444 .778	2228. 2213. 2199.	868. 862. 857.	2.73 2.69 2.64	.222 .556 .889	2223. 2209. 2195.	866. 860. 855.	2.72 2.67 2.62
3	TRAMO	.000	2190.	853.	2.61	.500	2115.	824.	2.49	1.000	2039.	794.	2.58
4	TRAMO	.000 .750	2039. 2115.	794. 824.	2.58 2.52	.250 1.000	2064. 2141.	804. 834.	2.56 2.50	.500	2090.	814.	2.54
5	TRAMO	.000 .333 .667 1.000	2141. 2062. 1983. 1905.	834. 803. 773. 742.	2.50 2.45 2.39 2.33	.111 .444 .778	2114. 2035. 1957.	824. 793. 762.	2.48 2.43 2.37	.222 .556 .889	2088. 2009. 1931.	814. 783. 752.	2.47 2.41 2.35
6	TRAMO	.000	1905.	742.	2.33	.500	1871.	729.	2.31	1.000	1838.	716.	2.28
7	TRAMO	.000	1838.	716.	2.28	.500	1836.	715.	2.26	1.000	1834.	715.	2.23
8	TRAMO	.000 .750	1834. 1581.	715. 616.	2.23 2.17	.250 1.000	1750. 1497.	682. 583.	2.21 2.14	.500	1665.	649.	2.19
9	TRAMO	.000	1497.	583.	2.14	.500	1510.	588.	2.12	1.000	1523.	594.	2.10
10	TRAMO	.000 .750	1523. 1816.	594. 707.	2.10 2.03	.250 1.000	1621. 1913.	631. 745.	2.07 2.00	.500	1718.	669.	2.05
11	TRAMO	.000	1913.	745.	2.00	.500	1881.	733.	1.97	1.000	1849.	720.	1.95
12	TRAMO	.000 .429 .857	1849. 1916. 1985.	720. 747. 773.	1.95 1.88 1.81	.193 .573 1.000	1871. 1939. 2008.	729. 755. 782.	1.92 1.86 1.79	.286 .714	1894. 1962.	738. 766.	1.90 1.83
13	TRAMO	.000	2008.	782.	1.79	.500	1994.	777.	1.76	1.000	1981.	772.	1.73
14	TRAMO	.000	1981.	772.	1.73	.500	2002.	780.	1.70	1.000	2022.	788.	1.67
15	TRAMO	.000 .333 .667 1.000	2022. 1973. 1924. 1876.	788. 769. 750. 733.	1.67 1.59 1.51 1.42	.111 .444 .778	2006. 1957. 1908.	782. 762. 743.	1.64 1.56 1.48	.222 .556 .889	1990. 1941. 1892.	775. 766. 737.	1.62 1.54 1.46
16	TRAMO	.000	1876.	733.	1.42	.500	1884.	734.	1.39	1.000	1892.	737.	1.35

TRAMO	17	.000	1892.	731.	1.35	.500	1881.	733.	1.32	1.000	1870.	728.	1.29
		.429	1920.	751.	1.30	.571	1869.	736.	1.27	.286	1909.	749.	1.24
		.857	1988.	774.	1.14	1.000	2008.	782.	1.21	.714	1968.	767.	1.16
TRAMO	19	.000	2008.	782.	1.11	.167	2009.	783.	1.09	.333	2010.	783.	1.06
		.500	2011.	784.	1.03	.667	2012.	784.	1.00	.833	2014.	785.	1.08
		1.000	2015.	785.	.99								
TRAMO	20	.000	2015.	785.	.95	.143	2006.	781.	.93	.286	1994.	778.	.90
		.429	1987.	774.	.88	.571	1978.	770.	.85	.714	1968.	767.	.83
		.857	1959.	743.	.80	1.000	1950.	760.	.78				
TRAMO	21	.000	1950.	760.	.78	.500	1980.	773.	.75	1.000	2018.	786.	.72
TRAMO	22	.000	2018.	786.	.72	.048	2014.	785.	.70	.095	2011.	784.	.67
		.143	2008.	782.	.65	.190	2005.	781.	.62	.238	2002.	780.	.60
		.286	1999.	779.	.58	.333	1998.	778.	.55	.381	1993.	777.	.53
		.429	1990.	775.	.51	.476	1987.	774.	.48	.524	1984.	773.	.46
		.571	1981.	772.	.44	.619	1978.	772.	.41	.667	1975.	770.	.39
		.714	1972.	768.	.37	.762	1969.	767.	.34	.810	1966.	766.	.32
		.857	1964.	765.	.29	.905	1961.	764.	.27	.952	1958.	763.	.25
		1.000	1955.	762.	.22								
TRAMO	23	.000	1955.	762.	.22	.500	1965.	765.	.20	1.000	1975.	769.	.17
TRAMO	24	.000	1975.	769.	.17	.143	1961.	764.	.15	.286	1946.	758.	.12
		.429	1932.	753.	.10	.571	1918.	747.	.07	.714	1904.	742.	.05
		.857	1890.	738.	.02	1.000	1876.	731.	.00				

VELOCIDAD EN BOMBAS = 5199.5 RPM
 *LA(S) BOMBA(S) ELEVACION A LA PRESION A LA DESCARGA
 GASTO POR BOMBAS = 196.0 GPM

TIEMPO =		X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)
	TRAMO	1	.000	1896.	734.	.00	.200	1904.	742.	.00	.400	1913.	745.
			.600	1922.	744.	.01	.800	1930.	752.	.01	1.000	1939.	755.
	TRAMO	2	.000	1939.	755.	.01	.111	1939.	755.	.01	.222	1939.	755.
			.333	1939.	756.	.02	.444	1939.	756.	.02	.556	1941.	756.
			.667	1948.	759.	.10	.778	1974.	769.	.34	.889	2020.	790.
			1.000	2087.	813.	1.38							
	TRAMO	3	.000	2087.	813.	1.38	.500	2058.	807.	1.19	1.000	2022.	788.
	TRAMO	4	.000	2022.	788.	2.12	.250	2077.	809.	2.17	.500	2113.	823.
			.750	2139.	831.	2.43	1.000	2165.	843.	2.42			
	TRAMO	5	.000	2165.	843.	2.42	.111	2119.	815.	2.40	.222	2112.	823.
			.333	2080.	813.	2.26	.444	2063.	803.	2.15	.556	2039.	793.

		.429	2023.	788.	.49	.478	2020.	787.	.47	.524	2017.	786.	.45
		.571	2014.	785.	.42	.619	2011.	784.	.40	.647	2008.	782.	.38
		.714	2005.	781.	.35	.762	2002.	780.	.31	.810	1999.	779.	.31
		.857	1996.	778.	.29	.905	1993.	777.	.26	.952	1991.	776.	.24
		1.000	1988.	774.	.22								
TRAMO	23	.000	1988.	774.	.22	.500	1997.	778.	.39	1.000	2007.	782.	.16
TRAMO	24	.000	2007.	782.	.16	.143	1993.	777.	.34	.286	1979.	771.	.22
		.429	1945.	760.	.09	.571	1951.	760.	.07	.714	1937.	755.	.05
		.857	1923.	749.	.02	1.000	1909.	744.	.00				

PARO DE BOMBA

TIEMPO = 395.17 SEG		X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	V (FT/SEG)
TRAMO	1	.000	1895.	738.	.00	.200	1904.	742.	.00	.400	1912.	745.	.00
		.600	1921.	748.	.00	.800	1930.	752.	.00	1.000	1938.	755.	.01
TRAMO	2	.000	1938.	758.	-.01	.111	1938.	755.	-.01	.222	1938.	755.	-.01
		.333	1938.	758.	-.01	.444	1939.	755.	-.01	.556	1939.	755.	-.01
		.667	1939.	759.	-.01	.778	1939.	755.	-.01	.889	1939.	756.	-.01
		1.000	1940.	768.	-.02								
TRAMO	3	.000	1940.	754.	-.02	.500	1868.	728.	-.02	1.000	1797.	700.	-.02
TRAMO	4	.000	1797.	700.	-.02	.250	1827.	712.	-.02	.500	1857.	724.	-.02
		.750	1887.	739.	-.02	1.000	1918.	747.	-.02				
TRAMO	5	.000	1918.	747.	-.02	.111	1896.	739.	-.02	.222	1876.	731.	.00
		.333	1861.	724.	.06	.444	1856.	723.	.22	.556	1870.	728.	.55
		.667	1897.	734.	1.00	.778	1920.	748.	1.42	.889	1932.	753.	1.74
		1.000	1935.	754.	1.98								
TRAMO	6	.000	1935.	754.	1.98	.500	1920.	748.	2.12	1.000	1890.	737.	2.13
TRAMO	7	.000	1890.	737.	2.13	.500	1889.	736.	2.11	1.000	1888.	736.	2.09
TRAMO	8	.000	1888.	736.	2.09	.250	1804.	703.	2.07	.500	1720.	670.	2.05
		.750	1836.	638.	2.03	1.000	1952.	609.	2.00				
TRAMO	9	.000	1952.	609.	2.00	.500	1958.	610.	1.98	1.000	1980.	618.	1.94
TRAMO	10	.000	1980.	618.	1.94	.250	1878.	654.	1.94	.500	1776.	692.	1.92
		.750	1878.	730.	1.90	1.000	1972.	768.	1.88				
TRAMO	11	.000	1972.	768.	1.88	.500	1942.	756.	1.85	1.000	1908.	743.	1.83
TRAMO	12	.000	1908.	743.	1.83	.143	1911.	752.	1.81	.286	1954.	761.	1.79
		.429	1977.	777.	1.74	.571	2003.	774.	1.74	.714	2023.	788.	1.72
		.857	2146.	791.	1.70	1.000	2019.	804.	1.68				

TRAMO	13	.000	2059.	806.	1.68	.500	2056.	801.	1.66	1.000	2043.	796.	1.63
TRAMO	14	.000	2043.	796.	1.63	.500	2044.	804.	1.61	1.000	2045.	812.	1.58
TRAMO	15	.000	2085.	812.	1.58	.311	2049.	804.	1.55	.222	2053.	800.	1.53
		.333	2037.	794.	1.57	.444	2027.	788.	1.49	.556	2006.	789.	1.48
		.667	1990.	775.	1.44	.778	1974.	769.	1.42	.889	1958.	763.	1.39
		1.000	1943.	757.	1.37								
TRAMO	16	.000	1943.	757.	1.37	.500	1951.	760.	1.34	1.000	1960.	764.	1.31
TRAMO	17	.000	1960.	764.	1.31	.500	1999.	759.	1.29	1.000	1938.	755.	1.26
TRAMO	18	.000	1938.	755.	1.26	.143	1958.	763.	1.24	.286	1974.	771.	1.21
		.429	1998.	778.	1.19	.571	2017.	786.	1.16	.714	2037.	794.	1.14
		.857	2057.	801.	1.12	1.000	2077.	809.	1.09				
TRAMO	19	.000	2077.	809.	1.09	.167	2078.	810.	1.07	.333	2079.	810.	1.04
		.500	2080.	810.	1.01	.667	2081.	811.	.98	.833	2082.	811.	.96
		1.000	2083.	812.	.93								
TRAMO	20	.000	2083.	812.	.93	.143	2074.	808.	.90	.286	2064.	804.	.88
		.429	2054.	800.	.85	.571	2045.	797.	.83	.714	2035.	793.	.80
		.857	2026.	789.	.77	1.000	2016.	785.	.75				
TRAMO	21	.000	2016.	785.	.75	.500	2050.	799.	.72	1.000	2083.	812.	.69
TRAMO	22	.000	2083.	812.	.69	.048	2080.	810.	.66	.095	2077.	809.	.64
		.143	2073.	808.	.62	.190	2070.	807.	.59	.238	2067.	805.	.57
		.286	2064.	804.	.54	.333	2061.	803.	.52	.381	2058.	802.	.50
		.429	2055.	801.	.48	.476	2052.	799.	.45	.524	2049.	798.	.43
		.571	2046.	797.	.41	.619	2043.	796.	.39	.667	2040.	795.	.37
		.714	2037.	794.	.34	.762	2034.	792.	.32	.810	2031.	791.	.30
		.857	2028.	790.	.28	.905	2025.	789.	.26	.952	2022.	788.	.23
		1.000	2019.	787.	.21								
TRAMO	23	.000	2019.	787.	.21	.500	2029.	791.	.19	1.000	2039.	794.	.16
TRAMO	24	.000	2039.	794.	.16	.143	2025.	789.	.14	.286	2011.	784.	.11
		.429	1997.	778.	.09	.571	1983.	773.	.07	.714	1969.	767.	.05
		.857	1956.	762.	.02	1.000	1941.	756.	.00				

PAP0 DE BOMBA(S)

TIEMPO = 418.96 SEG

	X	CABEZA (FT)	PRECISION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRECISION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRECISION (PSI)	V (FT/SEG)	
TRAMO	1	.000	1899.	740.	.00	.200	1807.	743.	.00	.400	1818.	747.	.01
		.600	1925.	750.	-.01	.800	1933.	753.	-.02	1.000	1942.	757.	-.02
TRAMO	2	.000	1942.	757.	-.02	.133	1942.	757.	-.03	.222	1942.	757.	-.03

RETROCESO DE PLUNO.

		.333	1942	751.	-01	.500	1942	757.	-02	.500	1942	757.	-02
		.667	1942.	751.	-02	.778	1943.	757.	-05	.667	1943.	757.	-02
		1.000	1943.	751.	-05								
FRAND	1	.000	1943.	751.	-04	.500	1972.	729.	-04	1.000	1801.	702.	-07
		.000	1801.	702.	-07	.750	1831.	711.	-07	.500	1840.	725.	-07
		.750	1840.	725.	-08	1.000	1900.	748.	-08				
FRAND	5	.000	1920.	748.	-08	.111	1874.	740.	-08	.222	1874.	731.	-09
		.333	1854.	730.	-09	.444	1837.	719.	-10	.555	1810.	705.	-10
		.667	1788.	697.	-10	.778	1755.	688.	-11	.667	1745.	680.	-11
		1.000	1723.	671.	-11								
FRAND	6	.000	1723.	671.	-11	.500	1694.	660.	-12	1.000	1444.	649.	-12
FRAND	7	.000	1686.	644.	-12	.500	1670.	651.	-11	1.000	1475.	653.	-09
FRAND	8	.000	1678.	653.	-09	.750	1602.	624.	-08	.500	1537.	599.	-10
		.750	1582.	637.	-09	1.000	1438.	560.	-07				
FRAND	9	.000	1538.	560.	-07	.500	1495.	603.	1.04	1.000	1848.	603.	1.34
FRAND	10	.000	1548.	603.	1.34	.750	1673.	652.	1.59	.500	1769.	697.	1.73
		.750	1688.	734.	1.79	1.000	1990.	778.	1.81				
FRAND	11	.000	1990.	778.	1.81	.300	1967.	746.	1.79	1.000	1935.	754.	1.77
FRAND	12	.000	1935.	754.	1.77	.143	1958.	743.	1.75	.286	1901.	722.	1.73
		.429	2003.	788.	1.71	.571	2023.	790.	1.69	.714	2051.	799.	1.67
		.857	2074.	808.	1.68	1.000	2097.	817.	1.43				
FRAND	13	.000	2097.	817.	1.63	.300	2085.	812.	1.40	1.000	2072.	807.	1.58
FRAND	14	.000	2072.	807.	1.58	.500	2093.	814.	1.35	1.000	2118.	824.	1.53
FRAND	15	.000	2118.	824.	1.53	.111	2090.	816.	1.32	.222	2083.	811.	1.48
		.333	2047.	790.	1.44	.444	2031.	789.	1.26	.555	2036.	793.	1.42
		.667	2020.	787.	1.40	.778	2000.	781.	1.17	.667	1989.	775.	1.38
		1.000	1973.	769.	1.33								
FRAND	16	.000	1973.	769.	1.33	.300	1982.	772.	1.10	1.000	1990.	778.	1.27
FRAND	17	.000	1990.	778.	1.27	.500	1980.	771.	1.25	1.000	1949.	767.	1.22
FRAND	18	.000	1949.	767.	1.22	.143	1989.	775.	1.20	.286	2008.	783.	1.18
		.429	2024.	790.	1.16	.571	2047.	794.	1.13	.714	2084.	808.	1.12
		.857	2090.	814.	1.09	1.000	2128.	821.	1.26				
FRAND	19	.000	2108.	821.	1.26	.147	2177.	827.	1.04	.293	2110.	822.	1.01
		.441	2147.	831.	.94	.667	2113.	823.	.96	.893	2124.	826.	.99

		1.000	2115.	824.	.91								
	TRAMO 20	.000	2115.	824.	-.91	.143	2106.	822.	-.89	.244	2097.	817.	-.83
		.429	2087.	813.	-.84	.571	2078.	810.	-.82	.718	2069.	806.	-.80
		.857	2059.	802.	-.78	1.000	2053.	799.	-.75				
	TRAMO 21	.000	2050.	799.	-.75	.500	2089.	817.	-.72	1.000	2117.	825.	-.70
	TRAMO 22	.000	2117.	825.	-.70	.048	2118.	826.	-.67	.095	2111.	822.	-.65
		.143	2107.	821.	-.63	.190	2104.	820.	-.60	.238	2103.	819.	-.58
		.286	2098.	817.	-.54	.333	2094.	816.	-.53	.381	2091.	815.	-.51
		.429	2088.	813.	-.48	.474	2085.	812.	-.46	.524	2081.	811.	-.44
		.571	2078.	810.	-.41	.619	2075.	808.	-.39	.667	2072.	807.	-.38
		.714	2069.	806.	-.34	.762	2065.	805.	-.32	.810	2062.	804.	-.29
		.857	2059.	802.	-.27	.905	2056.	801.	-.25	.952	2053.	800.	-.23
		1.000	2050.	799.	-.21								
	TRAMO 23	.000	2050.	799.	-.21	.500	2060.	803.	-.18	1.000	2070.	807.	-.15
	TRAMO 24	.000	2070.	807.	-.15	.143	2056.	801.	-.13	.286	2042.	796.	-.11
		.429	2028.	790.	-.09	.571	2019.	785.	-.07	.714	2000.	778.	-.04
		.857	1988.	774.	-.02	1.000	1972.	768.	-.00				

PADO DE BOMBAS

		X	CABEZA (FT)	PRECISION (P51)	V (FT/SEG)	Y	CABEZA (FT)	PRECISION (P51)	V (FT/SEG)	Z	CABEZA (FT)	PRECISION (P51)	V (FT/SEG)
	TIEMPO =	1436.76	SEC										
	TRAMO 1	.000	1907.	743.	-.00	.200	1915.	746.	-.01	.400	1924.	750.	-.01
		.400	1932.	753.	-.02	.600	1941.	756.	-.03	1.000	1950.	760.	-.03
	TRAMO 2	.000	1950.	760.	-.03	.111	1909.	760.	-.04	.222	1944.	760.	-.05
		.333	1949.	760.	-.05	.444	1909.	760.	-.06	.556	1950.	760.	-.07
		.667	1950.	760.	-.07	.778	1950.	760.	-.08	.889	1950.	760.	-.09
		1.000	1950.	760.	-.10								
	TRAMO 3	.000	1950.	760.	-.10	.500	1879.	732.	-.10	1.000	1808.	704.	-.11
	TRAMO 4	.000	1808.	704.	-.11	.250	1821.	716.	-.12	.500	1847.	726.	-.12
		.750	1897.	734.	-.13	1.000	1927.	751.	-.13				
	TRAMO 5	.000	1927.	751.	-.13	.111	1905.	742.	-.14	.222	1893.	734.	-.15
		.333	1861.	725.	-.15	.444	1839.	714.	-.16	.556	1817.	708.	-.17
		.667	1795.	699.	-.17	.778	1773.	691.	-.16	.889	1751.	682.	-.18
		1.000	1729.	674.	-.19								
	TRAMO 6	.000	1729.	674.	-.19	.500	1700.	662.	-.20	1.000	1672.	651.	-.21
	TRAMO 7	.000	1672.	651.	-.21	.600	1675.	652.	-.21	1.000	1677.	654.	-.22
	TRAMO 8	.000	1677.	654.	-.22	.250	1597.	622.	-.23	.500	1536.	593.	-.23
		.750	1436.	554.	-.24	1.000	1354.	528.	-.24				

TRAMO	13	.000	2037.	794.	-.81	.500	2024.	784.	-.73	1.000	2016.	785.	-.84
TRAMO	14	.000	2016.	785.	-.84	.500	2009.	765.	-.86	1.000	2043.	804.	-.88
TRAMO	15	.000	2063.	804.	-.88	.111	2049.	798.	-.89	.222	2035.	793.	-.90
		.333	2021.	787.	-.92	.444	2007.	787.	-.93	.556	1993.	776.	-.94
		.667	1979.	771.	-.96	.778	1965.	766.	-.97	.889	1951.	760.	-.98
		1.000	1937.	755.	-1.00								
TRAMO	16	.000	1937.	755.	-1.00	.500	1948.	759.	-1.01	1.000	1959.	763.	-1.03
TRAMO	17	.000	1959.	763.	-1.03	.500	1953.	760.	-1.04	1.000	1941.	766.	-1.05
TRAMO	18	.000	1941.	766.	-1.05	.143	1967.	765.	-1.07	.286	1984.	773.	-1.08
		.429	2005.	781.	-1.09	.571	2027.	790.	-1.10	.714	2048.	798.	-1.11
		.857	2070.	806.	-1.12	1.000	2091.	815.	-1.14				
TRAMO	19	.000	2091.	815.	-1.14	.167	2094.	816.	-1.15	.333	2097.	817.	-1.16
		.500	2100.	818.	-1.17	.667	2103.	819.	-1.18	.833	2104.	820.	-1.20
		1.000	2109.	822.	-1.21								
TRAMO	20	.000	2109.	822.	-1.21	.143	2101.	818.	-1.22	.286	2093.	815.	-1.23
		.429	2085.	812.	-1.24	.571	2077.	809.	-1.25	.714	2068.	806.	-1.25
		.857	2059.	802.	-1.25	1.000	2044.	798.	-1.23				
TRAMO	21	.000	2044.	798.	-1.23	.500	2078.	810.	-1.19	1.000	2104.	820.	-1.12
TRAMO	22	.000	2104.	820.	-1.12	.048	2091.	815.	-1.03	.096	2076.	809.	-.91
		.193	2058.	802.	-.77	.190	2039.	799.	-.63	.238	2021.	787.	-.84
		.286	2004.	783.	-.37	.333	1993.	775.	-.26	.381	1978.	771.	-.18
		.429	1968.	767.	-.13	.476	1941.	744.	-.09	.524	1954.	741.	-.06
		.571	1949.	759.	-.04	.619	1945.	758.	-.03	.667	1941.	756.	-.02
		.714	1937.	755.	-.02	.762	1934.	754.	-.01	.810	1931.	752.	-.01
		.857	1928.	751.	-.01	.905	1924.	750.	-.01	.952	1921.	749.	-.01
		1.000	1918.	747.	-.01								
TRAMO	23	.000	1918.	747.	-.01	.500	1929.	751.	-.01	1.000	1937.	755.	-.01
TRAMO	24	.000	1937.	755.	-.01	.143	1923.	749.	-.01	.286	1909.	744.	.00
		.429	1896.	738.	.00	.571	1881.	733.	.00	.714	1867.	727.	.00
		.857	1853.	722.	.00	1.000	1839.	716.	.00				

PARO DE BOMBA IS

TIEMPO =	TRAMO	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESION (PSI)	V (FT/SEG)
123.95	1	.000	2049.	806.	.00	.200	2076.	809.	-.01	.400	2085.	812.	-.03
		.600	2093.	815.	-.04	.800	2102.	819.	-.04	1.000	2110.	822.	-.07
	2	.000	2110.	822.	-.07	.111	2110.	822.	-.09	.222	2110.	822.	-.11

		.333	2110.	822.	-.12	.444	2110.	822.	-.14	.556	2109.	822.	-.15
		.667	2109.	822.	-.17	.778	2109.	822.	-.18	.889	2109.	822.	-.20
		1.000	2109.	822.	-.22								
TRAMO	3	.000	2109.	822.	-.22	.500	2034.	794.	-.23	1.000	1966.	766.	-.25
TRAMO	4	.000	1966.	766.	-.25	.250	1966.	770.	-.26	.500	2026.	789.	-.28
		.750	2055.	803.	-.30	1.000	2085.	812.	-.31				
TRAMO	5	.000	2085.	812.	-.31	.111	2087.	804.	-.33	.222	2040.	795.	-.34
		.333	2018.	784.	-.36	.444	1995.	777.	-.38	.556	1973.	769.	-.39
		.667	1950.	760.	-.41	.778	1928.	751.	-.42	.889	1904.	742.	-.44
		1.000	1883.	734.	-.45								
TRAMO	6	.000	1883.	734.	-.45	.500	1850.	722.	-.47	1.000	1824.	711.	-.49
TRAMO	7	.000	1824.	711.	-.49	.500	1827.	712.	-.51	1.000	1829.	713.	-.53
TRAMO	8	.000	1829.	713.	-.53	.250	1798.	681.	-.54	.500	1666.	649.	-.54
		.750	1585.	618.	-.57	1.000	1504.	546.	-.59				
TRAMO	9	.000	1504.	586.	-.59	.500	1521.	592.	-.60	1.000	1537.	599.	-.62
TRAMO	10	.000	1537.	599.	-.62	.250	1638.	638.	-.63	.500	1738.	677.	-.65
		.750	1838.	716.	-.65	1.000	1938.	755.	-.68				
TRAMO	11	.000	1938.	755.	-.65	.500	1409.	744.	-.69	1.000	1880.	732.	-.71
TRAMO	12	.000	1880.	732.	-.71	.143	1405.	742.	-.72	.286	1930.	752.	-.74
		.429	1955.	762.	-.75	.571	1980.	771.	-.76	.714	2005.	781.	-.78
		.857	2030.	793.	-.79	1.000	2055.	801.	-.80				
TRAMO	13	.000	2055.	801.	-.80	.500	2045.	797.	-.82	1.000	2034.	792.	-.83
TRAMO	14	.000	2034.	792.	-.83	.500	2057.	802.	-.85	1.000	2081.	811.	-.87
TRAMO	15	.000	2081.	811.	-.87	.131	2067.	805.	-.88	.222	2053.	800.	-.89
		.333	2038.	794.	-.91	.444	2024.	789.	-.92	.556	2010.	783.	-.93
		.667	1996.	778.	-.95	.778	1982.	772.	-.96	.889	1968.	767.	-.97
		1.000	1954.	761.	-.98								
TRAMO	16	.000	1954.	761.	-.98	.500	1965.	765.	-1.00	1.000	1975.	770.	-1.02
TRAMO	17	.000	1975.	770.	-1.02	.500	1986.	766.	-1.03	1.000	1957.	763.	-1.04
TRAMO	18	.000	1957.	763.	-1.04	.143	1978.	771.	-1.05	.286	2000.	779.	-1.07
		.429	2021.	787.	-1.08	.571	2042.	796.	-1.09	.714	2063.	804.	-1.10
		.857	2064.	812.	-1.10	1.000	2104.	820.	-1.10				
TRAMO	19	.000	2104.	820.	-1.10	.147	2104.	820.	-1.09	.333	2102.	819.	-1.08
		.500	2097.	817.	-1.00	.447	2088.	814.	-.91	.667	2077.	809.	-.99

TRAMO	20	.000 .429 .857	2063 1993 1940	804 776 756	-.65 -.28 -.06	-.145 .573 1.000	2038 1913 1976	794 769 750	-.52 -.19 -.03	.284 .734	2018 1965	785 762	-.30 -.11
TRAMO	21	.000	1926	750	-.03	.500	1957	762	-.00	1.000	1988	775	.02
TRAMO	22	.000 .143 .286 .429 .571 .714 .857 1.000	1988 1977 1966 1957 1947 1937 1928 1918	775 770 766 762 758 755 751 747	.02 .03 .03 .02 .02 .02 .01 .01	.048 .190 .333 .476 .619 .762 .905	1984 1973 1963 1953 1944 1934 1925	773 769 765 761 757 754 750	.02 .03 .02 .02 .02 .02 .01	.045 .238 .381 .524 .667 .810 .952	1000 1970 1960 1950 1940 1931 1921	772 767 764 760 756 752 749	.03 .03 .02 .02 .02 .02 .01
TRAMO	23	.000	1918	747	.01	.500	1928	751	-.41	1.000	1938	755	.01
TRAMO	24	.000 .429 .857	1938 1895 1853	755 738 722	.01 .00 .00	.145 .571 1.000	1924 1881 1859	749 733 716	.01 .00 .00	.286 .734	1909 1867	744 727	.01 .00

PARO DE BOMBA 15:00

TIEMPO = 044.75 SEG		X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	Y (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	Y (FT/SEG)	X	CABEZA (FT)	PRESSION (PSI)	Y (FT/SEG)
TRAMO	1	.000 .400	2088 2114	814 824	-.00 -.05	.200 .600	2097 2122	817 827	-.52 -.86	.400 1.000	2105 2131	820 830	-.03 -.08
TRAMO	2	.000 .333 .667 1.000	2131 2131 2131 2131	830 830 830 830	-.06 -.13 -.16 -.23	.311 .644 .778	2131 2131 2131	830 830 830	-.10 -.14 -.19	.222 .556 .889	2131 2131 2131	830 830 830	-.11 -.14 -.21
TRAMO	3	.000	2131	830	-.23	.500	2059	802	-.24	1.000	1988	775	-.26
TRAMO	4	.000 .750	1988 2077	775 809	-.26 -.30	.250 1.000	2018 2104	786 821	-.27 -.32	.500	2047	798	-.29
TRAMO	5	.000 .333 .667 1.000	2106 2039 1971 1903	821 794 768 742	-.32 -.36 -.40 -.45	.111 .444 .778	2084 2016 1948	812 785 759	-.33 -.38 -.42	.222 .556 .889	2061 1993 1926	803 777 750	-.35 -.39 -.43
TRAMO	6	.000	1903	742	-.45	.500	1874	730	-.47	1.000	1844	719	-.48
TRAMO	7	.000	1844	719	-.48	.500	1844	719	-.50	1.000	1846	720	-.52
TRAMO	8	.000 .750	1848 1606	720 625	-.52 -.56	.250 1.000	1767 1523	688 593	-.53 -.58	.500	1686	657	-.55

2) CASO: FALLA DE BOMBAS

Si se corta la potencia del motor de las bombas súbitamente, ya sea accidental o deliberadamente, pueden desarrollarse problemas significativos por golpe de ariete. La caída de presión que se desarrolla a la descarga de las bombas, por la acción de la falla, se propaga corriente abajo a la velocidad de la onda de presión. La caída de presión puede guiarnos a una separación de columna y la consecuencia de un choque (de columnas separadas) pueden ser severas. Con esto, si el flujo inverso en el sistema, no se maneja apropiadamente, nos guiará a sobrepresiones significativas, generalmente en la vecindad de las bombas.

Si las bombas que fallan son la de una Estación intermedia, causarán aumentos de presión en el lado de la succión.

Las válvulas Check también pueden causar aumentos de presión, si ocurre un retroceso de flujo antes del cierre total. Válvulas más modernas están diseñadas de tal manera que cierren instantáneamente después de que ha cesado el flujo hacia adelante, hay otras que se cierran con un sistema piloto.

En ocasiones donde se presenten amplias generaciones de presión por esta causa, tendrán que ser analizadas más específicamente. Recientemente, apareció un modelo matemático* que puede evaluar el comportamiento dinámico de la válvula Check.

En nuestro sistema de análisis se estableció que la válvula cerrará instantáneamente cuando se presentara flujo inverso.

La secuencia de eventos se analizará con las gráficas que se hicieron para observar de una forma sencilla el fenómeno. En este caso se establece que -

* A Model For Check Valve / Feedwater System Waterhammer Analysis By M.J. Kirik and R.J. Gradle.

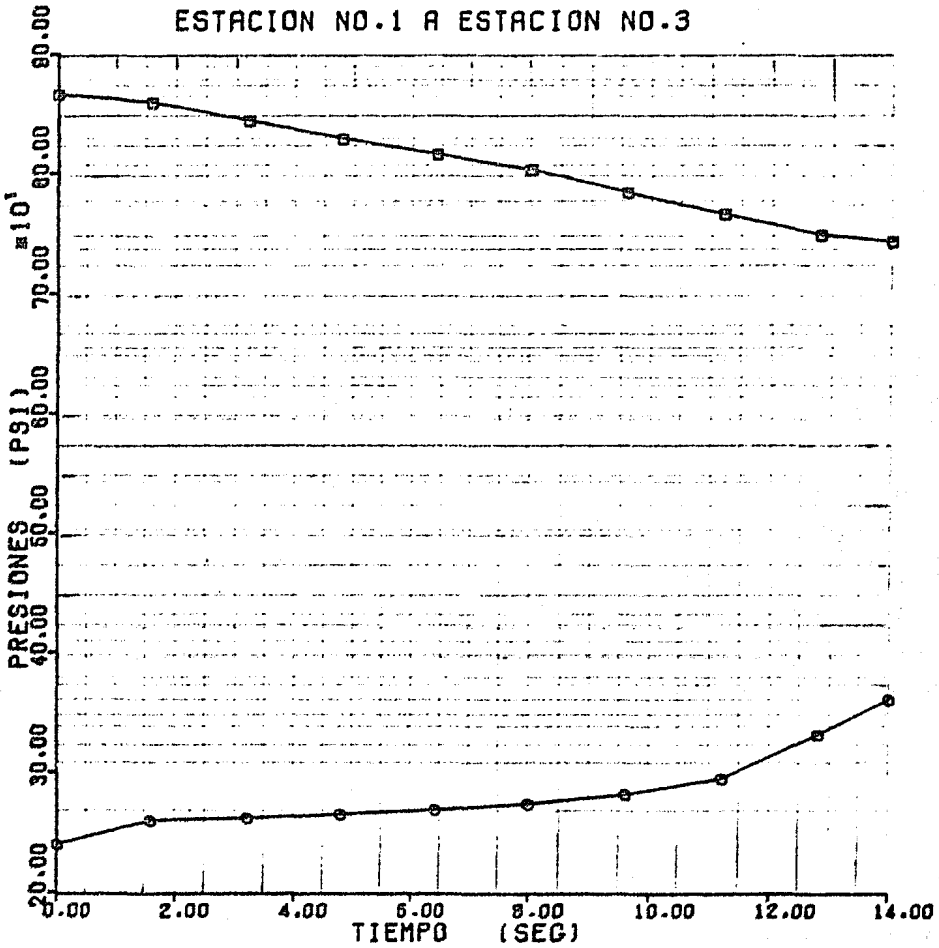
inmediatamente después de fijar las condiciones iniciales ($t = 0$ seg.) las bombas comienzan a fallar, haciendo que todas paren; pues el caso más crítico que se puede presentar en el sistema, ya que si éste no muestra problemas; los casos donde fallen menos bombas quedarán cubiertos.

De las gráficas podemos inferir que las bombas salen fuera de operación en 14 segundos, en la que la velocidad de rotación de las bombas disminuye lentamente desde los 5825 RPM hasta 5232 RPM en el tiempo de 11 seg. para posteriormente bajar drásticamente hasta los 14 seg. a cero (\emptyset RPM). Esto se debe a que la inercia se ve frenada por el fluido que circula a través del impulsor y que a los 11 seg., bajo esta velocidad, la bomba no puede proporcionar la cabeza de la columna de líquido que tiene la descarga y de esta manera, hace que pare rápidamente.

En las subsiguientes gráficas puede apreciarse cómo se desplaza la onda de presión en todo el sistema y de qué forma se comporta el mismo.

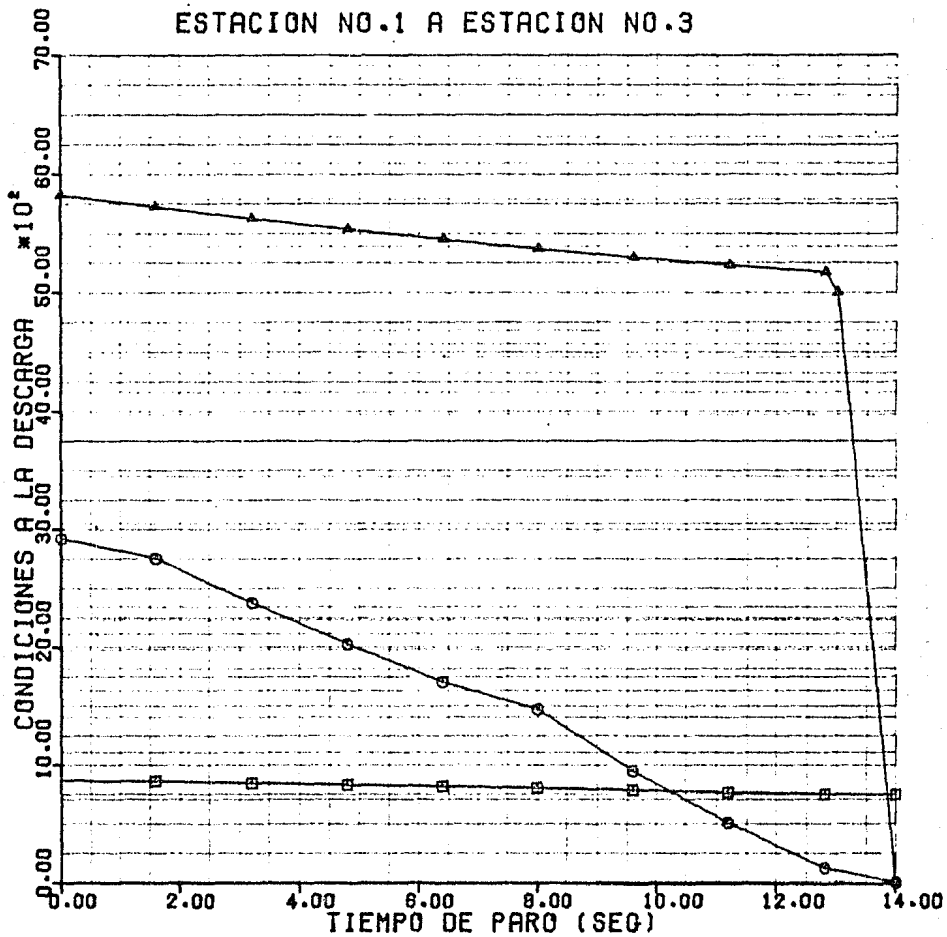
Del resumen obtenido se pudo observar que no se generaban altas presiones, más allá de las de operación, pero sí se alcanzaban presiones mucho menores, aunque no abajo de la presión de succión de la siguiente estación.

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO: FALLA DE BOMBAS
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



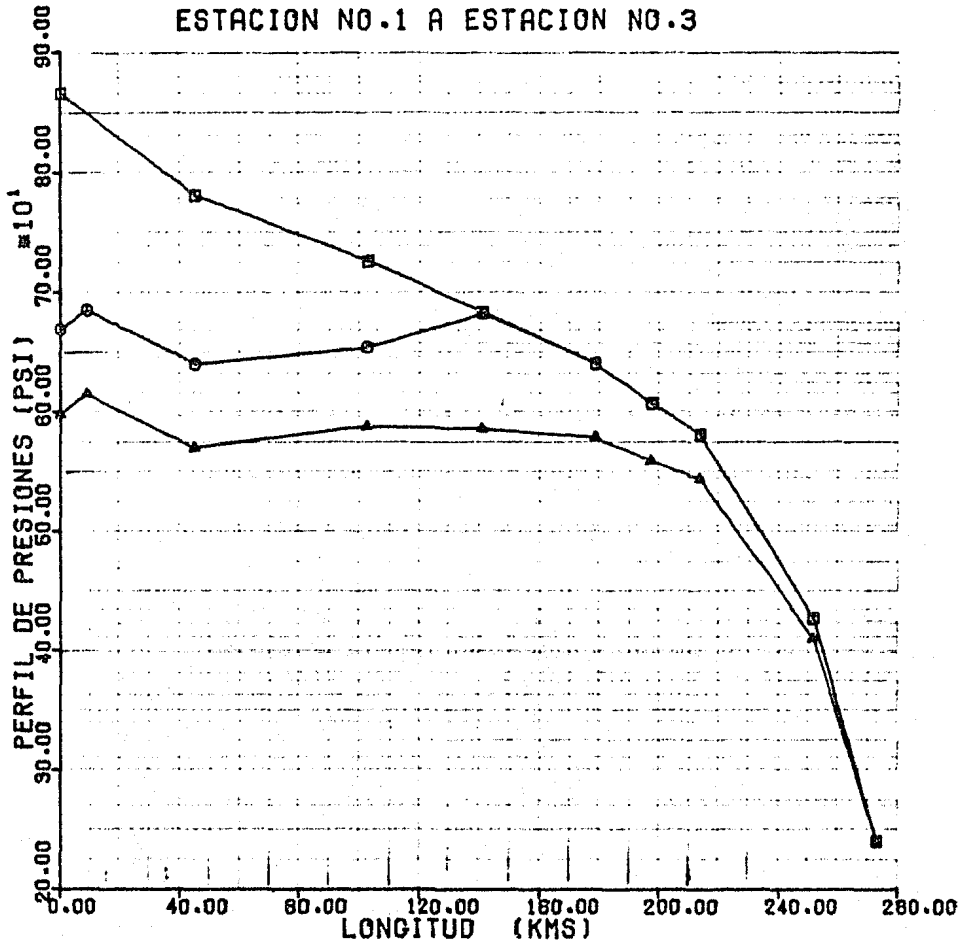
■ DESCARGA
○ SUCCION

ANALISIS DEL TRANSIENTE CASO: FALLA DE BOMBAS ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



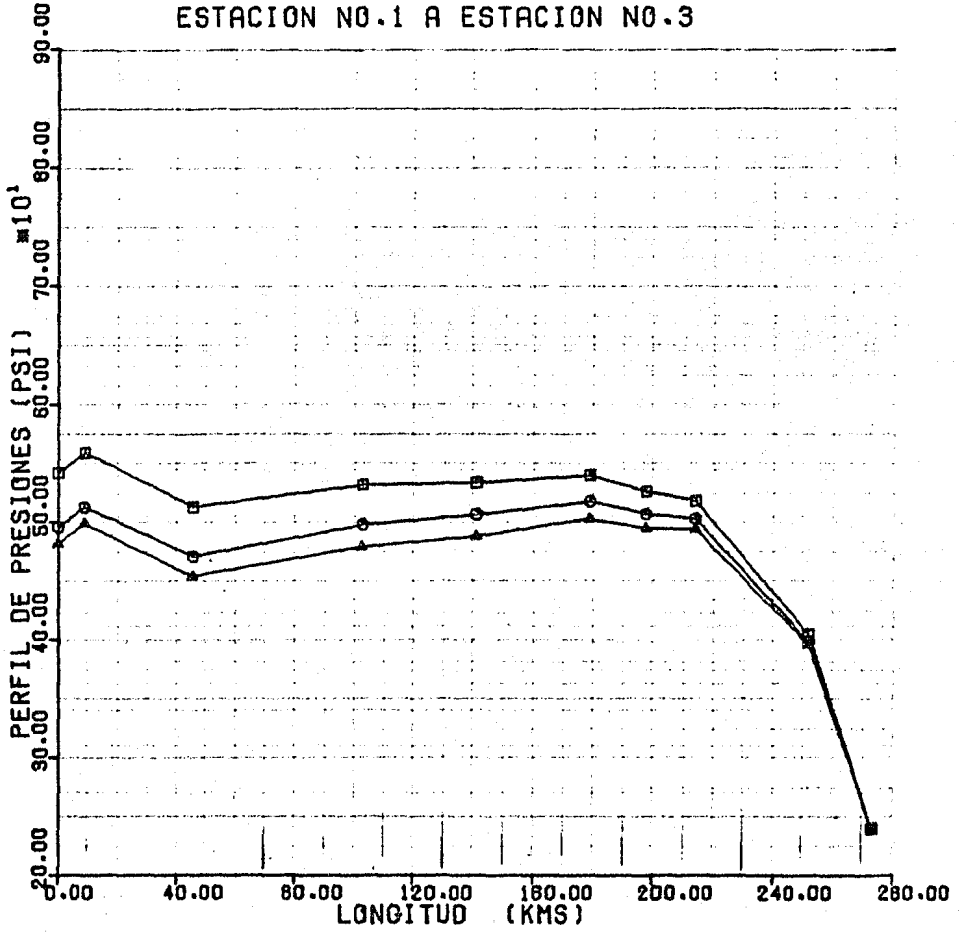
◻ PRESION (PSI)
● FLUJO POR BOMBA (OPM)
▲ VELOCIDAD (RPM)

ANALISIS DEL TRANSIENTE CASO : FALLA DE BOMBAS ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



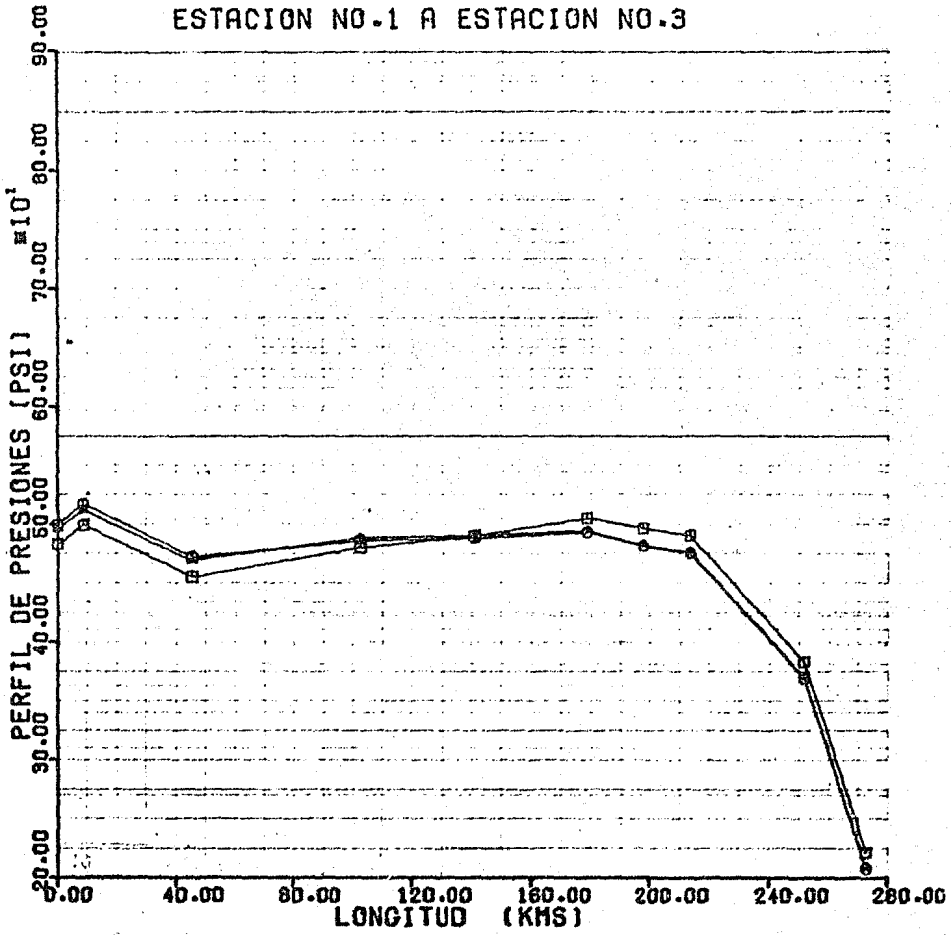
- TIEMPO = 0.0 SEG
- TIEMPO = 120.0 SEG
- ▲ TIEMPO = 260.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE CASO : FALLA DE BOMBAS ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



□ TIEMPO = 364.0 SEG
○ TIEMPO = 512.0 SEG
▲ TIEMPO = 840.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA DE BOMBAS
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3

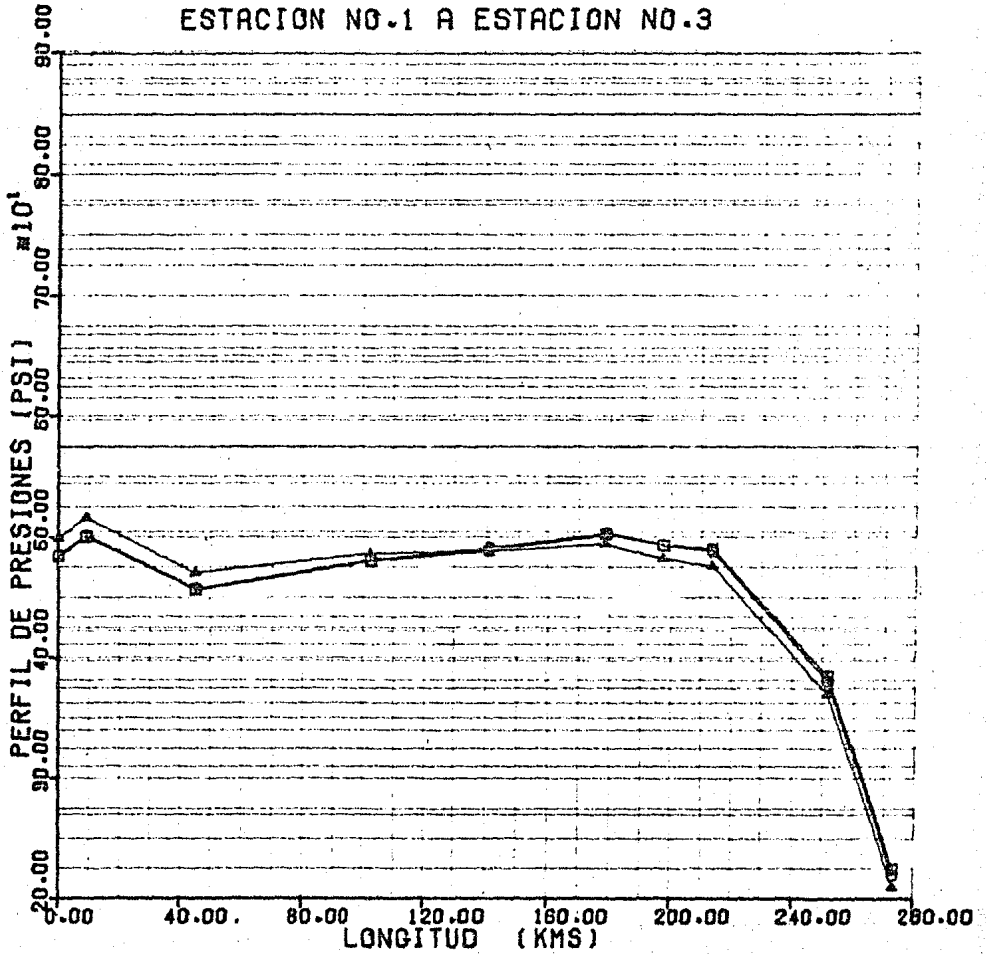


□ TIEMPO = 768.0 SEO
○ TIEMPO = 888.0 SEO
▲ TIEMPO = 1024.0 SEO

ANALISIS DEL TRANSIENTE

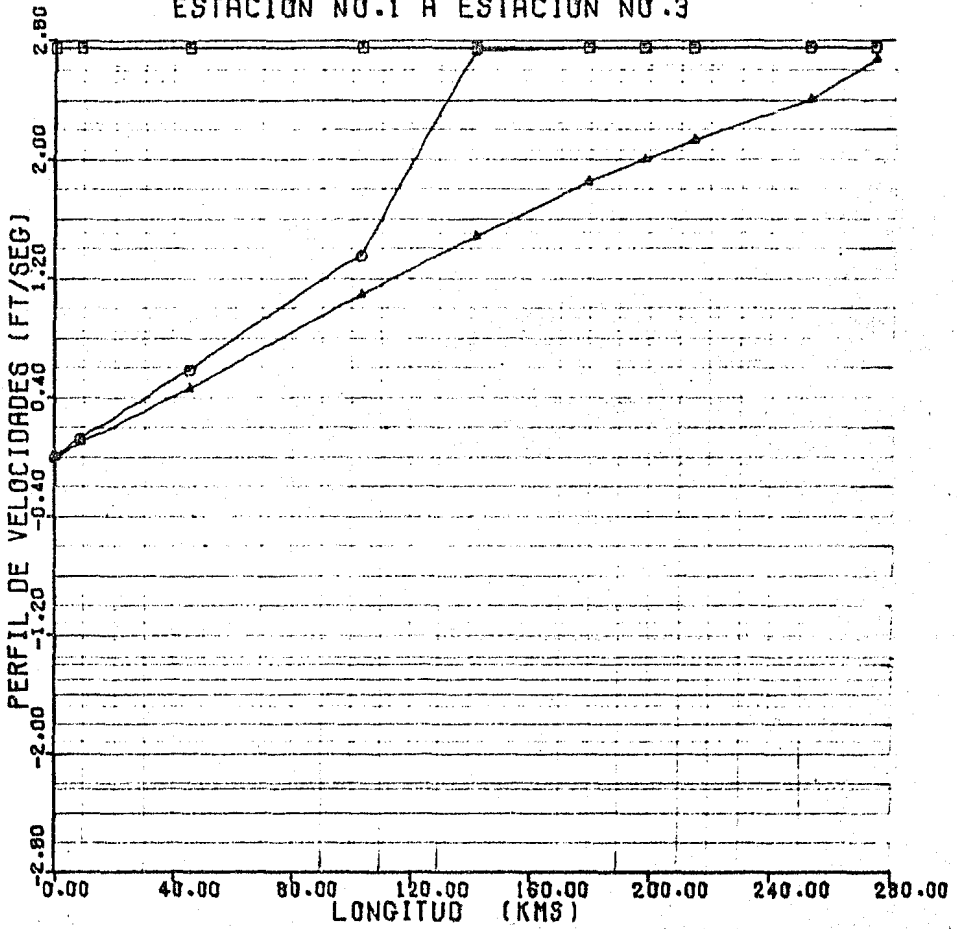
CASO : FALLA DE BOMBAS

ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



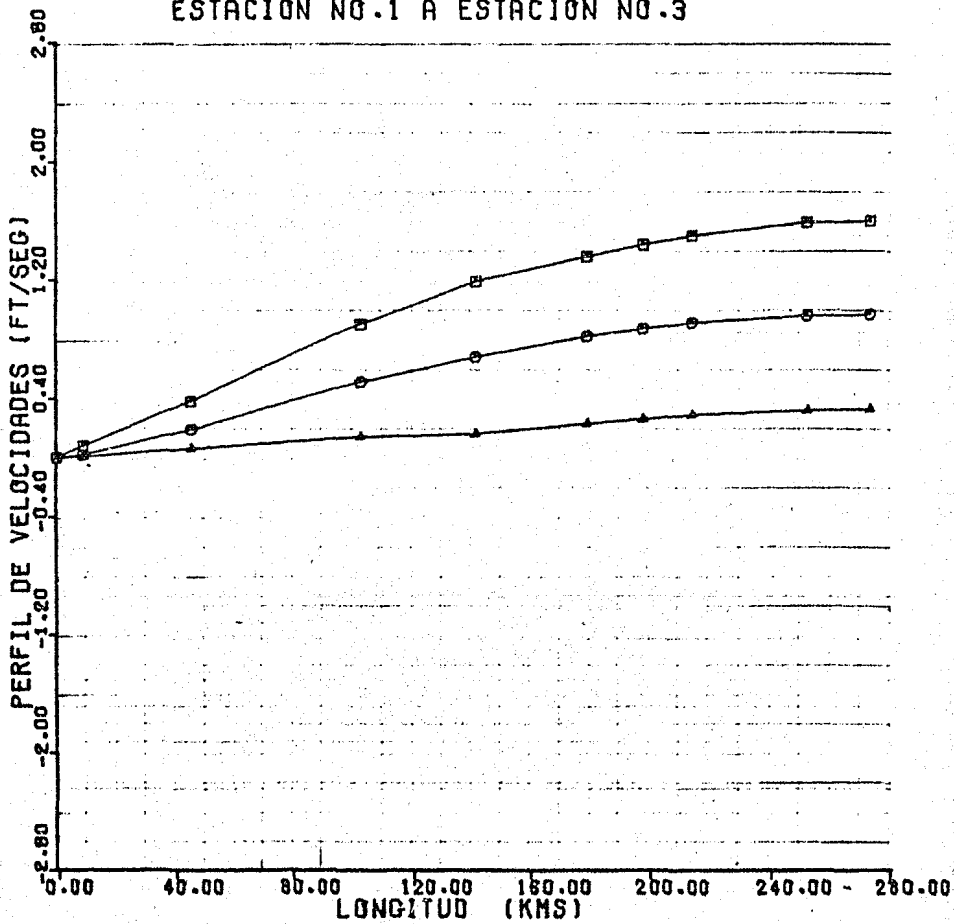
- TIEMPO = 1162.0 SEG
- TIEMPO = 1280.0 SEG
- ▲ TIEMPO = 1408.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA DE BOMBAS
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



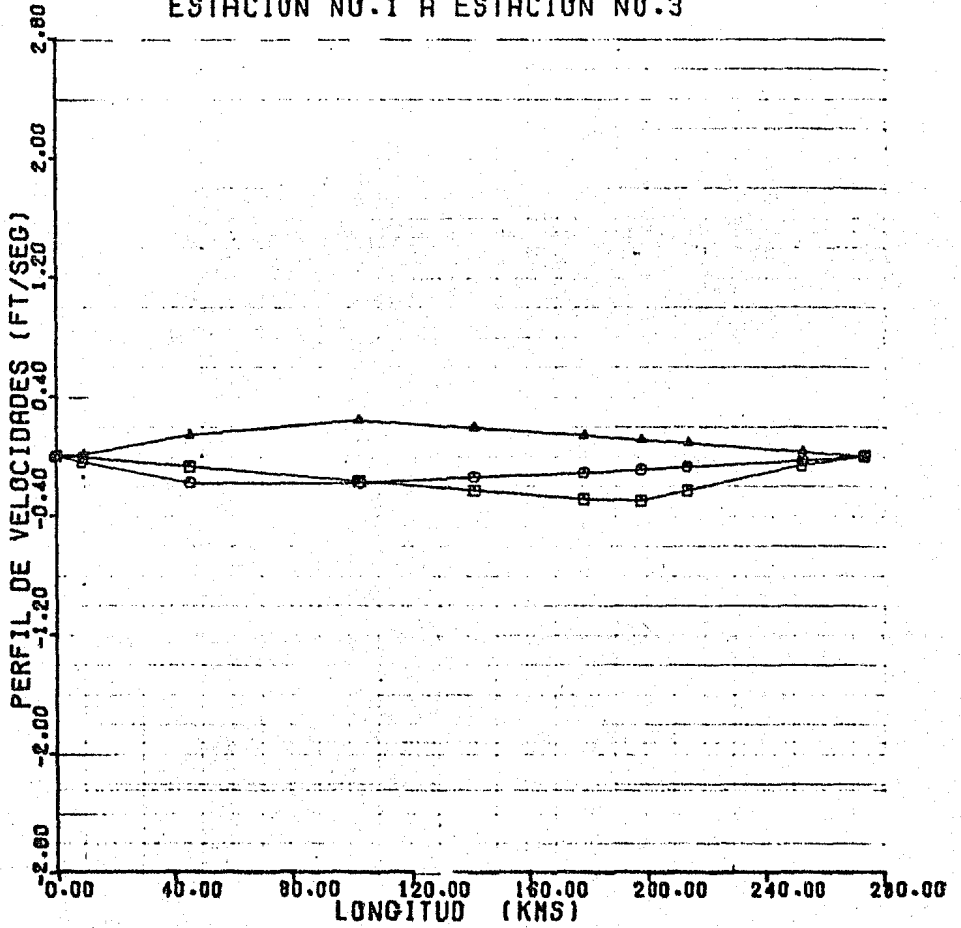
- TIEMPO = 0.0 SEG
- TIEMPO = 120.0 SEG
- ▲ TIEMPO = 250.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA DE BOMBAS
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



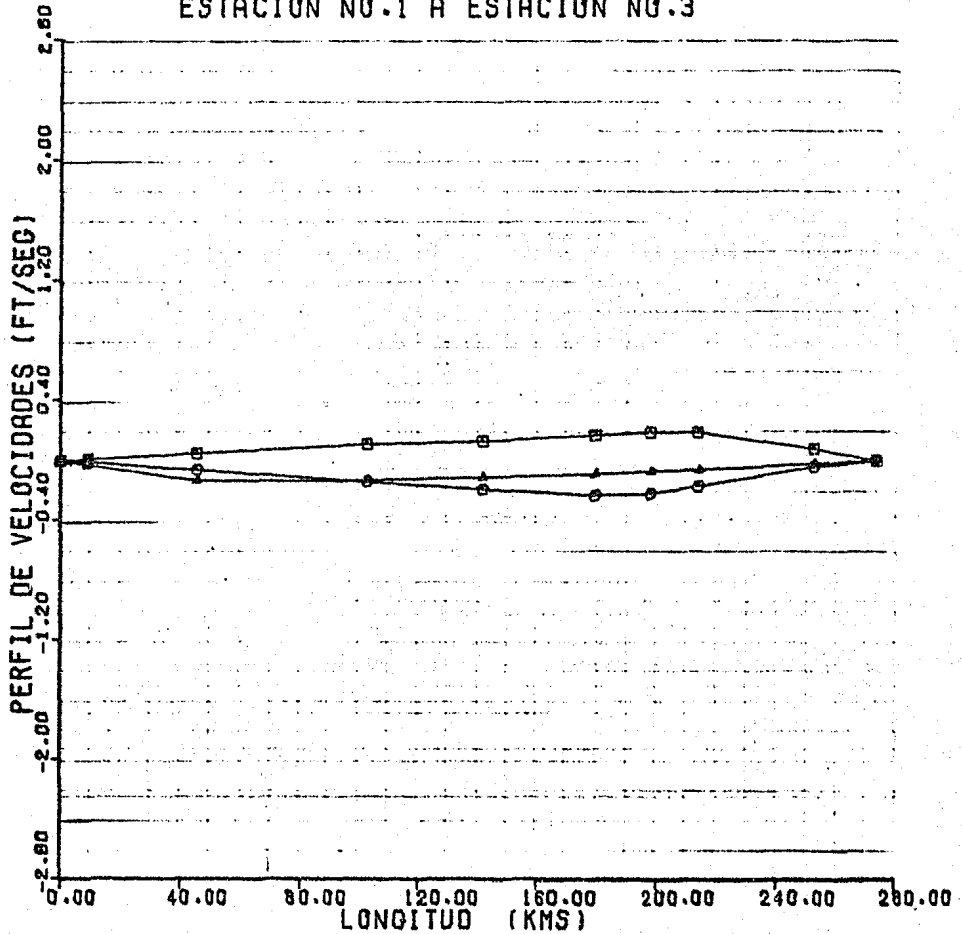
□ TIEMPO = 384.0 SEG
○ TIEMPO = 512.0 SEG
▲ TIEMPO = 640.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA DE BOMBAS
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



□ TIEMPO = 768.0 SEG
○ TIEMPO = 896.0 SEG
△ TIEMPO = 1024.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA DE BOMBAS
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



□ TIEMPO =1162.0 SEG
○ TIEMPO =1280.0 SEG
▲ TIEMPO =1408.0 SEG

3) CASO: FALLA SIMULTANEA

Se estableció para el análisis otro caso crítico en donde fallaran - además de las bombas de la Estación No. 1, las de la siguiente Estación en operación; presentando el mismo comportamiento de la falla de bombas.

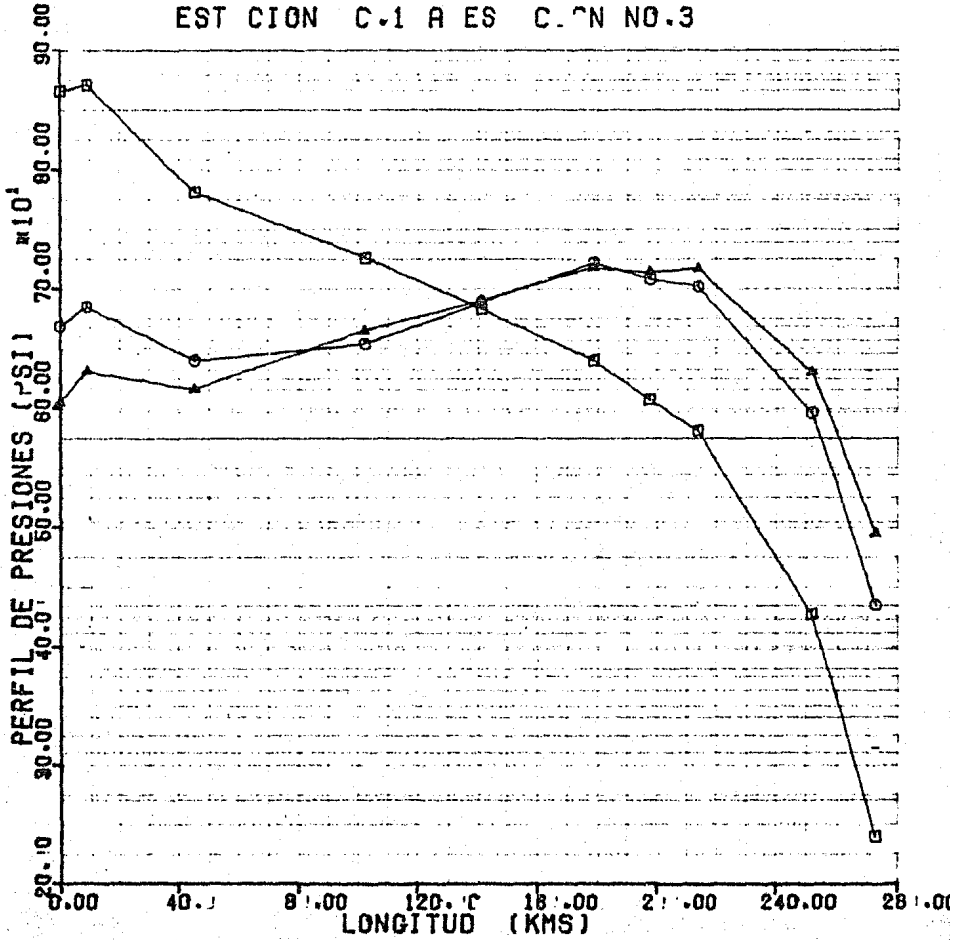
Siendo ahora, que el perfil en la disminución del flujo en la succión de la Estación corriente abajo, se comporta de manera similar al de la Estación corriente arriba. Como es de esperarse, por un lado que en la Estación corriente arriba se transmite una caída de presión a través del sistema por efecto de la falla y por el otro que la estación corriente abajo introduzca una alza de presión por el efecto de la falla al disminuir el flujo.

El comportamiento que siguieron ambos efectos se puede resumir en que la presión máxima alcanza hasta la Estación No. 2 (con su flujo correspondiente) fue de 802 psi, presión similar a la de las condiciones normales en la descarga - de las bombas de Nuevo Teapa y la mínima se alcanzó en el Km 68.6 siendo de 287 - psi a los 150 seg.

Para la Estación No. 3 la máxima presión se desarrolló en el Km 9.0 y fue de 871 psi, una libra más arriba de las condiciones normales de operación y la presión mínima se presentó en la succión de la Estación de Arroyo Moreno al inicio del proceso ($t=0$ seg.) y fue de 239 psi.

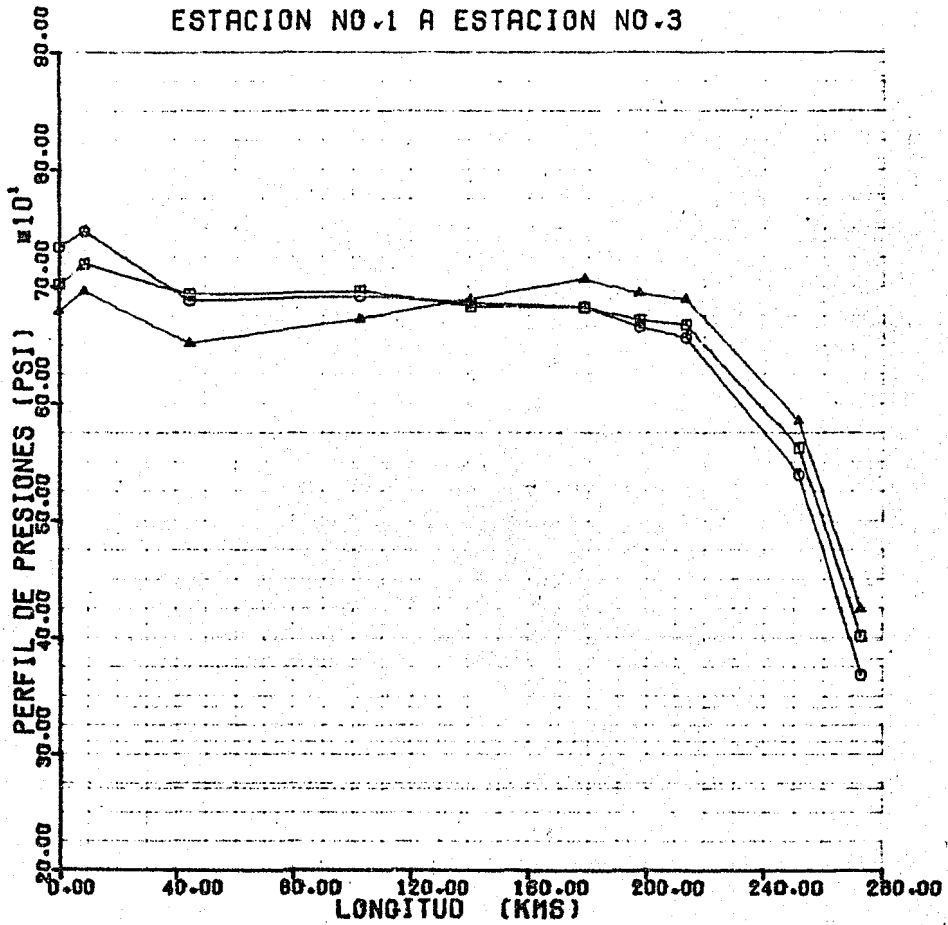
Si es que se desarrolla una maniobra similar a ésta; puede señalarse - que la probabilidad de que ocurra un problema puede ser causado cuando esté operando la Estación No. 2 por la baja de presión en el Km 68.5 y por el alto flujo en viado (260 MBPD); lo que pueda provocar que exista un choque de columnas de líquido si se presenta una separación de columna. De todas maneras todos los cambios en las condiciones de operación deben ser analizados específicamente.

AL. S DEL TRANSIENTE
COSO : FALL. SIMU. T. NEA
ESTACION C.1 A ES C. N NO.3



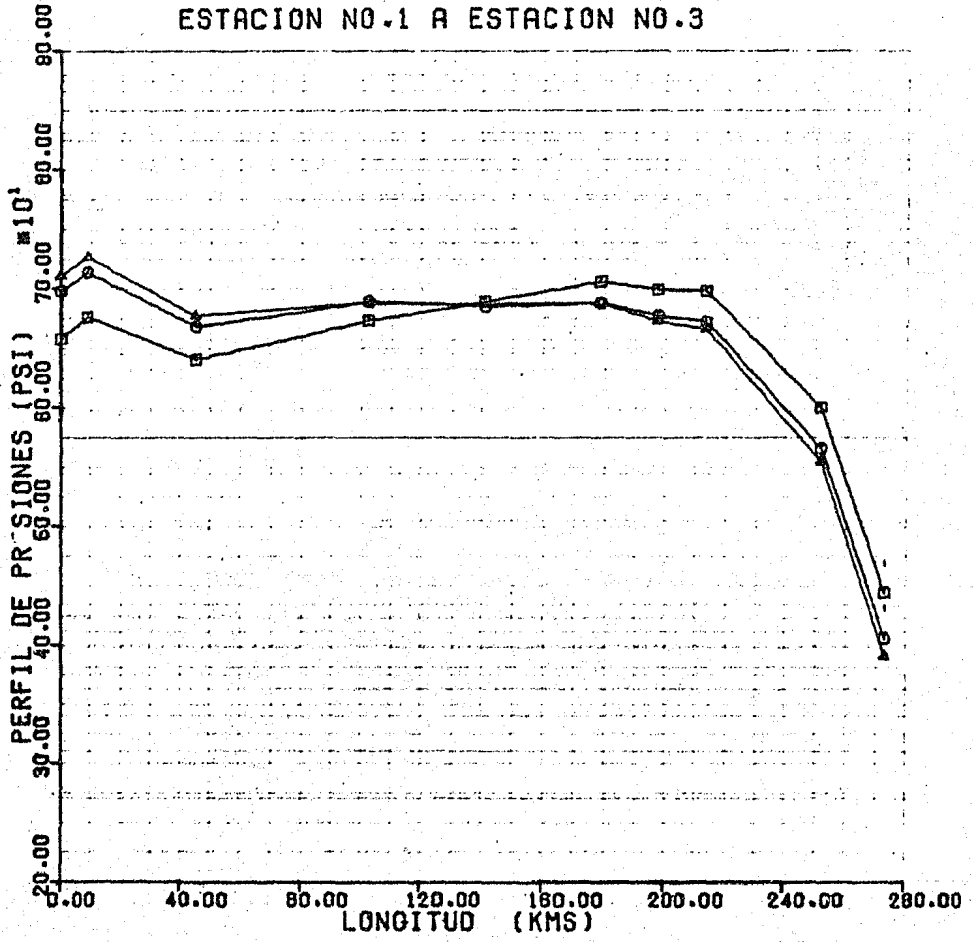
□ TIEMPO = 0.0 SEG
○ TIEMPO = 28.0 SEG
△ TIEMPO = 266.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE CASO : FALLA SIMULTANEA ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



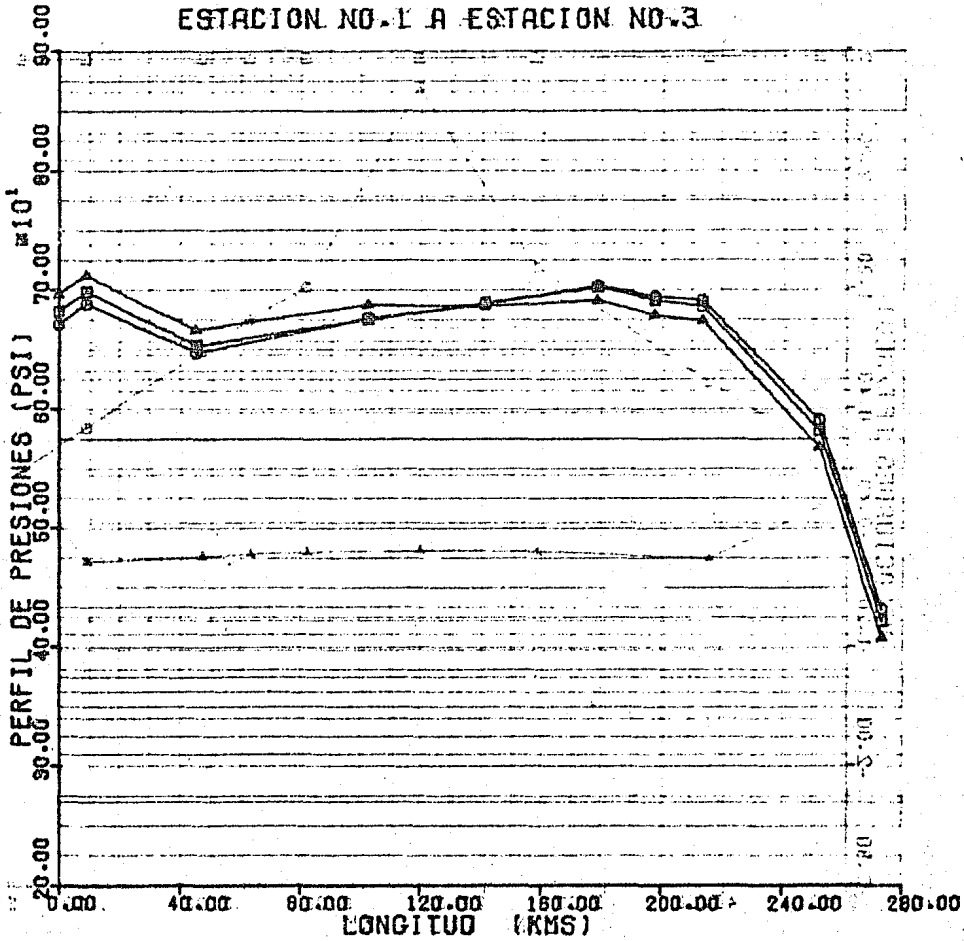
- TIEMPO = 984.0 SEG
- TIEMPO = 612.0 SEG
- ▲ TIEMPO = 840.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA SIMULTANEA
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



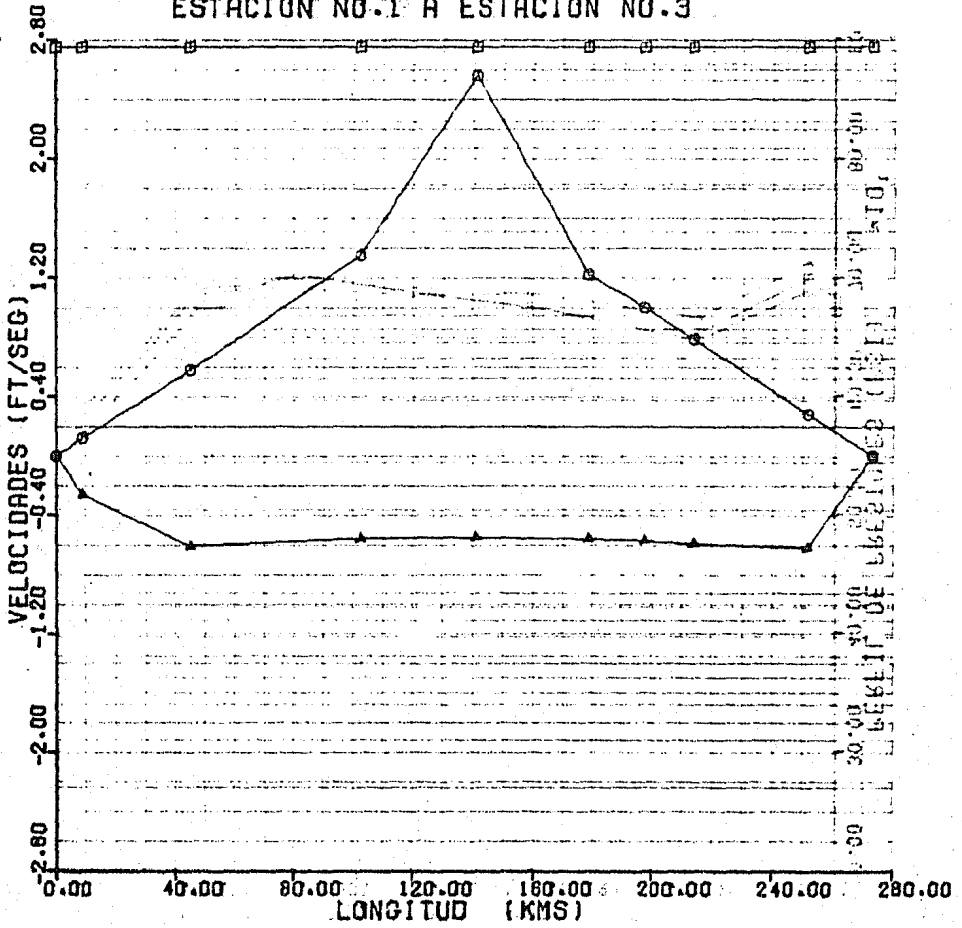
- TIEMPO = 768.0 SEG
- TIEMPO = 886.0 SEG
- ▲ TIEMPO = 1024.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO 1 FALLA SIMULTANEA
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



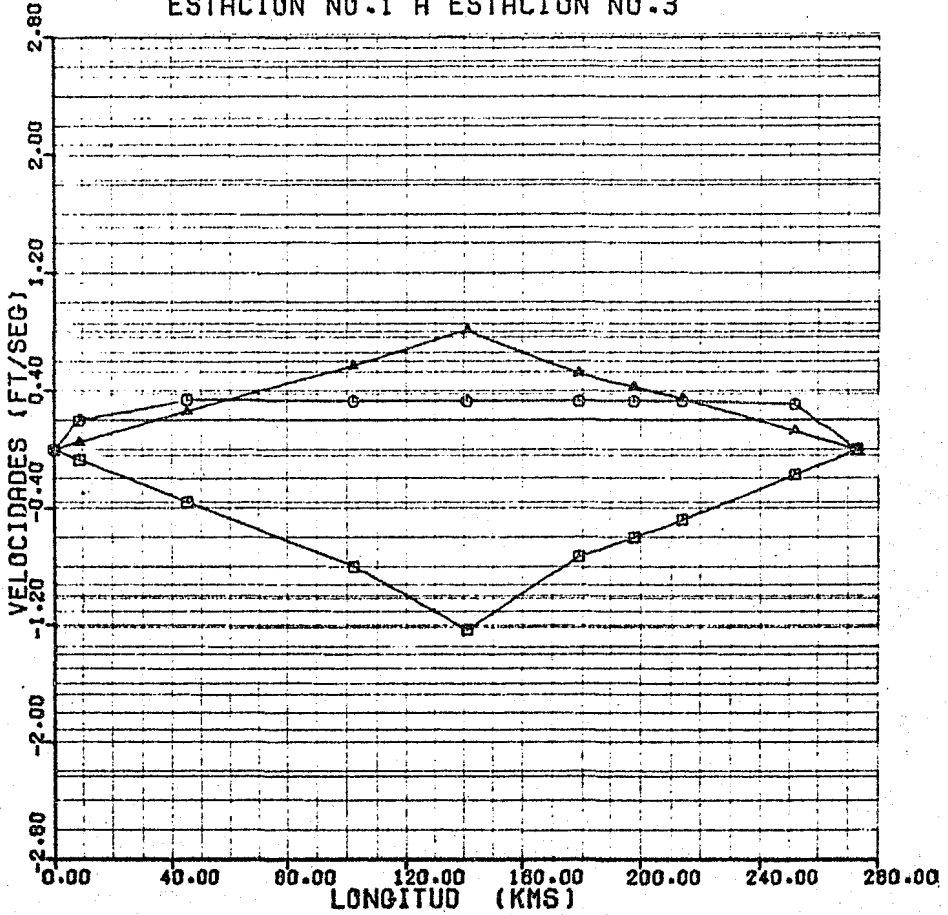
□ TIEMPO = 1162.0 SEG
○ TIEMPO = 1280.0 SEG
▲ TIEMPO = 1406.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE CASO : FALLA SIMULTANEA ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



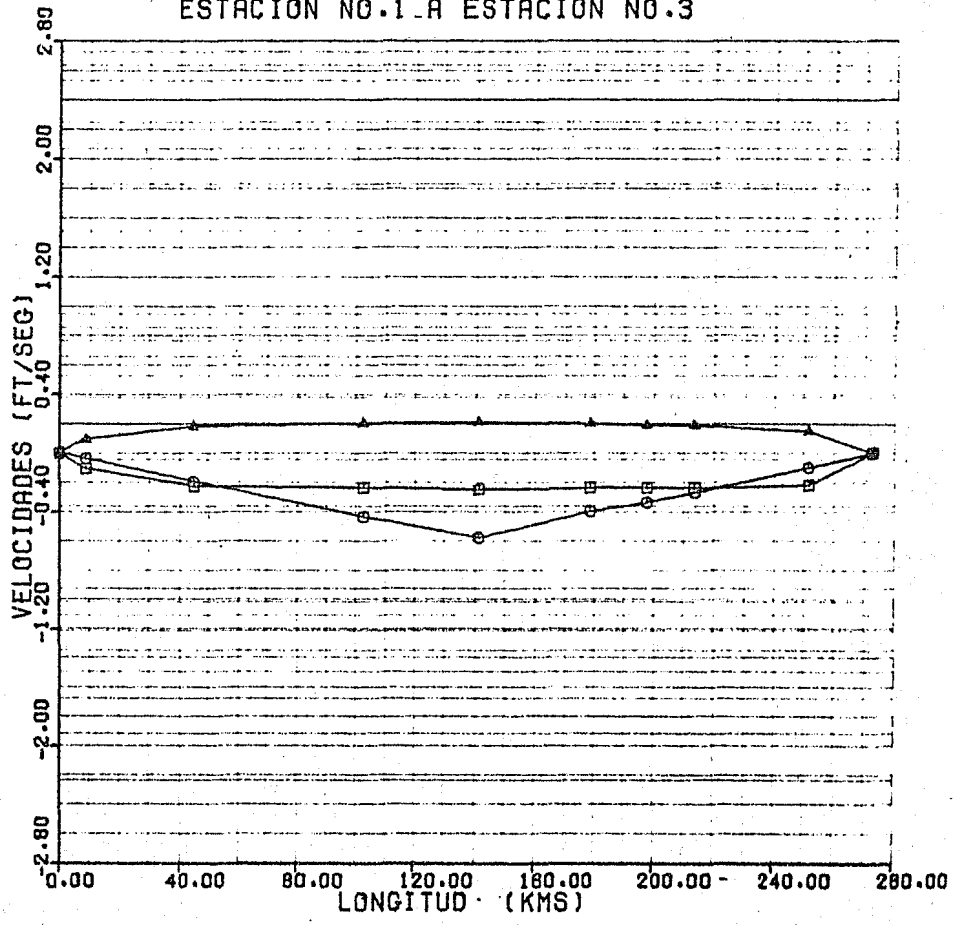
□ TIEMPO = 0.0 SEG
○ TIEMPO = 129.0 SEG
▲ TIEMPO = 269.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA SIMULTANEA
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



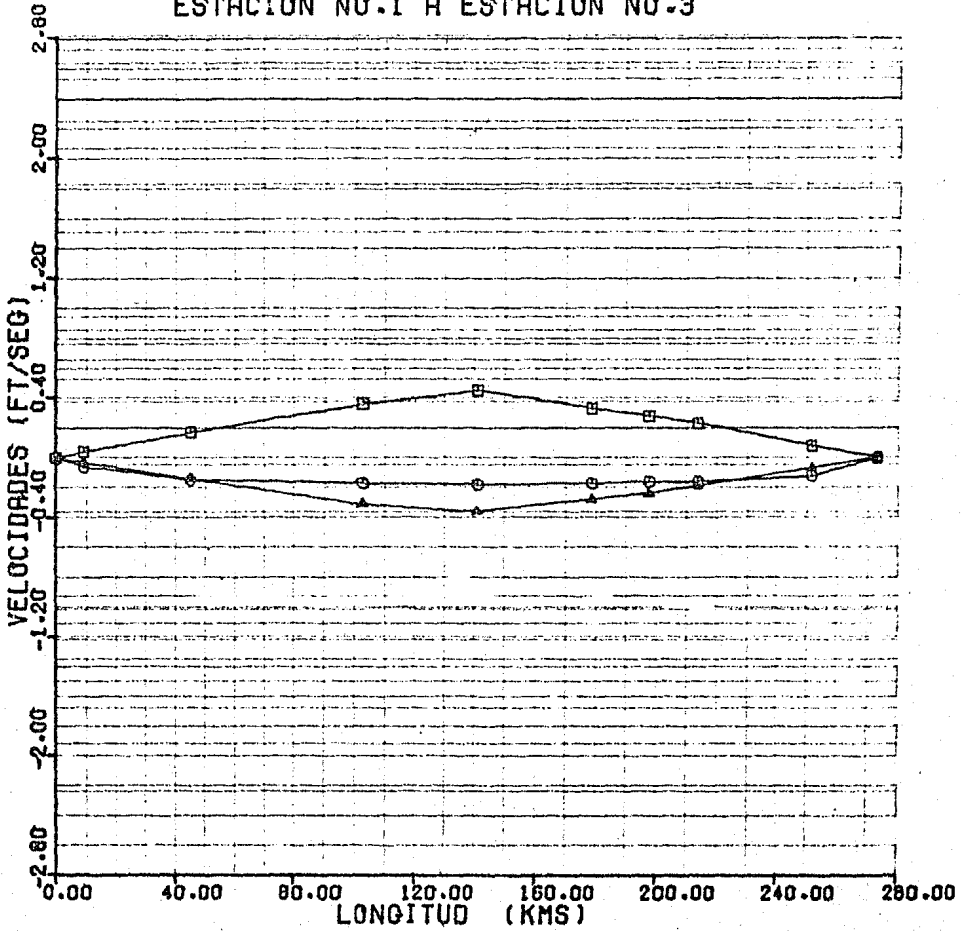
□ TIEMPO = 384.0 SEG
○ TIEMPO = 512.0 SEG
△ TIEMPO = 640.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA SIMULTANEA
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



- TIEMPO = 768.0 SEG
- TIEMPO = 888.0 SEG
- ▲ TIEMPO = 1024.0 SEG

ANALISIS DEL TRANSIENTE
CASO : FALLA SIMULTANEA
ESTACION NO.1 A ESTACION NO.3



□ □ TIEMPO = 1162.0 SEG
○ ○ TIEMPO = 1280.0 SEG
▲ ▲ TIEMPO = 1408.0 SEG

4) CASO: FALLA POR CAMBIOS EN LAS CONDICIONES DE OPERACION

Esta condición se establece cuando dos estaciones de bombeo operan normalmente pero súbitamente la estación corriente arriba (origen) cambia sus condiciones de operación (flujo) sin tener comunicación con la estación corriente abajo.

La configuración que se siguió fue aquella en que estuvieran operando normalmente las estaciones No. 1 y No. 3 y que por causas no previstas, aumados a los problemas de comunicación entre las dos estaciones existiera un súbito aumento en el flujo en la estación de Nuevo Teapa. Lo que provocará que exista problemas por bajas presiones de succión en la estación de Arroyo Moreno. Las maniobras que se realizaron en ésta, al presentarse este hecho son que una de las dos bombas en operación, sale fuera de operación dejando que siga funcionando la otra, para que tiempo después (5 min.) entre a recirculación, con lo que la estación se aísla del sistema de transporte. Se ha considerado este tiempo porque es el lapso promedio que se tardan en sacar una bomba a recirculación.

Se establece que siempre existirá problemas en la comunicación entre las estaciones involucradas y que en la estación No. 1 la presión de succión permanezca constante y además que no se efectúa acción correctiva al presentarse el fenómeno con el aumento de presión a la descarga de las bombas. Estas pudieran ser en un momento dado: bajar las velocidades de rotación de las turbinas con lo que nos bajaría la presión a la descarga metiendo de esta forma, más inestabilidad al sistema o haciendo parar las bombas inmediatamente.

Por lo tanto, dejaremos que las bombas operen bajo un mismo régimen de velocidades de rotación, señalando que la otra acción puede también ser prevista y simulada. La única respuesta que van a emitir las bombas es que cuando detecten una alza de presión a la descarga inmediatamente impondrán una presión de equilibrio entre ellas y la descarga (presiones iguales), disminuyendo el flujo para ello. De esta forma la tubería estará sujeta a trabajar a una mayor presión (oleoducto presionado) hasta que ocurra el disparo de las bombas o bien que se efectue una ruptura en la tubería.

Al simular esta secuencia de eventos por el modelo de solución ya establecido con modificaciones al programa se obtuvieron los siguientes resultados.

Con el flujo de 280 MEPSD la presión máxima alcanzada fue de 1062.7 psi en el Km 9 a un tiempo de 685 seg. y la mínima se localizó en la succión de las bombas en la Estación de Arroyo Moreno y fue de 60 psi en $t = 0$. seg. El disparo de las bombas se alcanzó en un tiempo de 678 seg.

Se prevé de que en un momento dado se pasará la Estación No. 2 y se enviará directamente a la Estación No. 1 hasta la Estación No. 3 con el mismo flujo (260 MEPSD) y que provocará el mismo problema en Arroyo Moreno. Los resultados fueron:

Presión máxima = 106.2 psi en el Km 9 a $t = 600$ seg.

Presión mínima = 164.6 psi localizado en la succión de la estación No. 2 a $t = 0$ seg.

Disparo de las bombas $t = 593$, por seg.

(ver resultados anexos).

De esta forma hemos indicado como se pueden presentar los problemas - por golpe de ariete; existiendo muchos casos, los cuales deben ser analizados específicamente aplicando la teoría de la columna elástica con sus condiciones límites apropiadas.

Un caso queda por ser estudiado, es el de los dispositivos que pueden controlar el fenómeno cuando se presente. Porque los cambios de presión -- son directamente proporcional a las variaciones de la velocidad, si se evitan súbitos cambios generalmente se previenen serias presiones por golpe de ariete. De esta forma, los dispositivos de control tienden a satisfacta generalización.

Un dispositivo sencillo y económico son las válvulas de relevatas válvulas diseñadas para abrir cuando se excede una presión preestada (ajuste). Generalmente son localizadas junto al elemento que se genere altas presiones; si se tienen ramificaciones es conveniente de válvulas para cada uno de ellos. El propósito de la válvula es cionar un escape de fluido para que evite cambios súbitos en las velocidades y de esa forma se provoquen altas presiones. La cuestión aquí es: cuál será la presión de ajuste de la válvula y la cantidad de líquido a relevar para determinar el tamaño de la(s) válvula(s).

La presión de ajuste puede establecerse determinando el punto adyacente más débil donde se localizará o si es el caso de la descarga de las bombas se fijará a la presión de disparo.

Para la determinación de la cantidad de líquido que se relevará no es tan sencillo establecerlo, pues dependerá de la forma y de las condiciones bajo las cuales se desarrolle la inestabilidad al sistema. Puede resolverse poniendo la misma cantidad de fluido que está fluyendo a través de la tubería (velocidad = \varnothing) si es que es una de diámetro pequeño. En caso contrario, si se requiere determinar rigurosamente es necesario integrar la válvula (modelo) al programa de computadora e indicar el tamaño de la misma. La solución se obtendrá por ensayo y error estableciendo tamaños de válvulas con presiones desarrolladas en la tubería después de accionado el relevo. En ocasiones se toma un valor proporcionado por gente de experiencia que ha tenido contacto con este problema.

Los recipientes surges o torres de oscilación pueden emplearse para prevenir tanto altas como bajas presiones. En general ellos actúan como almacenamientos temporales de fluido derivado de la corriente principal para prevenir altas presiones; o actúan como suministradores de líquido a la tubería en el caso de que necesite más fluido para prevenir bajas presiones (separación de columnas). Se localizan en los puntos que se requieren proteger y por lo general se utiliza una derivación desde la tubería hasta una cima determinada por su línea de grado hidráulico.

Las cámaras de aire se colocan a la descarga de un sistema de bombeo para controlar y prevenir columnas de separación resultante por la falla de bombas.

Estos son generalmente los dispositivos que comúnmente se colocan en un sistema de bombeo para el control del golpe de Ariete cuando se presenta.

La recomendación final son: que en la etapa de diseño se identifique los problemas que puedan presentarse al entrar en operación, el oleoducto y seleccionar la presión de diseño de la tubería. En la operación que se tenga cuidado de provocar altos índices de inestabilidad en el sistema por el peligro a que se estará expuesto y si no se pueden evitar tratar de hacerlos lo menos severos. Cuando se tenga que tomar acciones correctivas hay que detectar cuáles son los casos más severos y comunes que se presentan y de esa forma seleccionar el (o los) dispositivo(s) de control.

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

RESUMEN DE VALORES MAXIMOS Y MINIMOS OBTENIDOS DURANTE LA SIMULACION

TRAMO	N	CAPETA MAXIMA (FT)	CAPETA MINIMA (FT)	MMAX (FT)	MMIN (FT)	LONGITUD (MM)	PRESION MAXIMA (PSI)	PRESION NOMINAL (PSI)	PRESION MINIMA (PSI)
TRAMO 1	.000	2779.	2388.	2775.	2387.	.00	1056.64	976.00	931.36
	.200	2708.	2397.	2699.	2388.	1.00	1056.02	976.10	934.49
	.400	2713.	2405.	2686.	2389.	2.00	1057.90	974.19	938.03
	.600	2717.	2414.	2677.	2390.	3.00	1059.81	973.29	941.38
	.800	2722.	2422.	2668.	2389.	4.00	1061.75	972.39	944.73
.000	2727.	2431.	2665.	2390.	7.00	1063.72	971.49	948.09	
TRAMO 3	.000	2777.	2433.	2665.	2389.	9.00	1063.72	971.49	948.09
	.111	2724.	2431.	2661.	2389.	10.00	1062.30	967.09	948.08
	.222	2700.	2431.	2671.	2389.	17.00	1060.01	962.72	948.07
	.333	2717.	2431.	2678.	2388.	18.52	1059.58	958.39	948.06
	.444	2713.	2431.	2691.	2389.	18.36	1058.22	957.94	948.07
	.556	2700.	2431.	2687.	2389.	18.20	1056.92	949.58	948.09
	.667	2707.	2426.	2685.	2388.	20.04	1055.64	945.20	946.15
	.778	2704.	2415.	2682.	2373.	21.88	1054.40	940.82	941.77
	.889	2700.	2404.	2677.	2362.	23.72	1053.19	936.45	937.38
	.000	2697.	2392.	2684.	2353.	25.56	1052.00	932.07	933.00
TRAMO 3	.000	2697.	2392.	2684.	2353.	26.56	1052.00	932.07	933.00
	.500	2623.	2310.	2667.	2343.	27.28	1023.05	900.15	901.05
	.000	2644.	2326.	2681.	2330.	29.00	994.21	868.23	869.10
TRAMO 6	.000	2649.	2328.	2683.	2330.	29.00	994.21	868.23	869.10
	.250	2676.	2347.	2686.	2319.	30.83	1004.64	875.43	876.29
	.500	2603.	2365.	2646.	2308.	32.66	1015.18	882.82	883.48
	.750	2730.	2384.	2692.	2297.	34.50	1025.72	889.82	890.70
	.000	2657.	2302.	2684.	2286.	36.33	1036.26	897.02	897.91
TRAMO 5	.000	2657.	2302.	2683.	2286.	36.33	1036.26	897.02	897.91
	.111	2632.	2369.	2680.	2275.	36.11	1026.58	884.04	884.92
	.222	2601.	2336.	2684.	2265.	35.88	1016.91	871.04	871.93
	.333	2583.	2302.	2686.	2254.	41.66	1007.24	858.04	858.93
	.444	2558.	2369.	2682.	2243.	43.44	997.66	845.10	845.98
	.556	2533.	2336.	2680.	2232.	45.21	988.08	832.11	832.45
	.667	2509.	2302.	2682.	2222.	46.99	978.49	819.12	819.46
	.778	2484.	2269.	2684.	2211.	48.77	968.90	806.13	806.46
	.889	2460.	2236.	2686.	2200.	50.54	959.32	793.14	793.47
	.000	2436.	2202.	2687.	2189.	52.32	949.74	780.14	780.47
TRAMO 5	.000	2436.	2202.	2683.	2189.	52.32	949.74	780.14	780.47
	.500	2404.	2159.	2680.	2179.	54.15	937.44	767.21	767.44
	.000	2373.	2115.	2686.	2168.	56.98	924.97	744.23	744.98
TRAMO 7	.000	2372.	2115.	2682.	2161.	56.98	924.97	744.23	744.98
	.500	2372.	2105.	2686.	2149.	59.81	925.03	742.30	743.04
	.000	2372.	2105.	2686.	2137.	60.98	925.17	738.37	739.10
TRAMO 8	.000	2372.	2105.	2684.	2137.	60.98	925.17	738.37	739.10
	.250	2361.	2082.	2683.	2126.	62.89	922.81	722.14	722.47

Q = 280 P1000

	.500	2206.	1709.	2611.	2118.	58.83	360.50	665.96	666.43
	.750	2124.	1616.	2616.	2107.	58.72	320.22	629.76	630.19
	.900	2041.	1523.	2609.	2091.	58.64	295.97	594.56	594.15
TRAMO 9									
	.200	2641.	1423.	2604.	2091.	68.64	795.97	593.54	596.15
	.500	2656.	1428.	2607.	2079.	70.55	801.88	595.45	596.02
	.800	2671.	1433.	2606.	2069.	72.47	807.83	597.34	597.88
TRAMO 10									
	.200	2671.	1433.	2616.	2069.	72.47	807.87	597.30	597.88
	.500	2171.	1422.	2615.	2057.	74.33	816.50	611.97	612.91
	.800	2270.	1411.	2604.	2045.	76.18	825.15	626.54	627.17
	.950	2369.	1400.	2604.	2034.	78.04	833.90	641.21	641.42
	.900	2468.	1388.	2613.	2023.	79.90	842.64	655.83	656.47
TRAMO 11									
	.200	2465.	1388.	2603.	2023.	79.60	842.64	655.83	656.47
	.500	2439.	1386.	2612.	2010.	82.03	850.77	670.12	670.93
	.800	2407.	1374.	2611.	1997.	84.16	858.92	684.81	685.40
TRAMO 12									
	.200	2407.	1374.	2601.	1997.	84.16	858.92	684.81	685.40
	.500	2432.	1378.	2601.	1987.	85.00	868.38	700.34	700.95
	.750	2456.	1372.	2600.	1974.	85.84	877.86	715.91	716.31
	.929	2480.	1366.	2600.	1964.	86.38	887.37	731.46	732.07
	.971	2505.	1361.	2599.	1955.	87.12	896.89	747.02	747.63
	.914	2529.	1375.	2599.	1945.	87.87	906.43	762.55	763.19
	.857	2554.	1389.	2599.	1934.	88.61	916.00	778.10	778.75
	.800	2578.	1403.	2595.	1924.	89.35	925.58	793.65	794.31
TRAMO 13									
	.200	2573.	1403.	2595.	1924.	89.35	925.58	793.65	794.31
	.500	2567.	1381.	2595.	1913.	89.28	921.17	782.77	783.42
	.800	2556.	1356.	2595.	1902.	89.21	916.71	772.49	773.13
TRAMO 14									
	.200	2556.	1358.	2596.	1900.	89.21	916.71	772.49	773.13
	.500	2573.	1376.	2595.	1894.	89.54	921.55	787.14	787.81
	.800	2601.	1376.	2595.	1872.	89.87	926.48	801.83	802.48
TRAMO 15									
	.200	2601.	1376.	2595.	1872.	89.87	926.48	801.83	802.48
	.500	2577.	1350.	2595.	1861.	89.70	921.84	787.46	788.11
	.750	2572.	1324.	2594.	1850.	89.54	917.21	773.09	773.74
	.923	2554.	1299.	2595.	1839.	89.37	912.60	758.72	759.37
	.984	2544.	1273.	2595.	1827.	89.21	908.01	744.35	744.97
	.956	2520.	1247.	2595.	1815.	89.05	903.44	729.96	730.58
	.917	2515.	1222.	2594.	1804.	88.88	898.88	715.56	716.18
	.878	2501.	1196.	2600.	1792.	88.72	894.34	701.17	701.79
	.839	2487.	1170.	2610.	1780.	88.55	889.81	686.77	687.39
	.800	2473.	1145.	2611.	1777.	88.39	885.31	672.38	673.00
TRAMO 16									
	.200	2473.	1145.	2611.	1777.	88.39	885.31	672.38	673.00
	.500	2483.	1161.	2601.	1765.	88.72	890.82	687.94	688.56
	.800	2493.	1166.	2612.	1744.	89.05	896.37	703.53	704.15
TRAMO 17									
	.200	2493.	1166.	2612.	1744.	89.05	896.37	703.53	704.15
	.500	2493.	1156.	2612.	1732.	89.38	901.92	719.12	719.74
	.800	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33
TRAMO 18									
	.200	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33
	.500	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33
	.800	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33
	.900	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33
	.950	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33
	.975	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33
	.999	2475.	1153.	2612.	1721.	89.71	907.47	734.71	735.33

		857	2604	3650	2606	3656	181.00	1015.42	442.99	443.57
		000	2675	3660	2609	3663	182.84	1021.23	446.71	447.79
TRANC	19									
		000	2625	3660	2609	3663	181.74	1021.87	446.71	447.79
		167	2678	3699	2610	3631	184.84	1024.65	442.69	443.27
		333	2731	3639	2611	3619	184.84	1024.07	438.67	439.25
		500	2734	3629	2612	3607	187.64	1027.20	438.64	439.24
		667	2837	3619	2613	3597	180.44	1024.73	430.64	431.22
		833	2840	3608	2615	3587	182.84	1029.47	426.62	427.20
		000	2843	3598	2616	3577	184.84	1030.62	422.60	423.19
TRANC	20									
		000	2843	3598	2616	3577	184.84	1030.62	422.60	423.19
		163	2825	3578	2617	3567	184.63	1027.57	418.89	419.47
		266	2827	3558	2618	3549	188.82	1024.53	407.17	407.76
		429	2819	3539	2619	3539	180.23	1021.50	409.64	400.04
		571	2811	3519	2621	3521	182.00	1018.48	401.74	402.32
		714	2804	3499	2622	3511	183.79	1016.48	394.04	394.61
		857	2844	3475	2623	3501	185.58	1012.50	376.62	376.88
		000	2849	3459	2624	3495	187.37	1009.52	368.61	369.16
TRANC	21									
		000	2849	3459	2624	3495	187.37	1009.52	368.61	369.16
		500	2824	3400	2624	3487	184.53	1023.96	376.82	377.38
		000	2860	3382	2625	3467	174.70	1037.36	385.07	385.60
TRANC	22									
		000	2860	3382	2626	3469	171.70	1037.36	385.02	385.40
		048	2858	3388	2626	3451	177.42	1036.78	379.88	380.40
		098	2857	3375	2626	3445	175.14	1036.19	374.63	375.20
		143	2855	3362	2626	3438	174.67	1035.60	369.44	370.00
		190	2854	3348	2626	3428	174.59	1035.02	364.25	364.81
		236	2852	3335	2626	3417	178.31	1034.44	359.06	359.61
		286	2851	3322	2626	3407	182.04	1033.86	353.86	354.41
		333	2850	3308	2626	3397	183.76	1033.31	348.64	349.21
		381	2849	3295	2626	3386	185.48	1032.76	343.47	344.01
		429	2847	3282	2626	3376	187.21	1032.21	338.26	338.81
		476	2845	3268	2626	3365	188.93	1031.66	333.08	333.61
		524	2844	3255	2626	3355	190.65	1031.12	327.89	328.42
		571	2843	3242	2626	3345	192.36	1030.56	322.69	323.22
		619	2841	3228	2626	3334	194.10	1030.01	317.50	318.07
		667	2840	3215	2626	3324	195.82	1029.53	312.31	312.87
		714	2838	3202	2626	3314	197.55	1029.01	307.11	307.67
		762	2837	3188	2626	3303	199.27	1028.49	301.92	302.42
		810	2836	3175	2626	3293	200.99	1027.98	296.72	297.22
		857	2835	3162	2626	3282	202.72	1027.47	291.53	292.07
		905	2833	3148	2626	3272	204.44	1026.96	286.33	286.82
		952	2832	3135	2626	3262	206.16	1026.46	281.14	281.62
		000	2831	3122	2626	3251	207.89	1025.96	275.95	276.42
TRANC	23									
		000	2831	3122	2626	3251	207.89	1025.96	275.95	276.42
		500	2842	3119	2622	3236	200.89	1030.40	275.04	275.55
		000	2849	3117	2624	3227	211.89	1035.04	274.21	274.69
TRANC	24									
		000	2849	3117	2624	3227	211.89	1035.04	274.21	274.69
		143	2840	3192	2626	3216	213.66	1030.27	269.56	270.07
		266	2825	3168	2627	3206	215.44	1025.41	264.90	265.36
		429	2817	3143	2629	3195	217.22	1020.54	260.24	260.69
		571	2805	3118	2631	3184	219.00	1015.68	255.59	256.03
		714	2792	3093	2632	3173	220.77	1010.94	250.94	251.36
		857	2780	3068	2634	3163	222.55	1006.17	246.28	246.70
		000	2768	3044	2636	3152	224.33	1001.35	241.61	242.03
TRANC	25									

000	2864.	1444.	2676.	1152.	224.33	1001.38	406.87	407.03
107	2881.	1428.	2679.	1140.	224.24	998.90	398.99	399.15
333	2895.	1408.	2679.	1129.	224.18	994.98	391.27	391.44
500	2914.	1384.	2681.	1117.	224.10	993.98	383.59	383.75
647	2942.	1362.	2683.	1105.	224.02	991.81	375.91	376.07
973	2936.	1348.	2685.	1094.	223.95	989.08	368.29	368.41
J00	2971.	1328.	2686.	1082.	223.88	986.56	360.56	360.72
TRAMO 24								
000	2930.	125.	2688.	1082.	223.88	984.56	360.84	360.97
500	2942.	128.	2688.	1070.	223.88	971.89	340.52	340.68
300	2974.	123.	2690.	1058.	223.88	957.22	320.48	320.60
TRAMO 27								
000	2974.	123.	2690.	1058.	223.88	957.22	320.48	320.60
500	2979.	128.	2692.	1046.	223.81	944.91	321.91	322.13
J00	2998.	130.	2696.	1034.	223.84	932.60	323.34	323.46
TRAMO 28								
000	2998.	130.	2696.	1030.	223.84	927.60	323.34	323.46
143	2972.	128.	2696.	1019.	223.85	914.10	309.04	309.27
286	2940.	121.	2697.	1008.	223.84	901.59	296.44	296.67
429	2928.	127.	2699.	997.	223.94	889.08	282.19	282.46
571	2907.	123.	2700.	986.	223.77	876.57	269.81	270.08
714	2885.	120.	2702.	974.	223.86	863.05	254.49	254.69
857	2863.	124.	2704.	964.	223.39	848.53	243.05	243.30
000	2841.	129.	2708.	954.	223.20	834.01	229.67	229.90
TRAMO 29								
000	2841.	129.	2708.	954.	223.20	834.01	229.67	229.90
111	2803.	121.	2707.	943.	223.94	820.81	210.81	211.02
222	2767.	113.	2708.	932.	220.60	804.62	191.93	192.18
333	2722.	104.	2710.	922.	217.42	787.42	173.09	173.27
444	2715.	106.	2711.	910.	214.16	770.21	154.23	154.39
555	2694.	107.	2713.	901.	211.90	752.00	135.37	135.51
667	2723.	109.	2714.	891.	207.64	733.79	116.51	116.67
778	2696.	101.	2716.	881.	204.38	715.57	97.65	97.75
889	2649.	102.	2717.	870.	201.12	697.35	78.79	78.87
000	2612.	104.	2717.	859.	202.86	684.66	59.93	59.99

PRESION MAXIMA FICHA 7 PSI EN EL TRAMO 2 EN X = 300EN EL TIEMPO = 489.69 SEC

PRESION MINIMA = 89.9 PSI EN EL TRAMO 29 EN X = 1100EN EL TIEMPO = .00 SEC

LAISE DEPRESION SE DISPARATORNI EN EL TIEMPO = 674.3 SEG

STOP
 STOP IGNORED - IN CONTROL MODE
 DATA IGNORED - IN CONTROL MODE

STOP
 STOP IGNORED - IN CONTROL MODE
 DATA IGNORED - IN CONTROL MODE

RESUMEN DE VALORES MAXIMOS Y MINIMOS OBTENIDOS DURANTE LA SIMULACION

	X	CABEZA MAXIMA (FT)	CABEZA MINIMA (FT)	HMAX (FT)	HMIN (FT)	LONGITUD (MMS)	PRESION MAXIMA (PSI)	PRESION NORMAL (PSI)	PRESION MINIMA (PSI)
TRAMO 1	1								
	.000	2710.	2390.	2710.	2390.	.00	1056.72	1000.01	932.21
	.200	2709.	2399.	2701.	2390.	1.83	1056.61	1000.43	935.54
	.400	2734.	2407.	2697.	2390.	3.60	1056.49	1000.05	938.88
	.600	2739.	2416.	2693.	2390.	5.40	1063.39	999.67	942.22
	.800	2724.	2425.	2690.	2390.	7.20	1062.33	999.29	945.57
1.000	2729.	2433.	2686.	2390.	9.00	1064.29	998.91	948.92	
TRAMO 2	2								
	.000	2729.	2433.	2686.	2390.	9.00	1064.29	998.91	948.92
	.111	2725.	2433.	2683.	2391.	10.80	1062.86	995.07	948.90
	.222	2722.	2433.	2679.	2391.	12.60	1061.40	991.23	948.89
	.333	2718.	2433.	2676.	2391.	14.52	1060.09	987.39	948.88
	.444	2715.	2433.	2673.	2391.	16.36	1058.75	983.55	948.89
	.556	2711.	2433.	2669.	2391.	18.24	1057.43	979.71	948.91
	.667	2708.	2433.	2666.	2391.	20.08	1056.15	975.87	948.93
	.778	2705.	2433.	2663.	2392.	21.88	1054.90	972.03	948.97
	.889	2702.	2433.	2660.	2392.	23.72	1053.67	968.19	949.02
1.000	2699.	2434.	2657.	2392.	25.56	1052.47	964.35	949.07	
TRAMO 3	3								
	.300	2699.	2434.	2657.	2392.	25.56	1052.47	964.35	949.07
	.500	2624.	2362.	2655.	2392.	27.28	1023.55	932.94	921.28
1.000	2550.	2291.	2652.	2393.	29.00	994.66	901.52	893.49	
TRAMO 4	4								
	.000	2550.	2291.	2652.	2393.	29.00	994.66	901.52	893.49
	.250	2577.	2321.	2649.	2393.	30.83	1005.12	909.25	905.14
	.500	2604.	2351.	2647.	2393.	32.66	1015.61	916.99	916.79
	.750	2631.	2373.	2644.	2387.	34.50	1026.13	924.72	925.63
1.000	2658.	2393.	2642.	2377.	36.33	1036.68	932.45	933.38	
TRAMO 5	5								
	.000	2658.	2393.	2642.	2377.	36.33	1036.68	932.45	933.38
	.111	2633.	2361.	2639.	2368.	38.11	1026.96	919.99	920.91
	.222	2608.	2329.	2637.	2358.	39.88	1017.28	907.53	908.44
	.333	2584.	2297.	2635.	2349.	41.66	1007.62	895.07	895.97
	.444	2559.	2265.	2633.	2339.	43.48	997.99	882.61	883.49
	.556	2534.	2233.	2631.	2330.	45.21	988.29	870.15	871.02
	.667	2510.	2201.	2629.	2321.	46.98	978.61	857.69	858.55
	.778	2485.	2169.	2627.	2311.	48.77	969.26	845.23	846.07
	.889	2461.	2137.	2625.	2302.	50.59	959.74	832.77	833.60
1.000	2437.	2105.	2623.	2292.	52.32	950.24	820.31	821.13	
TRAMO 6	6								
	.300	2437.	2105.	2623.	2292.	52.32	950.24	820.31	821.13
	.500	2408.	2066.	2621.	2280.	54.65	937.71	809.01	804.81
1.000	2372.	2028.	2618.	2268.	56.98	925.22	787.71	788.50	
TRAMO 7	7								
	.000	2372.	2022.	2614.	2268.	58.98	925.22	787.71	788.50.
	.200	2372.	2015.	2617.	2257.	58.98	925.26	789.36	785.15
1.000	2373.	2005.	2615.	2247.	60.98	925.33	781.01	781.80	
TRAMO 8	8								
	.000	2373.	2005.	2615.	2247.	60.98	925.33	781.01	781.80
	.250	2340.	1911.	2613.	2237.	62.89	912.98	745.37	746.12

Q = 260 MGD

	.500	2217.	1822.	2612.	2226.	64.71	840.66	709.73	710.44
	.750	2124.	1750.	2610.	2216.	64.72	878.26	674.09	674.17
	1.000	2041.	1639.	2609.	2206.	64.64	796.29	636.45	639.28
TRAND 9	.000	2041.	1639.	2609.	2206.	64.64	796.29	636.45	639.00
	.500	2056.	1646.	2608.	2196.	70.55	871.98	640.90	641.62
	1.000	2072.	1651.	2606.	2186.	72.47	807.91	603.35	603.94
TRAND 10	.000	2072.	1651.	2606.	2186.	72.47	807.91	603.35	603.99
	.250	2171.	1741.	2605.	2176.	74.35	846.56	678.52	679.17
	.500	2270.	1832.	2604.	2166.	76.18	885.24	715.68	716.32
	.750	2369.	1922.	2604.	2156.	78.04	923.93	748.85	749.51
	1.000	2466.	2012.	2603.	2147.	79.93	962.65	784.01	784.73
TRAND 11	.000	2466.	2012.	2603.	2147.	79.93	962.65	784.01	784.73
	.500	2478.	1971.	2602.	2135.	87.23	950.76	768.13	768.79
	1.000	2477.	1930.	2601.	2124.	84.16	938.89	752.24	752.89
TRAND 12	.000	2477.	1930.	2601.	2124.	84.16	938.89	752.24	752.89
	.143	2432.	1946.	2600.	2115.	85.90	948.34	758.30	758.95
	.286	2456.	1962.	2600.	2106.	87.64	957.81	764.36	765.02
	.429	2461.	1977.	2600.	2096.	89.38	967.30	770.41	771.08
	.571	2505.	1990.	2599.	2087.	91.12	976.81	776.47	777.15
	.714	2529.	2008.	2599.	2078.	92.87	986.34	782.53	783.22
	.857	2554.	2024.	2599.	2069.	94.61	995.89	788.59	789.30
	1.000	2579.	2039.	2598.	2060.	96.35	1005.47	794.65	795.37
TRAND 13	.000	2578.	2039.	2598.	2060.	96.35	1005.47	794.65	795.37
	.600	2547.	2018.	2598.	2050.	98.28	1001.61	788.33	787.04
	1.000	2555.	1997.	2598.	2039.	100.21	996.58	778.02	778.72
TRAND 14	.000	2555.	1997.	2598.	2039.	100.21	996.58	778.02	778.72
	.200	2578.	2007.	2598.	2027.	102.54	1005.43	782.17	782.88
	.400	2601.	2018.	2598.	2015.	104.87	1014.36	786.32	787.03
TRAND 15	.000	2601.	2018.	2598.	2015.	104.87	1014.36	786.32	787.03
	.111	2596.	1998.	2598.	2005.	106.70	1004.71	776.86	777.57
	.222	2572.	1969.	2598.	1995.	108.54	1003.08	767.41	768.10
	.333	2558.	1945.	2598.	1986.	110.37	997.46	757.95	758.63
	.444	2543.	1921.	2598.	1976.	112.21	991.84	748.49	749.17
	.554	2529.	1897.	2599.	1966.	114.05	986.28	739.03	739.70
	.667	2515.	1872.	2599.	1957.	115.88	980.72	729.58	730.24
	.778	2500.	1848.	2598.	1947.	117.72	975.17	720.12	720.77
	.889	2486.	1824.	2600.	1937.	119.55	969.64	710.66	711.30
	1.000	2472.	1800.	2600.	1928.	121.39	964.12	701.20	701.83
TRAND 16	.000	2472.	1800.	2600.	1928.	121.39	964.12	701.20	701.83
	.500	2482.	1797.	2600.	1915.	123.72	968.13	700.28	700.88
	1.000	2453.	1795.	2601.	1903.	126.05	972.22	699.29	699.92
TRAND 17	.000	2453.	1795.	2601.	1903.	126.05	972.22	699.29	699.92
	.500	2464.	1774.	2602.	1893.	128.01	968.62	693.41	692.03
	1.000	2474.	1754.	2602.	1882.	129.98	965.04	683.53	684.14
TRAND 18	.000	2474.	1754.	2602.	1882.	129.98	965.04	683.53	684.14
	.143	2464.	1765.	2603.	1872.	131.81	973.26	687.79	688.40
	.286	2517.	1776.	2604.	1863.	133.65	981.49	692.04	692.66
	.429	2539.	1787.	2605.	1853.	135.49	990.04	696.29	696.92
	.571	2560.	1798.	2605.	1843.	137.33	998.39	700.55	701.18
	.714	2581.	1809.	2606.	1834.	139.16	1006.74	704.80	705.44

	.857	2603.	1820.	2607.	1829.	143.00	1015.15	709.06	709.70
	1.000	2629.	1831.	2600.	1814.	142.89	1023.55	713.31	713.96
FRANO 19	.000	2624.	1831.	2608.	1819.	142.88	1023.55	713.31	713.96
	.193	2627.	1823.	2609.	1804.	144.84	1029.46	709.48	710.53
	.333	2630.	1813.	2610.	1793.	146.80	1025.77	706.45	707.10
	.500	2635.	1804.	2611.	1783.	148.89	1026.88	703.01	703.67
	.667	2636.	1795.	2613.	1772.	150.88	1028.00	699.58	700.23
	.833	2639.	1785.	2614.	1762.	152.88	1029.13	696.15	696.80
	1.000	2642.	1775.	2615.	1751.	154.88	1030.27	692.71	693.37
FRANO 20	.000	2642.	1778.	2615.	1751.	154.88	1030.27	692.71	693.37
	.193	2634.	1759.	2616.	1742.	156.83	1027.21	685.52	686.18
	.386	2626.	1741.	2617.	1732.	158.82	1024.16	678.34	678.99
	.579	2618.	1723.	2618.	1723.	160.21	1021.11	671.15	671.80
	.771	2610.	1704.	2620.	1713.	162.00	1018.08	663.96	664.61
	.964	2601.	1686.	2621.	1704.	163.79	1015.07	656.77	657.41
	1.000	2595.	1667.	2622.	1694.	165.58	1012.07	649.58	650.21
FRANO 21	.000	2587.	1649.	2623.	1685.	167.37	1009.08	642.39	643.02
	.500	2623.	1671.	2625.	1675.	169.53	1023.00	651.23	651.87
	1.000	2659.	1694.	2627.	1662.	171.70	1038.91	660.07	660.72
FRANO 22	.000	2659.	1694.	2627.	1662.	171.70	1038.91	660.07	660.72
	.196	2657.	1682.	2628.	1653.	173.42	1036.29	655.38	656.03
	.395	2650.	1670.	2629.	1644.	175.14	1033.68	650.69	651.33
	.593	2654.	1658.	2631.	1635.	176.87	1031.08	646.00	646.64
	.790	2653.	1646.	2632.	1626.	178.59	1028.48	641.31	641.95
	.988	2651.	1634.	2634.	1617.	180.31	1025.89	636.62	637.25
	1.000	2656.	1622.	2635.	1607.	182.04	1023.31	631.93	632.56
	.193	2648.	1610.	2636.	1598.	183.76	1020.73	627.24	627.87
	.386	2647.	1598.	2638.	1589.	185.48	1018.16	622.55	623.17
	.579	2645.	1586.	2639.	1580.	187.21	1015.59	617.86	618.48
	.771	2644.	1574.	2641.	1571.	188.93	1013.03	613.17	613.78
	.964	2642.	1562.	2642.	1562.	190.65	1010.47	608.48	609.09
	1.000	2641.	1550.	2644.	1553.	192.38	1007.92	603.79	604.40
	.193	2639.	1538.	2645.	1544.	194.13	1005.37	599.10	599.70
	.386	2638.	1526.	2647.	1535.	195.82	1002.82	594.41	595.01
	.579	2637.	1514.	2649.	1526.	197.55	1000.28	589.72	590.33
	.771	2635.	1502.	2650.	1516.	199.27	1027.75	585.03	585.62
	.964	2634.	1490.	2652.	1507.	200.99	1025.21	580.34	580.92
	1.000	2637.	1478.	2653.	1498.	202.72	1022.68	575.65	576.23
	.193	2631.	1465.	2655.	1489.	204.44	1020.16	570.96	571.53
	.386	2630.	1453.	2656.	1480.	206.16	1025.63	566.27	566.84
	.579	2628.	1441.	2658.	1471.	207.89	1025.11	561.58	562.14
FRANO 23	.000	2628.	1441.	2658.	1471.	207.89	1025.11	561.58	562.14
	.500	2640.	1460.	2660.	1480.	209.89	1029.63	561.50	561.86
	1.000	2652.	1480.	2662.	1490.	211.89	1034.15	561.02	561.58
FRANO 24	.000	2652.	1480.	2662.	1490.	211.89	1034.15	561.02	561.58
	.193	2638.	1463.	2663.	1480.	213.44	1029.31	551.89	552.44
	.386	2627.	1443.	2664.	1471.	215.40	1024.47	542.75	543.29
	.579	2614.	1426.	2666.	1462.	217.22	1019.48	533.61	534.15
	.771	2602.	1406.	2668.	1453.	219.00	1014.41	524.48	525.00
	.964	2590.	1383.	2670.	1443.	220.77	1009.48	515.34	515.86
	1.000	2577.	1367.	2672.	1433.	222.55	1004.16	506.21	506.71
FRANO 25	.000	2545.	1276.	2671.	1399.	224.33	1000.34	497.07	497.67

	1.000	2645.	1276.	2673.	2309.	229.25	3002.38	697.07	697.57
	.167	2659.	1250.	2675.	2379.	228.75	997.69	699.96	690.45
	.333	2673.	1229.	2677.	2469.	228.78	995.43	682.85	683.13
	.500	2686.	1221.	2679.	2509.	230.10	992.98	675.73	676.21
	.667	2690.	1203.	2680.	2543.	232.03	993.52	668.62	669.09
	.833	2693.	1185.	2682.	2577.	233.95	988.15	661.50	661.97
	1.000	2527.	1166.	2684.	2575.	235.66	985.58	654.39	654.86
TRAMO 06									
	.167	2527.	1166.	2689.	2573.	235.08	985.58	654.39	654.86
	.333	2495.	1116.	2685.	2513.	237.80	970.93	638.94	635.37
	1.000	2452.	1066.	2686.	2302.	239.88	956.27	615.48	615.90
TRAMO 27									
	.167	2452.	1066.	2689.	2302.	239.88	956.27	615.48	615.90
	.333	2424.	1072.	2690.	2297.	242.21	963.69	617.86	618.00
	1.000	2424.	1077.	2692.	2277.	244.54	971.71	619.70	620.12
TRAMO 28									
	.167	2462.	1077.	2693.	2277.	244.54	971.71	619.70	620.12
	.333	2474.	1094.	2693.	2243.	246.35	963.22	606.85	607.25
	.500	2488.	1011.	2695.	2258.	248.16	954.74	594.02	594.39
	.667	2499.	978.	2697.	2249.	249.96	946.25	581.14	581.53
	.833	2494.	945.	2698.	2239.	251.77	937.75	568.29	568.66
	.916	2313.	912.	2700.	2237.	253.58	929.26	555.44	555.80
	.957	2311.	879.	2702.	2220.	255.39	920.76	542.59	542.97
	1.000	2335.	846.	2703.	2211.	257.20	912.25	529.74	530.07
TRAMO 29									
	.167	2335.	846.	2703.	2211.	257.20	912.25	529.74	530.07
	.333	2322.	799.	2705.	2201.	258.94	898.58	511.39	511.70
	.500	2274.	752.	2706.	2197.	261.68	883.90	493.04	493.33
	.667	2230.	705.	2708.	2149.	264.42	869.72	474.69	474.96
	.833	2184.	658.	2709.	2174.	266.16	855.53	456.34	456.59
	.916	2177.	611.	2711.	2165.	268.90	841.23	437.98	438.22
	.957	2121.	564.	2712.	2155.	267.64	827.12	419.63	419.85
	.974	2074.	517.	2714.	2146.	265.38	812.60	401.28	401.48
	.989	2044.	470.	2715.	2137.	271.12	794.59	382.93	383.21
	1.000	2031.	422.	2716.	2128.	272.86	783.59	364.58	364.75

PRESION MAXIMA = 1063.1 PSI EN EL TRAMO 2 EN X = 1.00000 EL TIEMPO = 599.95 SEG

PRESION MINIMA = 164.6 PSI EN EL TRAMO 29 EN X = 1.00000 EL TIEMPO = .00 SEG

ERIS) LOMAS) SE DISPARARON) EN EL TIEMPO = 593.5 SEG



SEOF
SEOF IGNITE - IN CONTROL MCD
DATA IGNITE - IN CONTROL MCD

SEOF
SEOF IGNITE - IN CONTROL MCD
DATA IGNITE - IN CONTROL MCD

BIBLIOGRAFIA

- 1) Ames F. William
Nonlinear Ordinary Differential Equations - in Transport Process
Academic Press 1968
- 2) Bell Sill H.
Petroleum Transportation handbook
McGraw Will 1963
- 3) Bird B.R., Stewart E.W., Lightfort N.E.
Transport Phenomena
John Wiley and Sons, Inc.
- 4) Crane
Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe
Technical Paper No. 410
- 5) Fox J.A.
Pressure Transients in Pipe Networks - A Computer Solution
International Conference on Pressure Surges 6th - 8th September 1972
- 6) Franks G.E. Roger
Modeling and Simulation in Chemical Engineering
Wiley - Interscience 1972
- 7) Gault W.F.
Compensating Acceleration Head Improves Pump - Suction
The oil and gas J. May 15, 1978.
- 8) Hamif Chaudry
Applied Hidraulic Transients
Van Nostrand Reinhold Co
- 9) Holland A.F., Chapman S.F.
Pumping of Liquids
Reinhold Publishing Co. 1966
- 10) Hara T., Yoshikai T., Hayashi H., Sugaya S., Susuki O., Fukuzawa K.,
Kondo M., Tobo K.
Test Results Validate Computer Simulation - of Pipeline Surges
The Oil and Gas J. Dec. 22, 1975

- 11) Hein Mike
Pipeline Surge Analysis No. 1 y No. 2 Oil and Gas J. Aug. 10 y 17,
1981
- 12) Ichikawa T., Yamaguchi K.
Oil Hammer and Transient Response in Oil Pipeline
International Conference on Pressure Surge 6th - 8th September 1972
- 13) Intercomp Resource Development and Engineering Inc.
Pipeline Simulation, Design and Control
July, 1980 Mexico City
Presented For Instituto Mexicano del Petróleo
- 14) Joseph I., Hamill A.F.
Start - Up Pressures in Short Pump Discharge Lines
Journal of the Hydraulics Div. July, 1972
- 15) Kay M.J., Nedderman M.R.
An Introduction to Fluid Mechanics and Heat - Transfer
Cambridge University Press 1974
- 16) Kalkwijk J.P. and Kranenburg C.
Cavitation in Horizontal Pipelines due to Waterhammer
Journal of the Hidraulics Div. Oct. 1971
- 17) Kaplan M.
Analyzing Pipeline Transients By Method of Characteristics
The Oil and Gas J. Jan. 15, 1968
- 18) Kaplan M., Belonogoff G., Wentworth C.R.
Economic Methods for Modeling Hydraulic Transient Simulation
Internacional Conference of Pressure Surge 6th - 8th September 1972
- 19) Kreyszing E.
Matemáticas Avanzadas para Ingeniería
Ed. Limusa 1978
- 20) Kremers J.
Overcoming the Forces of Waterhammer
Hydrocarbon Processing Vol. 62
- 21) Mendiluce Rosch E.
Una Protección Eficaz contra el Golpe de Ariete en las Instalaciones
Industriales
Ingeniería Química Julio 1978

- 22) Parmakian J.
Waterhammer Analysis
Dover Publications, Inc. 1963
- 23) Padmanabhan M.
Wave Propagation Through Flowing Gas-Liquid-Mixtures in Long Pipelines.
University Microfilms Int. 1982
- 24) Ross L.S.
Differential Equations
John Wiley and Sons, Inc. 1974
- 25) Ross R.R.
Applying Centrifugal Pumps to Pipeline Service
The Oil and Gas J. April 4, 1983
- 26) Streeter V.L.
Numerical Methods for Calculation of Transient Flow
International Conference of Pressure Surge
6th - 8th September 1972
- 27) Streeter V.L., Kyllie E.B.
Fluid Transients
Mc Graw Hill 1961
- 28) Takahashi K., Ikee S., Takahashi Y.
Transient Phenomena Caused by Directional Control Valve in Hydraulic Pipeline
Bulletin of the J.S.M.E. Vol. 16, No. 102, 1973
- 29) Techo R.
Pipeline Hydraulic Surges Are Shown in Computer Simulations
The Oil and Gas J. Nov. 22, 1976
- 30) Walker S.J.
Perturbation Solutions for Steady One-Dimensional Waterhammer Waves
Transactions of the ASME June 1975
- 31) Watters Z.G.
Modern Analysis and Control Unsteady Flow in Pipeline
Ann Arbor Science 1980