



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ZARAGOZA"

"ANALISIS HIDRAULICO DE LAS
OPERACIONES DE LLENADO Y
VACIADO DE CRUDO, EN
CAVIDADES MINADAS
(DOMOS SALINOS)"

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A N :

ALMA DELIA GARCIA RUIZ

GERARDO FRANCISCO ESPINOZA RABANAL

DIRECTOR DE TESIS: ING. RENE DE LA MORA MEDINA



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

JULIO 1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

INTRODUCCION	1
--------------	---

CAPITULO 2

GENERALIDADES	3
2.1 METODOS DE CONSTRUCCION DE UN DOMO SALINO	5
2.2 METODOS DE FORMACION	7
2.2.1 FORMACION DIRECTA	7
2.2.2 FORMACION INVERSA	7
2.3 FORMACION DE LA CAVIDAD (FASE LIXIVIACION)	8
2.3.1 GENERACION DE LA ZONA DE CAPTACION	8
2.3.2 DESARROLLO DE LA CAVIDAD	8
2.3.3 VARIABLES DE DISEÑO	9
2.4 OPERACION DEL MINADO POR SOLUCION	10
2.4.1 CONDICIONES PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS	12
2.4.2 VARIABLES A CONTROLAR	13
2.4.3 PARAMETROS DE OPERACION	14
2.5 FASE EXPLOTACION DE UN DOMO SALINO	17

CAPITULO 3

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL ANALISIS HIDRAULICO	23
--	----

3.1	ECUACION DE CONTINUIDAD	24
3.2	ECUACION DE BERNOULLI	29
3.2.1	ENERGIA DEL FLUIDO	30
3.2.2	ENERGIA QUE INTERCAMBIA EL FLUIDO CON LOS ALREDEDORES	32
3.2.3	ENERGIA DISIPADA POR FRICCION	35
3.2.4	PERDIDAS POR FRICCION EN ACCESORIOS, VALVULAS Y TUBERIA	37
3.3	ANALISIS HIDRAULICO EN REGIMEN TRANSIENTE	49
3.3.1	CAUSAS DEL REGIMEN TRANSIENTE	50
3.3.2	DESCRIPCION DEL FENOMENO 'GOLPE DE ARIETE'	53
3.3.3	ECUACIONES DE MOVIMIENTO Y CONTINUIDAD PARA REGIMEN TRANSIENTE	54

CAPITULO 4

	DESCRIPCION DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	68
4.1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	69
4.2	CAPACIDADES Y TIPOS DE FLUIDO	73
4.3	FILOSOFICA OPERACIONAL	77

CAPITULO 5

	ALGORITMO PARA EL ANALISIS HIDRAULICO DE ALMA- CENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN DOMOS SALINOS	82
--	--	----

5.1	ALGORITMO PARA EL ANALISIS HIDRAULICO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO UBICADO EN TUZANDEPETL (VERACRUZ)	84
5.2	ECUACIONES HIDRAULICAS PARA EL PROGRAMA DE SIMULACION	86
5.3	ECUACIONES DESCRIPTIVAS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CAVIDAD	92

CAPITULO 6

	RESULTADOS DEL ANALISIS HIDRAULICO DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN DOMOS SALINOS	101
--	--	-----

CAPITULO 7

	INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	130
--	---	-----

APENDICE A

	LISTADOS DE LAS OPERACIONES DE LLENADO Y VACIADO DE CADA HIDROCARBURO EN DOMOS SALINOS (FLUJOS MAXIMOS DE OLEODUCTOS Y FLUJOS NORMALES A CADA CAVIDAD.	137
--	--	-----

	BIBLIOGRAFIA	191
--	--------------	-----

INTRODUCCION.

Debido a la creciente necesidad de contar con reservas de energéticos estratégicos como el petróleo, a nivel mundial se han desarrollado nuevas tecnologías de almacenamiento subterráneo, siendo una de las más utilizadas hasta el momento, la perforación de cavidades en domos salinos.

En México se ha demostrado la importancia de este tipo de almacenamiento, ya que en las refineries es apropiado contar con depósitos de gran magnitud, para asegurar la operación continua cuando se presenten problemas en la explotación de pozos, o fallas en los ductos. También sirven para regular la operación en caso de problemas en las mismas refineries al existir bajas o incrementos considerables en el consumo.

Por lo anterior, el desarrollo de proyectos de almacenamiento de hidrocarburos en domos salinos es de gran relevancia. A la fecha existen varios proyectos, los cuales se encuentran en la fase de lixiviación o formación de las cavidades, estando pendiente la fase de explotación; por lo que, el estudio de las operaciones de vaciado y llenado de crudo, se hace imprescindible, así como, la predicción de las condiciones en esta fase.

Delimitando el problema, se iniciará con la descripción esquemática del sistema de extracción, almacenamiento y manejo de crudo en la red de tubería crudo - salmuera ubicado en Tuzandépetl (Veracruz); para un posterior análisis del grupo de cavidades, y así predecir el perfil de presiones en los puntos más significativos del sistema de almacenamiento; mediante un algoritmo, el cual implica un reordenamiento de las ecuaciones hidrostáticas y de flujo de fluidos, además de considerar los datos reales o aproximados de las características de instalación y geográficas.

CAPITULO 2.

GENERALIDADES

El almacenamiento en Domos Salinos, es el que se ha generalizado en el mundo. por y su fácil manejo para el desarrollo de cavidades almacenadoras de productos; ya que una de las ventajas que ofrece consiste en la variedad de productos que pueden ser almacenados. Cabe hacer la aclaración que en el presente trabajo el término Domos Salinos se refiere no al yacimiento salino cuya forma es un domo, sino al espacio practicado con fines de almacenamiento dentro del yacimiento.

El procedimiento para efectuar tal desarrollo está basado en la solubilidad de las sales en el agua. La operación se basa en perforar un pozo hasta el fondo de la cavidad proyectada; se coloca una tubería de revestimiento que se cementa desde la superficie hasta unos metros abajo de la cima de sal, cubriendo así totalmente dicha cima, además de toda la columna de roca sedimentaria insoluble. Posteriormente se introduce una tubería anular con la cual se inyecta agua dulce y se extrae la sal en forma de solución.

La entrada de agua dulce y la salida de agua saturada con sal determinan las cantidades de sal que se van extrayendo durante este proceso, con lo cual se puede conocer el volumen del hueco que se forma.

La cavidad hecha en el yacimiento de sal debe permanecer siempre llena, por lo que, cuando se va a almacenar un hidrocarburo se hace por desplazamiento de la salmuera contenida en el depósito; para la recuperación del producto almacenado se inyecta salmuera que desplaza al producto hacia la superficie.

En la mayoría de los estudios sobre almacenamiento subterráneo, hay una cierta limitación de tales productos, ya que los materiales económicamente factibles de almacenar deben tener las siguientes características:

- Ser gases, líquidos y sólo en casos especiales sólidos (materiales radiactivos de desecho).
- Muy ligeramente solubles o totalmente insolubles en agua dulce o salada.
- Que no reaccionen con la roca en la que van a estar confinados.
- Altamente compresibles, en el caso de los gases.
- Tener una alta presión de vapor.

2.1 METODOS DE CONSTRUCCION DE UN DOMO SALINO.

Es necesario tener en cuenta que para planear la formación de las cavidades salinas, se deben reunir determinados factores para asegurar el desarrollo óptimo de la misma. Tales requisitos son:

- a. Selección de la Sección de Sal. Esta deberá tener el suficiente espesor y pureza, que permita el desarrollo de la cavidad sin restricciones u obstáculos y evitar así problemas que pongan en peligro el trabajo una vez encausado.
- b. Cierre Perfecto. Debe tenerse cierre perfecto entre paredes, fondo, techo, tubería externa y válvulas superficiales. Para lograrlo debe haber homogeneidad de roca impermeable en la masa, en las paredes del pozo, fondo, techo y estrato superior. Debe ser resistente e insoluble, que permita la hermeticidad de la cavidad.
- c. Profundidad Apropriada. Es necesario tener una profundidad apropiada, entre la cima de la cavidad y la superficie del terreno, de suficiente espesor, que permita la hermeticidad de dicha cavidad dentro del yacimiento.

d. Sección Salina, Compacta y Estable. Para evitar en lo posible una posterior reestructuración de la cavidad.

Por otra parte, se debe disponer de una fuente de suministro de agua dulce que permita el desarrollo de la cavidad, junto con las instalaciones que faciliten el almacenamiento y recuperación del producto.

Para optar en la selección más conveniente de un intervalo y proceder al desarrollo de la cavidad, es necesario tener el pleno conocimiento de que las condiciones estatigráficas sean favorables, para esto es indispensable una información lo más completa posible sobre los datos de perforación.

El objetivo de un planeamiento de perforación es el de afinar los datos obtenidos mediante los estudios preliminares y así, el de proporcionar muestras para evaluar las condiciones geológicas profundas y definir la mejor localización de la obra. Ver figura (2.1).

En el caso de que el área explorada reúna las características adecuadas se procede a perforar un pozo hasta el fondo de la cavidad proyectada y se coloca una tubería de revestimiento que se cementa desde la superficie hasta unos metros abajo de la cima de sal. Ya efectuado esto, se inicia el desarrollo de la cavidad por medio del lavado, que se logra bajando una sarta de tubería que llegue al fondo del agujero ya perforado. A esta sarta se le da el nombre de tubería de inyección, puesto que por ésta se bombeará el agua dulce, hacia el fondo del pozo para el lavado de la sal; el agua salada o salmuera regresa a la superficie.

Si el área explorada no reúne las características adecuadas se procede a realizar el estudio preliminar en otras áreas factibles.

2.2 METODOS DE FORMACION.

Los métodos para el desarrollo de la cavidad podrán ser de dos formas: directo o inverso. El método elegido es aquel que ofrezca mayores ventajas, en un caso específico; sin embargo, por la forma de la cavidad almacenante y por tener mayor aceptación el método directo, ya sea por una o por varias etapas, es el más empleado sin eliminar la idea de emplear ambos métodos en el desarrollo de la cavidad.

2.2.1 METODO DE FORMACION DIRECTO.

En el método directo se inyecta el agua dulce por la tubería interna y la salmuera producida se descarga a la superficie por el espacio anular, ver figura (2.2), donde se muestra el procedimiento de inyección y la estructura resultante.

Algunas de las características de este método, son las siguientes:

- La forma obtenida es más ventajosa, en cuanto a que se tiene mayor rapidez de lavado.
- Los derrumbes no afectan la circulación.
- Mayor estabilidad estructural.

2.2.2 METODO DE FORMACION INVERSO.

Para el método inverso la circulación se hace inyectando el agua dulce por el espacio anular, efectuándose la descarga de la salmuera producida por la tubería interna, como se ilustra en la figura (2.3).

Las características de este método son:

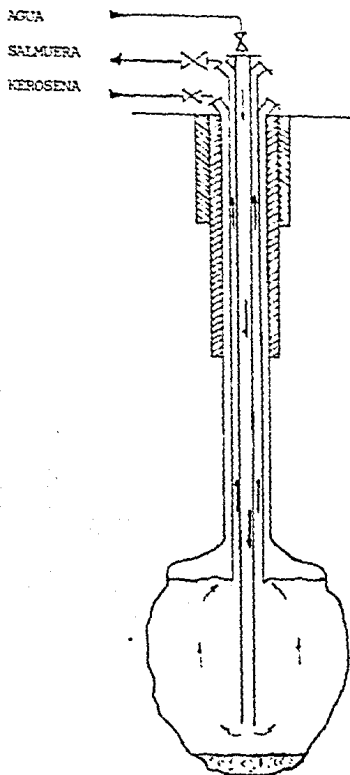


Fig. 7.2. Método de Formación Directo

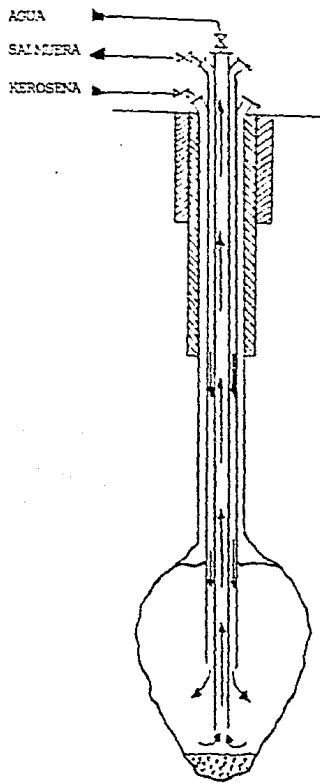


Fig. 2.3 Método de Formación Inverso

- Se tiene mayor rapidez en el desarrollo de la cavidad.
- La forma de la cavidad obtenida no es la más estable desde el punto de vista estructural.
- Los derrumbes causan frecuentes taponamientos durante la circulación.

La profundidad del pozo dentro de la sal dependerá del del sentido en que avance la disolución de la misma, ya que si la formación de la cavidad progresa del fondo hacia arriba será necesario que el pozo alcance la profundidad máxima de la cavidad. En cambio, si la disolución avanza hacia abajo es necesario, entonces, que el pozo alcance unos metros más que la profundidad escogida para la cima de la cavidad. La primera es la más ventajosa, ya que permite un mejor control del proceso de disolución, evitando que se depositen sedimentos insolubles; aunque éstos en realidad son imposibles evitarlos, pues la masa salina no es homogénea y por lo tanto, habrá regiones donde la solubilidad disminuye formando salientes en la pared de la cavidad, rodeadas de zonas de mayor solubilidad, las que tienden a crecer hasta provocar derrumbes de las salientes menos solubles. *

2.3 FORMACION DE LA CAVIDAD. (FASE LIXIVIACION).

La generación de la cavidad comprende básicamente dos etapas, las cuales se describen a continuación:

2.3.1 GENERACION DE LA ZONA DE CAPTACION.

El receptáculo de captación de insolubles es una zona que sirve como depósito de las impurezas que contiene la masa salina. Estos materiales caen por la diferencia de densidades al fondo de la cavidad creada.

La formación de este receptáculo se logra mediante la inyección de agua dulce por circulación directa. El punto se localiza a la profundidad deseada de la cavidad, con el extremo inferior de la tubería de mayor diámetro de la sarta, a una distancia del fondo igual a la altura de la zona de captación de insolubles.

El espacio anular entre la última tubería cementada y la tubería colgada de mayor diámetro se llena de kerosena o algún otro hidrocarburo, de menor densidad que la salmuera y que además no sea miscible con ella, para evitar la disolución de la sal y que la salmuera ascienda por este conducto.

Para impedir la disolución de la parte superior de la cavidad, durante su generación, es conveniente mantener una inyección constante de kerosena a través del espacio anular, entre la tubería cementada y la tubería colgada de mayor diámetro. La secuencia del proceso se muestra en la figura (2.4).

2.3.2 DESARROLLO DE LA CAVIDAD

Terminada la zona de captación de insolubles se inicia el desarrollo de la cavidad, la cual se lleva a cabo mediante una secuencia de operaciones constituidas principalmente por la elevación paulatina de la sarta de tuberías e invertir periódicamente el proceso de inyección; esta inversión en la técnica de circulación es necesaria a fin de evitar el taponamiento de las tuberías por cristalización de la sal, así como, la acumulación de materiales insolubles que intervienen en el lavado. Al elevar las tuberías se sube el punto de agua dulce, con lo cual se establece una disolución de los estratos inferiores hacia los superiores.

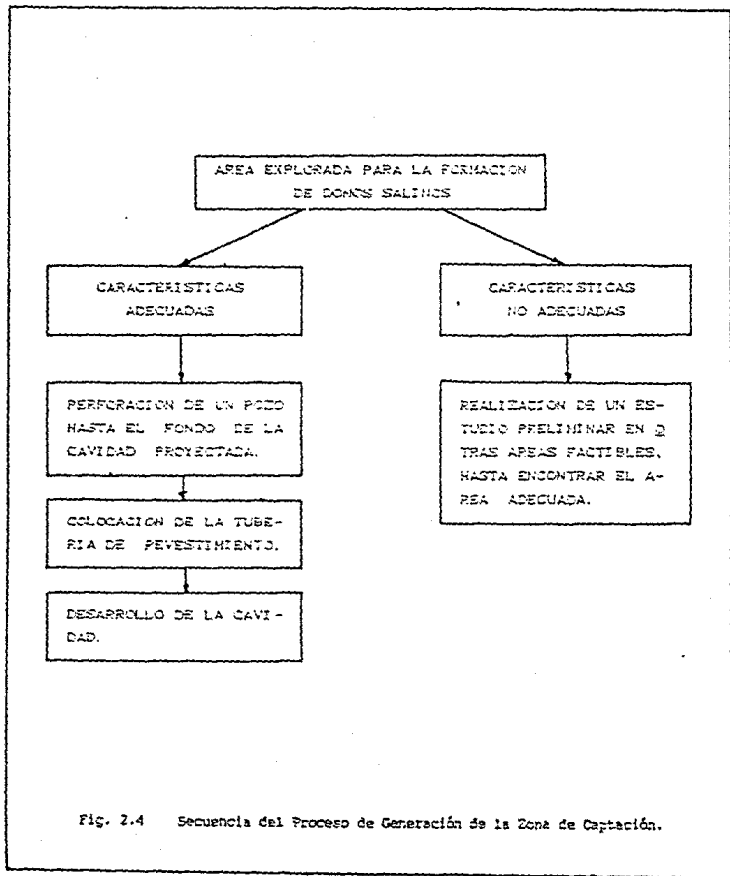


Fig. 2.4 Secuencia del Proceso de Generación de la Zona de Captación.

La forma de la cavidad resultante dependerá de la técnica de circulación empleada durante el proceso de disolución. Puede ser cilíndrica o de botella cuando el método es directo y cónica si el método es inverso.

El uso de las cavidades minadas por solución para almacenamiento subterráneo presenta diferentes problemas de diseño dependiendo del tipo de material que se almacenara. Cada tipo de material (sólido, líquido o gaseoso) tiene efectos particulares en el comportamiento reológico de la roca salina. Este comportamiento se presenta, por lo general, cuando la cavidad opera por un largo período.

2.3.3 VARIABLES DE DISEÑO.

Las principales variables de diseño a controlar cuando se almacena un líquido son:

- Dimensiones de la cavidad.
- Profundidad de la cavidad. En el caso de múltiples cavidades:
 - Espaciamiento de las cavidades.
 - Distribución de las cavidades.

2.4 OPERACION DEL MINADO POR SOLUCION.

Las operaciones de minado por solución se han analizado desde el punto de vista ingenieril y económico, para predecir: el desarrollo de la cavidad, el cálculo de la presión de operación, el consumo de energía y determinación de costos totales. Se han comparado varios parámetros de operación y métodos de desarrollo, para el caso de la formación de una cavidad con un volumen teórico de un millón de barriles.

Las operaciones de minado por solución, son generalmente, emprendidas para lograr estos dos objetivos:

1. Desarrollar un espacio para el almacenamiento subterráneo de productos o de dispositivos de desecho.
2. Para la producción de salmuera que se utiliza en la producción de sal o en plantas químicas.

Las cavidades deben ser diseñadas para operar en un periodo de tiempo largo y para asegurar que el objetivo propuesto pueda ser satisfecho. Existen numerosas posibilidades en términos de la combinación de parámetros y métodos de operación, lo cual da como resultado diferentes alternativas para el minado por solución. El diseño particular requiere del conocimiento de todas las posibilidades para alcanzar adecuadamente los objetivos globales.

Se han emprendido considerables trabajos para estudiar el desarrollo de la cavidad y para la disolución de la sal, con el fin de proveer criterios y guías para la planeación de las operaciones de minado por solución; por medio del estudio, experiencias y el análisis de operaciones anteriores, las compañías operadoras han desarrollado curvas de comportamiento que describen los parámetros de operación, para la producción de salmuera y el desarrollo de la cavidad.

El diseño de operaciones para el minado por solución, involucra la selección de las posibles combinaciones en las condiciones de operación y las configuraciones de la cavidad, que satisfagan los objetivos para un sistema con características determinadas.

Para el almacenamiento de hidrocarburos, se tiene como objetivos: (Puede ser uno o la combinación de los siguientes puntos).

1. El desarrollo de un cierto volumen de almacenamiento en un tiempo dado.
2. El desarrollo de un cierto volumen de almacenamiento en un tiempo mínimo.
3. El desarrollo de un cierto volumen de almacenamiento en un costo mínimo.
4. El desarrollo de un cierto volumen de almacenamiento con el menor gasto de energía.

2.4.1 CONDICIONES PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS.

Para lograr los objetivos del almacenamiento de hidrocarburos es necesario, satisfacer ciertas condiciones; las siguientes pueden considerarse como las más comunes:

1. La forma de la cavidad resultante se conforma con criterios específicos, dictados por los requerimientos de integridad estructural o por la funcionalidad de la cavidad. Frecuentemente, las condiciones de forma se expresan en términos del radio máximo permisible aunado a la altura máxima de la cavidad, o un espesor en la parte superior de ella y una distancia con respecto a otras cavidades cercanas. Para el caso de cavidades de almacenamiento, las condiciones de forma tienen que ser satisfechas durante el tiempo de vida del proyecto, teniendo en cuenta que los ciclos de llenado y desalojo pueden causar disolución adicional.
2. La salinidad de la salmuera debe estar dentro de cierto valor. Cuando la salmuera se usa como una corriente química, la salinidad debe ser mayor a un mínimo permisible.
3. Las operaciones de bombeo deben restringirse bajo

cierto límite de presión o energía máxima. Este generalmente será el caso para cuando existan facilidades en el desarrollo de cavidades adicionales. Las limitaciones se pueden imponer en el flujo de circulación debido a problemas causados por excesivas vibraciones de tuberías, cavitación o erosión causada por la turbulencia.

4. Con la tendencia actual de incremento en los costos de energía, existe la posibilidad de mejorar la eficiencia expresándola como un mínimo uso de energía para el desarrollo de un volumen de almacenamiento dado.

2.4.2 VARIABLES A CONTROLAR.

La combinación de objetivos y condiciones da como resultado la definición completa del diseño del problema. Ya definido el problema, su selección involucra dar una solución al conjunto de variables controlables o la combinación que permita aproximarse a los objetivos lo más cerca posible. En una operación de minado por solución, las variables controlables generalmente son las siguientes:

- A. Método de circulación del agua; directo o inverso.
- B. Cantidad de agua de circulación.
- C. Espesor de la sal expuesta a la disolución.
- D. Profundidad de la tubería con respecto al fondo de la cavidad y distancia entre inyección de agua y producción de salmuera.
- E. Tamaños de tuberías, recubrimientos y líneas de flujo superficial.
- F. La distancia entre la estación de bombeo, cavidad y descarga de salmuera.

En la mayoría de los casos no podemos considerar a todos los puntos como variables independientes, pero como se mencionó arriba, su variación será limitada por restricciones específicas.

2.4.3 PARAMETROS DE OPERACION.

El comportamiento del minado por solución se expresa por medio del crecimiento de la cavidad, el cual puede expresarse como la cantidad de sal extraída por unidad de tiempo. En términos de parámetros de operación, esto se puede calcular por la cantidad de circulación y la salinidad de la salmuera producida. Su interrelación se puede sintetizar en los siguientes puntos:

- A. Para un tamaño de cavidad dada, la saturación de salmuera producida es inversamente proporcional a la cantidad de circulación de agua.
- B. Para una cantidad dada de circulación de agua, la saturación de la salmuera producida se incrementa cuando aumenta el volumen de la cavidad o la altura de la sal.
- C. Para un volumen dado de la cavidad, la localización de los puntos de inyección y producción determinan la relación exacta entre la cantidad de agua y su saturación.
- D. La combinación entre la cantidad de agua de circulación y la posición de inyección y producción, determinan el desarrollo de la forma de la cavidad.

De las variables controlables las tres primeras, son factores controlantes mayores, para determinar la salinidad

de la salmuera producida. Las últimas tres variables, aunadas a la cantidad de circulación de agua y saturación de salmuera, determinan la presión requerida para bombear el fluido a través del sistema y por lo tanto, la cantidad de energía consumida en el proceso. Estos parámetros también controlan la inversión de capital necesaria para una nueva instalación.

Los modelos de disolución incorporan los efectos de la velocidad del fluido y la inclinación de la superficie de disolución. Para un caso dado y cierta cantidad de agua de circulación, el modelo calcula la cantidad de sal disuelta en varios niveles de la cavidad, la salinidad de la salmuera y el radio promedio de la cavidad en ese nivel. Los totales en cuanto al volumen de la cavidad, producción de sal y sal disuelta se calculan como una función del tiempo y se despliegan a intervalos constantes.

Diversos autores han tratado de utilizar modelos para demostrar la compleja situación en el interior de la cavidad. La experiencia prueba que los modelos sofisticados y poco manejables no son universales.

El ing. Dubois (ref. no. 20) ha desarrollado un modelo práctico, que toma en cuenta las características de concentración de los fluidos que entran y salen de la caverna.

Los parámetros siguientes explican este razonamiento:

ENTRADA: (medidas a la misma temperatura)

- V_c : Volumen de sal disuelta
- V_e : Volumen salmuera entrada (m^3)
- d_e : Peso específico en la entrada (T/m^3) o (kg/lt)
- S_e : Salinidad en la entrada (T/m^3) o (kg/lt)
- $ve = S_e/d_e$: Concentración en peso de la salmuera

SALIDA:

- d_s : Peso específico en (T/m^3) o (kg/lt)
- S_s : Salinidad a la salida (T/m^3) o (kg/lt)
- $v_s = S_s/d_s$: Concentración en peso de la salmuera
- d : 2.168, densidad de la sal

CONSIDERACIONES:

- Por cada litro de salmuera que entra, hay $(d_e - S_e)kg$ de agua dulce.
- Por cada kg de agua dulce que entra, hay $[S_e/(d_e - S_e)]kg$ de sal.
- Por cada litro de salmuera producida, hay $(d_s - S_s)kg$ de agua dulce.
- Cada kg de agua que entra en la cavidad se carga de:
 $[S_s/(d_s - S_s) - S_e/(d_e - S_e)]kg$ de sal.

Si V_e es el volumen de salmuera que entra, hay $V_e(d_e - S_e)kg$ de agua dulce que disuelve

$$V_c = [V_e d_e/d][v_s - v_e]/(1 - v_s) \quad \dots(2.1)$$

En general, el flujo y la presión de descarga en la línea de salida de salmuera se especifican. La presión de entrada al sistema. (o presión de salida de bombeo), tendrán que superar las pérdidas por fricción en las tuberías y la cabeza hidrostática causada por la diferencia de densidades que existe en el sistema. Otras pérdidas como la energía que cambia a través de los accesorios no se toman en cuenta, ya que no son significativos.

La presión de bombeo junto con la cantidad de circulación de agua, es la energía hidráulica, la cual a través de un factor de eficiencia se convierte en energía de bombeo. Esta energía se supone permanece constante en un intervalo de tiempo específico (usualmente un día) y se expresa como energía gastada. Del modelo de disolución se conoce el volumen de sal producida y el crecimiento de la cavidad durante el mismo lapso de tiempo. Estos valores son transfor-

mados en factores de eficiencia expresados como masa o volumen de sal removida por unidad de energía gastada.

Si durante la implementación del proyecto es necesario modificar el plan, es útil conocer los costos de operación y la inversión requerida.

Algunos costos dependen de la configuración física del sistema (como pueden ser profundidades, distancias y diámetros), otros son dependientes del tiempo y otros son función del flujo de circulación.

2.5 FASE EXPLOTACION DE UN DOMO SALINO (LLENADO Y VACIADO).

Los primeros operadores del almacenamiento subterráneo encontraron que el producto almacenado en cavidades subterráneas, podía ser recuperado fácil y económicamente por desplazamiento de agua fresca; con este método casi todos los equipos usados para el desarrollo de la cavidad pueden utilizarse para operarlo.

Sin embargo, este método de remoción de producto tiene una desventaja. Cada barril de agua fresca inyectada dentro de la cavidad para desplazar el producto disolverá alguna cantidad adicional de sal. Experimentalmente cada 6.03 barriles de agua fresca inyectados dentro de la cavidad se creará un barril adicional de volumen de almacenamiento; en la práctica actual, sin embargo, cada vez que una cavidad se vacía completamente por desplazamiento de agua fresca, la capacidad total sólo se incrementa en aproximadamente un 16.6%. A esta proporción, el tamaño de la cavidad se duplicará en cuatro y medio ciclos y se triplicará en menos de ocho, por lo que se debe usar un método de remoción del producto que no aumente el volumen. Estos valores se basan en el modelo antes mencionado y en datos experimentales de Geoslock.

Existe una variedad de formas mediante las cuales el producto puede ser recuperado sin que influya considerablemente en el tamaño de la cavidad. Estos métodos son:

- A. Desplazamiento por salmuera.
- B. Bombeo.
- C. Vaporización.
- D. Desplazamiento por medio de gas.
- E. Desplazamiento como un acumulador de gas.

A continuación se presentarán las características de cada uno de los métodos mencionados arriba.

A. Desplazamiento por salmuera.

Si la salmuera que se usa está saturada, o cercana a ello, su uso redundará en un leve aumento del volumen en la cavidad; sin embargo, para una operación de este tipo se necesita una fuente de salmuera, esta puede ser cualquier depósito de salmuera.

B. Bombeo.

Es posible instalar una bomba centrífuga en una cavidad de almacenamiento subterránea, lo cual es generalmente más económico. Sin embargo, las bombas tienen algunas desventajas, entre las que se cuentan las siguientes:

- La cantidad de producto que puede ser manejado por una bomba centrífuga, disminuye rápidamente con la profundidad. En cavidades con profundidades menores a 1000 pies, son usuales las razones de descarga de más de 1500 galones por minuto; si la profundidad se incrementa a unos 1500 pies, la razón de descarga podría bajar a aproximadamente

200 galones por minuto y más allá de 3000 pies de profundidad, la bomba centrífuga no es utilizable debido a razones de flujo muy bajas.

- Los productos con una alta presión de vapor que son generalmente almacenados en las cavidades, son notoriamente pobres como lubricantes, pudiendo penetrar al sello de la bomba y causar un excesivo desgaste. Consecuentemente, se pueden esperar altos costos en el mantenimiento, además donde se utilizan las bombas usualmente es necesario tener equipo de relevo para prevenir las fallas de éstas.
- Las bombas para el vaciado del hidrocarburo dentro del manto incluyen equipo subterráneo, el cual es extremadamente vulnerable en caso de taponamientos y desprendimientos de roca.
- La remoción del producto por medio del bombeo dará como resultado la casi total evacuación de éste en la cavidad. Cuando esto sucede o bien en la cavidad se almacenan gases o sólidos, la presión en las paredes de la cavidad se reduciría a un mínimo, con lo que se tendrá un efecto negativo que afecte el balance de la estabilidad dentro de la cavidad. Así, una cavidad estable con un tamaño máximo, en condiciones de estar totalmente llena, puede llegar a ser un hoyo estructural inestable cuando se encuentre evacuado.

El problema de la pequeña razón de bombeo puede ser resuelto usando una bomba sumergible que se instale dentro de la cavidad. Sin embargo este tipo de bombas tiene fallas de lubricación y puede esperarse un alto costo de mantenimiento. Algunas otras bombas están

disponibles para la conexión en las cavidades de almacenamiento, pero en la mayoría de los casos introducen más problemas de los que resuelven.

C. Vaporización.

En este método los vapores del hidrocarburo son retirados desde un tubo de diámetro relativamente pequeño que se extiende desde el fondo de la cavidad. Estos vapores se recomprimen e inyectan dentro del espacio que ocupa el vapor que se encuentra arriba del líquido almacenado en la cavidad. Las burbujas causadas por la vaporización del hidrocarburo líquido bajo presión reducida dentro de la tubería causa el ascenso del gas, el cual puede acarrear producto fuera de la cavidad.

Este método tiene un costo de operación relativamente alto y es aplicable sólo al propano y los productos con alta presión de vapor, su límite en la operación es de 1400 pies de profundidad como máximo, también está limitado en la razón de flujo que se espera. Estas desventajas evitan su uso general como un mecanismo de remoción de producto en cavidades minadas por solución.

D. Desplazamiento por medio de Gas.

En este método, el gas se inyecta a alta presión, la suficiente como para forzar al producto almacenado a salir de la cavidad, en este caso no se involucra equipo adicional ni pozos adyacentes para las bombas; y se puede adaptar a cualquier producto, a cualquier profundidad y a cualquier razón de flujo, además se mantiene la presión dentro de la cavidad.

Este sistema requeriría de una fuente de gas capaz de dar y tomar grandes cantidades de éste a intervalos regulares.

Si el almacenamiento está en contacto con alguna planta en operación, puede ser posible el usar gases de desecho para la remoción del producto, con la consecuente separación de los gases que van a un flare. Tal operación requeriría de equipo de compresión y un gran volumen de gas disponible para la demandas en un momento dado, este método también tendrá el problema de la contaminación y de la pérdida de producto.

E. Desplazamiento como un Acumulador de Gas.

Una variación del principio en el cual se basa el método de desplazamiento de gas, es la que se conoce comúnmente cuando se usa la cavidad como un acumulador de gas. En este método, la cavidad se vacía de su solución salina inicial por medio de inyección de gas; éste permanece en la cavidad y para inyectar el producto es necesario vencer la presión. Esta presión se puede usar para descargar el producto cuando se requiera. El método es adaptable a razones de flujo altas y bajas, a varias profundidades y no requiere de equipo adicional; pero necesita de alta inversión inicial debido al costo del gas y del equipo de compresión; además este tipo de operación requiere una cavidad con un volumen total mucho mayor que el volumen que se almacenará de producto, también tiene la desventaja de una posible contaminación del producto por parte del gas.

Estas son variedades de métodos por los cuales es posible recuperar el producto almacenado en la cavidad, minada por solución, sin alterar su tamaño. Todos los métodos tienen

sus ventajas y desventajas y no puede decirse que alguno de ellos es el mejor, sino que cada uno se puede adaptar a un caso específico. Todas las instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos están sujetas a sus limitaciones particulares debido a que varían sus condiciones de sitio a sitio, por lo que cada instalación debe ser analizada para encontrar que método suministra el medio más ventajoso y económico para la remoción del producto sin incrementar el tamaño de la cavidad.

Los cinco métodos de remoción de producto de una cavidad salina minada por solución pueden verse en la figura (2.5).

C A P I T U L O 3.

FUNDAMENTOS TEORICOS DEL ANALISIS HIDRAULICO.

En un análisis hidráulico, las variables a estudiar más importantes son la presión, la velocidad volumétrica, las pérdidas de energía por fricción, y las columnas de los fluidos por energía potencial. De aquí se desprende, que para llevar a cabo un análisis de cualquier sistema hidráulico es necesario modelar matemáticamente el flujo de fluidos. A continuación se describen las ecuaciones generales y posteriormente las particulares que nos dan el modelo matemático de este fenómeno a lo largo de un ducto.

3.1 ECUACION DE CONTINUIDAD.

Es el balance de masa de un elemento de volumen para sistemas de una fase, ver figura (3.1). Este balance de masa nace de la ley de conservación de la materia y en términos simples es:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{RAPIDEZ DE EN-} \\ \text{TRADA DE MASA} \\ \text{AL SISTEMA.} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{RAPIDEZ DE SA-} \\ \text{LIDA DE MASA} \\ \text{AL SISTEMA.} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{RAPIDEZ DE ACU-} \\ \text{MULACION DE MA-} \\ \text{SA AL SISTEMA.} \end{array} \right\}$$

Describiendo matemáticamente este balance se tiene:

A. Término de rapidez de entrada y de salida: Es el resultado de la sumatoria de los productos de la densidad por la componente de la velocidad y por la superficie perpendicular a dicha componente en el punto inicial, menos la sumatoria de los mismos productos evaluados en el punto final; es decir, de acuerdo a la figura (3.1), se tiene:

$$\begin{aligned} & (\rho v_x \Delta y \Delta z)_x + (\rho v_y \Delta x \Delta z)_y + (\rho v_z \Delta x \Delta y)_z - [(\rho v_x \Delta y \Delta z)_{x+\Delta x} + \\ & (\rho v_y \Delta x \Delta z)_{y+\Delta y} + (\rho v_z \Delta x \Delta y)_{z+\Delta z}] \dots (3.1) \end{aligned}$$

B. Término de rapidez de acumulación: Es la cantidad de masa del volumen en estudio que se acumula con respecto al tiempo.

\vec{v}
FLUIDO EN
MOVIMIENTO

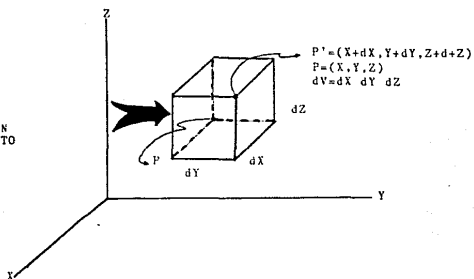


Fig. 3.1 Elemento de volumen para el balance de masa de un sistema de flujo de fluido, en una sola fase.

Referencia No. 1

$$(\rho \Delta x \Delta y \Delta z)_t - (\rho \Delta x \Delta y \Delta z)_{t+\Delta t} = \partial/\partial t (\rho \Delta x \Delta y \Delta z) = (\Delta x \Delta y \Delta z) \partial \rho / \partial t \quad \dots (3.2)$$

Desarrollando el balance antes descrito y reordenando los términos de entrada y salida de la ecuación (3.1), se tiene:

$$\rho v_x \Delta y \Delta z |_x - \rho v_x \Delta y \Delta z |_{x+\Delta x} + \rho v_y \Delta x \Delta z |_y - \rho v_y \Delta x \Delta z |_{y+\Delta y} + \rho v_z \Delta x \Delta y |_z - \rho v_z \Delta x \Delta y |_{z+\Delta z} = (\Delta x \Delta y \Delta z) \partial \rho / \partial t \quad \dots (3.3)$$

Considerando el volumen constante, dividiendo la ecuación (3.3) entre este elemento de volumen y simplificando se obtiene:

$$-\left[\frac{\rho v_x |_{x+\Delta x} - \rho v_x |_x}{\Delta x} \right] - \left[\frac{\rho v_y |_{y+\Delta y} - \rho v_y |_y}{\Delta y} \right] - \left[\frac{\rho v_z |_{z+\Delta z} - \rho v_z |_z}{\Delta z} \right] = \partial \rho / \partial t \quad \dots (3.4)$$

Donde cada término fraccional de la ecuación (3.4) corresponde a la definición matemática de una derivada, tal como se muestra en la ecuación (3.5).

$$f = \rho v$$

$$\partial f / \partial \rho = [f(\rho + \Delta \rho) - f(\rho)] / \Delta \rho \quad \dots (3.5)$$

Así, se tiene:

$$-\left\{ [\partial(\rho v_x) / \partial x] + [\partial(\rho v_y) / \partial y] + [\partial(\rho v_z) / \partial z] \right\} = \partial \rho / \partial t \quad \dots (3.6)$$

En otras palabras, el término entre paréntesis es la acción del operador nabla ('∇') sobre el producto de la densidad por el vector velocidad:

$$-\{\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})\} = \partial \rho / \partial t \quad \dots(3.7)$$

La ecuación (3.7), es la ecuación de continuidad que describe los cambios de la densidad del fluido en el elemento de volumen, vistos por un observador fijo en el espacio.

De las propiedades del operador nabra, obtenemos

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mathbf{v} \cdot (\nabla \rho) \quad \dots(3.8)$$

Sustituyendo la ecuación (3.8) en la ecuación de continuidad tenemos:

$$\partial \rho / \partial t = -\rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) - \mathbf{v} \cdot \nabla \rho \quad \dots(3.9)$$

Reordenando:

$$\partial \rho / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho = -\rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad \dots(3.10)$$

En la ecuación (3.10), el término de la izquierda representa la definición de la derivada material de la densidad, con respecto al tiempo. Esta definición es precisamente el cambio de una propiedad con respecto a la variable independiente, más el gradiente de esta propiedad multiplicada puntualmente por la velocidad. Esta derivada representa los cambios de una propiedad observados desde un punto que se mueve con el fluido.

$$D\rho/Dt = \partial \rho / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho \quad \dots(3.11)$$

$$D\rho/Dt = -\rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad \dots(3.12)$$

La ecuación (3.12) es la de continuidad y representa los cambios de la densidad con respecto al tiempo, vistos por un observador que se mueve con el fluido.

De esta ecuación, que es el balance de materia en un sistema

con un fluido en movimiento, y simplificando al suponer:

a) Régimen Permanente.

b) Flujo Unidireccional.

La primera condición implica que $\partial\rho/\partial t = 0$ y la segunda que $\partial\rho/\partial y$ y $\partial\rho/\partial z$ son cero.

Así, la ecuación (3.7) queda

$$0 + v \cdot \rho = -\rho(\nabla \cdot v) \quad \dots(3.13)$$

Si,

$$v = (v_x, v_y, v_z) \quad \dots(3.14)$$

y

$$\nabla\rho = \partial\rho/\partial x, \partial\rho/\partial y, \partial\rho/\partial z \quad \dots(3.15)$$

Si reemplazamos las ecuaciones (3.14) y (3.15) en la ecuación (3.13) y aplicando los operadores, tenemos

$$0 + (v_x, v_y, v_z) \cdot (\partial\rho/\partial x, \partial\rho/\partial y, \partial\rho/\partial z) = -\rho(\partial v_x/\partial x + \partial v_y/\partial y + \partial v_z/\partial z) \quad \dots(3.16)$$

Aplicando la segunda restricción a la ecuación (3.16)

$$v_x \partial\rho/\partial x = -\rho \partial v_x/\partial x \quad \dots(3.17)$$

La ecuación (3.17) al ser considerada una derivada total por su característica de flujo unidireccional, queda

$$v_x d\rho/dx = -\rho dv_x/dx$$

$$v_x d\rho/dv_x = -\rho \quad \dots(3.18)$$

La ecuación (3.18) se integra de un punto (1) a un punto (2)

$$\int dp/\rho = -\int dv_x/v_x \quad \dots(3.19)$$

Así,

$$\ln p_2/\rho_2 = \ln v_1/v_2 \quad \dots(3.20)$$

Aplicando las propiedades de logaritmos,

$$\rho_2 v_2 = \rho_1 v_1 \quad \dots(3.21)$$

La ecuación (3.21) es el balance de fluxes-masa en cada punto; por lo que, aplican las propiedades de suma de acuerdo al sistema en estudio, la cual opera para todo tipo de fluidos.

Para el caso de fluidos líquidos, y considerando además

- Fluido Incompresible $\partial \rho / \partial p = 0$
- Régimen permanente $\partial \rho / \partial t = 0$
- Densidad Constante $\partial \rho / \partial x_i = 0$
- Flujo Unidireccional $v = (v_x, 0, 0)$

De la forma mostrada en la expresión (3.16), la ecuación de continuidad se convierte en

$$0 = -\rho \partial v_x / \partial x \quad \dots(3.22)$$

Recordando la ecuación (3.22) con el concepto de derivada parcial y considerando el signo

$$\rho \left[(v_x)_x - v_x(x+\Delta x) / \Delta x \right] = 0 \quad \dots(3.23)$$

Si multiplicamos la ecuación (3.23) por el elemento de volumen, se llega a:

$$\Delta y \Delta z \rho (v_x)_x - v_x(x+\Delta x) = 0 \quad \dots(3.24)$$

donde:

$\Delta y \Delta z = S$	Area transversal al flujo.
$v_x|_x = v_1$	Velocidad en el primer punto.
$v_x|_{x+\Delta x} = v_2$	Velocidad en el segundo punto.

Desarrollando la ecuación (3.24) y evaluándola en los puntos mencionados,

$$\Delta y \Delta z \rho v_x|_x - \Delta y \Delta z \rho v_x|_{x+\Delta x} = 0 \quad \dots(3.25)$$

$$S \rho v_x|_x = S \rho v_x|_{x+\Delta x} \quad \dots(3.26)$$

$$W = \rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 \quad \dots(3.27)$$

La ecuación (3.27) es la ecuación de continuidad para régimen permanente y flujo unidireccional, expresada como flujo-masa. Si la densidad es constante, es decir, no varía a lo largo de la distancia 'x'; como ocurre en los fluidos incompresibles, la expresión se reduce a términos de flujo volumétrico, o sea,

$$Q = S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad \dots(3.28)$$

Las ecuaciones (3.27) y (3.28), obedecen a sumatorias algebraicas, de acuerdo a la ley de la conservación de masa.

3.2 ECUACION DE BERNOULLI.

La ecuación de Bernoulli, es el balance de energía de un sistema de flujo, tomando en cuenta todas las formas conocidas de ésta y las pérdidas ocasionadas en el sistema, en forma de calor o por fricción.

Expresando textualmente este balance, dada la figura (3.2), se tiene:

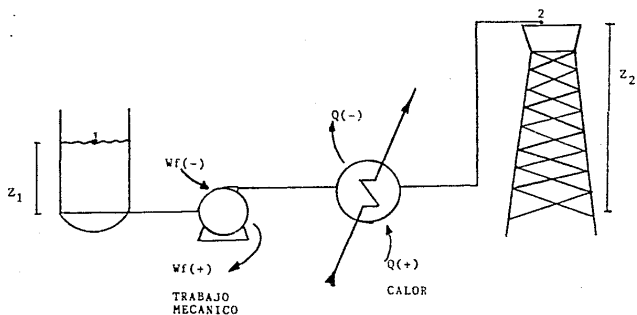


Fig. 3.2 Sistema a analizar para la definición del balance de energía, del cual surge la ecuación de Bernoulli.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA QUE} \\ \text{ENTRA AL} \\ \text{SISTEMA} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA QUE} \\ \text{SALE DEL} \\ \text{SISTEMA} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA QUE} \\ \text{ES GENERADA} \\ \text{EN EL SIST.} \end{array} \right\} -$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA QUE ES} \\ \text{CONSUMIDA EN} \\ \text{EL SISTEMA} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA QUE SE} \\ \text{ACUMULA EN EL} \\ \text{SISTEMA} \end{array} \right\}$$

Si se considera que el sistema está bajo las siguientes condiciones:

- No hay reacción química en el seno del fluido, o de éste con otra sustancia de sus alrededores.
- Hay régimen permanente en el sistema.

El balance de energía expresado anteriormente se reduce a:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA QUE} \\ \text{ENTRA AL} \\ \text{SISTEMA} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ENERGIA QUE} \\ \text{SALE DEL} \\ \text{SISTEMA} \end{array} \right\}$$

Para describir este balance de energía, se debe de considerar que existen en un sistema de flujo de fluidos dos tipos de energía: la del fluido y de intercambio.

3.2.1 ENERGIA DEL FLUIDO.

Dentro de este tipo de energía entran varias formas de ella que involucran diferentes características del fluido, y del sistema; tales formas de energía son:

- A. Energía Interna (U): La energía interna está relacionada con la estructura del fluido, esto es, la energía que los átomos y moléculas del fluido tienen como resultado de su configuración y movimiento. Así, se desprende que esta energía es función de la temperatura. Recordemos la expresión termodinámica:

$$(\partial U / \partial v)_p = T \quad \text{.....(3.29)}$$

- B. Energía Potencial (E_p): Es la energía que tiene un fluido, debido a la posición que guarda con respecto a un plano de referencia arbitrario. Su expresión involucra la diferencia de altura o columna, expresada en términos de energía.

$$E_p = z g \quad \text{.....(3.30)}$$

$$E_p = z g / g_c \quad \text{.....(3.31)}$$

La ecuación (3.30) expresa la energía potencial en sistemas absolutos de unidades, mientras que la ecuación (3.31), la expresa en unidades prácticas de ingeniería.

- C. Energía Cinética (E_c): Es la energía asociada con el movimiento del fluido, es decir, la energía que tiene el fluido debido a su velocidad. Su expresión involucra a los términos:

$$E_c = 1/2 v^2 \quad \text{.....(3.32)}$$

$$E_c = 1/2 v^2 / g_c \quad \text{.....(3.33)}$$

La primera es para sistemas de unidades absolutos, y la segunda es para sistemas prácticos de ingeniería.

- D. Energía de Flujo (E_f): Conocida mejor como energía de presión. Es una medida del trabajo requerido para introducir al fluido dentro del sistema. Se expresa para ambos sistemas de unidades como:

$$E_f = PV = P/\rho \quad \text{.....(3.34)}$$

3.2.2 ENERGIA QUE INTERCAMBIA EL FLUIDO CON LOS ALREDEDORES.

Dentro de esta energía pueden existir dos formas de ella, a saber:

- A. Energía de Flecha (W_f): Es el trabajo hecho por el fluido sobre los alrededores. Esto implica una turbina o cualquier otro equipo que sea movido por el fluido. Por convención, esta es positiva si el fluido hace trabajo sobre sus alrededores (como es el caso de una turbina), y esta es negativa si se hace trabajo sobre el fluido (el caso de una bomba). La forma de estimar esta energía depende de la forma en que esta se transfiere.
- B. Energía Calorífica (Q'): Es el calor absorbido por el fluido de los alrededores. El hecho de que se añada calor al fluido puede o no provocar que cambie la temperatura de éste, o sea, que puede haber transferencia de calor y permanecer la temperatura constante. Cabe hacer notar que este calor no incluye el calor generado por fricción, debido a que este proviene de la disipación de otras formas de energía. Por convención Q' es positivo si el fluido recibe calor y es negativo si el fluido cede calor.

Con todos estos conceptos y tomando en cuenta que el punto de entrada al sistema sea el primer punto, y el punto de salida, sea el segundo punto del sistema, el balance de energía simplificado queda como

$$U_{ent} + E_{pent} + E_{cent} + E_{fent} = U_{sal} + E_{psal} + E_{csal} + E_{fsal} - Q' + W_f \quad \dots(3.35)$$

Reemplazando los términos de la energía expresados en las ecuaciones (3.29), (3.31), (3.33) y (3.34) en la ecuación (3.35), y evaluándola se tiene:

$$U_1 + z_1 g/g_c + v_1^2/2g_c + P_1 v_1 + Q' = U_2 + z_2 g/g_c + v_2^2/2g_c + P_2 v_2 + W_f \quad \dots(3.36)$$

La ecuación (3.36) es el balance de energía del sistema de flujo, a régimen permanente y sin reacción química.

Si además se cumplen las siguientes condiciones:

a. No hay transferencia de masa con los alrededores, o sea:

$$U_2 - U_1 = Q - W \quad \dots(3.37)$$

donde:

Q = calor total transferido a los alrededores.

W = trabajo total en el sistema.

b. Si no hay acumulación de energía y transferencia de masa, es decir, $U_2 - U_1 = \Delta U = 0$:

$$Q = W \quad \dots(3.38)$$

c. No hay intercambio de energía con los alrededores y tampoco pérdidas por fricción.

$$Q = Q' + Hf_f = 0 \quad \dots(3.39)$$

$$W = W_f - Hf_f = 0 \quad \dots(3.40)$$

donde Hf_f son las pérdidas de energía por fricción.

Entonces se tiene que,

$$z_1 g/g_c + v_1^2/2g_c + P_1/\rho_1 = z_2 g/g_c + v_2^2/2g_c + P_2/\rho_2 \quad \dots(3.41)$$

La ecuación (3.41) es la ecuación de Bernoulli, (Ref. No. 2) más simple, la cual cumple con las condiciones mencionadas anteriormente.

Si se parte de la ecuación (3.36), del balance de energía del sistema, y consideramos a la primera Ley de la Termodinámica, así como, reemplazamos el valor de Q' a partir de la ecuación (3.39), se tiene:

$$U_1 + z_1 g/g_c + v_1^2/2g_c + P_1 v_1 + Q - Hf_s = U_2 + z_2 g/g_c + v_2^2/2g_c + P_2 v_2 + Wf$$

Reordenando:

$$Q - Wf = (U_2 - U_1) + (z_2 - z_1)g/g_c + (v_2^2 - v_1^2)/2g_c + P_2 v_2 - P_1 v_1 + Hf_s \quad \dots(3.42)$$

Si:

$$U_2 - U_1 = Q - W \dots(3.37) \text{ Primera Ley de la Termodinámica.}$$

$$W = P\Delta V \quad \dots(3.43) \quad \text{Definición de Trabajo.}$$

Al sustituir las expresiones (3.37) y (3.43) en la ecuación (3.42) se llega a:

$$Q - Wf = Q - P\Delta V + (z_2 - z_1)g/g_c + (v_2^2 - v_1^2)/2g_c + \Delta(PV) + Hf_s \quad \dots(3.44)$$

Si $\Delta(PV) = P\Delta V + V\Delta P$, entonces,

$$-Wf = (z_2 - z_1)g/g_c + (v_2^2 - v_1^2)/2g_c + P\Delta V - P\Delta V + V\Delta P + Hf_s \quad \dots(3.45)$$

$$-Wf = (z_2 - z_1)g/g_c + (v_2^2 - v_1^2)/2g_c + (P_2 - P_1)/\rho + Hf_s \quad \dots(3.46)$$

La ecuación (3.46) es la de Bernoulli corregida, o aquella que toma en cuenta las disipaciones de energía por fricción, es decir, los esfuerzos viscosos del fluido. Esta ecuación aplica a régimen permanente, flujo unidireccional, y considera que el sistema no intercambia calor con los alrededores, aunque sí toma

en cuenta el trabajo de flecha que el fluido intercambia con los alrededores.

3.2.3 ENERGIA DISIPADA POR FRICCION.

El fenomeno de flujo de un fluido a lo largo de un ducto, va acompañado por una fricción de las moléculas externas del fluido con la pared del tubo, generándose una fuerza que se opone al flujo. Dada la propiedad de consistencia de un fluido, o sea la resistencia de éste a sufrir deformaciones por esfuerzos constantes y normales a su superficie, conocida como viscosidad, ocurre una pérdida gradual de la energía que mueve al fluido debido a esa resistencia. Esta disipación de energía se expresa en la presión que disminuye a lo largo del ducto.

La ecuación general de pérdidas de energía, conocida como fórmula de Darcy, en unidades prácticas de ingeniería, es la siguiente:

$$H_f = (fLv^2)/(2gcD) \quad \dots(3.47)$$

Donde 'f' es el factor de fricción. Este factor es función del grado de turbulencia del flujo. La fórmula de Darcy puede ser reducida por un análisis dimensional de las variables involucradas, a excepción del factor de fricción, que debe ser determinado experimentalmente. El factor de fricción en las condiciones de flujo laminar ($Re < 2,000$), es función solamente del número de Reynolds. Cuando hay flujo turbulento el factor de fricción adquiere dependencia con respecto a las características de la tubería.

La región conocida como 'crítica', donde ocurren cambios del número de Reynold entre aproximadamente 2,000 y 4,000, presenta una combinación de flujo laminar con turbulento. El grado de turbulencia depende de factores como, cambios en la

dirección del flujo, obstrucciones, como válvulas y constricciones de tubería.

El factor de fricción de esta región es indeterminado y puede ser evaluado como el límite superior del flujo laminar o el límite inferior del flujo turbulento.

Si el flujo es laminar ($Re < 2,000$), el factor de fricción puede ser determinado a partir de

$$f = 64/Re = 64\mu/(pVD) \quad \dots(3.48)$$

Si la ecuación (3.48) es sustituida en la ecuación (3.47), se tiene:

$$H_f = (32L\mu V^2)/(g_c p D) \quad \dots(3.49)$$

La ecuación anterior es la pérdida de presión en unidades de longitud que conduce a la ecuación de Poiseuille.

Cuando el flujo es turbulento ($Re > 4,000$), el factor de fricción depende no solamente del número de Reynold, sino también de la rugosidad relativa (ϵ/D), que es la rugosidad de la tubería comparada con su diámetro interno. Para muchas tuberías suaves como trazados de aluminio y vidrio, el factor de fricción decrece más rápidamente cuando el número de Reynold se incrementa. Este hecho es menos marcado en tubería comparativamente rugosa.

Los datos de factor de fricción más utilizados y aceptados, para ser utilizados en la ecuación de Darcy fueron presentados por L. F. Moody y son reproducidos en las figuras (3.3), (3.4a) y (3.4b).

Colebrook correlacionó datos de factor de fricción con respecto al factor ϵ/D y el número de Reynold para valores de este último de 4,000 a 1'000,000 aproximadamente, basándose en los datos experimentales de Moody.

Como resultado de sus trabajos existe la correlación de Colebrook, en la cual, se involucra una función de tipo logarítmica. Tal ecuación es,

$$1/f^{1/2} = -2 \log_{10} \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} f^{1/2}} \right] \dots (3.50)$$

Como puede observarse esta ecuación es del tipo iterativa para encontrar el valor del factor de fricción. El valor de ϵ/D depende, al igual que en la investigación de Moody, sólo del material y el diámetro interno de la tubería. El número de Reynold involucra las propiedades del fluido, y por tanto sus condiciones operativas.

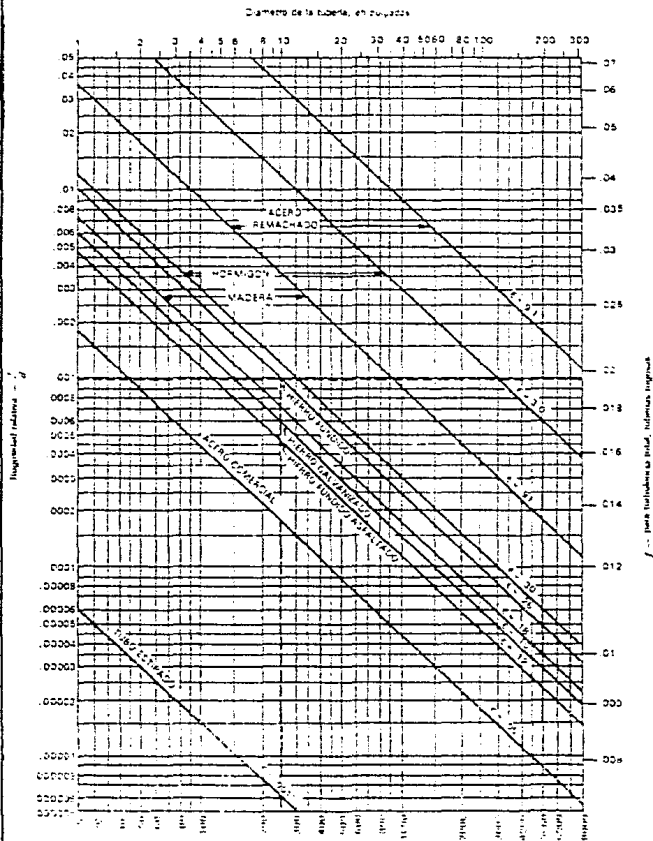
3.2.4 PERDIDAS POR FRICCIÓN EN ACCESORIOS VALVULAS Y TUBERIA.

Cuando un fluido esta fluyendo a lo largo de una tubería recta con diámetro uniforme, el patrón de flujo, así como la distribución de las velocidades a lo largo del diámetro asumirán una forma característica. Cualquier impedimento en la tubería que cambie la dirección de todo el flujo, o de parte de él, creará alternativamente la característica de turbulencia; causando una pérdida de energía más grande que la normal en tramo recto de tubería de igual longitud. Por lo tanto, las válvulas y los accesorios en línea ocasionan una caída de presión adicional.

La pérdida de presión causada por una válvula (o accesorio), toma en cuenta:

- La pérdida de presión causada dentro de la válvula en sí misma.
- La pérdida de presión en el tramo ascendente de tubería recta en exceso, de la que normalmente ocurriría, si la válvula no estuviera presente en la línea. Este efecto es pequeño.

Fig. 3.4a Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total



- La pérdida de presión en el tramo descendente de tubería recta en exceso, de la que normalmente ocurriría, si la válvula no estuviera en la línea. Este efecto es comparativamente grande.

A. COEFICIENTE DE RESISTENCIA, LONGITUD EQUIVALENTE Y COEFICIENTE DE FLUJO.

La variedad de tipos de válvulas y accesorios, así como la variedad de condiciones en que prestan su servicio, hacen virtualmente imposible el obtener datos para todo tipo y tamaño de válvulas y accesorios o condiciones. Por esta razón se hace indispensable el encontrar una relación utilizando los limitados datos existentes. Los métodos más aceptados y fundamentados, son:

- El Método de Longitud Equivalente Total.
- El Método de Coeficiente de Resistencia.
- El Método de Coeficiente de Flujo.

La velocidad en una tubería es obtenida a expensas de la cabeza estática, la relación entre ambas es:

$$h = v^2 / 2g \dots(3.51)$$

El flujo a través de una válvula o accesorio en una tubería causa una reducción de la cabeza estática, que puede ser expresada en términos de la cabeza-velocidad. Siendo la ecuación de coeficiente de resistencia

$$h_L = K v^2 / 2g \dots(3.52)$$

Donde la relación cabeza-velocidad, se ve afectada por un factor de resistencia de la válvula o accesorio.

Al comparar la ecuación (3.52) con la ecuación de Darcy se obtiene la igualdad

$$K = f L/D \quad \dots(3.53)$$

L/D es la relación de la longitud equivalente con respecto al diámetro de tubería, dicha longitud causará la misma caída de presión que la válvula en las mismas condiciones.

El coeficiente de resistencia podría teóricamente ser una constante para todos los tamaños de válvulas y accesorios en una línea que sean geoméricamente similares. Sin embargo, la similaridad geométrica se presenta raramente a causa de que el diseño de las válvulas y accesorios es dictada por economía de manufactura estándares, estructura de tramos de tubería, y otras consideraciones. La figura (3.4c) está basada en datos extensivos provenientes de varias fuentes. (Ref. No.2). Observando las curvas del coeficiente de resistencia, puede detectarse una tendencia definida de la relación $f L/D$ con respecto a los tramos de tubería.

Basándose en la figura (3.4c) puede decirse que el coeficiente de resistencia K , para una línea de válvulas y accesorios dada, tiende a variar con el valor del factor de fricción para la tubería recta, y que la longitud equivalente L/D tiende hacia una constante para diferentes tamaños de línea y accesorios.

En el rango de turbulencia completo, el coeficiente de resistencia 'K' para una tamaño de tubería y un valor dado de L/D , es practicamente una constante. En la zona de transición, donde f (para tubería) se incrementa cuando el número de Reynold decrece, se asume que el valor de L/D se mantiene constante y que el valor de K varía de acuerdo al factor de fricción. Algo que limita estas relaciones es que no son exactas y la variación para diferentes tipos de válvulas y accesorios es apreciable. Para simplificar se puede asumir que el coeficiente de resistencia es una constante para todo número de Reynold.

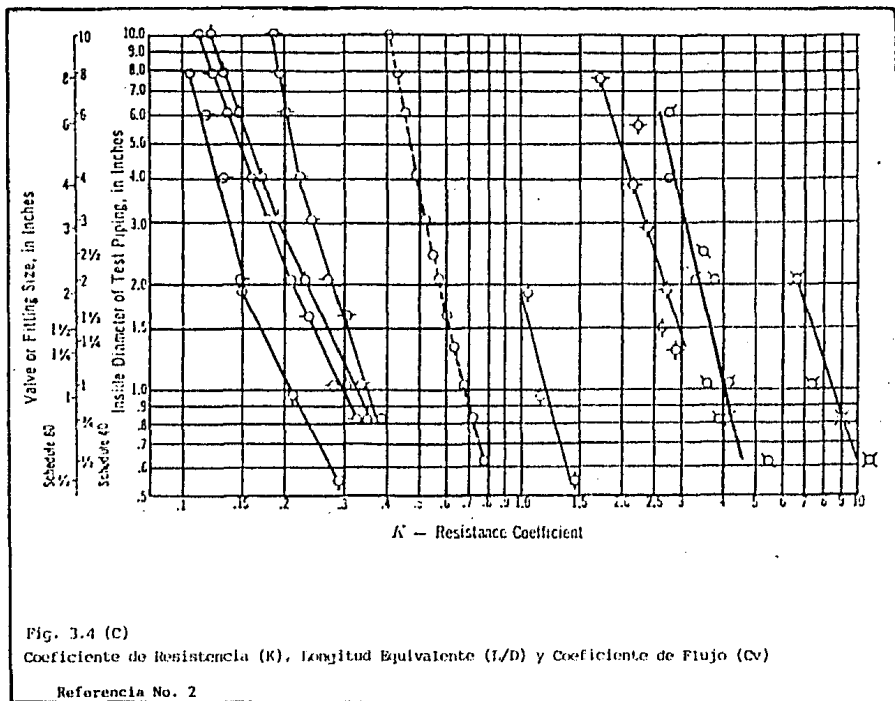


Fig. 3.4 (C)

Coefficiente de Resistencia (R), Longitud Equivalente (L/D) y Coeficiente de Flujo (C_v)

Referencia No. 2

Se ha encontrado conveniente en algunas ramas de la industria de válvulas, particularmente con las de control, expresar la capacidad y las características de flujo en ellas en términos de un coeficiente de flujo Cv.

El coeficiente volumetrico o Cv de una válvula, es definido como el flujo de agua a 60°F. en galones por minuto que ocasiona una caída de presión de una libra sobre pulgada cuadrada a través de la válvula.

A partir de la sustitución de las variables en unidades apropiadas en la ecuación de Darcy, se obtiene

$$Cv = 29.9d^2 / (\Delta P L / D)^{1/2} = 29.9d^2 / K \quad \dots(3.54)$$

También la cantidad en galones por minuto de algún líquido teniendo una viscosidad cercana a la del agua a 60°F, que está fluyendo a través de la válvula puede ser determinada a partir de,

$$Q = Cv[\Delta P(62.4/\rho)]^{1/2} = Cv(\Delta P/S.G.)^{1/2} \quad \dots(3.55)$$

La caída de presión puede ser calculada por la fórmula

$$\Delta P = \rho/62.4 (Q/Cv)^2 \quad \dots(3.56)$$

Las ecuaciones (3.54), (3.55) y (3.56) son simplemente otras formas de la ecuación de Darcy.

El coeficiente de resistencia para válvulas y accesorios a partir de la ecuación (3.54), es útil para válvulas de control

$$K = 891d^2 / Cv \quad \dots(3.57)$$

B. COEFICIENTES DE RESISTENCIA PARA VALVULAS Y ACCESORIOS.

A continuación se presentan las ecuaciones empíricas desarro-

lladas en los laboratorios de la CRANE Co., (Ref. No. 2).

1. CONTRACCIONES Y ENSANCHAMIENTOS GRADUALES. (FIGURAS 3.5 Y 3.6)

Contracción:

$$\text{Si } \theta \leq 45^\circ \quad K = 0.8 \text{sen}(\theta/2)(1-\beta^2)/\beta^4 \quad \dots(3.58)$$

$$45^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad K = 0.5(1-\beta^2)[\text{sen}(\theta/2)]^{1/2}/\beta^4 \quad \dots(3.59)$$

$$\beta = d_1/d_2 \quad \dots(3.60)$$

Expansión:

$$\text{Si } \theta \leq 45^\circ \quad K = 2.6 \text{sen}(\theta/2)(1-\beta^2)^2/\beta^4 \quad \dots(3.61)$$

$$45^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad K = (1-\beta^2)^2/\beta^4 \quad \dots(3.62)$$

2. CODOS DE TUBERIA. (FIGURAS 3.7 A 3.11)

Codo Angular:

$$\text{Si } 0^\circ \leq \alpha < 15^\circ \quad K = 2f \quad \dots(3.63)$$

$$15^\circ \leq \alpha < 30^\circ \quad K = 4f \quad \dots(3.64)$$

$$30^\circ \leq \alpha < 45^\circ \quad K = 8f \quad \dots(3.65)$$

$$45^\circ \leq \alpha < 60^\circ \quad K = 15f \quad \dots(3.66)$$

$$60^\circ \leq \alpha < 75^\circ \quad K = 25f \quad \dots(3.67)$$

$$75^\circ \leq \alpha < 90^\circ \quad K = 40f \quad \dots(3.68)$$

$$\alpha = 90^\circ \quad K = 60f \quad \dots(3.69)$$

Codo Estándar (90°):

$$K = 30f \quad \dots(3.70)$$

Codo Estándar (45°):

$$K = 16f \quad \dots(3.71)$$

Codo de 90° no Estándar:

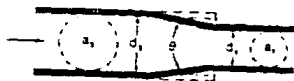


Fig. 3.5 Contracción Brusca y Gradual



Fig. 3.6 Expansión Brusca y Gradual

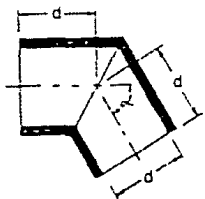


Fig. 3.7 Codo Angular



Fig. 3.8 Codo Estándar 90°



Fig. 3.9 Codo Estándar 45°



Fig. 3.10 Codos de 90 No Estándar



Fig. 3.11 Curva de 180° Radio Corto



Fig. 3.12 "T" Estándar

Si	$0 < r/d \leq 1$	$K = 20f$	.....(3.72)
	$1 < r/d \leq 2$	$K = 12f$	.....(3.73)
	$2 < r/d \leq 3$	$K = 12f$	.....(3.74)
	$3 < r/d \leq 4$	$K = 14f$	.....(3.75)
	$4 < r/d \leq 6$	$K = 17f$	.....(3.76)
	$6 < r/d \leq 8$	$K = 24f$	.....(3.77)
	$8 < r/d \leq 10$	$K = 30f$	.....(3.78)
	$10 < r/d \leq 12$	$K = 34f$	.....(3.79)
	$12 < r/d \leq 14$	$K = 38f$	.....(3.80)
	$14 < r/d \leq 16$	$K = 42f$	.....(3.81)
	$16 < r/d \leq 18$	$K = 46f$	.....(3.82)
	$18 < r/d \leq 20$	$K = 50f$	.....(3.83)

El coeficiente de una tubería que consiste en varios de estos codos iguales se calcula como:

$$K_r = (n-1)(0.25\pi f(r/d) + 0.5K) + K \quad \text{.....(3.84)}$$

K = coeficiente de cada codo.

n = no. de codos de 90°.

Codo de Retorno o de 180°:

$$K = 50f \quad \text{.....(3.85)}$$

3. TÉS, ENTRADAS Y SALIDAS DE TUBERÍA. (FIGURAS 3.12 A 3.14)

Te Estándard:

Flujo a lo largo, $K = 20f$ (3.86)

Flujo en el brazo, $K = 60f$ (3.87)

Entrada Gradual:

Si $r/d = 0$ $K = 0.5$ (3.88)

$0 < r/d \leq 0.02$ $K = 0.28$ (3.89)

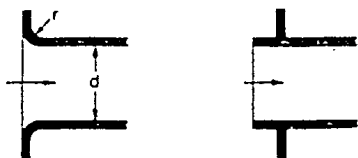


Fig. 3.13 Entradas de Tubería (Gradual y de Borde Saliente)

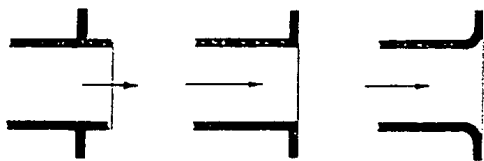


Fig. 3.14 Salidas de Tubería (Saliente, Afilado y Gradual)

$0.02 < r/d \leq 0.04$	$K = 0.24$	.....(3.90)
$0.04 < r/d \leq 0.06$	$K = 0.15$	.....(3.91)
$0.06 < r/d \leq 0.15$	$K = 0.09$	.....(3.92)
$0.1 \leq r/d$	$K = 0.04$	.....(3.93)

Entrada de Borde Saliente:

$$K = 0.78 \quad \text{.....(3.94)}$$

Salida de Borde Saliente, Afilado o Gradual:

$$K = 1.0 \quad \text{.....(3.95)}$$

4. VALVULAS. (FIGURAS 3.15 A 3.25)

Válvulas de Compuerta (Disco Acuñado, Disco Doble o Plug):

Si $\beta < 1$, $\theta \leq 45^\circ$

$$K = 8f/\beta^2 + 0.8\text{sen}(\theta/2)(1-\beta^2)/\beta^4 + 2.6\text{sen}(\theta/2)(1-\beta^2)^2/\beta^4 \quad \text{.....(3.96)}$$

Si $\beta < 1$, $45^\circ < \theta \leq 180^\circ$

$$K = [8f + 0.5(\text{sen}(\theta/2))^{1/2}(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2]/\beta^4 \quad \text{.....(3.97)}$$

$$\beta = d_1/d_2 \quad \text{.....(3.60)}$$

Válvulas de Globo:

$$\text{Si } \beta=1 \quad K = 340f \quad \text{.....(3.98)}$$

cuando $\beta < 1$, entonces aplica:

$$K = K_1/\beta^4 + \{[0.5(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2]\}/\beta^4 \quad \text{.....(3.102A)}$$

donde K_1 es el valor de K evaluada cuando $\beta=1$

Válvulas de Angulo:

Para válvulas de 180° y de 90° (disco simple),

$$\text{Si } \beta=1, K = 55f \quad \text{.....(3.100)}$$

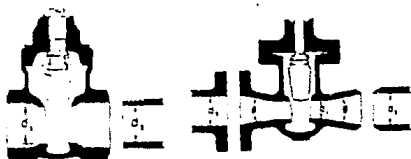


Fig. 3.15 Válvulas de Compuerta (De caña y Doble Obturador)

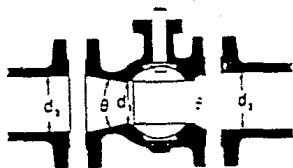


Fig. 3.16 Válvula de Globo

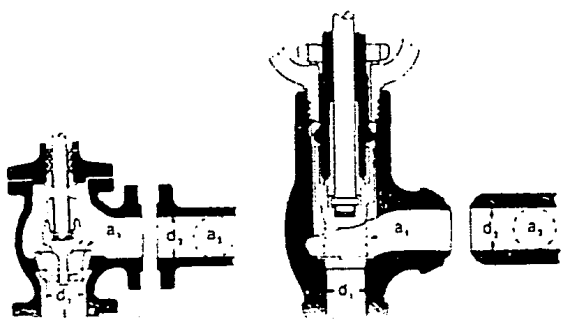
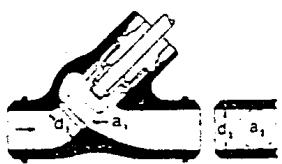
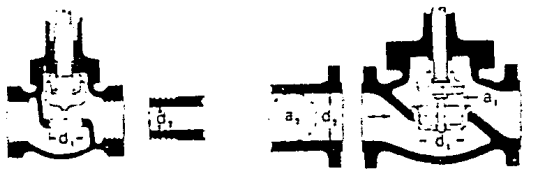


Fig. 3.17 Válvulas de Angulo

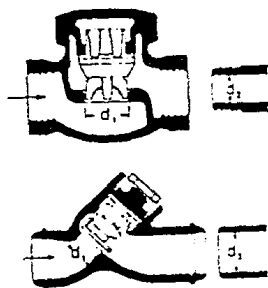


Fig. 3.18 Válvulas check de ajuste

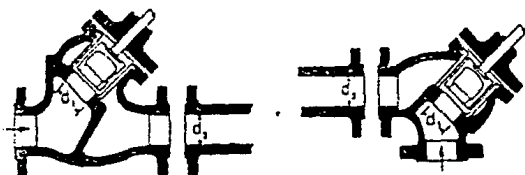


Fig. 3.19 Válvulas check de Paro

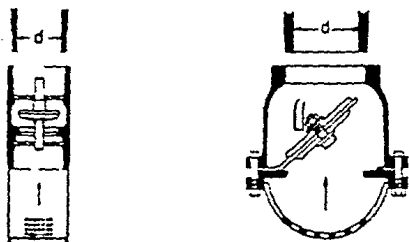


Fig. 3.20 Válvula check de Pie con Filtro

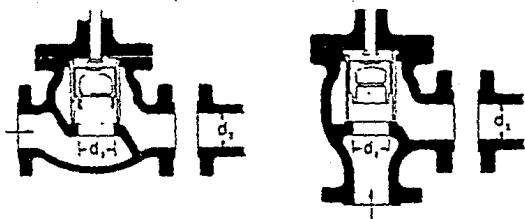


Fig. 3.21 Válvulas de Boia

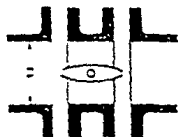


Fig. 3.22 Válvula de Mariposa

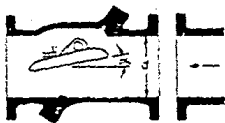


Fig. 3.23 Válvula Fulg. de Camino Recto

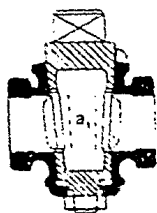


Fig. 3.24 Válvulas de Tres Vías (Flujo Recto)

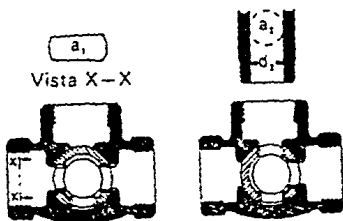


Fig. 3.25 Válvula de Tres Vías (Flujo en el Brazo)

para válvulas de 90° (doble disco),

$$\text{Si } \beta=1, K = 150f \quad \dots(3.101)$$

Si $\beta < 1$, entonces aplica:

$$K = K_i / \beta^4 + \{(\pi 0.5(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2)\} / \beta^4 \quad \dots(3.102B)$$

K_i , es el valor de K evaluada cuando $\beta=1$.

Válvulas Check:

- Balanceada Ajuste Oblicuo.

Si la mínima velocidad (fps) a través del disco es $35V^{1/2}$,

$$K = 100f \quad \dots(3.103)$$

Si la mínima velocidad (fps) a través del disco es $48V^{1/2}$,

$$K = 50f \quad \dots(3.104)$$

- Elevada de Ajuste Horizontal.

$$\text{Si } \beta=1, K = 600f \quad \dots(3.105)$$

$$\beta < 1, K = \left[600f + (\pi 0.5(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2) \right] / \beta^4 \quad \dots(3.106)$$

$$\text{velocidad mín.} = 40\beta^2 V^{1/2} \quad \dots(3.107)$$

- Elevada de Ajuste Directo.

$$\text{Si } \beta=1, K = 55f \quad \dots(3.108)$$

$$\beta < 1, K = \left[55f + (\pi 0.5(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2) \right] / \beta^4 \quad \dots(3.109)$$

- De Disco.

$$\alpha = 5^\circ$$

$$\alpha = 15^\circ$$

Tamaño de 2 a 8 in, $K = 40f$,

$K = 120f$, $\dots(3.110)$

Tamaño de 10 a 14 in, $K = 30f$,

$K = 90f$, $\dots(3.111)$

Tamaño de 16 a 48 in, $K = 20f$,

$K = 60f$, $\dots(3.112)$

mín. velocidad (fps), $80V^{1/2}$,

$30V^{1/2}$, $\dots(3.113)$

- De Paro (globo).

$$\text{Si } \beta=1, \quad K = 400f \quad \dots(3.114)$$

$$\beta < 1, \quad K = \left[400f + \beta(0.5(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2) \right] / \beta^4 \quad \dots(3.115)$$

$$\text{velocidad mínima} = 55\beta^2 V^{1/2} \quad \dots(3.116)$$

- De Paro (ángulo).

$$\text{Si } \beta=1, \quad K = 200f \quad \dots(3.117)$$

$$\beta < 1, \quad K = \left[200f + \beta(0.5(1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2) \right] / \beta^4 \quad \dots(3.118)$$

$$\text{velocidad mínima} = 75\beta^2 V^{1/2} \quad \dots(3.119)$$

- De Pie con Filtro de Malla.

$$K = 420f \quad \dots(3.120)$$

$$\text{velocidad mínima} = 15V^{1/2} \quad \dots(3.121)$$

- De Pie con Filtro Perforado.

$$K = 75f \quad \dots(3.122)$$

$$\text{velocidad mínima} = 35V^{1/2} \quad \dots(3.123)$$

Valvulas de Bola:

$$\text{Si } \beta=1, \theta=0; \quad K = 3f \quad \dots(3.124)$$

$$\beta < 1, \theta \leq 45^\circ;$$

$$K = \left[3f + \text{sen}(\theta/2) [0.8(1-\beta^2) + 2.6(1-\beta^2)^2] \right] / \beta^4 \quad \dots(3.125)$$

$$\beta < 1, 45^\circ < \theta \leq 180^\circ;$$

$$K = \left[3f + 0.5(\text{sen}(\theta/2))^{1/2} (1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2 \right] / \beta^4 \quad \dots(3.126)$$

Válvula de Mariposa:

Tamaño de 2 a 8 in, $K = 45f$ (3.127)

Tamaño de 10 a 14 in, $K = 35f$ (3.128)

Tamaño de 16 a 24 in, $K = 25f$ (3.129)

Válvula Plug de Camino Recto:

Si $\beta=1$, $K = 18f$ (3.130)

Válvula de Tres Vías (flujo recto).

Si $\beta=1$, $K = 30f$ (3.131)

Válvula de Tres Vías Flujo en el Brazo:

Si $\beta=1$, $K = 90f$ (3.132)

Para los tres casos anteriores si $\beta < 1$,

$$K = \left[K_1 + 0.5(\sin(\theta/2))^{1/2} (1-\beta^2) + (1-\beta^2)^2 \right] / \beta^4 \quad \text{.....(3.133)}$$

5. MEDIDORES DE FLUJO. (FIGURAS 3.26 A 3.28)

Para calcular el coeficiente de resistencia y la longitud equivalente de este accesorio, se requiere conocer la caída de presión teórica que producen dado un flujo.

Los medidores de flujo se pueden clasificar en la forma siguiente:

Medidores que Provocan Caídas de Presión.

1. De Caída de Presión Variables.

a. Velocidades Promedio.

- Placa de Orificio.

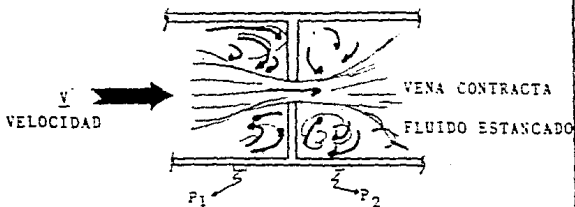


Fig. 3.26 Placa de orificio.

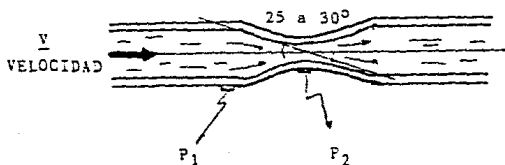


Fig. 3.27 Tubo de venturi.

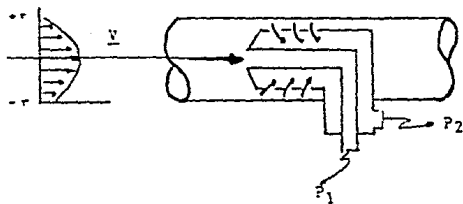


Fig. 3.28 Tubo pitot.

$$\Delta P = (\rho/2g_c)(Q/SCo)^2[(D_1^4/D_0^4)-1] \quad \dots(3.134)$$

$$K = (1/Co)^2[(D_1^4/D_0^4)-1] \quad \dots(3.135)$$

Co = coeficiente de descarga $\cong 0.61$ (flujo turbulento) $\dots(3.135)$

Ver figura (3.29).

La ecuación (3.134) proviene del balance de energía y masa en el medidor, y la (3.135) de la (3.52).

Este tipo de medidor es barato, fácilmente construible y no requiere de mantenimiento constante. Sin embargo, provoca altas caídas de presión, y no son adecuadas para manejar fluidos con sólidos en suspensión, abrasivos o muy corrosivos.

- Tubo de Venturi.

$$\Delta P = (\rho/2g_c)(Q/SCv)^2[(D_1^4/D_0^4)-1] \quad \dots(3.136)$$

$$K = (1/Cv)^2[(D_1^4/D_0^4)-1] \quad \dots(3.137)$$

Cv = Coeficiente de expansión del Venturi o de descarga $\cong 0.98$

La ecuación (3.136) proviene del balance de energía y masa del punto (1) al (6), ver figura (3.27), y la (3.137) de la (3.52).

Este tipo de medidor es caro, difícil de construir, respecto al de orificio, y ocupan más espacio que la placa de orificio. Genera bajas caídas de presión, maneja fluidos abrasivos y requieren poco mantenimiento.

b. Velocidades Puntuales.

- Tubo Pitot.

$$\Delta P = (Q C_{rz} / S C_p) \rho / 2 g_c \quad \dots(3.138)$$

$$K = (C_{rz} / C_p)^2 \quad \dots(3.139)$$

$$C_{rz} = v / V_M = f(\text{flujo}, \mu, z) \cong 0.5 \text{ (laminar)} \\ \cong 0.81 \text{ (turbulento)}$$

$$C_p = \text{coeficiente de descarga} \cong 0.98 \cong 1.0$$

2. De Caída de Presión Constante.

a. Rotámetro.

$\Delta P = \text{constante}$. área variable.

$$u_r = C_R \{ [2g V_f (\rho_f - \rho)] / S_f \rho (S_1^2 / S_z^2 - 1) \} \quad \dots(3.140)$$

C_R , es función de la forma del flotador.

V_f , es el volumen del flotador, cte.

S_f , es el área del flotador, cte.

S_1 , es el área de referencia (puede ser el área de entrada del rotámetro).

S_z , es el área anular (cambia de cero a un valor máximo)

ρ , es la densidad del fluido.

ρ_f , es la densidad del flotador.

g , es la aceleración de la gravedad.

u_r , es la velocidad del fluido en el punto de medición del rotámetro.

$$Q = u_r S_z \quad \dots(3.141)$$

donde Q es el flujo volumétrico que pasa a través del punto de medición.

3.3 ANALISIS HIDRAULICO EN REGIMEN TRANSIENTE (GOLPE DE ARIETE).

En sistemas de almacenamiento subterráneo, la presencia de equipo de bombeo y la naturaleza discontinua de las diversas operaciones (vaciado y/o llenado de las cavidades), implican la necesidad de un análisis de lo que ocurre en la red de transporte de fluido cuando arranca y/o para el sistema de bombeo de crudo y de salmuera de acuerdo a las diversas operaciones efectuadas.

En la puesta en marcha y paro de una bomba; en la apertura y cierre de una válvula y en general, en toda variación tanto en la velocidad del fluido, así como en la presión, se produce un régimen transiente de flujo conocido como "Golpe de Ariete". Este fenómeno consiste en una oscilación de la presión que se propaga por el ducto y es amortiguado con el tiempo. Al no considerar estos efectos en la etapa de diseño de un sistema hidráulico (equipos, líneas, accesorios, etc.), éste estará sujeto; a violentos movimientos, vibraciones y posible ruptura de los ductos que conforman la red hidráulica.

Con un mayor entendimiento de naturaleza y severidad del problema de golpe de ariete, las fuerzas destructivas se podrán evitar. Este entendimiento constituye para el ingeniero químico un papel importante; es decir, dar recomendación sobre la introducción o incorporación de medidas preventivas en el diseño de instalaciones y sistemas hidráulicos, los cuales prevendrán los efectos nocivos y reducirán costos por daños a los equipos y a la tubería.

En este punto del capítulo en curso, se analizarán los efectos de sobrepresiones causados por el golpe de ariete, en sistemas que transportan líquidos en una sola fase, tomando en cuenta la compresibilidad del líquido y la elasticidad de las paredes del conducto.

El estudio del transiente, está basado en dos teorías

básicas. La primera considera al fluido como una sustancia inelástica, en la que los cambios de presión se propagan instantáneamente a través del sistema y las propiedades elásticas de la tubería no son de gran importancia. Esta teoría es conocida como TEORÍA DE LA COLUMNA RÍGIDA.

La segunda teoría toma en cuenta los efectos de elasticidad del fluido y de las paredes de la tubería los cuales se consideran en los cálculos. Dentro de esta teoría es clasificado el fenómeno de golpe de ariete.

3.3.1 CAUSAS DEL RÉGIMEN DE FLUJO TRANSIENTE.

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

Los ejemplos más comunes de causas del régimen transiente y que suelen ser los más peligrosos debido a los fuertes cambios de presión que ocasionan dentro de un sistema son:

- A) Cambios Súbitos en el Flujo por Cierre y Apertura de una Válvula.

El cierre o apertura de una válvula en una tubería por la cual fluye un líquido a régimen permanente ocasiona un incremento o bien una disminución de la resistencia al flujo que produce cambios en su magnitud los cuales son dependientes del tiempo e influyen en la presión a la que se encuentra sometida la tubería, la cual puede sufrir ruptura y daños económicos serios. Por lo tanto en la etapa de diseño del sistema deben preverse este tipo de situaciones y

dar recomendaciones y soluciones viables para evitar sus efectos.

B) Arranque de un Sistema de Bombeo.

El arranque de un sistema de bombeo (oleoductos), cuando existen varias estaciones de bombeo en serie, generalmente se hace de la estación final y retrocediendo hasta la estación de origen. Las estaciones intermedias que se encuentren entre la estación de origen y la terminal nos sirven para dar la suficiente presión de succión.

Quando las bombas de alta velocidad entren en operación, es recomendable que al inicio del arranque se mantenga una reducción del flujo a la descarga, para que de esta manera se evite desarrollar inicialmente un alto Par a flujo total, lo que provoca problemas, e inclusive fallas al accionador de la(s) bomba(s). Dependiendo de este control de flujo a la descarga puede suministrar inestabilidad a la tubería. Con esto podemos inferir que en algún momento dado se cae en el caso de apertura súbita de una válvula para poner en movimiento el fluido.

Cabe hacer notar que el arranque local mantendrá las bombas en recirculación hasta que la estación anterior entre en operación.

C) Paro Programado de un Sistema de Bombeo.

El paro programado de un sistema de bombeo, se desarrolla en sentido contrario al procedimiento de arranque. Hay que tener especial cuidado en la forma en que se desarrolla el paro, ya que esto puede asemejarse a la falla de potencia de una estación de bombeo, y por consiguiente provocará que la tubería esté sujeta al peligro de un colapso, es decir, que la tubería se estreche.

Por otro lado se puede hacer 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-passeando 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 del flujo, provocando altas presiones en la descarga de la estación previa a la estación en recirculación, originándose de esta manera flujo a régimen transiente.

D) Falla de Energía en los Accionadores.

La falta súbita de energía en los accionadores del sistema de bombeo provoca flujo transiente.

Existen algunas condiciones de operación de los accionadores que son capaces de producir sustanciales cambios de presión en la tubería, de esas condiciones una de las más importantes es la rápida desaceleración de los accionadores por falla en el suministro de energía. Cuando esto ocurre, la energía que mantiene en rotación a la bomba es la energía Inercial proporcionada tanto por la circulación del fluido a través de la bomba, como de la inercia de las partes en movimiento (impulsor), siendo entonces, reducida la velocidad de rotación de la bomba rápidamente. Cuando se reduce la velocidad de rotación de la bomba, el flujo del líquido del lado de la descarga también disminuirá y como resultado de estos cambios rápidos en él, se producirán condiciones de flujo transiente en la que se formarán ondas de presión del lado de la descarga, las cuales se reflejarán a través del sistema.

3.3.2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO 'GOLPE DE ARIETE'.

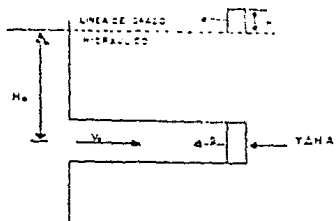
Como ejemplo más simple y didáctico del fenómeno "Golpe de Ariete" se presenta una descripción generada por el cierre súbito de una válvula, lo cual provocará un estado no permanente. Se describe este sistema considerando la teoría de la columna rígida y que las pérdidas por fricción son despreciables en el sistema. Se toma este ejemplo por ser la causa más común de régimen transiente y por ser el más sencillo.

Considerando el sistema de tubería mostrado en la figura (3.28A). Al instante de cerrar la válvula el fluido se desplaza con una velocidad (V_0) y una presión inicial antes de la válvula de (P_0), tan pronto como la primera capa se desplaza, esta se detiene y la misma acción se aplica para la siguiente capa del fluido desplazado, donde la velocidad de éste cambiará a ($V_0 + \Delta V$) la presión en la válvula será ($P_0 + \Delta P$). Por lo tanto una onda de presión de magnitud (ΔP), viajará desde la válvula, a la misma velocidad a la que viaja el sonido en el seno del fluido comunmente llamada velocidad de onda o celeridad, la cual será designada con la letra (c).

Si aplicamos un volumen de control a la figura (3.28B), en la cual la onda se mueve a la izquierda con una velocidad absoluta ($c - V_0$). Donde la velocidad de entrada y salida del flujo en el volumen de control son ($V_0 + c$) y ($V_0 + c + \Delta V$), respectivamente, y aplicando el Principio de Conservación de Masa, para el volumen de control dado, se obtiene:

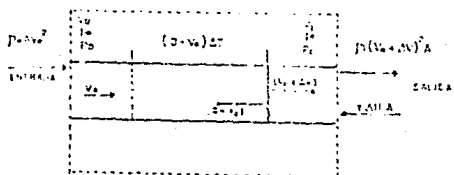
$$\rho_1(V_0 + c + \Delta V) - \rho_0(V_0 + c) = 0 \quad \dots\dots(3.142)$$

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



SISTEMA DE TUBERIA

FIG. 3.28 (A)



VOLUMEN DE CONTROL

FIG. 3.28 (B)

Entonces obtenemos:

$$\gamma \Delta H = \rho c(c+V_0)\Delta V \quad (3.143)$$

en donde la densidad del fluido esta relacionada como ($\rho = \gamma/g$)
y sustituyendo se tiene:

$$- \Delta H = (c/g)(1 + V_0/c)\Delta V \quad (3.144)$$

donde

- ΔH = es el cambio de la cabeza de presión. (metros)
- c = velocidad de propagación de la onda. (m/s)
- g = aceleración de la gravedad.
- V_0 = velocidad del fluido a régimen permanente. (m/s)
- ΔV = es el cambio de velocidad. (m/s)

Como la relación (V_0/c) es pequeña, puede ser despreciada y considerando toda la longitud de la tubería. tenemos que el cabezal o presión es la suma algebraica de todas la ondas de presión directas o reflejadas; con lo que se obtiene:

$$\sum \Delta H = \pm (c/g)\sum \Delta v \quad (3.145).$$

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

3.3.3 ECUACIONES DE MOVIMIENTO Y DE CONTINUIDAD PARA REGIMEN TRANSIENTE.

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

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

El flujo transiente a través de conductos cerrados es descrito por ecuaciones dinámicas de momentum y continuidad. Las derivaciones de estas ecuaciones se mostrarán a continuación. Para ello se harán las siguientes consideraciones, las cuales son frecuentes e involucran las propiedades de la tubería y del fluido:

- a) El fluido en el sistema de tuberías es elástico, la densidad homogénea y siempre en estado líquido.
- b) El material de las paredes de la tubería o conducto es homogéneo, isotrópico y elástico.
- c) Las velocidades y presiones en la tubería, las cuales siempre son de flujo completo están uniformemente distribuidas bajo cualquier sección transversal de la tubería.
- d) El cabezal de velocidad en la tubería es despreciable cuando es comparado con el cambio de presión.
- e) El flujo en el conducto se efectúa en una sola dirección espacial, es decir, puede ser modelado en un sólo eje de coordenadas.
- f) Las ecuaciones para calcular las pérdidas por fricción a régimen permanente en tuberías, serán consideradas válidas durante el régimen transiente para simplificar el modelado del fenómeno.

Para el desarrollo de las ecuaciones fundamentales del fenómeno se usara la siguiente nomenclatura:

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

Se considerará que las velocidades cuyo vector de dirección sea corriente abajo son positivas, H es el cabezal piezométrico a centro de la línea del conducto sobre el nivel de referencia.

La ecuación está dada en términos de presión $P(x,t)$, velocidad $V(x,t)$, $H(x,t)$ y $Q(x,t)$. En la mayoría de este tratamiento algebraico, estas variables son referidas como variables dependientes, y (x,t) como variables independientes.

En la figura (3.29) se muestra un diagrama de cuerpo libre de fluido, considerando un elemento inclinado con respecto a la horizontal un ángulo (α) , teniendo un área transversal (A) y una diferencial de longitud (δx) . Si el cabezal piezométrico y la velocidad a la distancia (x) son (H) y (V), entonces sus valores correspondientes a $(x + \delta x)$ serán:

$$H + (\partial H / \partial x) \delta x \quad \text{y} \quad V + (\partial V / \partial x) \delta x \quad (3.146)$$

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

$$F_1 = \rho A(H-Z) \dots (3.147)$$

$$F_2 = \rho A(H-Z) + (\partial H / \partial x) \partial x \quad (3.148)$$

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

$$\Delta P = \rho f L V |V| / 2D \quad (3.149)$$

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

$$\Delta P \pi D^2 / 4 = S \pi D L \quad (3.150)$$

por tanto, el esfuerzo cortante (S) está dado por:

$$S = \rho f V |V| / 8 \quad (3.151)$$

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

Aplicando la segunda ley del movimiento de Newton, que establece: que un pequeño elemento de velocidad que se mueve con el fluido, es acelerado por las fuerzas que actúan sobre él,
 $\Sigma \text{FUERZAS} = \text{MASA} \times \text{ACELERACION}$.

De la figura (3.29), la suma de las fuerzas está dada por:

$$\Sigma \text{FUERZAS} = \rho A(H-Z) - \rho A[H-Z + (\partial H / \partial x) \partial x] - \rho (f V |V| / 8 g) \pi D \partial x \quad (3.152)$$

considerando la masa del fluido en cuestión tenemos:

$$\text{MASA} = (\rho/g)A\delta x \quad (3.153)$$

$$\text{ACELERACION} = dV/dt \quad (3.154)$$

combinando las tres últimas ecuaciones en la expresión de la ley de Newton obtenemos:

$$(\rho/g)A\delta x(dV/dt) = -\rho A(\partial H/\partial x)\delta x - V|V|\pi D\delta x(\rho f/8g) \quad (3.155)$$

dividiendo entre δx e igualando a cero,

$$(\rho/g)A(dV/dt) + \rho A(\partial H/\partial x) + V|V|\pi D(\rho f/8g) \quad (3.156)$$

simplificando la ecuación anterior.

$$(dV/dt) + g(\partial H/\partial x) + fV|V|/2D = 0 \quad (3.157)$$

El término de aceleración es para una partícula del fluido, la cual está en movimiento con éste y dado por,

$$(dV/dt) = V\partial V/\partial x + \partial V/\partial t \quad (3.158)$$

sustituyendo la ecuación (3.158) en la (3.157),

$$g(\partial H/\partial x) + fV|V|/2D + (\partial V/\partial t) + V\partial V/\partial x = 0 \quad (3.159)$$

En la mayoría de los problemas de transiente, el término $V\partial V/\partial x$ es más pequeño que $\partial V/\partial t$ por lo que obtenemos,

$$g(\partial H/\partial x) + fV|V|/2D + (\partial V/\partial t) = 0 \quad (3.160)$$

En términos del flujo (Q) la ecuación (3.160) se expresa como:

$$g(\partial H/\partial x)A + fQ|Q|/2DA + (\partial Q/\partial t)/A = 0 \quad (3.161)$$

La ecuación anterior es la de movimiento para flujo transiente, la cual describe el cambio de cabezal respecto a la distancia, el cambio de flujo o velocidad con respecto al tiempo las cuales están relacionadas con las variables que permanecen constantes durante el transiente, siendo éstas el área y el diámetro de la tubería.

En el desarrollo de la ecuación de continuidad se considerará el volumen de control mostrado en la figura (3.30), con longitud (δx), al tiempo (t) en la dirección axial. Aplicando la ley de conservación de masa, en donde el flux de entrada dentro del volumen de control es justo igual a la velocidad de incremento,

$$-(\rho A(V-U))\delta x = (\rho A(U \partial/\partial x + \partial/\partial t))\delta x \quad (3.162)$$

igualando a cero y simplificando, obtenemos

$$(\rho A V)_x + (\rho A)_t = 0 \quad (3.163)$$

o bien,

$$\rho A (\partial V / \partial x) + V (\rho A)_x + (\rho A)_t = 0 \quad (3.164)$$

En la ecuación (3.164) los dos términos $V(\rho A)_x + (\rho A)_t$ representan la derivada de ρA con respecto al movimiento de una partícula de masa, entonces:

$$[V(\partial \rho A / \partial x) + \partial \rho A / \partial t] + \rho A (\partial V / \partial x) = 0 \quad (3.165)$$

multiplicando por $(1/\rho A)$,

$$(1/\rho A)(V \partial \rho A / \partial x + \partial \rho A / \partial t) + \partial V / \partial x = 0 \quad (3.166)$$

Analizando esta ecuación se tiene que la derivada total del escalar ρA se encuentra expresado en el primer término de la expresión, por tanto,

$$(1/\rho A)(d\rho A/dt) + \partial V / \partial x = 0 \quad (3.167)$$

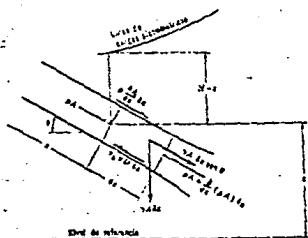


Fig. 3.29 Diagrama de Cuerpo Libre para Deducir la Ecuación de Movimiento.

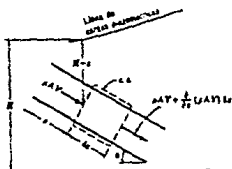


Fig. 3.30 Volumen de Control para la Ecuación de Continuidad

desarrollando la derivada total de la ecuación anterior obtenemos,

$$(1/\rho A)(\rho dA/dt + A dc/dt) + \partial V/\partial x = 0 \quad (3.168)$$

o bien

$$(dA/dt)/A + (dc/dt)/c + \partial V/\partial x = 0 \quad (3.169)$$

Lo anterior es válido para toda clase de tubería, así como para cualquier fluido, incluyendo gas. Se consideran los términos de efecto elástico de la tubería y del fluido; $(dA/dt)/A$, considera los cambios del área del ducto por elasticidad durante el golpe de ariete; por otra parte, $(dc/dt)/c$ considera los cambios de masa del fluido, que se presentan en todo momento a través de la tubería por su deformación elástica.

Los efectos se desarrollan de la siguiente forma:

- a) Los cambios de masa involucran una propiedad que se conoce como el módulo de elasticidad (K) de un fluido, el cual está definido como:

$$K = \Delta P / (\Delta \rho / \rho) = (dP/dt) / [(dc/dt)/c] \quad (3.170)$$

entonces,

$$(dP/dt)/K = (dc/dt)/c \quad (3.171)$$

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

Para el desarrollo de este caso primero definiremos el término de razón de Poisson (μ_1),

$$\begin{aligned}\mu_1 &= -(\text{unidad de tensión lateral/unidad de tensión axial}) \\ &= -\xi/\xi_1 \quad (3.172)\end{aligned}$$

El cambio de área es el resultado de un cambio total en la tensión lateral o circunferencial (ξ_1).

$$\Delta A = \Delta(\xi_1 D \pi D / 2)$$

dividiendo entre el área tenemos

$$\Delta A/A = (dA/dt)/A = 2(d\xi/dt) \quad (3.173)$$

Además,

$$\xi_1 = \xi_2 + \xi$$

si

$$\mu_1 = -(\xi/\xi_1)$$

entonces,

$$\xi_1 = \xi_2 - \mu_1 \xi_1 \quad (3.174)$$

El esfuerzo y la tensión están relacionados por el módulo de elasticidad de Young (E).

$$d\xi_2/dt = (d\sigma_2/dt)/E \quad \text{y} \quad d\xi_1/dt = (d\sigma_1/dt)/E \quad (3.175)$$

en las cuales,

σ_1 = unidad de esfuerzo axial.

σ_2 = unidad de esfuerzo lateral.

por lo tanto,

$$\xi_1 = (dcz/dt - \mu_1 d\sigma_1/dt)/E \quad (3.176)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.171, 3.172, 3.173 y 3.176) en la ecuación (3.169), obtenemos:

$$(dcz/dt)/K + (dcz/dt - \mu_1 d\sigma_1/dt)^2/E - \partial V/\partial x = 0 \quad (3.177)$$

Por otra parte, si se considera la figura (3.31), en la cual (e) es el espesor de la tubería, y (Tf) es la fuerza de tensión circundante por unidad de longitud de tubería, o bien:

$$\sigma_z = T_f/e = \gamma HD/2e \quad \text{ó}$$

$$\Delta \sigma_z = dP/2e \quad (3.178)$$

Por lo tanto,

$$dcz/dt = (dP/dt)D/2e \quad (3.179)$$

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

Haciendo referencia a los tres casos mencionados anteriormente, la razón de cambio del esfuerzo a la tensión axial ($d\sigma_1/dt$) está dado por:

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

$$d\sigma_1/dt = (dP/dt)A/\pi D e \quad (3.180)$$

Por otra parte,

$$A = \pi D^2/4 \quad (3.181)$$

Por lo tanto,

$$dc_1/dt = (dP/dt)D/4e \quad (3.182)$$

Caso b). Para un ensanchamiento de tubería.

$$\xi_1 = 0 \quad \text{y} \quad dc_1/dt = \mu dz/dt \quad (3.183)$$

Caso c). Para juntas de expansión.

$$dc_1/dt = 0 \quad (3.184)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.179), 3.182, 3.183 y 3.184) en (3.177) obtenemos:

$$C_1(dP/dt)D/Ee + (dP/dt)/K + \partial V/\partial x = 0 \quad (3.185)$$

donde,

$$\text{Caso a).} \quad C_1 = 1 - \mu/2 \quad (3.186)$$

$$\text{Caso b).} \quad C_1 = 1 - \mu \quad (3.187)$$

$$\text{Caso c).} \quad C_1 = 1 \quad (3.188)$$

Si multiplicamos la ecuación (3.185) por (K) y la dividimos entre (ρ) se obtiene,

$$(dP/dt)/\rho + \{ (K/\rho) / (KD/Ee) C_1 + 1 \} \partial V/\partial x = 0 \quad (3.189)$$

En suma, de lo antes descrito la velocidad de onda de golpe de ariete depende de las propiedades elásticas, tanto de la tubería como del fluido: así como, de las restricciones externas: tipo de soporte y la libertad del conducto para moverse en la dirección axial. Por tanto, el cuadrado de la velocidad de onda se define como,

$$c^2 = (K/\rho) / ((KD/Ee) C_1 + 1) \quad (3.190)$$

en donde,

C_1 depende del caso al que se refiera.

E = módulo de elasticidad del material (Young).

D = diámetro de la tubería.

e = espesor de la tubería.

K = módulo de elasticidad del fluido.

ρ = densidad del fluido.

La tabla (3.1) muestra algunos valores de los módulos de elasticidad y Razón de Poisson para diferentes materiales.

La tabla (3.2) presenta los módulos de elasticidad y densidad para ciertos líquidos comunes.

Las figuras (3.32) y (3.33) representan las curvas características que relacionan los parámetros adimensionales (K/E) y (D/e) con la velocidad de onda o celeridad para varios materiales.

Sustituyendo la ecuación (3.190) en la (3.189), se tiene:

$$(dP/dt)/\rho + c \, dV/\partial x = 0 \quad (3.191)$$

En la ecuación (3.191) c es considerada constante para una colección de propiedades, tanto del fluido como de la tubería, en la mayoría de los casos.

Considerando la figura (3.29) tenemos que el cabezal piezométrico está dado por

$$P = \rho g(H-Z) \quad \text{o bien,}$$

$$dP/dt = \rho g(dH/dt - dZ/dt) \quad (3.192)$$

El cambio de altura está dado por



Fig. 3.31 Sistema de Tubería

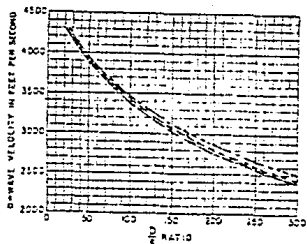
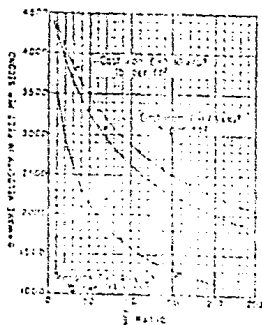


Fig. 3.32 Curvas Características que Relacionan el Parámetro D/e con la Velocidad de Onda para varios Materiales.



VELOCIDAD DE ONDA DE PRESION PARA TUBERIA FIERRO COLADO

FIG. 3.33

Referencia No. 7

$$dH/dt = V\partial H/\partial x + \partial H/\partial t \quad (3.193)$$

$$dZ/dt = V\partial Z/\partial x + \partial Z/\partial t \quad (3.194)$$

Sustituyendo en (3.192)

$$dP/dt = \rho g(V\partial H/\partial x + \partial H/\partial t - V\partial Z/\partial x - \partial Z/\partial t) \quad (3.195)$$

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

$$\partial Z/\partial t = 0; \partial Z/\partial x = \text{sen } \alpha.$$

$$(dP/dt)/\rho = g(V\partial H/\partial x + \partial H/\partial t - V\text{sen} \alpha) \quad (3.196)$$

sustituyendo la ecuación (3.196) en la ecuación (3.191), y dividiendo entre (g) obtenemos,

$$V\partial H/\partial x + \partial H/\partial t - V\text{sen} \alpha + (c^2/g)\partial V/\partial x = 0 \quad (3.197)$$

La ecuación (3.197) es la forma conveniente de la ecuación de continuidad, con (V o Q) y (H o P) como variables dependientes, y con (x y t) como variables independientes.

Transformando la ecuación (3.197) en términos del gasto (Q) tenemos,

$$(Q/A)\partial H/\partial x + \partial H/\partial t - (Q/A)\text{sen} \alpha + (c^2/gA)\partial Q/\partial x = 0 \quad (3.198)$$

Las ecuaciones de continuidad (3.197) y (3.162) forman un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales de primer orden, la solución aproximada de éstas dependerá del método utilizado, y de las restricciones pertinentes, hechas en cada solución. Por otra parte, el factor de fricción varía con el número de Reynolds. Por tanto, (f) es considerado constante, porque los efectos de las variaciones del estado transiente son despreciables.

TABLA 3.1

MODULO DE ELASTICIDAD Y RELACION DE POISSON'S PARA AL-
GUNOS MATERIALES DE TUBERIAS.

Acero	$E = 30 \times 10$	psi	$\mu = 0.30$
Hierro Colado	$E = 24 \times 10$	psi	$\mu = 0.28$
Cobre	$E = 16 \times 10$	psi	$\mu = 0.30$
Aluminio	$E = 10.5 \times 10$	psi	$\mu = 0.33$
PVC	$E = 4.0 \times 10$	psi	$\mu = 0.45$
Plástico con fi- bra de vidrio re- forzado (PFV)	$E = 1.3 \times 10$	psi	$\mu = 0.27$ a $\mu = 0.30$
Asbesto Cemento	$E = 3.4 \times 10$	psi	
Concreto	$E = 57,000$	psi	

TABLA 3.2

MODULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD DE LIQUIDOS COMUNES
A PRESION ATMOSFERICA

LIQUIDOS	TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD (LB/FT ³)	MODULO DE ELASTICIDAD (PSI) X 10
Agua	20	62.60	317.63
Agua de Mar	15	63.99	329.23
Alcohol Etílico	0	49.32	191.45
Benceno	15	54.93	152.29
Crudo (Petroleo)	15	56.80	217.56
Glicerina	15	78.86	642.52
Keroseno	20	50.29	191.45

C A P I T U L O 4.

DESCRIPCION DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO.

4.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO.

En México, se han realizado domos salinas en la región Sureste de Veracruz, pudiéndose ampliar el número de estos debido a que la zona mencionada es muy extensa y a que se tiene un segundo yacimiento localizado en los estados de Nuevo León, Tamaulipas y Coahuila, cercano a los Estados Unidos.

El yacimiento del Sureste: localizado en la parte sur del estado de Veracruz con una entrante hacia el oriente en forma de cuna pasando por las ciudades de Cárdenas y Villahermosa, Tabasco para culminar en el poblado de Salto de Agua, Chiapas; está compuesto principalmente de cloruro de sodio casi puro, con pequeñas cantidades de sulfato de calcio y dolomita. Debido a la alta solubilidad del cloruro de sodio, el yacimiento del Sureste es de primordial importancia porque se pueden desarrollar domos salinos mediante el método de minado por solución.

Petróleos Mexicanos, perforando pozos de petróleo y gas, ha descubierto numerosos depósitos salinos en el área norte del Istmo de Tehuantepec y en la región sur del Golfo de Campeche. Descubrimientos recientes hacen suponer que este yacimiento es mucho más extenso.

El proyecto Tuzandépetl, de almacenamiento bajo tierra de aceite crudo, podrá albergar a unos 800 metros de profundidad promedio; el cual reforzará el sistema ya existente de almacenamiento, transporte y distribución del área, a donde concurre el 90% de la producción total y permitir continuidad en el abastecimiento durante las épocas de mal tiempo.

La producción podrá así, ser enviada a los centros principales de exportación, refinación y consumo, tales como Pajaritos, Rabón Grande, Minatitlán, Poza Rica, Venta de Carpio y Salina Cruz, sin pasar por Nuevo Teapa y entroncará en su fase final con el oleoducto transmítico de 48 pulgadas de diámetro que se cons-

truirá de Nuevo Teapa en Veracruz, a Salina Cruz en Oaxaca, para satisfacer las necesidades de la Cuenca del Pacífico.

El yacimiento de Tuzandépetl forma parte de la cuenca salina del istmo y se encuentra situado entre los paralelos 18°25' y 94° 27' de longitud oeste.

Como puntos de referencia se encuentran, la ciudad de Coatzacoalcos a 12 km. al norte, Nanchital a 4 km. orientada al noroeste y el complejo petroquímico de Pajaritos a 9 km. al noroeste.

La estructura es de forma cómica con flancos de pendientes suaves, su eje principal está orientado del noroeste al suroeste. La mencionada estructura parece ser la continuidad de una secuencia constituida al norte por las estructuras Rabón Grande y Pajaritos, y finalmente la de Tuzandépetl en el extremo sur, como puede verse en la figura (4.1).

Se pretenden utilizar las cavidades existentes en la zona de Tuzandépetl generadas durante la explotación de salmuera por la compañía Industrias Químicas del Istmo, previa perforación de nuevos pozos para el abastecimiento de sal al complejo químico de Pajaritos y almacenamiento de hidrocarburos posteriormente.

Con el objeto de aprovechar estas cavidades como almacenamiento de hidrocarburos, los pozos tuvieron que ser reparados y adaptados de acuerdo a los requerimientos, ya que contaban con sólo dos tuberías cementadas y dos colgadas. El estado actual de las cavidades se muestra en la figura (4.2).

Al final de la lixiviación cuando la cavidad ya alcanzó su volumen útil final puede ponerse en explotación. Entre estas dos fases existe una transición que se puede resumir de la siguiente manera:

- Último sonar de lixiviación para averiguar el volumen final.
- Cambio de las instalaciones de la cabeza de pozo pasando del

arreglo de lixiviación al de explotación.

- Recuperación del sello de gasóleo.
- Recuperación de las tuberías de 11 3/4 de pulgada y 7 pulgadas.
- Descenso de la tubería de 11 3/4 pulgadas hasta su nivel de explotación.
- Poner el sello al nivel del programa de prueba.
- Prueba de la cavidad (dura aproximadamente dos semanas para llegar a una situación casi saturada de la salmuera).
- Recuperación del sello.

Al principio de la lixiviación, los pozos estarán equipados con tuberías de revestimiento que permitirán, utilizando el caudal de la mejor manera, efectuar la lixiviación y la explotación de las cavidades.

Para lixiviar los pozos se equipan con tuberías de revestimiento de 18 pulgadas - 11 3/4 pulgadas y tuberías de bombeo de 7 pulgadas. Se escogió tubería con diámetro estándar de 18 pulgadas, espesor de 0.6 pulgadas, grado J55, cuya presión de colapso es de 1688 libras por pulgada cuadrada (tubería vacía) para disminuir la pérdida de carga y por razones de costo. Esta tubería con otra interior de 11 3/4 pulgadas, permite obtener el caudal deseado en cada cavidad, siendo ésta la tubería cementada.

En la fase explotación, se sacan las tuberías de bombeo de 7 pulgadas; la tubería de 11 3/4 pulgadas se utiliza como una tubería de bombeo y su zapata se coloca en la cota del nivel adecuado para permitir la explotación. Cuando hay bastante sal, como en este caso, se recomienda colocar la zapata por lo menos 50 metros bajo el techo de la sal pura. La salmuera de compensación pasa por la tubería de bombeo de 11 3/4 pulgadas y el petróleo crudo por el espacio anular de 18 pulgadas por 11 3/4 pulgadas.

Las cabezas de los pozos comprenden los elementos de suspensión de estas tuberías de revestimiento y de bombeo, así como las

salidas correspondientes en la cabeza. Se modifican entre la fase de lixiviación y la fase de explotación. Como se observa en los esquemas de las figuras (4.3) y (4.4).

Después de la fase de transición, se puede empezar el primer movimiento de almacenamiento de crudo, donde el hidrocarburo se inyecta por el espacio anular. Cuando se requiera extraer el hidrocarburo, se procederá a inyectar la salmuera por la tubería central y recuperarlo por el espacio anular. De esta manera, la presión en las paredes de la cavidad será por lo menos igual a la presión equivalente a una columna de salmuera desde la superficie.

La salmuera de explotación se almacenará en grandes presas a cielo abierto, por lo tanto, está expuesta a evaporaciones y precipitaciones.

Cuando se reemplaza el crudo por salmuera, ésta no se encuentra saturada, por lo que, los movimientos para extraer el crudo provocarán una lixiviación adicional, en función de:

- La concentración de la salmuera.
- La frecuencia de los movimientos.

La lixiviación adicional provocará un aumento del volumen de la cavidad por lo que después de veinte años (o más) de explotación, la ésta doblará su volumen inicial, utilizando salmuera.

A fin de mantener las dimensiones del receptáculo, se recomienda que los fluidos almacenados tengan una presión entre 1275 y 3950 psia para evitar el derrumbe de las cavidades o su fraccionamiento.

Las condiciones extremas de operación se presentarán al inicio del almacenamiento, así como, en el momento del vaciado. Estas situaciones se ejemplifican en la figura (4.5), en la que se muestran las presiones que se estima prevalecerán para gas licuado.

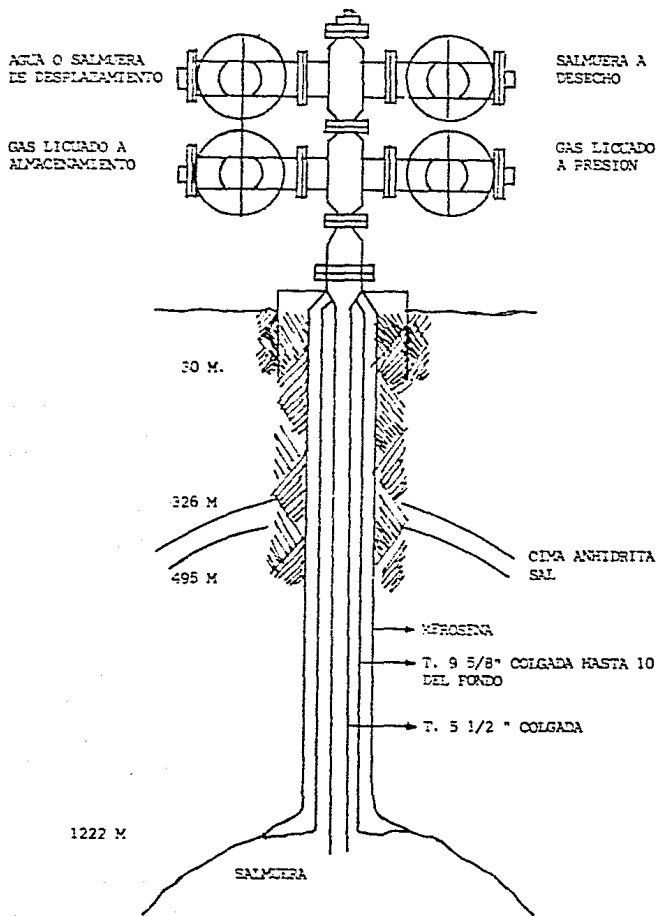
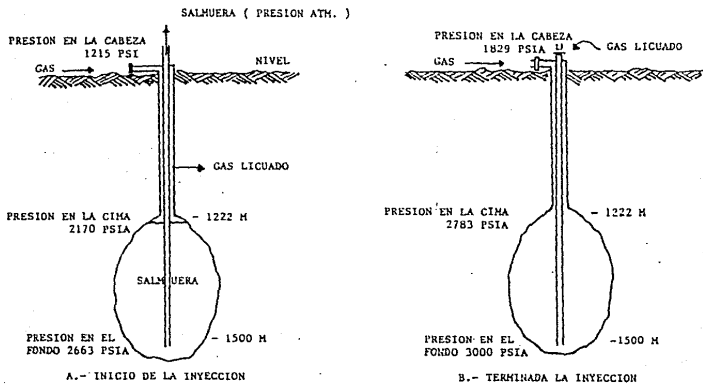


FIG. 4.3 Configuración de una Cavity después de ser Reacondicionada entre la fase Explotación y Lixiviación.

Fig. 4.5 Condiciones Extremas de Operación al Inicio del Almacenamiento y durante el Vaciado.



Podrá observarse que estos valores pueden reducirse. Si la tubería colgada se coloca en algún punto intermedio dentro de la cavidad, y se va bajando a medida que sea necesario.

Si se considera despreciable la compresibilidad del hidrocarburo, el volumen que podrá almacenarse es igual al de la cavidad.

4.2 CAPACIDADES Y TIPOS DE FLUIDO.

El programa de Manejo Integral de Crudo en México contempla la operación de terminales de exportación de crudo, de las que destacan Cayo Arcas, Dos Bocas, Salina Cruz y Pajaritos formando una amplia red de exportación y distribución interna.

La red está formada de la siguiente manera:

- Cayo Arcas y Dos Bocas están conectadas por medio de tuberías con algunos pozos de producción como: Akal J, Akal C, Nohoch, Abkatum y Pol.
- De Dos Bocas que tiene una capacidad de almacenamiento de 9.3 millones de barriles se distribuye crudo hacia la estación intermedia de bombeo Cárdenas, cuya capacidad de bombeo es de 6.6 millones de barriles. De Cárdenas pasa a Pajomas y luego a Nuevo Teapa, que es otro centro de distribución de bombeo; entre estas dos estaciones existen los domos salinos de Tuzandépetl. De Nuevo Teapa el crudo se distribuye a las otras dos terminales de exportación, Pajaritos y Salina Cruz, y a los otros centros de refinación primaria que son Cangrejera, Poza Rica, Venta de Carpio y Minatitlán. De estos, pasan a centros de refinación secundaria como Reynosa, Tula, Salamanca y Azcapotzalco. La red se muestra en la figura (4.1).

Entre Cárdenas y Nuevo Teapa existen doce domos salinos en la

zona de Tuzandépetl con una capacidad de almacenamiento de 10 millones de barriles. El papel que desempeñan estos domos es el de regular la cantidad de crudo que llegue a los centros de exportación de Salina Cruz y Pajaritos y a los centros de refinación de Cangrejera, Poza Rica, Venta de Carpio y Minatitlán. Otra aplicación, también estratégica, es la de servir como almacenamiento eventual en el caso de que los centros de exportación de Cayo Arcas y Dos Bocas tengan su capacidad de almacenamiento saturada o cuando, por alguna razón, no se pueda exportar en alguno o los dos centros de exportación. Toda esta red tiene la siguiente capacidad de flujos a exportación.

Terminal	Promedio	Nominal
Cayo Arcas	550	1,000
Dos Bocas	661	-----
Pajaritos		
a) Muelles	672	-----
b) Rabon Grande	309	-----
Salina Cruz	160	1,000

Notas: Los datos están reportados en miles de barriles por día.
 (----) representa un dato no disponible.

La relación de almacenamiento entre los domos salinos de Tuzandépetl y las terminales de exportación de Cayo Arcas y Dos Bocas es la siguiente. Mientras que Tuzandépetl tiene una capacidad nominal de almacenamiento de 10 millones de barriles, las terminales de Cayo Arcas y Dos Bocas suman una capacidad de almacenamiento de 9.3 millones de barriles, es decir, Tuzandépetl tiene capacidad para almacenar la totalidad del volumen que pueden almacenar estas dos terminales de exportación, y aún tiene un excedente de 0.7 millones de barriles.

Por otro lado, Salina Cruz cuenta con una capacidad de alma-

cenamiento de 4.0 millones de barriles, mientras que Pajaritos tiene una capacidad de 5.2 millones de barriles; por lo que, Tuzandépetl es capaz de almacenar íntegramente el volumen de las dos terminales de exportación, como en el caso anterior, se tiene un volumen excedente de 0.8 millones de barriles.

Si contemplamos la relación de Tuzandépetl con los centros de refinación primaria y secundaria tendríamos que los centros de refinación primaria abastecidos son: Cangrejera, 0.6 millones de barriles de almacenamiento; Minatitlán, 1.0 millones de barriles; Venta de Carpio, 1.65 millones de barriles y Poza Rica con 2.3 millones de barriles; con lo que Tuzandépetl tiene capacidad para almacenar todo el volumen nominal de almacenamiento del crudo destinado a los centros de refinación primaria y todavía tiene un excedente de 4.45 millones de barriles.

En cuanto a los centros de refinación secundaria, que serían: Ciudad Madero con una capacidad de almacenamiento de 2.0 millones de barriles, Cadereyta con 2.3 millones de barriles, Reynosa con 0.02 millones de barriles, Tula con 3.0 millones de barriles, Salamanca con 1.13 millones de barriles y Azcapotzalco con 0.62 millones de barriles; los domos salinos de Tuzandépetl tienen capacidad para almacenar totalmente la capacidad nominal de los centros de refinación secundaria.

Resumiendo, las características del sistema de almacenamiento en domos salinos, Tuzandépetl, son las siguientes:

Volumen Total de Almacenamiento: 1'589,700 metros cúbicos.

Número de Cavidades: 12.

Volumen Promedio de cada Cavidad: 132,475 metros cúbicos.

Altura Promedio de las Cavidades: 290 metros.

Se han previsto tres tipos de petróleo provenientes de la estación Palomas que serán restituidos al mismo sitio, siendo el caudal máximo de 1.2 millones de barriles por día.

a) Pesado Marino (Maya). 22°API.

Densidad Relativa: 0.92 a 20°C,
0.905 a 37°C.

Presión de Vapor: 5 psi.

Viscosidad: 321.7 cp a 15.6°C,
173.2 cp a 25°C,
67.5 cp a 37°C.

Temperatura de Escurrimiento: -27°C.

Resinas: 15.68% en peso.

Contenido de Azufre: 3.35% en peso.

Caudal Normal: 600,000 barriles por día.

Caudal Máximo: 600,000 barriles por día

b) Ligero Marino (Itsmo). 32°API.

Densidad Relativa: 0.89 a 15°C,
0.87 a 37°C.

Presión de Vapor: 3 a 5 psi.

Viscosidad: 16.2 cp a 15.6°C,
13.6 cp a 25°C,
10.7 cp a 37°C.

Temperatura de Escurrimiento: 27°C.

Resinas: 5.4% en peso.

Asfaltenos: 3.8% en peso.

Contenido de Azufre: 1.5% en peso.

Caudal Normal: 400,000 barriles por día.

Caudal Máximo: 600,000 barriles por día.

c) Ligero Mezosoico. 35°API.

Densidad Relativa: 0.837 a 25°C,
0.829 a 37°C.

Presión de Vapor: 14 psi.

Viscosidad: 7.9 cp a 25°C,
5.9 cp a 37°C.

Caudal Normal: 500,000 barriles por día.

Caudal Máximo: 600,000 barriles por día.

4.3 FILOSOFIA OPERACIONAL.

En un almacenamiento importante como el de Tuzandépetl, conviene tratar de obtener caudales unitarios, por cavidad, de la mayor magnitud posibles, siendo la finalidad de la operación cargar un navio en un tiempo razonable.

El almacenamiento será de 4'800,000 de barriles en cuatro días (763056 metros cúbicos), o sea, 50,000 barriles/hr. por doce cavidades, es decir, 4,167 barriles/hr. por cavidad; simultáneamente puede repartirse un producto distinto por grupo de tres cavidades.

El crudo será enviado a partir de palomas (16.5 kms.) con una presión máxima de 18 kg/cm^2 , normal de 15 kg/cm^2 y una presión mínima de 12 kg/cm^2 . Si los flujos cambian, se deben modificar los caudales o efectuar mezclas en cavidad.

Durante la explotación, estos caudales se repartirán entre varias bombas paralelas, lo que permitirá obtener fluctuaciones de caudal y escalonamiento de las inversiones. Ver figura (4.6).

También la estación de bombeo enviará la salmuera de las presas a los pozos, con un caudal equivalente al de vaciado del producto.

La figura (4.7) representa las condiciones hidráulicas durante el llenado. El hidrocarburo entra en el pozo a través del anular; en la cabeza del mismo la presión es Pan. En un momento dado, la interfase hidrocarburo-salmuera se encuentra en la profundidad I. La salmuera vuelve a subir por la tubería central con el mismo caudal.

Siendo:

H, la profundidad en metros de la zapata cementada.

LLENADO

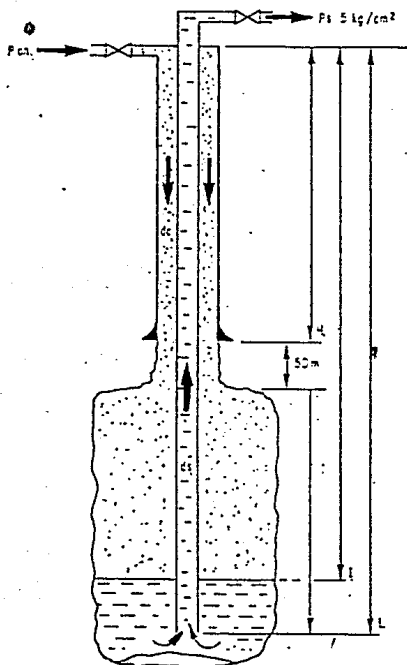
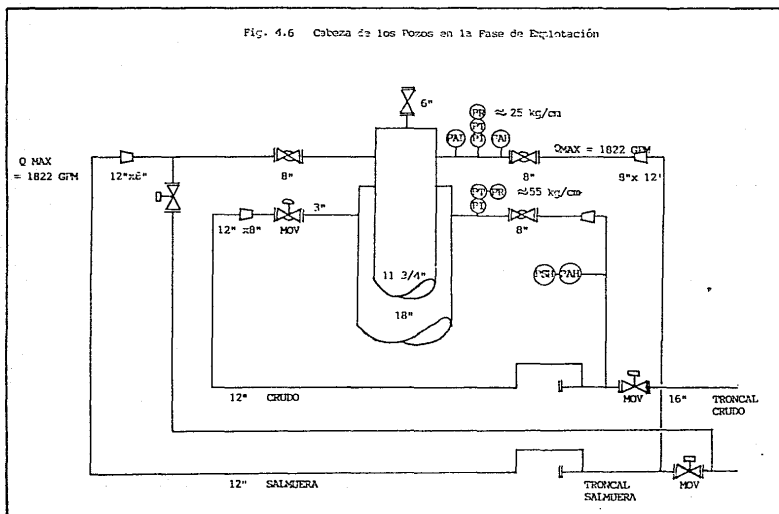


Fig. 4.7 Condiciones Hidráulicas durante el llenado

Fig. 4.6 Cabeza de los Pozos en la Fase de Ejecución



- L, la profundidad en metros de la tubería central.
- h, la altura útil de la cavidad ($L - H = h + 50$), ya que se recomienda colocar la zapata por lo menos 50 metros bajo el techo de la sal pura.
- I, la profundidad del hidrocarburo hasta la interfase hidrocarburo - salmuera.
- ds, el peso específico de la salmuera en kgf por decímetro cúbico.
- dc, el peso específico del crudo en kgf por decímetro cúbico.

Durante el vaciado las condiciones hidráulicas se representan en la figura (4.8). Se recomienda que la tubería de inyección de salmuera permanezca llena, es decir, con una presión positiva.

El volumen útil de almacenamiento deberá ser de 10 millones de barriles (1'589,700 metros cúbicos). Se almacenarán 3 productos:

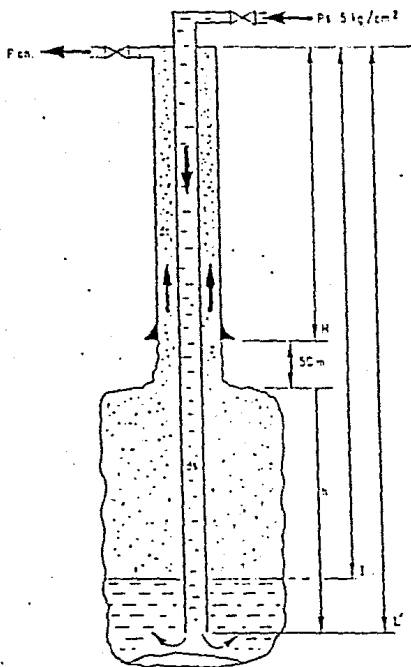
- Pesado Marino 22°API.
- Ligero Marino 32°API.
- Ligero Mezosoico 35°API.

Estos productos provendrán del centro de Palomas situado a 16.5 km., y se enviarán al mismo sitio.

Para la recepción el caudal máximo será de 1.2 millones de barriles por día, al igual que el envío.

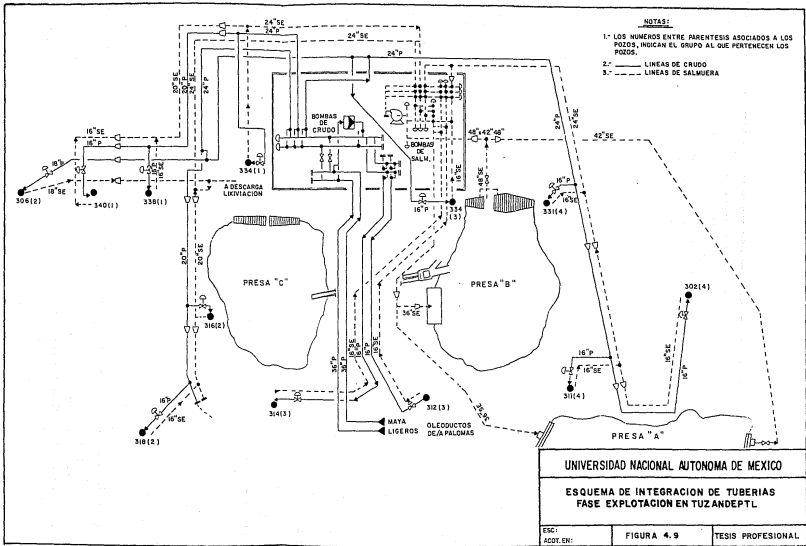
El almacenamiento estará formado por doce cavidades independientes, con un volumen unitario de 132,475 metros cúbicos, Ver figura (4.9). Cada una de estas cavidades, contendrá un sólo producto y la repartición ha sido definida por PEMEX, siendo la siguiente:

VACIADO



CONDICIONES HIDRAULICAS DURANTE EL VACIADO

FIG. 4.8



- 3 cavidades para el Marino Pesado.
- 3 cavidades para el Marino Ligero.
- 3 cavidades para el Ligero Mesozoico.
- 3 cavidades que pueden recibir otros productos.

Por razones de estabilidad mecánica, las cavidades lixiviadas en el domo salino se tienen que conservar llenas de líquido, ya sea crudo o salmuera.

Las características y distribución de la red de almacenamiento se presentan en la tabla (4.1).

TABLA 4.1

CARACTERISTICAS FISICAS DE CAVIDADES

CARACT. GRUPO	NO. POZO	PROF. ZAP. 18" (m)	PROF. INTERF. SUP. (m)	PROF. INTERF. INF. (m)
1	334	499	549	794
	338	519	569	814
	340	499	549	794
2	306	628	678	923
	316	600	650	895
	318	600	650	895
3	332	600	650	895
	312	600	650	895
	314	600	650	895
4	331	574.5	624.5	869.5
	311	649.5	699.5	944.5
	302	600	650	895

TABLA 4.1

(CONTINUACION)

CARACT. GRUPO	NO. POZO	PROF. ZAP. ZAP 11 $\frac{3}{4}$ (m)	PRESION MAX. ZAP 18 (BAR)	TIPO CRUDO A ALMACENAR
1	334	799	84.83	MAYA
	338	819	88.23	MAYA
	340	799	84.83	MAYA
2	306	928	106.76	MAYA/LIG MAR
	316	900	102.00	MAYA/LIG MAR
	318	900	102.00	MAYA/LIG MAR
3	332	900	102.00	CUALQUIERA
	312	900	102.00	CUALQUIERA
	314	900	102.00	CUALQUIERA
4	331	874.5	97.66	MAYA/MESO
	311	949.5	110.41	MAYA/MESO
	302	900	102.00	MAYA/MESO

C A P I T U L O 5 .

ALGORITMO DE CALCULO PARA EL ANALISIS HIDRAULICO DE
ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN DOMOS SALINOS.

El algoritmo para el análisis del comportamiento hidráulico del sistema de almacenamiento antes descrito, implica un reordenamiento de las ecuaciones hidrostáticas y de flujo de fluidos, en el cual la estructura de estas queda supeditada a tres variables fundamentales, a saber, el número de cavidades del sistema de almacenamiento, el número de profundidades de interfase para cada cavidad a las cuales se desea reportar el perfil de presiones, y el número de tipos diferentes de crudo que se desee almacenar en el sistema.

Una vez dadas las ecuaciones fundamentales de la forma requerida por el cálculo, se procede a establecer el ordenamiento matricial de éstas, las cuales ejecutara el programa de tal forma que efectúe el cálculo hidráulico de todos los pozos.

Para llevar a cabo este cálculo, es necesario establecer un predimensionamiento de la tubería que conducirá el crudo y establecer los diámetros de la tubería de salmuera, en la red de distribución a los pozos, es decir, los dos oleoductos de Palomas a Tuzandépetl de 16.5 km de longitud, los tres troncales que distribuyen el crudo a los grupos de pozos, los ramales de crudo independientes de los pozos, los ramales de salmuera que salen de ellos, los troncales de salmuera, y el sistema de succión y descarga de las cortinas de las presas.

Se procederá a definir las características de la tubería de salmuera que será reutilizada en la fase explotación tras su instalación en la lixiviación. Se elaborará el algoritmo de cálculo, la definición de las ecuaciones utilizadas por el programa y el diagrama de flujo, y posteriormente se llevará a cabo considerando los datos reales o aproximados de las características de instalación y geográficas de Tuzandépetl, esto se hará en el capítulo siguiente.

5.1 ALGORITMO PARA EL ANALISIS HIDRAULICO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO UBICADO EN TUZANDEPETL (VERACRUZ).

Este involucra las operaciones y actividades necesarias para efectuar el análisis hidráulico y consiste en:

A. Definir las características isométricas (diferencias de altura, longitud de tramo recto, así como número y tipo de accesorios presentes en el ducto), de la red de distribución de salmuera reutilizada tras la fase lixiviación para la explotación de las cavidades de Tuzandépetl.

B. Efectuar el predimensionamiento de las líneas que conducen crudo de Palomas a Tuzandépetl, usando para ello los flujos máximos de operación del crudo más viscoso y pesado, que son fijados por las condiciones de almacenamiento en las bases de diseño. Para estos coleductos el análisis se hará a régimen permanente.

C. Llevar a cabo el predimensionamiento de la red de tubería que conduce crudo a las cavidades con las condiciones de flujo máximo del crudo más pesado y viscoso, suponiendo que la tubería de crudo será paralela a las líneas de salmuera ya existentes, dentro de dicha red. Este predimensionamiento se hará a régimen permanente, debido a lo corto de las diversas trayectorias de las tuberías.

D. Una vez teniendo los diámetros internos de las diversas tuberías, de acuerdo a las especificaciones de líneas especiales adecuadas y además, las características isométricas y su longitud, se procede a realizar un análisis de la tubería anular y central de las cavidades; para determinar si las caídas de presión son aceptables para la condición máxima tolerable en la zapata, en el pozo con la zapata más profunda. Con esto se definirán los diámetros de estas líneas. Desde la fase de

lixiviación se cuenta con una tubería de 18 pulgadas en el anular y una línea de 11 $\frac{1}{4}$ pulgadas en el tubing, este cálculo verificará si son aceptables.

E. Considerando las características de profundidad de la zapata y profundidad del tubing, para cada una de las cavidades se efectuarán varias simulaciones de la red de Tuzandépetl para llenado con cada tipo de crudo; con la finalidad de definir la potencia, el flujo que manejen y la cabeza, de las bombas que inyectarán el crudo a las cavidades. Después de definir las características operativas, de las bombas de crudo, se efectuarán varias simulaciones para determinar en la operación de llenado, las presiones en la zapata, en el tubing, a la entrada y salida de cada pozo, y en los orígenes de cada cabezal troncal de la red de crudo y salmuera, para cada tipo de crudo en el almacenamiento.

F. Efectuar varias simulaciones para el vaciado del crudo de las cavidades, con la finalidad de especificar las características hidráulicas de las bombas de inyección de salmuera, tales como: potencia, flujo y cabeza, así como, su número. Tras llevar a cabo la especificación de las bombas se procede a definir los perfiles de presión en la red de distribución a los pozos durante la operación de vaciado.

G. Definiendo el tipo y flujo de crudo se obtendrá una cabeza mínima de las bombas de crudo y de salmuera; para los casos no críticos se definen las caídas de presión de las válvulas de control de presión, que se instalarán en el lado del crudo a la entrada de cada pozo, con la finalidad de especificarlas.

H. Definidas las características del sistema de almacenamiento, se efectuarán las simulaciones finales para obtener los perfiles de presión que regirán el sistema a diferentes profundidades de la interfase crudo - salmuera, para ambas operaciones.

5.2 ECUACIONES HIDRAULICAS PARA EL PROGRAMA DE SIMULACION.

En el capítulo 3 de este trabajo se definió el balance de masa y energía necesarios para describir un análisis hidráulico a régimen permanente, sin intercambio de calor con los alrededores:

$$-Wf = (z_2 - z_1)g/g_c + (v_2^2 - v_1^2)/2g_c + (P_2 - P_1)/\rho + Hf_s \quad \text{.....(5.1)}$$

$$Q = S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad \text{.....(5.2)}$$

Estas son las ecuaciones básicas que se utilizan para describir el flujo, tanto de crudo como de salmuera a lo largo de los ductos de la red. Además se hace la suposición de que entre los dos puntos (inicio y final) la velocidad sólo es función del área de flujo o el diámetro de la línea. Así, para una línea sin bombeo:

$$P_f = P_i + [(z_i - z_f)g/g_c - Hf_s]\rho \quad \text{.....(5.3)}$$

$$Q = S_i v_i = S_f v_f \quad \text{.....(5.4)}$$

Las ecuaciones anteriores son las que utiliza el programa para describir hidráulicamente cada tramo de tubería que existe en la red, tanto de crudo como de salmuera; éstas serán trabajadas en las siguientes unidades:

P, presión en kg/cm^2 .

z, elevaciones en metros.

g, aceleración de la gravedad en metros/seg^2 .

Q, flujo volumétrico en barriles/día.

v, velocidad media del fluido en metros/seg .

g_c, constante práctica en $\text{kg-metros/kg-seg}^2$.

Hf_s, energía disipada por fricción en $\text{kg}_f\text{-metros/kg}_m$.

Siguiendo lo estipulado en el capítulo 3, la energía disipada por fricción se calcula con la ecuación de Darcy y el factor de fricción con la ecuación de Colebrook. Es decir,

$$Hf_{fd} = fLv^2/2g \cdot D \quad \dots(5.5)$$

$$(1/f^{1/2})^{k+1} = -2 \log[f/3.7D + 2.51/Re(1/f^{1/2})^k] \quad \dots(5.6)$$

Si estas ecuaciones se aplican a la red de distribución de Tuzandépetl de acuerdo a la figura (4.9), e incluyendo las rutas de las líneas, así como la transformación de unidades se obtienen las ecuaciones del programa.

A. Oleoductos de Palomas a Tuzandépetl.

Estos oleoductos conducen crudo pesado marino (maya), uno de ellos puede conducir además ligero marino o ligero mesozoico. desde Palomas a Tuzandépetl o viceversa, siendo n el número de oleoductos:

$$P_{fil} = P_{iil} + im(z_{fil} - z_{iil})\rho_c/10 - Hf_{fd}\rho/10 + Wf_{fd}\rho/10 \quad \dots(5.7)$$

$$Hf_{fil} = 2.00663f_{fil}L_{trav}v_{fil}^2/d \quad \dots(5.8)$$

$$(1/f_{fil}^{1/2})^{k+1} = -2 \log[f_{fil}/3.7d + 2.51/Re(1/f_{fil}^{1/2})^k] \quad \dots(5.9)$$

$$Q_{iil} = \sum_{i=1}^{NC/2} Q_i \quad \dots(5.10)$$

$$Q_{iil(-1)} = \sum_{i=NC/2}^{NCAV} Q_i \quad \dots(5.11)$$

donde: im , es el signo de la columna de líquido.

(1) si el llenado con crudo $\therefore -Wf \neq 0$

(-1) si es vaciado de crudo $\therefore -Wf = 0$

ρ_c , densidad del crudo en el oleoducto en g/cm^3 .

Estas líneas de transporte tienen una longitud de 16.5 km, desde su punto de origen en Palomas hasta su punto terminal en Tuzandépetl. A la llegada de estos oleoductos a Tuzandépetl están las bombas de crudo, las cuales operarán en el llenado de crudo.

B. Líneas Comunes de Crudo o Troncales a cada Grupo de Pozos.

Estas líneas son las que manejan el crudo que llega de los cabezales, y lo conducen a cada uno de los grupos de 3 pozos de almacenamiento. Cada troncal puede manejar un tipo específico de crudo o varios dependiendo del crudo que puedan almacenar los pozos. Las doce cavidades están divididas en cuatro grupos de tres pozos y los tipos de crudo están definidos en el capítulo 4.

Para el tercer grupo de cavidades no existe el troncal común, debido a que por requerimientos estratégicos para la manipulación de crudo, estas cavidades pueden almacenar cualquier tipo de crudo.

Si k es el número de grupo, j el número de nodos de cada troncal donde nace un ramal a una cavidad, kk el número de la cavidad en la red, e i el número de cavidad en el grupo; aplicando las ecuaciones (5.1) a (5.6), tenemos:

$$kk = 3(k-1)+1 \quad \dots(5.12)$$

$$P_{fk,j} = P_{k,j} + im(z_{fk,j} - z_{kk,j})p_c/10 - H_{fk,j}(p_c/10) \dots(5.13)$$

$$H_{fk,j} = 2.00663f_{k,j}L_{k,j}v_{k,j}^2/d_{k,j} \quad \dots(5.14)$$

$$(1/f_{k,j}^{1/2})^{k-1} = -2 \log \left[12c/3.7d_{k,j} + 2.51/re(1/f_{k,j}^{1/2})^k \right] \quad \dots(5.15)$$

$$Q_{kk,j} = \sum_{i=1}^3 Q_{kk(i)} \quad \dots(5.16)$$

$$Q_{kk,j-1} = Q_{kk,j} - Q_{kk(i)}, \quad i = 1,4,10 \quad \dots(5.17)$$

C. Ramales de Crudo a los Pozos.

Son las tuberías que conducen crudo desde los troncales hasta el anular de cada cavidad, o viceversa, de acuerdo a la operación de llenado o vaciado de crudo. Hay un ramal de crudo

para cada cavidad y estará diseñado para llenar un pozo en un plazo de cuatro días con un flujo promedio máximo de 100,000 BPD, con respecto a la capacidad de los oleoductos.

Si kk es el número de cada cavidad (del 1 al 12), k es el número de grupo de pozos y j el número de cada cavidad dentro de cada grupo, y si se aplican las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.5) y (5.6), se obtiene:

$$kk = 3*(k-1)+j \quad \dots(5.18)$$

$$Pfk_k = Pkk + im(zfkk - zikk)pc/10 - Hfkk pc/10 \quad \dots(5.19)$$

$$Hfkk = 2.00663 fkk Lkk vkk^2/dkk \quad \dots(5.20)$$

$$(1/fkk^{1/2})^{k-1} = -2\log(12c/3.7dkk + 2.51/Re(1/fkk^{1/2})^k) \quad \dots(5.21)$$

$$Qkk = dato \quad \dots(5.22)$$

D. Ramales de Salmuera de los Pozos.

Son las tuberías que conducen la salmuera desde los troncales comunes a cada cavidad o viceversa, de acuerdo a la operación de inyección o expulsión de la salmuera. Existe un ramal de salmuera por cavidad y este desemboca en el tubing del pozo.

Si kk es el número de cada cavidad (del 1 al 12), k es el número de grupo de los pozos, j es el troncal de donde nace un ramal e i es el número de pozo en el grupo de pozos, y aplicando las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.5) y (5.6), tenemos:

$$Qsikk = Qkk \quad \dots(5.23)$$

$$Pfskk = Pskk - im(zfskk - zsikk)psol/10 - Hfskk psol/10 \quad (5.24)$$

$$Hfskk = 2.00663 fkk Lkk vsol-kk^2 /dkk \quad \dots(5.25)$$

$$(1/f_{kk}^{1/2})^{k+1} = -2 \log \left[12 \rho_{\text{salm}} / 3.7 d_{kk} + 2.51 / \text{Re}(1/f_{kk}^{1/2})^k \right] \quad (5.26)$$

donde ρ_{salm} es la densidad de la salmuera en gramos por centímetro cúbico.

E. Cabezales Troncales de Salmuera.

Estos recolectan o envían la salmuera de cada grupo de pozos al troncal principal de las presas. Existen tres troncales comunes debido a que el grupo de pozos número 3 no tiene troncal de salmuera. Las líneas de salmuera de cada pozo del grupo, desembocan directamente en el troncal común de salmuera a las presas.

Si aplicamos las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.5) y (5.6), con k como el número de grupo de pozos y j como el número de cavidad dentro de cada grupo, tenemos:

$$P_{f_{tk,j}} = P_{i_{tk,j}} - \text{im}(Z_{f_{tk,j}} - Z_{i_{tk,j}}) \rho_{\text{salm}} / 10 - H_{f_{tk,j}} \rho_{\text{salm}} / 10 \quad \dots(5.27)$$

$$H_{f_{tk,j}} = 2.00663 f_{tk,j} L_{tk,j} v_{\text{salm}(k,j)}^2 / d_{tk,j} \quad \dots(5.28)$$

$$(1/f_{tk,j}^{1/2})^{k+1} = -2 \log \left[12 \rho_{\text{salm}} / 3.7 d_{tk,j} + 2.51 / \text{Re}(1/f_{tk,j}^{1/2})^k \right] \quad \dots(5.29)$$

F. Troncal Principal de Salmuera a Presas.

Este es un cabezal que maneja toda la salmuera que se emplea en la operación de las doce cavidades, tanto de llenado de crudo como vaciado de crudo. Es único y en el nacimiento de éste, a partir de los troncales, se encuentran las bombas de salmuera; las cuales en el caso de vaciado de crudo operarán dando presión a la inyección de la salmuera. Este cabezal lleva al arreglo de succión de cada presa y conecta la obra de descarga de cada una, con la red de salmuera de los pozos.

Aplicando las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.5) y (5.6), a este troncal tenemos:

$$P_{fTRONC} = P_{iTRONC} - \text{im}(z_{fTRONC} - z_{iTRONC})\rho_{salm}/10 - H_{fTRONC}\rho_{salm}/10 + W_{fTRONC}\rho_{salm}/10 \quad \dots(5.30)$$

$$H_{fTRONC} = 2.00663 f_{TRONC} L_{TRONC} v_{TRONC}^2 / d_{TRONC} \quad \dots(5.31)$$

$$(1/f_{TRONC}^{1/2})^{k-1} = -2 \log \left[\frac{12f_{TRONC}/3.7d_{TRONC} + 2.51/\text{Re}(1/f_{TRONC}^{1/2})^k}{\dots} \right] \quad \dots(5.32)$$

donde $\text{im} = 1$ llenado con crudo y $-W_{fTRONC} = 0$
 $\text{im} = -1$ vaciado de crudo y $-W_{fTRONC} \neq 0$

G. Cabezales de Descarga de las Presas.

Nacen del troncal común de salmuera y descargan, durante el llenado de crudo, la salmuera a las presas A y B respectivamente. Sólo operan en esta fase, dado que se realiza un by pass a las bombas de salmuera, y se descarga en la parte superior de cada cortina. Estos cabezales pueden manejar hasta 1'200,000 BPD de salmuera. Si j_j toma el valor de A o B y se aplican las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.5) y (5.6), se obtiene:

$$P_{fTj} = P_{iTj} - (z_{fTj} - z_{iTj})\rho_{salm}/10 - H_{fTj}\rho_{salm}/10 \quad \dots(5.33)$$

$$H_{fTj} = 2.00663 f_{Tj} L_{Tj} v_{Tj}^2 / d_{Tj} \quad \dots(5.34)$$

$$(1/f_{Tj}^{1/2})^{k-1} = -2 \log \left[\frac{12f_{Tj}/3.7d_{Tj} + 2.51/\text{Re}(1/f_{Tj}^{1/2})^k}{\dots} \right] \quad \dots(5.35)$$

H. Cabezales de Succión de las Presas.

Nacen de las obras de toma situadas en la parte inferior de las cortinas de cada presa, y sólo operan durante el vaciado de crudo, enviando la salmuera por el troncal común de ésta, hasta

la succión de las bombas de inyección de salmuera. Estos cabezales pueden manejar hasta 1200,000 BPD o más de salmuera. Si f_{jj} toma el valor de A o B, y aplicando las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.5) y (5.6), se obtiene:

$$P_{f_{jj}} = P_{i_{jj}} + im(z_{f_{jj}} - z_{i_{jj}})\rho_{sal}/10 - H_{f_{jj}}\rho_{sal}/10 \dots (5.36)$$

$$H_{f_{jj}} = 2.00663 f_{jj} L_{jj} v_{jj}^2 / d_{jj} \tau_{suc} \dots (5.37)$$

$$(1/f_{jj})^{k+1} = -2 \log \left[12 \tau_{sal} / 3.7 d_{jj} \tau_{suc} + 2.51 / \text{Re} (1/f_{jj})^{1/2} \right]^k \dots (5.38)$$

En conjunto estas ecuaciones son empleadas por el programa para describir hidráulicamente, la red de distribución de crudo y salmuera a los pozos de almacenamiento.

5.3 ECUACIONES DESCRIPTIVAS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CAVIDAD.

En una cavidad previamente excavada, como la descrita en la figura (5.1), existe un equilibrio de fuerzas hidrostáticas producto de las columnas de líquido, las cuales ejercen presión debido a su peso y velocidad. Así, si la cavidad al operar en la fase explotación, lo hace por desplazamiento de crudo por salmuera o viceversa; y además, con el crudo en el tubo anular a lo largo del cuello del pozo, y el espacio de la cavidad y la solución salina en el tubing interno hasta la parte más profunda de almacenamiento (tal como se muestra en la figura), se tiene que cada fluido va a ejercer una presión tal, que en la interfase entre ambos sean idénticas.

Por lo tanto, al analizar el valor que toma la presión de la interfase, se hará de acuerdo a la figura (5.1) tanto para el llenado como el vaciado junto con las ecuaciones (5.1), (5.3), (5.5) y (5.6).

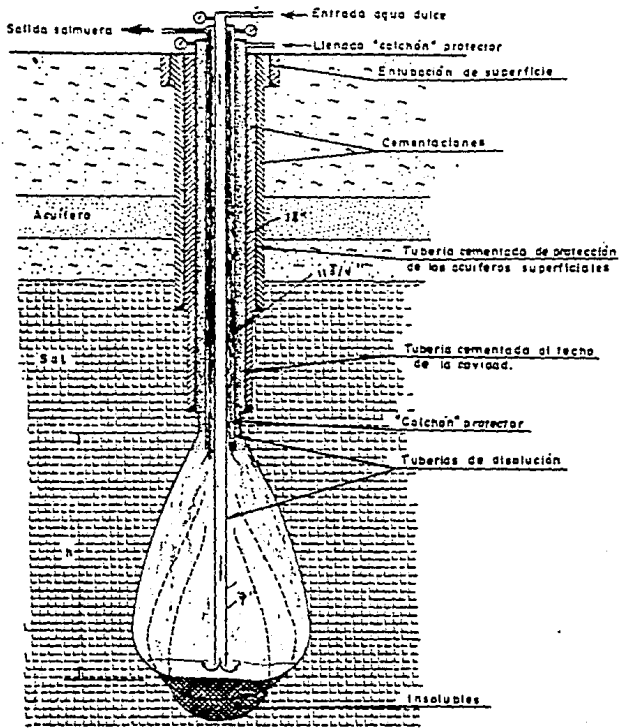


Fig. 5.1 Cavity Previously Excavated

Para el llenado, de la ecuación (5.1) y si $Wf = 0$, se tiene:

$$P_2 - P_1 = k \left[-(z_2 - z_1)g/g_c - (v_2^2 - v_1^2)/2g_c - Hf_{sk} \right] \rho \quad \dots(5.39)$$

Por el lado del crudo, es decir, cuando $\rho = \rho_{\text{crud}}$ en el anular; y en la cavidad puede verse con claridad que el flujo del crudo en el anular, para densidad constante, es la diferencia de velocidades entre el punto (1) y la zapata, siendo cero en ésta. Ya que la velocidad en la interfase de la cavidad es despreciable y el crudo está prácticamente en reposo, puede despreciarse el término de energía cinética obteniéndose:

$$P_2 - P_1 = [-(z_2 - z_1)g/g_c - Hf_s] \rho \quad \dots(5.40)$$

En la ecuación (5.40) el término Hf_s involucra las pérdidas por fricción en el lado del crudo. Como el crudo en la cavidad prácticamente está en reposo, y la velocidad de la interfase es muy pequeña, la contribución más fuerte al término de pérdida por fricción, se presenta en el tubo anular.

Con esto, se tiene:

$$\rho = \rho_{\text{crud}}$$

$$P_1 = \text{PENT. CRUD.}$$

$$P_2 = \text{PINT.}$$

$$z_1 = 0$$

$$z_2 = -k \left[ZAP + h_{p1} + (H_{\text{INT}} - H_{ZAP} - h_{p1}) \right]$$

$$Hf_s = Hf_{s\text{ANUL}} + Hf_{s\text{CUELLO}} + Hf_{s\text{CAV}} \cong Hf_{s\text{ANUL}}$$

donde $Hf_{s\text{CUELLO}}$ tiende a cero pies.

$Hf_{s\text{CAV}}$ tiende a cero pies.

Sustituyendo lo anterior en la ecuación (5.40), se obtiene:

$$\text{PINT} - \text{PENT. CRUD.} = \left\{ [-(HZAP + h_{p1} + (H_{\text{INT}} - H_{ZAP} - h_{p1})) - 0]g/g_c - Hf_{s\text{ANUL}} \right\} \rho_{\text{CRUD}} \quad \dots(5.41)$$

$$P_{INT} = P_{ENT. CRUD.} + H_{ZAF} \rho_{CRUD} g / g_c - H_{fANUL} \rho c + h_{PIG} / g_c \rho_{CRUD} + (H_{INT} - H_{ZAF} - h_{PI}) g / g_c \rho_{CRUD} \quad \dots(5.42)$$

La ecuación (5.42) describe la presión o suma de fuerzas en la interfase analizándola por el lado del crudo.

Para el lado de la salmuera, la diferencia de velocidades a la salida del tubing y a la entrada de dicha tubería es cero, si la densidad de la salmuera es constante; y además dentro de la cavidad la solución salina está prácticamente en reposo, siendo posible despreciar el término de energía cinética y la pérdida por fricción H_{fE} es la que se pierde en el tubing. Por consiguiente, la ecuación (5.40) es válida. Con lo anterior, se tiene:

$$\rho = \rho_{SALM}$$

$$P_1 = P_{INT}$$

$$P_2 = P_{SAL. SALM.}$$

$$z_1 = -(H_{TUB} - (H_{TUB} - H_{INT}))$$

$$z_2 = 0$$

$$H_{fE} = H_{fTUB} + H_{fshp2} + H_{fCAV}$$

donde H_{fshp2} tiende a cero pies y H_{fCAV} tiende también a cero.

Sustituyendo en la ecuación (5.40),

$$P_{SAL} = P_{INT} = \left\{ -[0 - [-(H_{TUB} - (H_{TUB} - H_{INT}))k] g / g_c - H_{fTUB}] \rho_{SAL} \right. \quad \dots(5.43)$$

$$H_{TUB} - H_{INT} \geq h_{p2} \quad \dots(5.44)$$

$$-P_{INT} = -P_{SAL. SALM.} - [H_{TUB} - (H_{TUB} - H_{INT})] g / g_c \rho_{SALM} - H_{fE} \rho_{SALM} \quad \dots(5.45)$$

$$P_{INT} = P_{SAL. SALM.} + [H_{TUB} - (H_{TUB} - H_{INT})] g / g_c \rho_{SALM} + H_{fE} \rho_{SALM} \quad \dots(5.46)$$

donde la ecuación (5.46) es la suma de fuerzas de presión en la interfase, se igualan las ecuaciones (5.42) y (5.46):

$$\begin{aligned} \text{PSAL. SALM.} &+ [\text{HTUB} - (\text{HTUB} - \text{HINT})]g / g_{\rho\text{psalm}} &+ \text{Hf}_{\text{ETUBpsalm}} &= \\ \text{PENT. CRUD.} &+ \text{HZAP}g / g_{\rho\text{crud}} &- \text{Hf}_{\text{eANULcrud}} &+ \text{h}_{\text{pscrud}}g / g_{\rho} &+ \\ (\text{HINT} - \text{h}_{\text{pi}} - \text{HZAP})g / g_{\rho\text{crud}} & & & & \dots(5.47) \end{aligned}$$

$$\text{Si } \Delta\text{PCAV. LLEN.} = \text{PSAL. SALM.} - \text{PENT. CRUDO} \dots(5.48)$$

entonces,

$$\begin{aligned} \Delta\text{PCAV. LLEN.} &= \text{HZAP}g / g_{\rho\text{crud}} &- \text{Hf}_{\text{eANULcrud}} &+ \text{h}_{\text{pscrud}}g / g_{\rho} &+ \\ (\text{HINT} - \text{h}_{\text{pi}} - \text{HZAP})g / g_{\rho\text{crud}} & &- [\text{HTUB} - (\text{HTUB} - \text{HINT})]g / g_{\rho\text{psalm}} &- & \\ \text{Hf}_{\text{ETUBpsalm}} & & & & \dots(5.49) \end{aligned}$$

$$\text{Si } \Delta\text{PANUL. LLEN.} = \{ \text{HZAP}g / g_{\rho} - \text{Hf}_{\text{eANUL}} \} \dots(5.50)$$

$$\text{y } \Delta\text{PTUB. LLEN.} = \{ \text{HTUB}g / g_{\rho} + \text{Hf}_{\text{ETUB}} \}_{\rho\text{psalm}} \dots(5.51)$$

tenemos,

$$\begin{aligned} \Delta\text{PCA. LLEN.} &= \Delta\text{PANUL. LLEN.} &+ \text{h}_{\text{pi}}g / g_{\rho\text{crud}} &+ \text{HINT} - \text{h}_{\text{pi}} - \text{HZAP})g / g_{\rho\text{crud}} \\ &+ (\text{HTUB} - \text{HINT})g / g_{\rho\text{psalm}} &- \Delta\text{PTUB. LLEN.} & \dots(5.52) \end{aligned}$$

La ecuación (5.52) es descriptiva de la operación de una cavidad en la fase de llenado, por medio de esta se obtiene el comportamiento de las columnas de crudo y de salmuera; así como, la diferencia de presión producida por las diferentes densidades.

Para la operación de vaciado las ecuaciones (5.39) y (5.40) siguen siendo válidas. Cuando se avanza en la condición de vaciado por el lado de la salmuera, el término H_{fs} de la ecuación (5.40) es la contribución de las pérdidas por fricción en el tubing y en la cavidad, pero como la salmuera está prácticamente en reposo, la última contribución es despreciable. Por lo tanto,

$$\rho = \rho_{\text{psalm}}$$

$$P_1 = \text{PENT. SALM.}$$

$$P_2 = \text{PINT}$$

$$\begin{aligned}
 z_1 &= 0 \\
 z_2 &= -[HTUBING-(HTUB-HINT)] \\
 Hf_s &= Hf_{sTUB}
 \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación (5.40),

$$PINT - PENT. SALM. = \left\{ -[-(HTUB-(HTUB-HINT))g/g_c] - Hf_{sTUB} \right\} \rho_{salm} \quad \dots(5.53)$$

$$PINT = PENT. SALM. + \left[HTUB-(HTUB-HINT) \right] g/g_c \rho_{salm} - Hf_{sTUB} \rho_{salm} \quad \dots(5.54)$$

La ecuación (5.54) es la suma de fuerzas hasta la interfase, en la condición de vaciado por el lado de la salmuera.

Analizando la condición de vaciado por el lado del crudo, se tiene:

$$\begin{aligned}
 \rho &= \rho_{crud} \\
 P_1 &= PINT \\
 P_2 &= PSAL. CRUD. \\
 z_1 &= -[HZAP+h_{p1}+(HINT-h_{p1}-HZAP)] \\
 Hf_s &= Hf_{sANUL} + Hf_{sCUELLO} + Hf_{sCAV}
 \end{aligned}$$

Sustituyendo estos términos en la ecuación (5.40),

$$PSAL. CRUDO - PINT = \left\{ -[0-(HZAP+h_{p1}+(HINT-h_{p1}-HZAP))]g/g_c - Hf_{sANUL} - Hf_{sCUELLO} - Hf_{sCAV} \right\} \rho_{crud} \quad \dots(5.55)$$

En la ecuación (5.55), debido a que el crudo está prácticamente en reposo en la cavidad, los términos $Hf_{sCUELLO}$ y Hf_{sCAV} , se aproximan a cero.

$$-PINT = -PSAL. CRUDO + \left\{ -[HZAP+h_{p1}+(HINT-h_{p1}-HZAP)]g/g_c \rho_{crud} \right\} - Hf_{sANUL} \rho_{crud} \quad \dots(5.56)$$

Cambiando el signo:

$$PINT = PSAL.CRUDO + (HZAP+hpi)g/gc + (HINT-hpi-HZAP)g/gc \\ (\rho_{crud}) + Hf_{ANUL\rho_{crud}} \dots(5.57)$$

La ecuación (5.57) es la suma de fuerzas hasta la interfase para la condición de vaciado por el lado del crudo.

Si igualamos las ecuaciones (5.54) y (5.57) de acuerdo al equilibrio de fuerzas existentes en la interfase:

$$PENT.SAL. + (HTUB-(HTUB-HINT))g/gc_{psalm} - Hf_{TUB,psalm} = \\ PSAL.CRUDO + (HZAP+hpi)g/gc_{\rho_{crud}} + (HINT-hpi-HZAP)g/gc_{\rho_{crud}} + \\ Hf_{ANUL\rho_{crud}} \dots(5.58)$$

Rearreglando la ecuación (5.58),

$$PSAL.CRUDO - PENT.SALM. = (HZAP+hpi)g/gc_{\rho_{crud}} + (HINT-hpi-HZAP) \\ (g/gc_{\rho_{crud}}) + Hf_{ANUL\rho_{crud}} - (HTUB-(HTUB-HINT))g/gc_{psalm} \dots(5.59)$$

Analizando la ecuación anterior se tiene,

$$\Delta PCAV.VAC. = PSAL.CRUDO - PENT.SALM. \dots(5.60)$$

$$\Delta PANUL.VAC. = HZAPg/gc_{\rho_{crud}} + Hf_{ANUL\rho_{crud}} \dots(5.61)$$

$$\Delta PTUB.VAC. = HTUBg/gc_{psalm} - Hf_{psalm} \dots(5.62)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación (5.59),

$$\Delta PCAV.VAC. = \Delta PANUL. + hpi g/gc_{\rho_{crud}} + (HINT-hpi-HZAP)g/gc_{\rho_{crud}} + \\ (HTUB-HINT)g/gc_{psalm} - \Delta PTUB \dots(5.63)$$

Obsérvese que las ecuaciones (5.52) y (5.63) son idénticas, sólo que la dirección del flujo determina el signo contrario en esta última ecuación. Además, nótese que los términos de pérdidas por fricción de las ecuaciones (5.61) y (5.62) cambian de signo,

respecto a sus contrapartes en la condición de vaciado.

Si, $im = 1.0$ llenado,
 $im = -1.0$ vaciado,

y además, aplicando las conversiones pertinentes se obtiene:

$$\Delta PCAV = im \left\{ \begin{aligned} &\Delta PANUL + h_{pi} p_c / 10 + (H_{INT} - h_{pi} - H_{ZAP}) p_c / 10 + (H_{TUB} - H_{INT}) p_s / 10 \\ &- \Delta P_{TUB} \end{aligned} \right\} \quad \dots(5.64)$$

$$\Delta PANUL = H_{ZAP} p_c / 10 - H_{pi} p_c im / 10 \quad \dots(5.65)$$

$$\Delta P_{TUB} = H_{TUB} p_s / 10 + im H_{INT} p_s / 10 \quad \dots(5.66)$$

Analizando el sistema en su conjunto, se ve que la ΔP de la cavidad es función de la profundidad de la interfase, y por tanto, se hace necesario un control de presión para mantener la presión de salida de la cavidad a un nivel constante.

Para la opción de llenado donde la ΔP de la cavidad es negativa, debido al mayor peso de la salmuera, el control debe efectuarse directamente en la inyección del crudo, para evitar someter la zapata a presiones que puedan superar su presión de diseño.

Cuando se tiene la operación de vaciado el control puede efectuarse en el lado del crudo, dado que el peso de la columna de salmuera ayuda a las bombas de inyección; las cuales, pueden ser escalonadas en serie, arrancando unas u otras con mayor cabeza, evitando de esta forma un incremento desmesurado en la presión de la zapata. Otra opción es controlar la presión de inyección del lado de la salmuera con efectos análogos al caso de llenado.

El control por el lado del crudo se muestra en la figura (5.2) para la operación de llenado. El control por el lado del crudo en la operación de vaciado se muestra en la figura (5.3). El control por el lado de salmuera en el vaciado, se muestra en la figura (5.4).

Para el cálculo de la capacidad volumétrica de la válvula controladora de presión se utiliza la siguiente ecuación,

$$Cv \text{ VALVULO} = Q (SG/\Delta PVALV) \dots(5.67)$$

donde:

Q = QCRUDO (Control lado del crudo) o

QSALM. (Control lado de la salmuera).

SG = Densidad relativa del fluido que maneje la válvula.

$\Delta PVALV$ = Caída de presión en la válvula.

$\Delta PVALV = P_{INY.CRUDO} - P_{ENT.CRUDO}$, control lado crudo,
im = 1.0.

$\Delta PVALV = P_{INY.SALM.} - P_{ENT.SALM.}$, control lado salmuera,
im = -1.0.

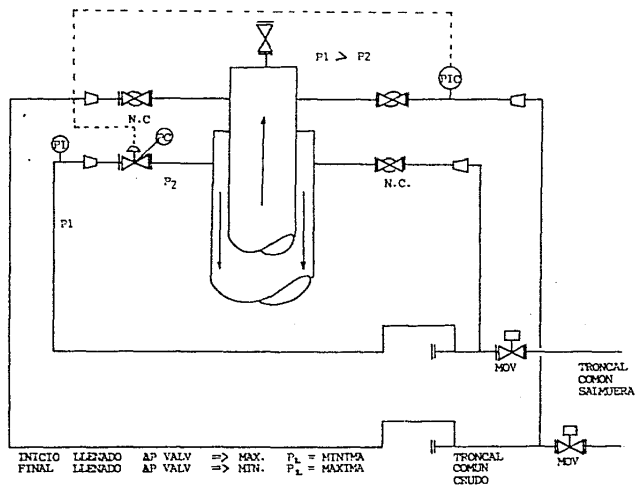
$\Delta PVALV = P_{SAL.CRUDO} - P_{CRUDO RAM.}$, control lado crudo,
im = -1.0.

5.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROGRAMA DE ANALISIS HIDRAULICO DE LA RED.

De acuerdo a lo analizado en el punto anterior se tiene un diagrama de bloques simple como se manifiesta en la figura (5.5).

El programa consta de un archivo principal o maestro y de varias subrutinas. El PROGRAMA PRINCIPAL lleva a cabo el cálculo de las condiciones de la red de crudo y salmuera, para la distribución a los pozos. La subrutina POZO calcula las condiciones hidráulicas de cada cavidad dentro de la red. La subrutina SLEQ calcula las longitudes equivalentes para accesorios y válvulas, sobre la tubería, para todo el sistema. La subrutina FRIC calcula el factor de fricción de Darcy para cada

Fig. 5.2 Control de Presión del Lado Crudo en la Operación Llenado



CONTROL DE PRESION DEL LADO CRUDO EN LA OPERACION DE VACIADO

FIG. 5.3

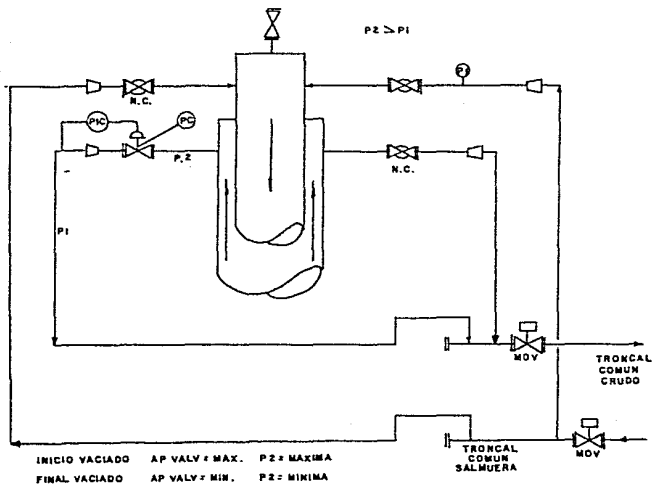
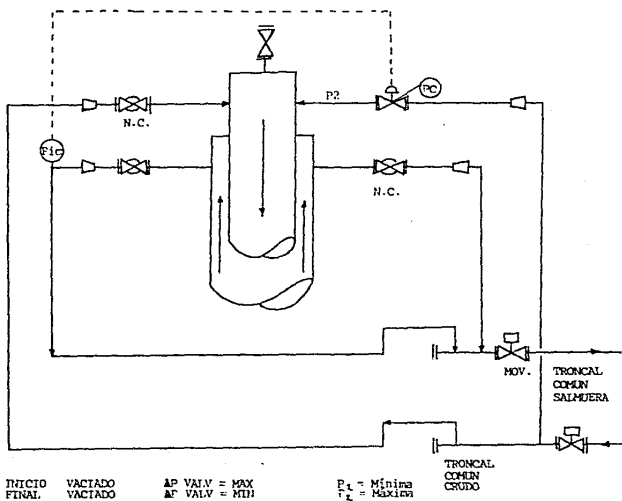


Fig. 5.4 Control del lado Salmuera, en la operación de vaciado



línea de la red y de cada pozo. La subrutina OUTPUT es la entrada de los datos por pantalla. El PROGRAMA PRINCIPAL cuenta además con un bloque de datos, el cual almacena los valores de respaldo como una corrida estándar.

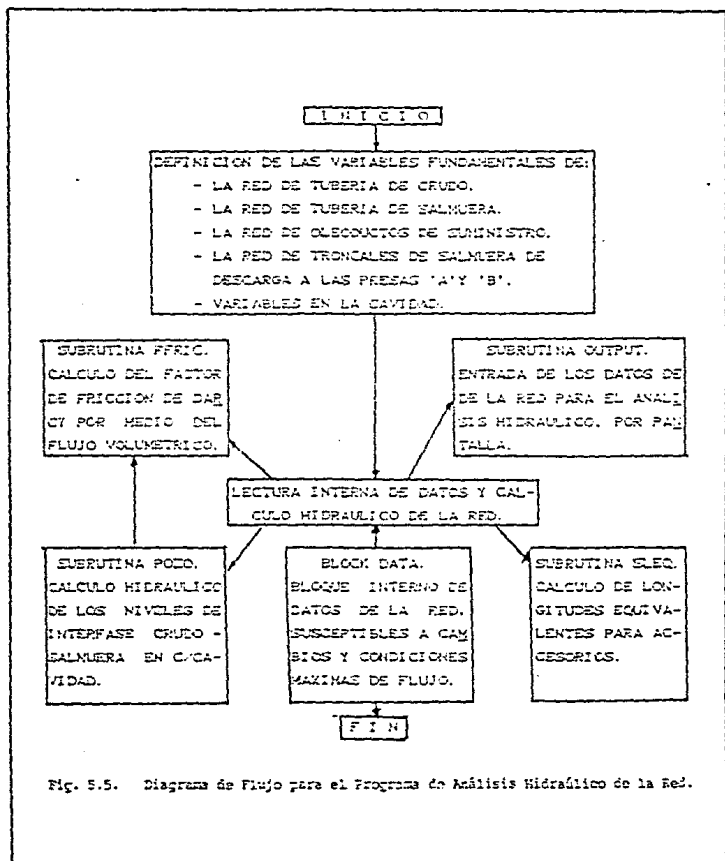


Fig. 5.5. Diagrama de Flujo para el Programa de Análisis Hidráulico de la Red.

C A P I T U L O 6.

RESULTADOS DEL ANALISIS HIDRAULICO DE ALMACENAMIENTO DE
HIDROCARBUROS EN DOMOS SALINOS

Basándose en la figura (4.9) se definieron las características de la tubería de salmuera que va desde Tuzandepetl a las presas A y B; así como, la tubería que en el vaciado conduce salmuera desde las presas a la succión de las bombas de inyección. De acuerdo a esto se tiene la tabla (6.1), que describe la tubería troncal de salmuera, y la tubería de succión y descarga de ambas cortinas de dichas presas.

Se establecieron los diámetros de las tuberías que conducen salmuera de los pozos a Tuzandepetl, y viceversa. Dicha tubería es remanente de la fase lixiviación y será aprovechada en la fase explotación o de almacenamiento en la red. Las características de dicha tubería quedan establecidas en las tabla 6.2, donde se indican sus longitudes y elevaciones además de sus accesorios.

Una vez definidas las características de la tubería de salmuera, se procede a dimensionar y diseñar las tuberías de los oleoductos que conducen crudo desde Palomas a Tuzandepetl y viceversa. En el capítulo 4 quedó establecido el flujo máximo de crudo a manejar como 600.000 BPD por oleoducto del crudo más pesado y viscoso (MAYA). La tubería se diseña de acuerdo al código para tubería de transporte ANSI/ASME B31.4, resultando tubería API 5L tipo XS2 grado B. El cálculo del espesor y diámetro se efectúa con el flujo máximo y la máxima presión de operación de acuerdo al criterio del código. Los resultados se muestran en las tablas 6.3A, 6.3B y 6.3C para la condición de llenado, y las tablas 6.3D, 6.3E y 6.3F para la condición de vaciado.

Obsérvese que las caldas de presión óptimas en ambas operaciones se presentan con un diámetro nominal de 36 pulgadas. A dicho diámetro la presión más alta es en el vaciado con rebombeo, y es de 66.1721 kg/cm²; siguiendo el criterio del código ANSI B31.4 se tienen los siguientes resultados:

$$t = P_d D / (2 S) + t_c$$

$P_d = 940.3434$ psi ; Presión de diseño del ducto.

D = 36 Pulgadas; Diámetro externo del ducto.

S = 37450.0 psi; Esfuerzo permisible con E=0.72; juntasol.

tc = 0.0625 Pulgadas ; Espesor adicional por corrosión.

El espesor calculado es de 0.52153 pulgadas y el nominal queda de 0.562 pulgadas.

Con los datos para cada cavidad, respecto a su profundidad, diámetros del anular y tubing obtenidos desde la fase Lixiviación se procede a simular la red de tubería que conduce crudo desde Tuzandepetl a los pozos. Los diámetros, características isométricas y espesores de dichas líneas serán consideradas similares a las de las líneas que conducen salmuera debido a que los flujos volumétricos de dichos ductos de crudo son iguales a los de sus opuestos de salmuera, las trayectorias son semejantes y también al reemplazo de las líneas de agua de lixiviación para el manejo de crudo. Los cálculos de las caídas de presión de dichas líneas se llevan a cabo con el flujo máximo de los oleoductos que por cavidad implican 100000.0 BPD del crudo más pesado y viscoso (maya). Luego se efectúan las simulaciones para evaluar las presiones de inyección del crudo y la salmuera en las operaciones de llenado y vaciado las cuales permitan satisfacer los requerimientos de operación en ambos casos y determinar las presiones diferenciales de las bombas de inyección de crudo y de salmuera, además se definirán las características de las válvulas de control de flujo de cada cavidad. Las condiciones hidráulicas sin trabajo aplicado al sistema se presentan a continuación y las condiciones de presión requeridas por el sistema en las tablas 6.4A, 6.4B, y 6.4C para llenado y las tablas 6.4D, 6.4E y 6.4F para vaciado.

Para evaluar los flujos máximos de crudo y salmuera, tanto para llenado como vaciado de las cavidades, se presentaron dos opciones:

- a. Que se transporte el flujo total por oleoducto (600,000 BPD) y se distribuya entre todos los pozos.

b. Que el flujo manejado por el conducto, se envíe completamente a una sola cavidad.

En ambas opciones existen parámetros que limitan o restringen el flujo a manejar por cada cavidad, siendo:

- La presión máxima que soporta la zapata.
- La velocidad a manejar tanto por el tubing, como por el anular de la cavidad.
- La caída de presión en la válvula de control a 100% de abertura, que es aproximadamente de 1 kg/cm^2 .

De los flujos máximos a pozos manejando 600.000 BPD por cabezal, se obtuvieron los resultados para llenado (tabla 6.5) y vaciado (tabla 6.6).

Cabe hacer notar que las cavidades en que se va a manejar crudo ligero marino son únicamente 306, 316, 318, 332, 312 y 314. Las cavidades que van a manejar crudo mesozoico son únicamente 332, 312, 314, 331, 311 y 302.

De los cálculos efectuados se encontró que el flujo máximo que se puede manejar en cualquier cavidad y con cualquier tipo de crudo es de 146 MBPD como máximo, debido a que la tubería del anular y el tubing de todos los pozos, es de las mismas características; a ese flujo en el tubing se tienen velocidades del orden de 15 ft/seg. lo cual es un máximo recomendable, ya que no va a existir corrosión por oxígeno disuelto. (se aplica inhibidor de oxígeno), o va a ser mínima y por tanto, el desgaste de la tubería se reduce a erosión por sólidos en suspensión.

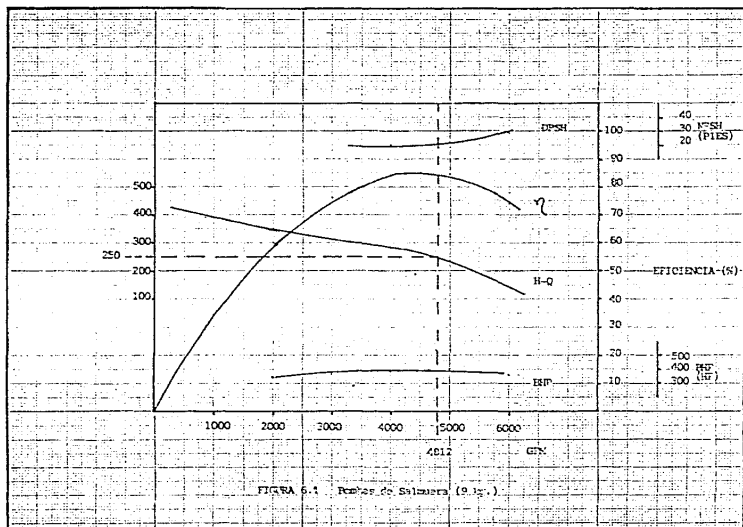
De igual manera se analizaron las curvas de fabricante de bombas, encontrándose que el flujo normal que pueden manejar es de 150 MBPD y en un determinado caso se puede llenar una cavidad con una sola bomba, a condiciones normales sin sobrepasar la capacidad de la bomba. Las bombas de crudo deben tener una cabeza

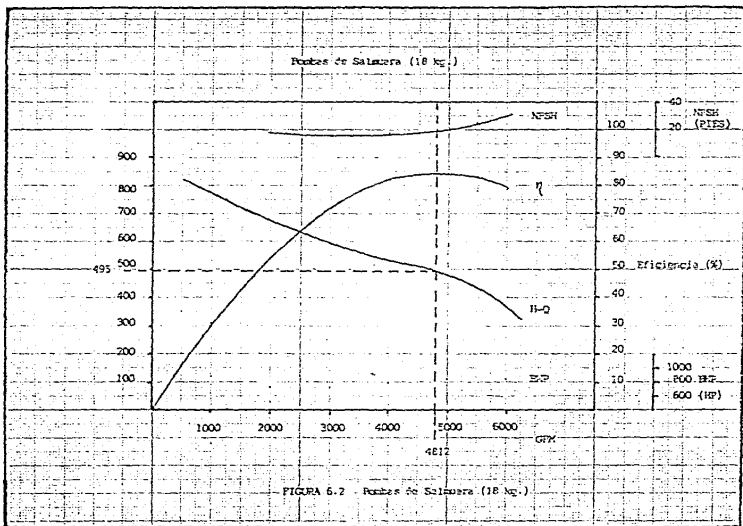
mínima de 437.208 Kgf m/Kgm que es la necesaria para poder llenar con el crudo más ligero (crudo Mesozoico) a la cavidad mas lejana que la cavidad 302. Revisando curvas de bombas centrifugas horizontales de los catálogos de diversos fabricantes se encontró que el fabricante K.S.B de México dispone de un modelo que cuenta con 440 Kgf m/Kgm de cabeza y un flujo nominal con sobrediseño del 10% de 165000 BPD cumplen con este requerimiento de presión y una alta eficiencia de bombeo de 0.76.

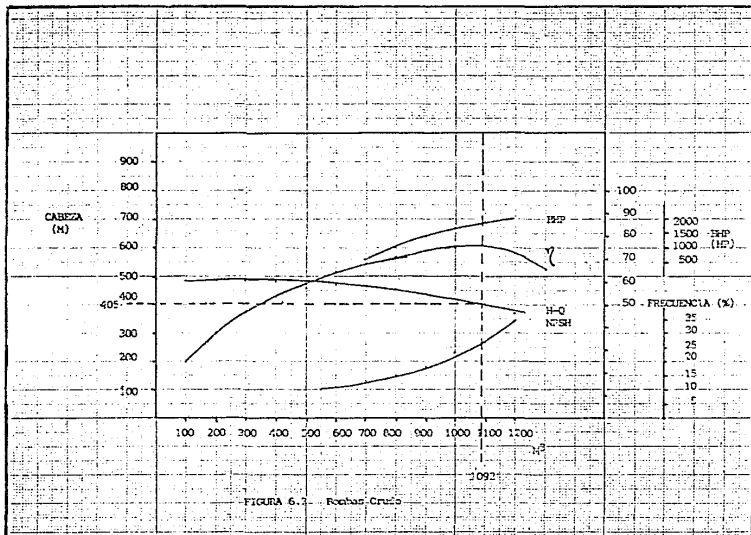
En cuanto a los requerimientos de presión o cabeza en la condición de vaciado se encontró que para vaciar el crudo Maya se requieren deltas de presiones que van desde los 10.568 Kgf/cm² hasta los 21.927 Kgf/cm² (ver tabla 6.4D); que para vaciar crudo Ligero Marino se requieren deltas de presión entre los 0.4 Kgf/cm² y los 12.38 Kgf/cm²; y que para vaciar crudo Ligero Mesozoico se requieren deltas de presión entre 0.0 y 9.012 kgf/cm². De todo esto se desprende que es recomendable manejar tres niveles de presión en los cabezales de descarga de salmuera, estos niveles son 9.0, 18.0 y 27.0 kgf/cm² debido a la posibilidad de instalar bombas de 150.275 y 75.14 Kgf m/Kgm para los crudos ligeros y esta bombas en serie para el crudo Maya en un inicio del vaciado. Estas bombas deben ser verticales y por catalogo los modelos Bingham tipo '24 KXF VCT' y '24 KXH VCT' cumplen con los requerimientos necesarios. Dichos modelos son:

- Modelo 24 KXF VCT con cuatro pasos, cabeza total de 493.0 pies, diámetro del impulsor de 16 1/4 pulgadas, eficiencia de operación de 84.5% y un flujo de 165 MBPD. Esto produce una delta de presión de 18 kg/cm² con salmuera se misaturada, (Gráfica 6.1).

Modelo 24 KXH VCT con dos pasos, cabeza total de 246.52 pies, diámetro del impulsor de 16 1/4 pulgadas, eficiencia del 83.5% y un flujo de 165 MBPD. Esto produce una diferencia de presión de 9 Kg/cm² con salmuera semisaturada, (Gráfica 6.2).







Una vez definidos los requerimientos de cabeza se procede a efectuar el cálculo de la red con dicho bombeo para definir las capacidades volumétricas y diferencias de presión máximas, normales y mínimas de las válvulas de control de cada pozo dentro de la red. Dichos valores se despliegan en las tablas 6.7A, 6.7B y 6.7C para el llenado con crudo; y en las tablas 6.7D, 6.7E y 6.7F para el vaciado.

T A B L A 6.1

CARACTERISTICAS DE LA TUBERIA DE SALMUERA
 DE LAS PRESAS A TUZANDEPETL
 Acero Carbón API 5L Gr. B.
 $t_c = 0.200$ in.

TRAMO	DIAMETRO NOM/INT (IN)	LONG (CM)	DIF. DE ELEV. (CM)	PRESION DE DISEÑO (KG/CM ²)	ACESORIOS
TRONC.DESC. A PRESAS	36.0 35.124	552.0	SUBT. 0.0	23.43	2 CODOS 900 STD, 5 'T', 1 VALV.COMP 1 EXP 36/ 42, 1 EXP 42/48.
RAMAL DESC A PRESA "A"	36.0 35.124	624.0	11.0	23.43	12 CODOS 900 STD, 1 'T', 1 VALV.COMP
RAMAL DESC A PRESA "B"	36.0 35.124	15.0	3.0	23.43	3 CODOS 900 STD, 1 'T', 1 VALV.COMP
TRONC.SUCC BOMBAS	42.0 41.124	120.0	SUBT. 0.0	20.1	15 'T'
RAMAL SUCC PRESA "A"	42.0 41.124	194.0	17.0	20.1	8 CODOS 900 STD, 1 'T', 1 VALV.COMP
RAMAL SUCC PRESA "B"	48.0 47.124	116.0	5.0	17.6	3 CODOS 900 STD,

T A B L A 6.2

RED DE SALMUERA TUZANDEPETL A POZOS
 Acero al Carbón API 5L Gr B.
 t_c = 0.200 in.

TRAMO	DIAMETRO NOM/INT (IN)	LONG. (M)	DIF. DE ELEV. (M)	PRESION DE DISEÑO (KG/CM ²)	ACCESORIOS
1o. TRONCAL GRUPO I	24.000 23.000	125.0	0.0 (SUB)	44.30	2 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP., 1 REDUC. 24" X 20"
RAMAL A CAV. 334/ GPO. I	16.000 15.000	299.0	-6.6	66.45	6 CODOS 90°, 2 'T' 1 VALV. COMP., 1 REDUC. 16" X 12", 1 REDUC. 12" X 8", 1 VALV GLOBO
2o. TRONCAL GRUPO II	20.000 19.124	515.0	0.0 (SUB)	42.17	3 CODOS 90°, 2 'T' 1 VALV. COMP., 1
RAMAL A CAV 338/ GPO. I	16.000 15.000	43.0	-4.5	66.45	2 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP.
RAMAL A CAV 340/ GPO. I	16.000 15.000	265.0	-5.5	66.45	2 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP., 1 REDUC. 20" X 16"

T A B L A 6.2

RED DE SALMUERA TUZANDEPETL A POZOS
Acero al Carbón API 5L Gr. B.
 $t_c = 0.200$ in.

(CONTINUACION)

TRAMO	DIAMETRO NOM./INT (IN)	LONG. (CM)	DIF.DE ELEV. (CM)	PRESION DE DISEÑO (KG/CM ²)	ACCESORIOS
1o. TRONCAL GRUPO II	24.000 23.000	650.0	0.0 (SUB)	44.3	6 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP., 1 REDUC. 24" X 20"
RAMAL A CAV 306/GPO. II	18.000 17.124	620	-13.25	46.86	4 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP.
2o. TRONCAL GRUPO II	20.000 19.124	130	0.0 (SUB)	42.17	5 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP., 1 REDUC. 20" X 18"
RAMAL A CAV 316/GPO. II	16.000 15.000	10	-6.6	66.45	2 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP.
RAMAL A CAV 318/GPO. II	16.000 15.000	280	-7.8	66.45	4 CODOS 90°, 1 'T' 1 VALV. COMP.
1o. TRONCAL GRUPO III		(VER NOTA)			
RAMAL A CAV 332/GPO III	16.000 15.000	220	-11.6	66.45	2 CODOS 90°, 4 'T' 1 VALV. COMP.

T A B L A 6.2

RED DE SALMUERA TUZANDEPETL A POZOS
Acero al Carbón API 5L Gr. B.
Lc = 0.200 in.

(CONTINUACION)

TRAMO	DIAMETRO NOM/INT (IN)	LONG. (CM)	DIF. DE ELEV. (CM)	PRESION DE DISEÑO (KG/CM ²)	ACCESORIOS
RAMAL A CAV 312/GPO III	16.000 15.000	610	-11.6	66.45	4 CODOS 900, 4 'T' 1 VALV. COMP.
RAMAL A CAV 314/GPO III	16.000 15.000	420	-9.1	66.45	4 CODOS 900, 4 'T' 1 VALV. COMP.
1o. TRONCAL GRUPO IV	24.000 23.000	510	0.0 (SUB)	44.3	4 CODOS 900, 1 'T' 1 VALV. COMP., 1 REDUC. 24" X 20"
RAMAL A CAV 331/GPO. IV	16.000 15.000	40	-12.0	66.45	2 CODOS 900, 1 'T' 1 VALV. COMP.
2o. TRONCAL GRUPO IV	20.000 19.124	210	0.0 (SUB)	42.17	2 'T', 1 REDUC. 20" X 16", 1 VALV COMP
RAMAL A CAV 311/GPO. IV	16.000 15.000	10	-11.9	66.45	1 CODO 900, 1 'T' 1 VALV. COMP.
RAMAL A CAV 302/GPO. IV	16.000 15.000	450	-7.4	66.45	3 CODOS 900, 1 'T' 1 VALV. COMP.

NOTA : EL GRUPO III NO TIENE TRONCALES COMUNES, ES DECIR, LAS
CAVIDADES PUEDEN RECIBIR CUALQUIER TIPO DE CRUDO.

T A B L A 6.3A

"PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS OLEODUCTOS PALOMAS-TUZANDEPETL"
 OPCION "A", Q maya = 600 MSPD. DIAMETRO = 30 PULG.

SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 17-02-1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.01 DE 6

• PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA •

CRUDO:	DENSIDAD: (KG/LT)	VISCOSIDAD: (Cp.)
LMESO	.9370	7.9000
LIGMAR	.8800	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA	1.1978	1.6760

•• LLENADO CON CRUDO.

• CONDICIONES DE OPERACION DE LOS OLEODUCTOS. •

DUCTO	CRUDO	FLUJO (BPD)	DP.FRIC KG/CM2	DP.OLEOD. KG/CM2	DIAM. (IN)
1	MAYA	600000.0	22.04650	19.69338	28.87600
2	MAYA	600000.0	22.04650	19.69338	28.87600

P.PALOMAS (KG/CM2):	12.0000	12.0000
P.LLEG.TUZ.(KG/CM2):	-7.6934	-7.6934
P.DESC.TUZ.(KG/CM2):	29.1110	29.1110

T A B L A 6.3B

"PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS OLEODUCTOS PALOMAS-TUZANDEPETL"
OPCION "B", Q maya = 600 MSPD. DIAMETRO = 36 PULG.

SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
FECHA: 17-02-1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
CORRIDA No: C.02 DE 6

* PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA *

CRUDO	DENSIDAD (KG/LT)	VISCOSIDAD: (Cp.)
LMESO	.8370	7.9000
LIGMAR	.8800	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA	1.1978	1.6760

** LLENADO CON CRUDO.

* CONDICIONES DE OPERACION DE LOS OLEODUCTOS. *

DUCTO	CRUDO	FLUJO (BPD)	DP.FRIC KG/CM2	DP.OLEOD. KG/CM2	DIAM. (IN)
1	MAYA	600000.0	<u>9.01454</u>	6.66143	<u>34.87600</u>
2	MAYA	600000.0	<u>9.01454</u>	6.66143	<u>34.87600</u>

P.PALOMAS (KG/CM2):	12.0000	12.0000
P.LLEG.TUZ.(KG/CM2):	5.3386	5.3386
P.DESC.TUZ.(KG/CM2):	42.1430	42.1430

T A B L A 6.3C

"PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS OLEODUCTOS PALOMAS-TUZANDEPETL"
 OPCION "C", Q maya = 600 MBPD, DIAMETRO = 42 PULG.

SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 17.02.1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.03 DE 6

• PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA •

CRUDO	DENSIDAD (KG/LT)	VISCOSIDAD (Cp.)
LMESO	.8370	7.9000
LIGMAR	.8800	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA	1.1978	1.6760

•• LLENADO CON CRUDO.

• CONDICIONES DE OPERACION DE LOS OLEODUCTOS. •

DUCTO	CRUDO	FLUJO (BPD)	DP.FRIC KG/CM2	DP.OLEOD. KG/CM2	DIAM. (IN)
1	MAYA	600000.0	4.25422	1.90111	40.87600
2	MAYA	600000.0	4.25422	1.90111	40.87600

P.PALOMAS (KG/CM2):	12.0000	12.0000
P.LLEG.TUZ.(KG/CM2):	10.0989	10.0989
P.DESC.TUZ.(KG/CM2):	46.9033	46.9033

T A B L A 6.3D

"PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS OLEODUCTOS PALOMAS-TUZANDEPETL"
 OPCION "D", Q maya = 600 MBPD, DIAMETRO = 30 PULG.

SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.

FECHA: 17.02.1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.

CORRIDA No: C.04 DE 6

• PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA •

CRUDO	DENSIDAD (KG/LT)	VISCOSIDAD (Cp.)
LMESO	.8370	7.9000
LIGMAR	.8800	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA	1.1978	1.6760

•• VACIADO DE CRUDO.

• CONDICIONES DE OPERACION DE LOS OLEODUCTOS. •

DUCTO	CRUDO	FLUJO (BPD)	DP.FRIC KG/CM2	DP.OLEOD. KG/CM2	DIAM. (IN)
1	MAYA	600000.0	22.04650	24.39961	28.87600
2	MAYA	600000.0	22.04650	24.39961	28.87600

P.PALOMAS (KG/CM2):	54.8044	54.8044
P.LLEG.TUZ.(KG/CM2):	42.3996	42.3996
P.DESC.TUZ.(KG/CM2):	79.2040	79.2040

T A B L A 63E

"PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS OLEODUCTOS PALOMAS-TUZANDEPETL"
 OPCION "E", Q maya = 600 MSPD, DIAMETRO = 36 PULG.

SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 17-02:1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.05 DE 6

* PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA *

CRUDO	DENSIDAD (KG/LT)	VISCOSIDAD (Cp.)
LMESO	.8370	7.9000
LIGMAR	.8800	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA	1.1978	1.6760

** VACIADO DE CRUDO.

* CONDICIONES DE OPERACION DE LOS OLEODUCTOS. *

DUCTO	CRUDO	FLUJO (BPD)	DP.FRIC KG/CM2	DP.OLEOD. KG/CM2	DIAM. (IN)
1	MAYA	600000.0	<u>9.01454</u>	11.36765	<u>34.87600</u>
2	MAYA	600000.0	<u>9.01454</u>	11.36765	<u>34.87600</u>

P.PALOMAS (KG/CM2):	54.8044	54.8044
P.LLEG.TUZ.(KG/CM2):	29.3677	29.3677
P.DESC.TUZ.(KG/CM2):	<u>66.1721</u>	<u>66.1721</u>

T A B L A 6.3F

"PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS OLEODUCTOS PALOMAS-TUZANDEPETL"
 OPCION "F", Q maya = 600 MBPD, DIAMETRO = 36 PULG.

SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 17.02.1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.06 DE 6

* PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA *

CRUDO	DENSIDAD (KG/LT)	VISCOSIDAD (Cp.)
LMESO	.8370	7.9000
LIGMAR	.8800	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA	1.1978	1.6760

** VACIADO DE CRUDO.

* CONDICIONES DE OPERACION DE LOS OLEODUCTOS. *

DUCTO	CRUDO	FLUJO (BPD)	DP.FRIC KG/CM2	DP.OLEOD. KG/CM2	DIAM. (IN)
1	MAYA	600000.0	4.25422	6.60734	40.87600
2	MAYA	600000.0	4.25422	6.60734	40.87600

P.PALOMAS (KG/CM2):	54.8044	54.8044
P.LLEG.TUZ.(KG/CM2):	24.6073	24.6073
P.DESC.TUZ.(KG/CM2):	61.4117	61.4117

TABLA 6.4A

CONDICIONES DE OPERACION SIN BOMBEO
DURANTE EL LLENADO DE CRUDO MAYA

P. PALOMAS = 12.0 Kg/cm².
Q = 600000 BPD CRUDO MAYA
DP MIN VALV. = Kg/cm²

DENS. CRUDO = 0.911 Kg/lts.
VISC. CRUDO = 17.2 CP.
DENS. SALM. = 1.1978 Kg/lts.
VISC. SALM. = 1.676 CP.

CAVIDAD No	PRESION LLEG./SALUZANDEPT	PRESION ANTES VALVULA	P. INY. CRUDO REQUERIDA	PRESION MAXIMA ZAPATA	PRESION OPERACION ZAPATA	DP. CAVIDAD Ps - Pentl.	PRESION SALIDA SALMUERA	DH REQUERIDA Kgl m/Kgm
334	5.3386	4.320	26.052/33.079	86.527	67.173/74.2	-23.070/-33.096	2.983	327.0600
338	5.3386	3.956	27.435/34.461	89.995	70.204/77.23	-23.892/-30.918	3.543	346.2500
340	5.3386	3.567	26.645/33.671	86.527	67.766/74.792	-23.070/-30.096	3.572	341.6410
306	5.3386	3.049	30.906/37.933	108.896	82.658/89.684	-28.373/-35.399	2.533	394.3750
316	5.3386	3.904	30.432/40.040	104.040	79.876/89.484	-27.222/-36.829	3.210	408.1345
318	5.3386	3.438	30.486/40.094	104.040	79.831/89.533	-27.222/-36.829	3.265	413.5750
332	5.3386	4.124	29.462/39.069	104.040	78.906/88.514	-27.222/-36.829	2.240	394.7830
312	5.3386	3.595	29.728/39.336	104.040	79.173/88.780	-27.222/-36.829	2.507	403.5260
314	5.3386	4.078	29.894/39.502	104.040	79.338/88.946	-27.222/-36.829	2.673	400.0440
331	5.3386	3.739	28.568/35.595	99.618	75.911/82.938	-26.173/-33.200	2.395	360.8570
311	5.3386	3.495	31.806/33.833	112.613	85.330/92.336	-29.257/-36.283	2.550	399.0995
302	5.3386	3.299	30.601/40.209	104.040	80.045/89.655	-27.222/-36.829	3.379	416.3650

NOTA: LOS VALORES DE PRESION ESTAN REPORTADOS EN Kg/cm²

TABLA 6.4A

CONDICIONES DE OPERACION SIN BOMBEO
DURANTE EL LLENADO DE CRUDO MAYA

P. PALOMAS = 12.0 Kgf/cm²
Q = 60000 BPD CRUDO MAYA
DP MIN VALV. = Kgf/cm²

DENS. CRUDO = 0.911 Kgf/lts.
VISC. CRUDO = 17 2 CP.
DENS. SALM. = 1.1978 Kgf/lts.
VISC. SALM. = 1.676 CP.

CAVIDAD No	PRESION LLEG./SAL UZANDEPT	PRESION ANTES VALVULA	P. INY. CRUDO REQUERIDA	PRESION MAXIMA ZAPATA	PRESION OPERACION ZAPATA	DP. CAVIDAD Ps - Pent.	PRESION SALIDA SALMUERA	DH REQUERIDA Kgf m/Kgm
334	5.3386	4.320	26.052/33.079	86.527	67.173/74.2	-23.070/-30.096	2.933	327.0500
338	5.3386	3.956	27.435/34.461	89.995	70.204/77.23	-23.832/-30.918	3.543	346.2500
340	5.3386	3.567	26.645/33.671	86.527	67.766/74.792	-23.070/-30.096	3.572	341.5410
306	5.3386	3.049	30.906/37.933	108.895	82.658/89.684	-28.373/-35.399	2.533	394.3750
316	5.3386	3.904	30.432/40.040	104.040	79.875/89.454	-27.222/-36.829	3.210	408.1945
318	5.3386	3.438	30.486/40.094	104.040	79.931/89.533	-27.222/-36.829	3.265	413.5750
332	5.3386	4.124	29.462/39.069	104.040	78.906/88.514	-27.222/-36.829	2.240	334.7830
312	5.3386	3.595	29.728/39.336	104.040	79.173/88.780	-27.222/-36.829	2.507	403.5260
314	5.3386	4.078	29.894/39.502	104.040	79.338/88.946	-27.222/-36.829	2.673	400.0440
331	5.3386	3.739	28.568/35.595	99.618	75.911/82.938	-26.173/-33.200	2.395	360.8570
311	5.3386	3.495	31.806/33.833	112.613	85.330/92.336	-29.257/-36.283	2.550	399.0995
302	5.3386	3.299	30.601/40.209	104.040	80.045/89.655	-27.222/-36.829	3.379	416.3650

NOTA: LOS VALORES DE PRESION ESTAN REPORTADOS EN Kgf/cm²

TABLA 6.48

CONDICIONES DE OPERACION SIN BOMBEO
DURANTE EL LLENADO DE CRUDO LIGMAR

P. PALOMAS = 12.0 Kg/cm²
Q = 600000 BPD LIGERO MARINO.
DP MIN. VALV. = 1.0 Kg/cm²

DENS. CRUDO = 0.88 Kg/ts.
VISC. CRUDO = 13.60 CP.
DENS. SALM. = 1.1978 Kg/ts.
VISC. SALM. = 1.676 CP.

CAVIDAD N	PRESION LLEG. SAL. UZANDEPT	PRESION ANTES VALVULA	P. INY. CRUDO REQUERIDA	PRESION MAXIMA ZAPATA	PRESION OPERACION ZAPATA	DP. CAVIDAD Ps - Pent	PRESION SALIDA SALMUERA	DH REQUERIDA Kg/ m/Kgm
306	9.4027	7.734	30.256/38.042	108.895	81.824/89.610	-26.711/-36.457	1.545	355.968
316	9.4027	8.437	29.774/40.420	104.040	79.043/89.689	-27.552/-38.198	2.222	375.013
318	9.4027	8.155	29.828/40.475	104.040	79.097/89.744	-27.352/-38.198	2.277	378.944
332	9.4027	8.367	28.804/39.450	104.040	78.073/88.719	-27.552/-38.198	1.252	364.780
312	9.4027	8.097	29.071/39.717	104.040	78.333/88.996	-27.552/-38.198	1.519	370.850
314	9.4027	8.446	29.236/39.883	104.040	78.505/89.152	-27.552/-38.198	1.684	368.806

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

TABLA 6.4C

CONDICIONES DE OPERACION SIN BOMBEO
DURANTE EL LLENADO DE CRUDO LMESO.

P. PALOMAS = 12.0 Kg/cm².
Q = 600000 BPD UGERO MESOZOICO.
DP MIN. VALV. = 1.0 Kg/cm².

DENS. CRUDO = 0.837 Kg/lts.
VISC. CRUDO = 7.9 CP.
DENS. SALM. = 1.1978 Kg/lts.
VISC. SALM. = 1.676 CP.

CAVIDAD No	PRESION LLEG./SALUZANDEPT	PRESION ANTES VALVULA	P. INY. CRUDO REQUERIDA	PRESION MAXIMA ZAPATA	PRESION OPERACION ZAPATA	DP. CAVIDAD Ps - Pent.	PRESION SALIDA SALMUERA	DH REQUERIDA Kgl m/kg
332	9.9416	8.970	6/38.04231.094/4	104.040	78.268/90.374	-29.842/-41.929	1.252	420.9120
312	9.9416	8.739	31.361/43.448	104.040	78.554/90.641	-29.842/-41.929	1.519	426.8650
314	9.9416	9.058	31.527/43.613	104.040	78.720/90.807	-29.842/-41.929	1.684	425.3060
331	9.9416	8.769	30.105/38.944	99.618	75.293/84.132	-28.698/-37.538	1.407	372.9130
311	9.9416	8.662	33.624/42.464	112.623	84.712/93.551	-32.063/-40.902	1.562	418.2989
302	9.9416	8.770	32.233/44.32	104.040	79.427/91.514	-29.842/-41.929	2.391	437.2080

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

TABLA 6.4D

CONDICIONES DE OPERACION SIN BOMBEO
DURANTE EL VACIADO DE CRUDO MAYA.

P. PALOMAS = 12.0 kgf/cm².
Q = 600000 BPD CRUDO MAYA
DP VALV. = 1.0 Kgf/cm².

DENS. CRUDO = 0.911 Kg/lts.
VISC. CRUDO = 173.2 CP.
DENS. SALM. = 1.1978 Kg/lts.
VISC. SALM. = 1.676 CP.

CAVIDAD No	PRESION LLEG./SAL. UZANDEPT	PRESION ANTES VALVULA CONTROL	PRESION SALIDA EQUERID	PRESION MAXIMA ZAPATA	PRESION OPERACION ZAPATA	DP. CAVIDAD Ps - Pent.	DP BOMB. REQUER.	DH REQUERIDA Kgf m/Kgm
334	29.3677	17.143/10.117	29.457	86.527	66.940/59.913	15.448/8.421	13.314/20.34	67.39/170.62
338	29.3677	15.651/8.624	30.204	89.995	67.443/60.417	15.773/8.746	15.550/22.56	130.00/186.74
340	29.3677	15.054/8.027	30.411	86.527	64.851/57.824	15.448/8.421	16.357/23.383	136.70/195.45
306	29.3677	19.948/12.921	29.516	108.895	82.618/75.591	17.544/10.517	10.568/17.595	88.34/147.07
316	29.3677	19.363/9.756	29.862	104.040	79.239/69.632	19.670/10.062	11.499/21.107	96.12/176.43
318	29.3677	19.045/9.437	30.128	104.040	78.921/69.313	19.670/10.062	12.062/21.69	100.00/181.30
332	29.3677	19.160/9.552	28.749	104.040	79.036/69.428	19.670/10.062	10.589/20.197	88.51/168.82
312	29.3677	18.888/9.28	29.275	104.040	78.764/69.156	19.670/10.062	11.387/20.995	95.18/175.49
314	29.3677	19.316/9.709	29.244	104.040	79.192/69.584	19.670/10.062	10.927/20.535	91.34/171.64
331	29.3677	18.834/11.807	29.058	99.618	76.165/69.136	16.675/9.648	11.224/18.251	93.82/152.55
311	29.3677	17.001/9.975	29.324	112.623	81.817/74.79	17.893/10.067	13.323/19.349	111.36/161.73
302	29.3677	19.000/9.392	30.319	104.040	78.876/69.268	19.670/10.062	12.319/21.927	102.97/183.28

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kgf/cm².

TABLA 6.4E

CONDICIONES DE OPERACION SIN BOMBEO
DURANTE EL VACIADO DE CRUDO LIGERO.

P. PALOMAS = 18.0 Kg/cm².
Q = 600000 BPD LIGERO MARINO.
DP VAL. MIN. = 1.0 Kg/cm².

DENS. CRUDO = 0.88 Kg/lts.
VISC. CRUDO = 13.6 CP.
DENS. SALM. = 1.1978 Kg/lts.
VISC. SALM. = 1.676 CP.

CAVIDAD N	PRESION LLEG./SAL. UZANDEPT	PRESION ANTES VALVULA	P. SALIDA EQUERID	PRESION MAXIMA ZAPATA	PRESION OPERACION ZAPATA	DP. CAVIDAD Ps - PenL	DP BOMB REQUERIDA	DH REQUERIDA Kg m/Kg
306	25.1433	25.345/17.559	24.744	108.835	84.305/76.519	22.168/14.383	0.399/8.185	3.330/ 68.334
316	25.1433	24.874/14.228	25.201	104.040	81.205/70.559	24.408/13.762	1.327/11.973	11.092/100.050
318	25.1433	24.556/13.909	25.289	104.040	80.887/70.241	24.408/13.762	1.734/12.380	14.484/103.481
332	25.1433	24.670/14.024	24.409	104.040	81.001/70.355	24.408/13.762	0.739/11.385	6.177/ 95.164
312	25.1433	24.399/13.752	24.675	104.040	80.737/0.083	24.408/13.762	1.276/11.922	10.666/ 99.653
314	25.1433	24.827/14.181	24.763	104.040	81.158/70.512	24.408/13.762	0.936/11.582	7.824/ 96.811

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

TABLE 6.4F

CONDICIONES DE OPERACION SIN BOMBEO
DURANTE EL VACIADO DE CRUDO LMESO.

P. PALOMAS = 18.0 Kg/cm².
Q = 600000 BPD LIGERO MESOZOICO.
DP MIN. VALV. = 1.0 Kg/cm².

DENS. CRUDO = 0.837 Kg/lts.
VISC. CRUDO = 7.9 CP.
DENS. SALM. = 1.1978 Kg/lts.
VISC. SALM. = 1.676 CP.

CAVIDAD N	PRESION LLEG./SAL UZANDEPT	PRESION ANTES VALVULA	P. SALIDA EQUERID	PRESION MAXIMA ZAPATA	PRESION OPERACION ZAPATA	DP. CAVIDAD Ps - Point	DP BOMB. EQUERID	DH EQUERID Kg m/Kg
332	24.3824	28.918/16.831	23.670	104.040	82.164/70.077	29.149/17.062	0.0/7.839	0/55.524
312	24.3824	26.646/16.560	23.898	104.040	81.853/68.806	29.149/17.062	0.0/8.338	0/63.636
314	24.3824	29.075/16.968	23.994	104.040	82.321/70.234	29.149/17.062	0.0/8.006	0/66.920
331	24.3824	27.595/18.755	23.840	99.618	78.578/69.738	25.205/16.366	0.0/6.085	0/50.863
311	24.3824	26.568/17.728	23.980	112.623	84.207/75.367	27.253/18.413	0.0/7.256	0/60.651
302	24.3824	28.685/16.599	24.611	104.040	81.932/69.845	29.149/17.042	0.0/9.012	0/75.33

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

T A B L A 6.5

FLUJOS MAXIMOS PARA LLENADO DE CRUDO

CAVIDAD	FLUJO CRUDO MAYA (MBPD)	FLUJO CRUDO LIG. MARINO (MBPD)	FLUJO CRUDO MESOZOICO (MBPD)
334	146	---	---
338	146	---	---
340	145	---	---
306	130	139	---
316	138	146	---
318	135	145	---
332	145	146	136
312	142	146	130
314	144	146	133
331	146	---	141
311	128	---	112
302	133	---	122

T A B L A 6.6

FLUJOS MAXIMOS PARA EL VACIADO DE CRUDO

CAVIDAD	FLUJO CRUDO MAYA (MBPD)	FLUJO CRUDO LIG. MARINO (MBPD)	FLUJO CRUDO MESOZOICO (MBPD)
334	142	---	---
338	135	---	---
340	130	---	---
306	136	135	---
316	139	136	---
318	135	132	---
332	146	144	146
312	141	139	146
314	144	142	146
331	143	---	146
311	143	---	146
302	136	---	146

TABLE 6.7A

LLENADO CRUDO MAYA
CON BOMBEO DE 440 Kg/ m²Kgm.

P. PALOMAS = 12.0 Kg/cm².P. LLEGADA Z. = 5.3386 Kg/cm².

Q = 600000 B D OLEODUCTO

DH BOMB. CRUDO = 440 Kg/ m²Kgm

DEN. CRUDO = 0.911 Kg/lts

VIS. CRUDO = 173.20 cp.

CAVIDAD No	PRESION ESCARG BOMBAS	PRESION ENTRADA VALVULA	PRESION SALIDA VALVULA	DP. VALVULA MAXIMA	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	DP. VALVULA MINIMA	CV. VALVULA MAXIMA (GPM)
334	45.4226	44.404	26.052/33.079	24.352/17.325	159.763/195.050	18.352/11.325	251.600/320.280
338	45.4226	44.040	27.435/34.461	22.605/15.579	166.700/208.148	16.605/09.579	264.500/348.250
340	45.4226	43.641	26.645/33.671	23.006/15.980	165.050/204.910	17.006/09.980	261.360/341.180
306	45.4226	43.133	30.906/37.933	18.227/11.200	189.620/257.803	12.227/05.200	274.460/420.860
316	45.4226	43.988	30.432/40.040	19.556/09.948	181.433/280.700	13.556/03.948	276.700/512.730
318	45.4226	43.522	30.486/40.094	19.036/09.428	184.350/291.300	13.036/03.428	276.030/538.282
332	45.4226	44.208	29.462/39.069	20.746/11.139	175.250/258.770	14.746/05.139	280.700/475.450
312	45.4226	43.679	29.728/39.336	19.897/10.343	179.600/272.433	13.897/04.343	281.200/503.030
314	45.4226	44.162	29.894/39.502	20.268/10.660	177.650/266.740	14.268/04.660	281.430/492.450
331	45.4226	43.823	28.568/35.595	21.255/14.228	172.780/220.315	15.255/08.228	275.960/375.750
311	45.4226	43.579	31.806/33.833	16.773/10.746	198.920/265.251	11.773/04.746	275.400/432.524
302	45.4226	43.383	30.601/40.209	18.782/09.174	170.340/243.734	12.782/03.174	218.040/530.400

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

TABLA 6.7B

LLENADO CRUDO LIGERO MARINO
CON BOMBEO DE 440 Kgf.m/Kgm.

P. PALOMAS = 12.0 Kg/Ucm².
P. LLEGADA Z = 9.4027 Kg/Ucm².
O = 600000 BPD OLEODUCTO
DH BOMB. CRUDO = 440 Kgf.m/Kgm
DENS. CRUDO = 0.88 Kg/lts.
VISC. CRUDO = 13.60 cp.

CAVIDAD No	PRESION DESCARGA BOMBAS	PRESION NTRAD VALVULA	PRESION SAUDA VALVULA	DP. VALVULA MAXIMA	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	DP. VALVULA MINIMA	CV. VALVULA MAXIMA (GPM)
306	48.1227	46.454	30.256/36.042	22.198/14.412	165.600/214.790	16.198/08.412	250.590/347.730
316	48.1227	47.157	29.774/40.420	23.383/12.737	160.710/232.520	17.383/06.737	254.080/403.130
318	48.1227	46.875	29.828/40.475	23.047/12.400	162.052/236.650	17.047/06.400	254.810/415.870
332	48.1227	47.067	28.904/39.450	24.283/13.637	157.275/222.470	18.283/07.637	247.750/383.320
312	48.1227	46.817	29.071/39.717	23.746/13.100	159.290/228.310	17.746/07.100	251.470/397.560
314	48.1227	47.166	29.236/39.883	23.930/13.283	158.600/226.265	17.930/07.283	250.170/392.530

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/Ucm².

TABLA 6.7C

LLENADO CRUDO UGERO MESOZOICO
CON BOMBEO DE 440 Kg/ mKgm.

P. PALOMAS = 12.0 Kg/cm².
 P. LLEGADA Z. = 9.9416 Kg/cm².
 Q = 600000 BPD OLEODUCTO
 DH BOMB. CRUDO = 440 Kg/ mKgm
 DENS. CRUDO = 0.837 Kg/lts.
 VISC. CRUDO = 7.9 CP.

CAVIDAD No	PRESION ESCAPG BOMBAS	PRESION ENTRADA VALVULA	PRESION SALIDA VALVULA	DP. VALVULA MAXIMA	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	DP. VALVULA MINIMA	CV. VALVULA MAXIMA (GPM)
332	46.7696	45.798	30.265/38.042	21.542/13.756	164.331/215.760	15.542/07.756	244.110/345.560
312	46.7696	45.568	31.361/43.448	20.207/08.120	170.590/312.726	14.207/02.120	244.060/631.794
314	46.7696	45.886	31.527/43.443	20.359/06.273	169.640/308.160	14.359/02.273	248.360/624.240
331	46.7696	45.597	30.105/38.944	21.492/12.942	164.550/224.420	15.492/06.942	253.490/378.680
311	46.7696	45.490	33.624/42.464	17.866/09.026	183.530/288.260	11.866/03.026	230.070/455.600
302	46.7696	45.598	32.233/44.320	19.365/07.278	174.920/342.120	13.365/01.278	236.140/763.650

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

TABLA 6.7D

VACIADO DE CRUDO MAYA
CON BOMBEO DE 27 Kg/cm² Y 18 Kg/cm².

P. PALOMAS = 18.0 Kg/cm².P. SALIDA D TUZ. = 29.3677 Kg/cm².

Q = 600000 BPD OLEOOCUOTO

DH BOMB. = 225.41 Kg/cm². Y 150.275 Kg/cm².

DEN. CRUDO = 0.911 Kg/lts

VIS. CRUDO = 173.20 cp.

CAVIDAD No	PRESION SALIDA VALVULA	PRESION ANTES VALVULA	DP. VALVULA MINIMA	CV. VALVULA MAXIMA (GPM)	DP. VALVULA MAXIMA	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	PRESION OPERACION ZAPATA
334	29.457	.143/37.1	05.686/07.660	452.010/389.430	11.686/13.660	250.490/199.740	084.940/086.413
338	30.204	.651/35.6	03.447/04.553	580.535/505.126	09.447/10.553	290.750/268.620	085.493/087.417
340	30.411	.054/35.0	02.643/04.616	662.980/501.670	08.643/10.616	310.830/267.500	082.851/084.824
306	29.516	.948/39.9	08.432/10.405	330.500/297.520	14.432/16.405	218.340/201.633	100.618/102.600
316	29.862	.363/36.7	07.501/06.894	371.970/388.010	13.501/12.894	227.810/234.690	097.233/096.632
318	30.128	.045/36.4	06.917/06.309	378.940/396.790	12.917/12.309	234.430/241.960	096.921/096.313
332	28.749	.160/36.5	08.411/07.803	371.642/365.850	14.411/13.803	218.540/224.610	097.036/096.428
312	29.275	.888/36.2	07.613/07.005	379.930/396.060	13.613/13.005	226.610/233.400	096.764/096.156
314	29.244	.316/36.7	08.072/07.465	374.170/389.090	14.072/13.465	221.860/228.200	097.192/096.584
331	29.058	.834/38.8	07.776/09.749	386.520/345.200	13.776/15.749	224.890/206.760	094.165/096.138
311	29.324	.001/36.9	05.677/07.651	396.600/341.620	11.677/13.651	250.610/226.200	099.817/101.790
302	30.319	.000/36.3	06.681/06.073	379.860/398.420	12.681/12.073	237.270/245.080	096.876/096.265

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

TABLA 6.7E

VACIADO CRUDO LIGERO MARINO
CON BOMBEO DE 18.0 Kg/m² Y 9.0 Kg/m²

P. PALOMAS = 18.0 Kg/cm².

P. SALIDA TUZ. = 25.1433 Kg/cm²

Q = 600,000 BPD OLEODUCTO

DH BOMB. = 150.275 Kg/m/Kgm Y 75.14 Kg/m/Kgm.

DENS. CRUDO = 0.88 Kg/lts.

VISC. CRUDO = 13.60 cp.

CAVIDAD No	PRESION SALIDA VALVULA	PRESION ANTES VALVULA	DP. VALVULA MINIMA	CV. VALVULA MAXIMA	DP. VALVULA MAXIMA	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	P. OPERACION ZAPATA
306	24.744	14.345/35.559	10.675/11.880	299.790/284.180	16.675/17.889	196.210/188.040	93.305/94.519
316	25.201	33.874/32.226	09.976/08.330	312.420/341.890	15.975/14.330	201.430/215.560	90.205/88.559
318	25.289	33.556/31.909	09.562/07.915	309.730/340.430	15.562/13.915	204.710/219.620	89.887/88.241
332	24.409	33.670/32.024	09.830/08.184	333.240/395.230	15.830/14.184	202.570/216.960	90.001/88.355
312	24.675	33.399/31.762	09.419/07.782	328.620/361.530	15.419/13.782	205.890/220.970	89.730/88.083
314	24.763	33.827/32.181	09.216/07.570	339.390/374.470	15.216/13.570	207.600/223.170	90.158/88.512

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kg/cm².

TABLA 6.7F

**VACIADO DE CRUDO LIGERO MESOZOICO
CON BOMBEO DE 9.0 Kgf/m² Y 0.0 Kgf/m²**

P. PALOMAS = 18.0 Kgf/cm²
 P. SALIDA TUZ. = 24.3824 Kgf/cm²
 Q = 600000 BPD OLEODUCTO
 DH BOMB. = 75.140 Kgf m/Kgm Y 0.0 Kgf m/Kgm.
 DENS. CRUDO = 0.837 Kg/lts.
 VISC. CRUDO = 7.90 cp.

CAVIDAD No	PRESION SALIDA VALVULA	PRESION ANTES VALVULA	DP. VALVULA MINIMA	CV. VALVULA MAXIMA	DP. VALVULA P ^o MAXIMA	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	P. OPERACION ZAPATA
332	23.670	28.918/25.831	05.248/02.161	450.980/702.790	11.248/08.161	246.400/298.590	82.164/79.077
312	23.898	28.646/25.560	04.748/01.662	474.130/801.380	10.748/07.662	254.220/327.780	81.853/78.806
314	23.994	29.075/25.988	05.081/01.994	458.330/731.620	11.081/07.994	212.570/316.280	82.321/79.234
331	23.840	27.595/27.755	03.755/03.975	533.150/522.140	03.755/09.915	272.260/269.093	78.578/78.738
311	23.980	26.568/26.728	02.588/02.748	642.200/623.230	08.588/08.748	299.340/295.150	84.207/75.367
302	24.611	28.685/25.599	04.074/00.988	511.850/1039.38	10.074/06.988	266.050/354.340	81.932/69.845

NOTA: LOS VALORES REPORTADOS DE PRESION ESTAN EN Kgf/cm².

C A P I T U L O 7

INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

- Se estableció como flujo máximo de operación 600 MBPD por oleoducto, ya que a mayores flujos se presentan caídas de presión excesivas a lo largo de la red; además de requerirse tubería mayor a 36 pulgadas de diámetro en dichos ductos, lo cual incrementa la inversión.
- Para los flujos de crudo establecidos en las bases de diseño, (máximo de 600 MBPD por oleoducto), las líneas de distribución dentro de la red a los pozos no sobrepasan los criterios de dimensionamiento tanto para la velocidad, (rango de 5 a 15 ft/s), como para la caída de presión por fricción, siendo 3 lb/in² cada 100 pies como máximo para líneas de trayectoria corta.
- En base a los requerimientos de presión mostrados en las tablas 6.4A, 6.4B y 6.4C, se determina que la condición crítica de bombeo se presenta en el manejo del crudo más ligero a la cavidad más lejana, (No. 302), esto cuando se realiza la operación de llenado con un flujo de 600 MBPD en cada oleoducto. Este requerimiento es de 43.72 Kgf/cm² y por tanto las bombas de inyección de crudo fueron seleccionadas de acuerdo a esta condición.
- De acuerdo al máximo flujo de operación en la red de crudo y a la diferencia de presión mínima requerida, se seleccionaron diez bombas centrífugas horizontales con una cabeza de 440.0 Kgf m/Kgm. y un flujo de 165 MBPD cada una, de las cuales dos bombas son de relevo; todas operarán con un 76% de eficiencia, y un impulsor de 18 pulgadas de diámetro. Se consideró un sobrediseño del 10% en el flujo, por razones de seguridad, y por fluctuaciones operativas.

Con esto se tiene que 8 bombas en operación y 2 de relevo las cuales tienen la secuencia siguiente:

4 bombas para crudo pesado.

- 1 bomba de relevo para crudo pesado.
- 4 bombas para ambos crudos ligeros.
- 1 bomba de relevo para ambos crudos ligeros.

- Debido a que las operaciones de llenado y vaciado son por desplazamiento de un fluido inmiscible por otro, el volumen de almacenamiento de salmuera debe ser mayor o igual a la capacidad de las 12 cavidades en su etapa final de explotación.
- Se definió un flujo normal de 100 MBPD por cavidad ya que el proyecto de Tuzandepati permitirá almacenar la capacidad de exportación de crudo durante ocho días, con el propósito de garantizar el abastecimiento en épocas de mal tiempo.
- En base a los resultados mostrados en las tablas 6.4D, 6.4E y 6.4F se encuentra que para vaciado de los diversos tipos de crudo se requieren deltas de presiones de inyección de salmuera desde 0.0 hasta 21.93 Kgf/cm² y desde el punto de vista operativo no es recomendable manejar dichos rangos con un sólo modelo de bombas por razones de control de presiones de inyección y de operación. Estos modelos se describen en el capítulo 6 y sus curvas de operación en las figuras 6.1 y 6.2 de dicha sección.
- De los cálculos efectuados, se encontró que el flujo máximo que se puede manejar en cualquier cavidad y con distintos tipos de crudo es 146 MBPD; lo anterior se debe a las limitaciones existentes en el anular de todos los pozos, ya que se alcanzan velocidades del orden de 15 pies/seg, lo cual es un máximo recomendable para evitar problemas de corrosión.
- En el caso de las cavidades más profundas el flujo máximo a manejar fue determinado por la presión en la zapata, resultando menores a 146,000 EPD, resultando del orden de 112 MBPD como máximo para el llenado de crudo ligero mesozoico. (ver tablas 6.5 y 6.6).

- Analizando las curvas de bombas comerciales, se encontró que el flujo normal que pueden manejar es 150,000 BPD, y en un determinado caso se puede llenar una cavidad con una sola bomba, a condiciones normales sin sobrepasar la capacidad de la bomba.

- Un punto importante, es que los valores reportados para la presión de la zapata inicial para llenado de crudo, considera que la interfase se encuentra 50 metros por abajo de la cementación del tubo anular; y la presión de la zapata final, considera que la interfase está en el borde final del tubing menos 5 metros. Para el caso de vaciado, la presión de la zapata inicial considera la interfase en el borde final del tubing menos 5 metros, y la presión de la zapata final, considera la interfase 50 metros por abajo de la cementación del tubo anular.

- Durante la operación de vaciado de crudo pesado en las condiciones más críticas se corre el riesgo de sobrepasar la presión de diseño de la zapata, por lo tanto se recomienda un control que garantice que esto no suceda. Este peligro también existe en el llenado de crudo pesado si se produce una falla mecánica de la válvula de control a la entrada del pozo, por lo tanto el control debe ser instalado a ambos lados del árbol del pozo. Este control puede constar de una alarma por alta presión y un switch local que envíe una señal de cierre a la válvula de bloqueo motorizada en la entrada del pozo y a la secuencia de paro de las bombas.

- Para definir el cálculo de las válvulas de control se consideró la inyección del crudo con 440 Kgf m/Kgm de cabeza y los flujos máximos de los oleoductos para el llenado a las condiciones más críticas como se muestra en la tablas 6.7A, 6.7B y 6.7C. Además se muestran las CV's en GPM de agua que presentarían dichas válvulas con flujos normales en las condiciones mínimas de temperatura durante el llenado.

- En las tablas 6.7D, 6.7E y 6.7F se despliegan los valores de CV's de las mismas válvulas durante el vaciado de todos los crudos en las condiciones de operación más críticas ya descritas. Cabe indicar que en términos generales las capacidades volumétricas de éstas son mayores en esta operación que en el llenado. Los valores de CV's que serían utilizados para especificar dichas válvulas se despliegan en las tablas 7.1 y 7.2.
- Un diámetro de tubería nominal de 36 pulgadas con una caída de presión de 0.26 psi/100 pies de línea, son las condiciones óptimas para el manejo de 600 MBPD en cada uno de los oleoductos, sin sobrepasar las condiciones de diseño establecidas, (para tubería de transporte, velocidades de 5 a 10 ft/seg y caídas de presión cada 100 pies de 0.5 psi).
- En la condición de llenado de crudo, las caídas de presión máximas de las válvulas en cada uno de los pozos, es tal que permite la descarga de la salmuera a la cortina de la presa más lejana sin requerimientos de bombeo adicional.
- Ya que en el sistema de almacenamiento se manejan varios tipos de crudo (pesados y ligeros), cuyas densidades influyen en las condiciones hidrostáticas de las cavidades, la operación de vaciado es crítica con respecto a las presiones de inyección de la salmuera. Por lo tanto se definieron diferentes niveles de presión de inyección, (27, 18 y 9 Kg/cm²) con un sistema adecuado de bombeo en serie o en paralelo, lo cual garantiza flexibilidad en la protección de la zapata y una mejor operación de las válvulas de control.
- En el caso de las cavidades más profundas el flujo de entrada a ella queda limitado por la profundidad de la cementación de la tubería anular, ya que entre más profunda es ésta, las columnas hidrostáticas de los fluidos incrementan la presión en este punto, y la distancia de la cavidad del área de bombeo.

- Para el vaciar crudo maya las bombas de salmuera de 18 kg/cm^2 , suministran la presión necesaria en el inicio de la operación, y las bombas de salmuera de 9.0 y 18.0 Kgf/cm^2 en serie dan la presión de inyección necesaria al final de la operación de vaciado facilitándose el control del sistema, debido a que el exceso de presión inicial será abatida a la salida de cada pozo por la válvula de control de flujo. Sin embargo jamás deben operarse estas bombas en serie al inicio del proceso de vaciado de crudo pesado debido a que se sobrepasa la presión de diseño de la zapata de todos los pozos.
- En el vaciado de crudo ligero marino la operación será efectuada en un inicio con las bombas de 18.0 Kgf/cm^2 y al final de dicha operación con las bombas de salmuera de 9.0 kg/cm^2 , ya que estas satisfacen los requerimientos de presión de inyección de cada cavidad sin sobrepasar la presión de diseño de la zapata.
- Durante la operación de vaciado del crudo ligero mesozoico se emplearan al final de ésta las bombas de salmuera de 9.0 Kgf/cm^2 dado que al inicio no se requiere trabajo de bombeo, ya que la columna de salmuera produce la suficiente presión para enviar el crudo a palomas a 18.0 Kgf/cm^2 . Cabe indicar que ningún caso se corre el riesgo de sobrepasar la presión de diseño de la cementación del anular.
- Cabe aclarar que si las condiciones de los crudos, al momento del transporte no coinciden con los valores reportados en este estudio, los resultados obtenidos aquí se verán modificados en base a las nuevas condiciones de presión y temperatura.
- Observando los valores de CV's máximas, normales y mínimas de las tablas 7.1 y 7.2 se deduce que los rangos son muy grandes en flujo y deltas de presión, aunque una sola válvula de $8''$ de bola tipo ED de igual porcentaje con puerto de $8''$ con viaje de éste de $2''$ y $3''$ de 600 libras cumplen para cada pozo el rango máximo y normal de cada cavidad. En términos generales

estas válvulas satisfacen las tres condiciones de operación en rangos de aberturas del 90%, 50- 65% y 30% para condiciones máximas, normales y mínimas.

- Se concluye que especificando estas válvulas controladoras de flujo con las caídas de presión requeridas se puede efectuar un control de estas variables tal, que el flujo sea constante a cada cavidad (controlador de flujo) y que la presión no sobrepase la presión de diseño de la zapata de cada cavidad.

TABLA 7.1

CV'S MAXIMAS/NORMALES/MINIMAS DE LAS VALVULAS FIG DE CADA POZO.
LLENADO CON CRUDO.

CAVIDAD No	CV. VALVULA MAXIMA (GPM)	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	CV. VALVULA MINIMA (GPM)	TIPO DE CRUDO CONDICIONES MAX./NOR./MIN.	FLUJO CRUDO MAXIMO (BPD)
334	320.280	195.050	74.800	MAYA/MAYA/MAYA	146000.0
338	348.250	208.148	77.636	MAYA/MAYA/MAYA	146000.0
340	341.180	204.910	76.950	MAYA/MAYA/MAYA	146000.0
306	420.860	257.803	77.000	MAYA/MAYALIGMAR	130000.0
316	512.730	280.700	75.023	MAYA/MAYALIGMAR	138000.0
318	538.282	291.300	75.570	MAYA/MAYALIGMAR	135000.0
332	475.450	222.970	75.023	MAYALIGMAR/LIGMAR	146000.0
312	631.790	312.726	74.440	LMESO/LMESO/LIGMAR	130000.0
314	624.240	308.160	74.161	LMESO/LMESO/LIGMAR	133000.0
331	378.680	224.420	78.254	LMESO/LMESO/LMESO	141000.0
311	455.600	288.260	83.710	LMESO/LMESO/LMESO	112000.0
302	763.650	342.120	80.400	LMESO/LMESO/LMESO	122000.0

TABLA 7.2

CV'S MAXIMAS/NORMALES/MINIMAS DE LAS VALVULAS FIC DE CADA POZO.
VACIADO DE CRUDO.

CAVIDAD No	CV. VALVULA MAXIMA (GPM)	CV. VALVULA NORMAL (GPM)	CV. VALVULA MINIMA (GPM)	TIPO DE CRUDO CONDICIONES MAX/NOR/MIN.	FLUJO CRUDO MAXIMO (BPD)
334	452.010	250.490	107.960	MAYA/MAYA/MAYA	142000.0
338	580.535	290.750	113.626	MAYA/MAYA/MAYA	135000.0
340	662.980	310.830	113.280	MAYA/MAYA/MAYA	130000.0
306	330.500	218.340	085.774	AYA/MAYA/LIGMA	136000.0
316	388.010	227.810	095.835	AYA/MAYA/LIGMA	139000.0
316	396.780	234.430	097.253	AYA/MAYA/LIGMA	135000.0
332	702.790	298.590	091.181	ESO/LMESO/LIGMA	146000.0
312	801.380	361.530	091.182	ESO/LMESO/LIGMA	146000.0
314	731.620	316.280	093.003	ESO/LMESO/LIGMA	146000.0
331	533.150	272.260	093.012	MESO/LMESO/MAY	146000.0
311	692.200	299.340	099.904	MESO/LMESO/MAY	146000.0
302	1039.380	354.340	106.232	MESO/LMESO/MAY	146000.0

A P E N D I C E A

**LISTADOS DE LAS OPERACIONES DE LLENADO Y VACIADO DE CADA
HIDROCARBURO EN DOMOS SALINOS
(FLUJOS MAXIMOS OLEODUCTOS Y FLUJO NORMALES EN CADA POZO)**

"UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO"
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ZARAGOZA"
 "INGENIERIA QUIMICA"
 "CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED EN EL LLENADO"
 SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 20:02:1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.01 DE 6

• PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA •

CRUDO:	DENSIDAD: (KG/LT)	VISCOSIDAD: (Cp.)
LMESO	.8370	7.9000
LIGMAR	.8600	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA:	1.1978	1.6760

** LLENADO CON CRUDO MAYA.

* CONDICIONES DE OPERACION DE LOS TRONCALES *
 * DE DESC. DE SALM. *

* TRONCAL COMUN:1200000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.NODO T. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
3.53198	.0132924	.62637	.62637	2.84633	35.12400	552.00

* TRONCAL A PRESA "A": 1200000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM A. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
3.53198	.0132924	.70807	2.74433	.10200	35.12400	624.00

* TRONCAL A PRESA "B": .0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM B. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
.00000	.0000000	.00000	.00000	.00000	35.12400	15.00

PRESION SALMUERA TUZANDEPETL (KG/CM2): 3.47269

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 1 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	320.00	.3783	4.9603	.37829
2	1.9857	19.124	510.00	.7178	4.2425	.71782

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	320.00	.2109	3.6836	.21093
2	1.9857	19.124	510.00	.3915	4.0751	.39150

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 334

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	130.0	5.10	.1760	.6406

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 334

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	130.0	-6.60	.0898	-.7008

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 338

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	3.00	.0135	.2868

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 338

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-4.50	.0069	-.5321

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 340

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	230.0	4.00	.3113	.6757

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 340

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	230.0	-5.50	.1588	-.5000

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 2 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.7684	4.5702	.76841
2	1.9857	19.124	130.00	.1630	4.3872	.18297

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.4285	3.9011	.42845
2	1.9857	19.124	130.00	.0998	4.0009	.09979

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	11.75	.4505	1.5209

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	-13.25	.2192	-1.3679

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	5.16	.0135	.4836

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-6.66	.0069	-.7908

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2.....
100000.0	15.00	280.0	6.26	.3790	.9493

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	280.0	-7.76	.1933	-.7352

- * CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
- * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 3 *

- * EL GRUPO No. 3 NO POSEE CABEZAL COMUN,
PUEDA RECIBIR CUALQUIER TIPO DE CRUDO.

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	10.06	.2978	1.2142

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	-11.56	.1519	-1.2328

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	10.08	.8257	1.7439

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	-11.58	.4211	-.9659

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	7.60	.5685	1.2608

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	-9.10	.2900	-.8000

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 4 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	500.00	.5911	4.7475	.59108
2	1.9857	19.124	210.00	.2956	4.4519	.29557

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	500.00	.3296	3.8023	.32958
2	1.9857	19.124	210.00	.1612	3.9635	.16121

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	10.48	.0541	1.0089

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	-11.98	.0276	-1.4073

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	10.35	.0135	.9573

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-11.85	.0069	-1.4137

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	5.97	.6091	1.1531

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	-7.47	.3107	-5.843

"UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO"
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ZARAGOZA"

"INGENIERIA QUIMICA"

"CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED EN EL LLENADO"
 SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.

FECHA: 20:02:1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.

CORRIDA No: C.02 DE 6

•• LLENADO CON CRUDO LIGMAR.

• CONDICIONES DE OPERACION DE LOS TRONCALES •
 • DE DESC. DE SALM. •

• TRONCAL COMUN: 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.NODO T. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
1.76599	.0137966	.16253	.16253	2.32199	35.12400	552.00

• TRONCAL A PRESA "A": 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM A. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
1.76599	.0137966	.18373	2.21999	.10200	35.12400	624.00

• TRONCAL A PRESA "B": .0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM B. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
.00000	.0000000	.00000	.00000	.00000	35.12400	15.00

PRESION SALMUERA TUZANDEPETL (KG/CM2): 2.48452

• CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES •
 • PARA EL GRUPO DE POZOS No: 2 •

• LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.4090	8.9938	.40897
2	1.9857	19.124	130.00	.0960	8.8978	.09596

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.4285	2.9130	.42845
2	1.9857	19.124	130.00	.0998	3.0128	.09979

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	11.75	.2253	1.2593

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	-13.25	.2192	-1.3679

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	5.16	.0069	.4609

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-6.66	.0069	-.7908

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	280.0	6.26	.1921	.7430

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	280.0	-7.76	.1933	-.7352

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 3 *

* EL GRUPO No. 3 NO POSEE CABEZAL COMUN.
 PUEDE RECIBIR CUALQUIER TIPO DE CRUDO.

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	10.06	.1509	1.0352

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	-11.56	.1519	-1.2328

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	10.08	.4185	1.3055

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	-11.58	.4211	-.9659

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	7.60	.2881	.9569

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	-9.10	.2900	-.8000

"UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO"
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ZARAGOZA"
 "INGENIERIA QUIMICA"

"CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED EN EL LLENADO"
 SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.

FECHA: 20:02:1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.03 DE 6

** LLENADO CON CRUDO LMESO.

* CONDICIONES DE OPERACION DE LOS TRONCALES *
 * DE DESC. DE SALM. *

* TRONCAL COMUN: 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.NODO T. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. CM
1.76599	.0137966	.16253	.16253	2.32199	35.12400	552.00

* TRONCAL A PRESA "A": 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM A. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. CM
1.76599	.0137966	.18373	2.21999	.10200	35.12400	624.00

* TRONCAL A PRESA "B": .0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM B. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. CM
.00000	.0000000	.00000	.00000	.00000	35.12400	15.00

PRESION SALMUERA TUZANDEPETL (KG/CM2): 2.48452

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 3 *

* EL GRUPO No. 3 NO POSEE CABEZAL COMUN.
 PUEDE RECIBIR CUALQUIER TIPO DE CRUDO.

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	10.06	.1296	.9716

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	-11.56	.1519	-1.2328

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	10.08	.3594	1.2031

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	-11.58	.4211	-.9659

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	7.60	.2474	.8836

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	-9.10	.2900	-.8000

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
* PARA EL GRUPO DE POZOS No: 4 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	500.00	.2723	9.6693	.27228
2	1.9857	19.124	210.00	.1339	9.5354	.13387

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	500.00	.3296	2.8141	.32958
2	1.9857	19.124	210.00	.1612	2.9753	.16121

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	10.48	.0236	.9007

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	-11.98	.0276	-1.4073

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	10.36	.0059	.8730

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-11.86	.0069	-1.4137

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT. (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	5.97	.2651	.7650

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT. (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	-7.47	.3107	-.5843

"UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO"
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ZARAGOZA"
 "INGENIERIA QUIMICA"
 "CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED EN EL VACIADO"
 SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 20:02:1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.04 DE 6

* PROPIEDADES FISICAS DE LOS CRUDOS Y LA SALMUERA *

CRUDO:	DENSIDAD: (KG/LT)	VISCOSIDAD: (Cp.)
LMESO	.8370	7.9000
LIGMAR	.8800	13.6000
MAYA	.9110	173.2000
SALMUERA:	1.1978	1.6760

** VACIADO DE CRUDO MAYA.

* CONDICIONES DE OPERACION DE LOS TRONCALES *
 * DE SUCC. DE SALM. *

* TRONCAL COMUN:1200000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIG.	DP.FRIG. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.NODO T. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. CM
2.57653	.0130804	.06090	.06090	1.08711	41.12400	120.00

* TRONCAL A PRESA "A": 1200000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIG.	DP.FRIG. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM A. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. CM
2.57653	.0130804	.98509	-.35645	.73066	41.12400	1941.00

* TRONCAL A PRESA "B": .0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIG.	DP.FRIG. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM B. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. CM
.00000	.0000000	.00000	.00000	.00000	47.12400	116.00

PRESION SALMUERA TUZANDEPETL (KG/CM2): 1.02620

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 1 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	320.00	.3783	29.7459	.37829
2	1.9857	19.124	510.00	.7178	30.4638	.71782

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	320.00	.2109	.8153	.21093
2	1.9857	19.124	510.00	.3915	.4238	.39150

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 334

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	130.0	5.10	.1760	-.2886

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 334

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	130.0	-6.60	.0898	.8803

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 338

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	3.60	.0135	-.2598

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 338

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-4.50	.0069	.5459

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 340

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	230.0	4.00	.3113	-.0531

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 340

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	230.0	-5.50	.1588	.8176

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
* PARA EL GRUPO DE POZOS No: 2 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.7684	30.1361	.76841
2	1.9857	19.124	130.00	.1830	30.3190	.18297

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.4285	.5978	.42845
2	1.9857	19.124	130.00	.0998	.4980	.09979

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	11.75	.4505	-.6199

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	-13.25	.2192	1.8063

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	5.16	.0135	-.4555

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-6.66	.0069	.8046

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	280.0	6.26	.3790	-.1913

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	280.0	-7.76	.1933	1.1228

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 3 *

* EL GRUPO No. 3 NO POSEE CABEZAL COMUN.
 PUEDE RECIBIR CUALQUIER TIPO DE CRUDO.

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	10.05	.2978	-.6187

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	-11.56	.1519	1.5365

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	10.08	.8257	-.0926

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	-11.58	.4211	1.8082

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	7.60	.5685	-.1239

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	-9.10	.2900	1.3800

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 4 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	500.00	.5911	29.9587	.59108
2	1.9857	19.124	210.00	.2956	30.2543	.29557

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	500.00	.3296	.6966	.32958
2	1.9857	19.124	210.00	.1612	.5354	.16121

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	10.48	.0541	-9006

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	-11.98	.0276	1.4626

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	10.36	.0135	-9303

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-11.86	.0069	1.4275

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	5.97	.6091	.0650

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	-7.47	.3107	1.2057

"UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO"
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ZARAGOZA"
 "INGENIERIA QUIMICA"
 "CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED EN EL VACIADO"
 SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 20:02:1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.O 5 DE 6

** VACIADO DE CRUDO LIGMAR.

* CONDICIONES DE OPERACION DE LOS TRONCALES *
 * DE SUCC. DE SALM. *

* TRONCAL COMUN: 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.NODO I. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
1.28827	.0135944	.01594	.01594	1.81435	41.12400	120.00

* TRONCAL A PRESA "A": 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM A. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
1.28827	.0136944	.25783	-1.08370	.73056	41.12400	1941.00

* TRONCAL A PRESA "B": .0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM B. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
.00000	.0000000	.00000	.00000	.00000	47.12400	116.00

PRESION SALMUERA TUZANDEPETL (KG/CM2): 1.79842

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 2 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.4090	25.5523	.40897
2	1.9857	19.124	130.00	.0960	25.6483	.09596

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.0593	23.000	650.00	.4285	1.3700	.42845
2	1.9857	19.124	130.00	.0998	1.2702	.09979

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	11.75	.2253	-.8087

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 306

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	17.12	620.0	-13.25	.2192	1.8063

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	5.16	.0069	-.4472

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 316

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-6.66	.0069	.8046

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	280.0	6.26	.1921	-.3588

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 318

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	280.0	-7.76	.1933	1.1228

- * CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
- * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 3 *

* EL GRUPO No. 3 NO POSEE CABEZAL COMUN.
 PUEDE RECIBIR CUALQUIER TIPO DE CRUDO.

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	10.05	.1509	-.7344

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	-11.56	.1519	1.5365

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	10.08	.4185	-.4686

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	-11.58	.4211	1.8082

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	7.60	.2881	-.3807

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	-9.10	.2900	1.3800

"UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO"
 ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ZARAGOZA"
 "INGENIERIA QUIMICA"

"CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED EN EL VACIADO"
 SIMULADOR DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO EN DOMOS SALINOS.
 FECHA: 17:02:1991 CORRIDA HECHA POR: G.E.R./A.G.R.
 CORRIDA No: C.06 DE 6

■ ■ VACIADO DE CRUDO LMESO.

■ CONDICIONES DE OPERACION DE LOS TRONCALES ■
 ■ DE SUCC. DE SALM. ■

■ TRONCAL COMUN: 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.NODO T. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
1.28827	.0136944	.01594	.01594	1.32178	41.12400	120.00

■ TRONCAL A PRESA "A": .0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM A. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
.00000	.0000000	.00000	.00000	.00000	41.12400	1941.00

■ TRONCAL A PRESA "B": 600000.0 BPD

VELOC (M/S)	F.FRIC.	DP.FRIC. KG/CM2	DP.TRONC KG/CM2	P.SALM B. KG/CM2	DIAM. (IN)	LONG. (M)
.98110	.0136593	.00778	-.59112	.73066	47.12400	116.00

PRESION SALMUERA TUZANDEPETL (KG/CM2): 1.30584

■ CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES ■
 ■ PARA EL GRUPO DE POZOS No: 3 ■

■ EL GRUPO No. 3 NO POSEE CABEZAL COMUN.
 PUEDE RECIBIR CUALQUIER TIPO DE CRUDO.

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	10.06	.1296	-.7124

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 332

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	220.0	-11.56	.1519	1.5365

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	10.08	.3594	-.4843

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 312

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	610.0	-11.58	.4211	1.8082

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	7.60	.2474	-.3887

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 314

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	420.0	-9.10	.2900	1.3800

* CONDICIONES DE OPERACION DE LA RED A RAMALES *
 * PARA EL GRUPO DE POZOS No: 4 *

* LADO DE CRUDO; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.1757	22.376	500.00	.3111	24.6934	.31108
2	2.0935	18.625	210.00	.1522	24.8456	.15215

* LADO DE SALMUERA; FLUJO: 300000.0 BPD

CABEZ.	VELOC. (M/S)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	DP.PRES KG/CM2	P.NODO KG/CM2	DP.FRIC KG/CM2
1	2.1757	22.376	500.00	.3790	.9268	.37905
2	2.0935	18.625	210.00	.1844	.7424	.18440

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	10.48	.0236	-8536

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 331

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	40.0	-11.98	.0276	1.4626

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	10.36	.0059	-8612

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 311

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (M)	D.ALT (M)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	10.0	-11.86	.0069	1.4275

CONDICIONES DE OPERACION DEL RAMAL DE CRUDO A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	5.97	.2651	-.2347

CONDICIONES DE OPER. DEL RAMAL DE SALM. A POZO: 302

FLUJO: (BPD)	DIAM. (IN)	LONG. (CM)	D.ALT (CM)	DP.FRIC KG/CM2	DP.RAMAL KG/CM2
100000.0	15.00	450.0	-7.47	.3107	1.2057

BIBLIOGRAFIA.

9.1 LIBROS Y TESIS.

- 1.- BALDERAS NARANJO CESAR; 'DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD EN CASO DE GOLPE DEL ARIETE'; TESIS U.N.A.M., 1987.
- 2.- BIRD B. W., ARREN W., STEWART E., LIGHTFOOT N., 'FENOMENOS DE TRANSPORTE', ED. REVERTE S.A., 1982.
- 3.- CRANE Co., 'FLOW OF FLUIDS THROUGH, VALVES, FITTINGS AND PIPE'.
- 4.- KENNETH J.MC. NAUGHTON; 'BOMBAS, SELECCION, USO Y MANTENIMIENTO MC GRAW - HILL, 1989.
- 5.- KLEIN JAN JULES, 'PRACTICAL GEOPHYSICS FOR THE EXPLORATIONS GEOLOGIST', NORTAWEST MINING ASSOCIATIONS, 1980.
- 6.- MACIEL REYES R., MACIEL VELAZQUEZ M., RANGEL CARRILLO M.; 'ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN DOMOS SALINOS'. TESIS UNAM, 1988.
- 7.- PERRY R. H., 'MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO', ED. MCGRAW-HILL, 5a. EDICION.
- 8.- RICHARD W. GREENE; 'VALVULAS, SELECCION, USO Y MANTENIMIENTO', MC. GRAW - HILL, 1989.
- 9.- TREYBAL S., 'OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA'. ED. MCGRAW-HILL, 1982.

8.2 ARTICULOS.

- 10.- ALTERMAN J., 'ENGINEERED BIT LOGS CUT DRILLING COST', WORD OIL, MARZO 1969.

- 11.- JANSSON G., 'ROCK CAVERN STORAGE CAN BE CHEAPER OPTION', THE OIL AND GAS JOURNAL, OCTUBRE 1974.
- 12.- JOHANSON J.R., 'DESIGN FOR FLEXIBILITY IN STORAGE AND PECLAIN', CHEMICAL ENGINEERING, DESKBOOK ISSUE, OCTUBRE 1978.
- 13.- McCORMICK B., 'CAVE OIL STORAGE HAS ADVANTAGES', THE OIL AND GAS JOURNAL, MAYO 1977.
- 14.- NIXON J. W., 'EXCAVATED CAVERNS', PETROLEUM REFINNERS, JULIO 1954.
- 15.- PARKER P. N., 'CEMENTING SUCCESFUL AT LOW DISPLACEMENT RATES', WORD OIL, ENERO 1969.
- 16.- SABERIAN A., PODIO A. L., 'A COMPUTER MODEL FOR DESCRIBING THE DEVELOPMENT OF SOLUTION MINED CAVITIES', WORD OIL, ENERO 1977.
- 17.- WEISMANTEL G. E., 'UNDERGROUND STORAGE: MOVING CLOSER TO REAL PAYDRIT', CHEMICAL ENGINEERING, ENERO 1978.
- 18.- ING. C. DUBOIS; 'ESTUDIO DE CRECIMIENTO DE LA CAVIDAD POR LAS OPERACIONES DE VACIADO CON SALMUERA NO SATURADA'; GEOSTOCK, MENOSQUE; 22 DE OCTUBRE 1979.

8.3 BOLETINES.

- 19.- 'AN INVESTIGATION INTO UNDERGROUND GAS STORAGE', FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SALT-NORTHERN OHIO GEOLOGICAL SOCIETY.
- 20.- CLEC-RENAUD A., DUBOIS D., 'LONG-TERM OPERATION OF UNDERGROUND STORAGE IN SALT', FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SALT-NORTHERN OHIO GEOLOGICAL SOCIETY.

- 21.- 'FORMING STORAGE CAVERN'. DRILLING, MARZO 1982.
- 22.- 'HOW AN OIL STORAGE IS FOR MED', DRILLING, MARZO 1982.
- 23.- 'IN APPROVE STORAGE FACILITIES', PETROLEUM REYTEM, AGOSTO / SEPTIEMBRE 1980.
- 24.- 'INTERNATIONAL CONFERENCE ON SALINE DEPOSITS', 1962.
- 25.- SABERIAN A., 'ACCOMPLISHMENTS OF SMRI SPONEORED SALT DISOLUTION RESEARCH SINCE THE FOURTH SYMPOSIUM ON SALT', FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SALT NORTHERN OHIO GEOLOGICAL SOCIETY.
- 26.- SERATA S., CUNDEY T. E., 'DESING VARIABLES IN SOLUTION CAVITIES FOR STORAGE OF SOLIDS, LIQUIDS AND GASES', FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SALT NORTHERN OHIO GEOLOGICAL SOCIETY.
- 27.- RUSSO A. J., 'A SOLUTION MINING CUDE FOR STUDYING AXISYMMETRIC SALT CAVERN FORMATION', SAND 81-1231, SEPTIEMBRE 1981.
- 28.- 'UNDERGROUND STORAGE IN MEXICO', KAVERN BAU-UND BETRIEBS GMBH.