

01174 /
2ej



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

**ANALISIS Y DISEÑO DEL BOMBEO NEUMATICO
INTERMITENTE MEDIANTE UN SIMULADOR**

T E S I S

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA**

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA
PETROLERA**

ING. JESUS SALVADOR FLORES MONDRAGON

CIUDAD UNIVERSITARIA 1992



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

	PAGINA
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
INTRODUCCION.	2
REVISION BIBLIOGRAFICA	4
I.- BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE. (BNI)	7
I.1.- Características del pozo.	8
I.2.- Mecanismo de levantamiento de liquido.	8
I.3.- Fenómeno de resbalamiento de liquido.	10
I.4.- Diseño de una instalación.	11
I.4.1.- Tipo de válvulas usadas en BNI.	12
I.4.2.- Presión disponible en la red de BN.	12
I.4.3.- Profundidad de colocación de la válvula superior.	13
I.4.4.- Gradiente de descarga y espaciamiento de las válvulas.	13
I.4.5.- Diferencia entre la presión de apertura de la válvula operante y la carga del fluido a bombearse.	15
I.4.6.- Diámetro del orificio de paso principal de gas de la válvula operante.	16
I.4.7.- Recuperación de líquido.	16
I.4.8.- Volumen de gas requerido por ciclo.	17
I.4.9.- Ciclos de inyección.	18
I.5.- Control de inyección de gas en la superficie.	19
I.5.1.- Control por estrangulador.	19
I.5.2.- Control cíclico de tiempo.	20

I.6.- Interpretación de registros de presión superficial y subsuperficial en pozos de BNI.	20
I.6.1.- Registro de presión superficial en la T.R.	20
I.6.2.- Registro de presión superficial en la T.P.	22
I.6.3.- Estudios hipotéticos de presiones subsuperficiales en una instalación de BNI.	23
I.6.4.- Estudios de casos reales de presiones subsuperficiales en una instalación de BNI.	24
I.6.5.- Análisis de registros de presión durante un ciclo de BNI.	25
II.- MODELO MATEMATICO QUE DESCRIBE EL FENOMENO DEL FLUJO INTERMITENTE.	43
II.1.- Consideraciones del modelo.	44
II.2.- Propiedades físicas de los fluidos del pozo.	45
II.3.- Ecuaciones básicas del modelo.	45
II.3.1.- Comportamiento de la presión en el espacio anular.	45
II.3.2.- Comportamiento de la presión en la burbuja de gas dentro de la T.P.	47
II.3.3.- Flujo de gas a través de la válvula de B.N.	48
II.3.4.- Movimiento del bache líquido.	50
II.3.5.- Movimiento de la burbuja de gas.	52
II.3.6.- Caída de presión entre la parte superior de la burbuja y el punto de inyección de gas.	54
II.3.7.- Resbalamiento y colgamiento de líquido.	55
II.3.8.- Procedimiento de cálculo.	56

III.- VALIDACION DEL MODELO.	63
III.1.- Velocidad media instantánea del bache de líquido.	64
III.2.- Líquido penetrado por la burbuja de gas.	65
III.3.- Presión en la parte superior de la burbuja de gas.	65
III.4.- Colgamiento de líquido.	66
III.5.- Tiempo de viaje del bache de líquido a la superficie.	66
III.6.- Recuperación de líquido en la superficie.	67
III.7.- Relación gas inyectado - líquido.	67
III.8.- Comparación de resultados medidos y calculados	68
IV.- APLICACION DEL MODELO PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACION DE B.N.I.	87
IV.1.- Espaciamiento y calibración de válvulas.	88
IV.2.- Obtención del diámetro del orificio de la válvula operante.	89
IV.3.- Volumen de gas inyectado.	89
IV.4.- Aportación de fluidos de la formación.	89
IV.5.- Longitud del bache inicial.	91
IV.6.- Volumen de líquido recuperado.	92
IV.7.- Relación gas inyectado - líquido.	93
IV.8.- Número de ciclos por día.	93
IV.9.- Flujo en la línea de descarga.	94
IV.10.- Presión superficial de cierre y de apertura de la válvula operante.	95
IV.11.- Levantamiento del bache por expansión del gas.	96
IV.12.- Resultados.	97

V.- EJEMPLOS DE APLICACION.

99

VI.- CONCLUSIONES.

111

NOMENCLATURA.

115

REFERENCIAS.

123

APENDICE.

125

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo de este trabajo, consiste en establecer un procedimiento de cálculo que permita diseñar y analizar instalaciones de Bombeo Neumático Intermitente (B.N.I.) mediante un modelo matemático, el cual simule, en forma completa, el fenómeno de levantamiento de un bache de líquido impulsado por gas a alta presión. Para esto, y debido a la complejidad operacional del modelo, fue necesario desarrollar un programa de cómputo que ayude al ingeniero de Producción a conocer, con cierta precisión, parámetros tan importantes como : la velocidad promedio del bache de líquido en su ascenso, volumen y porcentaje de líquido recuperado por ciclo, volumen de gas requerido por ciclo, producción diaria de líquidos, número de ciclos por día, tiempo de inyección del gas por ciclo, profundidad del líquido al cierre de la válvula operante, espaciamiento y calibración de todas las válvulas de B.N. del aparejo, etc..

El programa de cómputo es fácil de manejar y, debido a que en su ejecución realiza una gran cantidad de cálculos, se recomienda instalarlo en PC's con procesadores 286 o mayores, con el objeto de disminuir el tiempo de proceso.

El estudio está fundamentado en el modelo matemático y trabajo experimental desarrollado por Fernández, O.E. y colaboradores⁽⁹⁾.

INTRODUCCION

Llevar a cabo una explotación racional y eficiente de los recursos no renovables tales como los hidrocarburos es una necesidad imperiosa. Debido a que dichos recursos se han venido extrayendo en nuestro país desde principios de este siglo, en una gran mayoría de los campos productores, si no es que en todos, se vuelve indispensable aplicar un sistema artificial de producción. Dentro de estos sistemas, el bombeo neumático intermitente (B.N.I.), ha tenido gran aceptación, sobre todo en pozos de baja producción, debido a la sencillez de sus instalaciones tanto superficial como subsuperficial y por la funcionabilidad del mismo. El B.N.I. es un método de producción cíclico en el cual un bache de líquido se acumula en el interior de la tubería de producción. Cuando se tiene una longitud de líquido determinada, se inyecta gas a alta presión por debajo del bache a través de una válvula de bombeo neumático. Súbitamente, la columna de líquido es impulsada hacia arriba tanto por la energía de expansión del gas, como por el volumen inyectado debajo de la misma. El rápido movimiento de la burbuja de gas, el cual es mayor al del bache de líquido, da origen a que constantemente la burbuja penetre por la parte inferior de éste, ocasionando con ello un continuo decremento en su longitud.

Aún cuando el B.N.I. ha sido usado por mucho tiempo para producir en forma artificial los pozos de aceite, se tiene el inconveniente de que muchos de los parámetros de interés para el ingeniero de producción todavía son obtenidos con métodos empíricos o semiempíricos. Esto se debe a la naturaleza variable del fenómeno, lo cual ha impedido el desarrollo de un modelo adecuado que nos permita predecir el comportamiento de un bache de líquido impulsado por gas. Existen pocos estudios publicados sobre este tema, ya que debido a su complejidad, han sido pocos los investigadores que lo han abordado.

REVISION BIBLIOGRAFICA

Brown y Jessen⁽³⁾ efectuaron en 1962 una serie de experimentos en un pozo de 8000 pies de profundidad y una tubería de $2 \frac{3}{8}$ pg de diámetro exterior, la cual fue equipada con transductores de presión a diferentes profundidades. El objetivo del experimento, fue evaluar el comportamiento de un pozo de B.N.I. al variar el diámetro del orificio de la válvula operante. La conclusión del trabajo fue que entre mayor fuera el diámetro del orificio de la válvula (máximo 1 pg), mayor sería la eficiencia del sistema.

White y colaboradores⁽⁴⁾ presentan un modelo dinámico para predecir presiones, velocidades y pérdidas de líquido en función del tiempo. El modelo es demasiado simplista como para predecir el verdadero comportamiento de un pozo en B.N.I.. De pruebas experimentales, se encontró que la velocidad del bache de líquido rápidamente alcanza un valor constante. Por otra parte, se observó que la velocidad de penetración del gas en el líquido puede considerarse constante para propósitos prácticos.

Brill y colaboradores⁽⁵⁾ establecieron en 1967 un modelo matemático que permite simular el desplazamiento de un bache de líquido impulsado por gas. El modelo fue validado con datos

reales de un pozo experimental de 1500 pies de profundidad. En este trabajo, se intentó desarrollar una correlación general para obtener el resbalamiento total dentro del sistema. Sin embargo, no se tuvo éxito.

Zúñiga, P.H. ⁽¹⁰⁾, basándose en el trabajo desarrollado por Brill y colaboradores ⁽⁵⁾ y los resultados experimentales obtenidos por White ⁽⁴⁾, elaboró, en 1969, un programa de cómputo que permite diseñar y analizar instalaciones de B.N.I. de una manera sencilla y práctica.

Neely y colaboradores ⁽⁶⁾ realizaron en 1974 pruebas de campo en una instalación de B.N.I. y correlacionaron la velocidad promedio del gas fluyendo por debajo del bache de líquido con el colgamiento del mismo, obtenido este último con correlaciones de flujo continuo. Un método analítico para calcular el comportamiento del B.N.I. se desarrolló, suponiendo una velocidad del líquido constante.

Fernández y colaboradores ⁽⁹⁾ desarrollaron, en 1982, un modelo hidrodinámico para predecir el levantamiento artificial de aceite viscoso mediante B.N.I.. El modelo incluye todas las variables relevantes que pueden ser simuladas matemáticamente para predecir su comportamiento, con respecto al tiempo, en un ciclo intermitente de levantamiento por gas, el cual finaliza

cuando determinado porcentaje de la columna original es producido en la cabeza del pozo. Los resultados del modelo fueron comparados con los resultados experimentales obtenidos de la instalación de prueba.

CAPITULO I
BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE

I.1.- CARACTERISTICAS DEL POZO

El Bombeo Neumático Intermitente, B.N.I., es usado en pozos cuyos gastos de producción son relativamente bajos o bien, en aquellos pozos que presenten las siguientes características :

- a) Alto índice de productividad (mayor de 1.0 bpd/psi) y baja presión del yacimiento (P_{ws}).
- b) Bajo índice de productividad (menor de 0.3 bpd/psi) y alta presión del yacimiento (P_{ws}).

Se dice que la presión de fondo es alta cuando el pozo es capaz de sostener dentro de la tubería de producción una columna de fluidos equivalente al 70 % de la profundidad media de los disparos. En cambio, una presión de fondo baja se tiene cuando el pozo sostiene una columna de fluido menor al 40 % con relación a dicha profundidad (15) .

I.2.- MECANISMO DE LEVANTAMIENTO DE LIQUIDOS

El B.N.I. es un método cíclico de producción, en donde inicialmente se permite la formación de un bache de líquido en la tubería de producción (Fig. 1-A)^{*} . Cuando la presión ejercida por la columna de líquido dentro de la T.P. y frente a la válvula operante alcanza un valor determinado, gas a alta presión es inyectado desde la superficie al interior de la tubería de revestimiento. Al aumentar la presión en esta tubería (T.R.), se

* Las figuras se presentan en la parte final del capítulo.

alcanza un valor tal que una de las válvulas del aparejo de B.N. abre y se inicia, con esto, el movimiento del bache de líquido hacia la superficie. Generalmente, lo que se busca en una instalación de B.N.I. es trabajar con la válvula más profunda del aparejo (válvula operante), con el objeto de arrastrar una mayor cantidad de líquido y obtener mejores recuperaciones del mismo. Bajo condiciones ideales, el líquido se mueve ascendentemente en forma de bache o pistón por la energía, que debajo de éste, transmite la expansión y flujo del gas inyectado. El gas viaja a una velocidad mayor que la velocidad del bache de líquido, ocasionando con esto que el gas penetre continuamente dentro del bache y una región de flujo anular sea observada por debajo del mismo. Esta penetración provoca la existencia de grandes fuerzas de corte en los extremos de la interface gas-líquido, originando un arrastre o caída de pequeñas gotas de líquido hacia el interior de la burbuja de gas (Fig. 1-B) y/o como una película anular por las paredes de la tubería de producción (Fig. 1-C).

Cuando el bache de líquido llega a la superficie, ocurre un cambio en la presión hidrostática ejercida por éste y, en consecuencia, la presión en la tubería de producción frente a la válvula operante disminuye, incrementándose la inyección de gas a través de ella. Una vez que la presión en la tubería de revestimiento baja hasta la presión de cierre de la válvula operante, la inyección de gas se interrumpe (Fig. 1-D); sin embargo, aún después de ocurrido lo anterior, continúa una expansión de gas adicional y ocasiona que una cantidad de líquido considerable dentro de la burbuja de gas y en la película adherida a las paredes de la tubería de producción sea todavía producida en la superficie. De acuerdo a las investigaciones realizadas por Neely, A.B. y colaboradores ⁽⁶⁾, se determinó que este excedente de producción posterior a la llegada del bache de líquido es en algunos casos superior al 50 % de la producción

total recuperada en la superficie.

Una vez que el bache de líquido intacto, las gotas de líquido dentro de la corriente de gas y la película de líquido anular han llegado a la superficie, transcurre un período de tiempo llamado tiempo de estabilización de la presión, durante el cual, las gotas de líquido del bache anterior que no alcanzaron a llegar a la superficie caen al fondo del pozo para formar, junto con el líquido alimentado por la formación, el siguiente bache de líquido.

I.3.- FENOMENO DE RESBALAMIENTO DE LIQUIDO

El resbalamiento de líquido puede representar una parte substancial del bache original. El control de este resbalamiento determina el éxito de una instalación de B.N.I.. La falta de habilidad para predecirlo, provoca que muchas instalaciones sean sobrediseñadas. En muchos de los casos, pueden alcanzarse altos porcentajes de recuperación de líquidos, pero también frecuentemente, los costos excesivos de operación reducen las utilidades que en un momento dado se pudieran obtener del pozo.

Pruebas realizadas en tuberías de producción de 2 pg. de diámetro muestran que una pérdida o resbalamiento de líquido del 7 % del volumen inicial del bache por cada 1000 pies de levantamiento es representativo. En general, este valor de resbalamiento puede ser usado para otros diámetros de tuberías. Cuando se tienen instalaciones con cámaras de acumulación, el resbalamiento oscila entre el 3 y 5 % , reduciéndose aún más cuando se emplea el pistón viajero.

I.4. - DISEÑO DE UNA INSTALACION DE B.N.I.

Existen varios procedimientos para llevar a cabo el espaciamento de las válvulas en instalaciones de B.N.I.. Estos varían según las recomendaciones del fabricante y el tipo de válvula a usar. Normalmente, las válvulas operadas por presión pueden ser espaciadas a mayor distancia una de la otra en relación a las válvulas operadas por fluido. En un aparejo de B.N.I., la válvula más profunda es la única que opera una vez descargado el pozo y por tal razón se le conoce como válvula operante. Aunque la instalación de esta válvula no siempre se hace a la profundidad total del pozo, se recomienda colocar válvulas hasta el fondo de la tubería de producción (siempre y cuando lo permita el empacador), con la finalidad de prevenir posibles descensos en el nivel dinámico del líquido como consecuencia de un abatimiento en la presión de fondo.

Las válvulas situadas arriba de la válvula operante, sirven para descargar el pozo cuando éste ha sido controlado con fluido de control o bien, cuando por algún motivo se haya cerrado el pozo durante un tiempo y el nivel estático del líquido haya alcanzado una altura considerable. De esta manera, se tendrá que repetir el proceso de descarga para dejar nuevamente operando el pozo bajo condiciones estables inyectando gas a través de la válvula operante.

El tipo de control en la superficie para la inyección de gas, también tiene influencia en el diseño de una instalación de B.N.I.. El diseño es más crítico, si se utiliza un control superficial con estrangulador que un control cíclico de tiempo. Para un control con estrangulador, se recomienda usar una válvula operante con la amplitud correcta para suministrar el volumen de

gas requerido por ciclo. Si se usa un control cíclico de tiempo, entonces el valor de la amplitud de la válvula no es tan crítico.

Para llevar a cabo un buen diseño de una instalación de B.N.I., es necesario considerar los siguientes aspectos :

I.4.1.- TIPOS DE VALVULAS USADAS EN B.N.I.

Es recomendable para una instalación de B.N.I. usar válvulas del tipo desbalanceadas operadas por piloto y sección motriz ya sean operadas por presión de T.R. o bien operadas por fluido, con elemento de carga que puede ser resorte o domo cargado de nitrógeno, con la característica de que la válvula debe de abrir en forma instantánea sin estrangular el paso de gas. Dependiendo del tipo de control del gas de inyección en la superficie, se puede o no requerir amplitud de la válvula. Si el gas es controlado completamente desde la superficie empleando interruptor de tiempo, una válvula con amplitud pequeña puede ser usada en flujo intermitente. Si se desea usar el espacio anular para almacenar el volumen de gas a inyectar y mediante un control de válvula de aguja en la superficie, la amplitud de la válvula es extremadamente importante, ya que de ella depende el volumen de gas a inyectar por ciclo.

I.4.2.- PRESION DISPONIBLE EN LA RED DE B.N.

La presión máxima disponible del gas de inyección para descargar el pozo al inicio, siempre debe ser mayor que la presión de operación. Esta última, es la presión que se puede mantener en la cabeza del pozo bajo condiciones normales de

operación. Si la presión en la línea varía, se considera la presión mínima como la presión con la que puede operar la instalación en cualquier momento. Bajo ninguna circunstancia se debe colocar la válvula operante a una presión de apertura mayor que la presión de operación disponible.

I.4.3.- PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA VALVULA SUPERIOR.

Si el pozo se encuentra completamente lleno con fluido de control, la válvula superior de bombeo neumático deberá ir colocada de acuerdo a la presión máxima disponible del gas de inyección (P_{ko}). Analíticamente, la profundidad de colocación de esta válvula es posible obtenerla con la siguiente expresión ⁽¹⁾ * :

$$Dv1 = \frac{P_{ko} - P_{whg}}{G_{fc}} \dots (1-1)$$

De hecho, la primera válvula queda un poco más abajo de lo determinado por la expresión anterior, debido a que se considera el peso de la columna de gas de inyección en la tubería de revestimiento.

I.4.4.- GRADIENTE DE DESCARGA Y ESPACIAMIENTO DE LAS VALVULAS.

Para determinar la distancia que debe existir entre cada

* La nomenclatura se proporciona al final de trabajo.

válvula de bombeo neumático, es necesario usar un gradiente de presión dentro de la tubería de producción. Este gradiente varía con el volumen de gas disponible y los gastos de descarga, y debe ser usado con precaución cuando se tienen volúmenes limitados de gas disponible y se emplea en un proceso de descarga. Con un exceso de gas del 100 % , gradientes tan bajos como 0.01 lb/pg²/pie han sido obtenidos para gastos del orden de 80 bl/día. Gradientes pequeños del orden de 0.02 lb/pg²/pie han sido utilizados para propósitos de descarga de un pozo. Comúnmente, un gradiente de descarga recomendable es de 0.04 lb/pg²/pie para tuberías de 2 y 2 $\frac{1}{2}$ pg. de diámetro interior. En cambio, para tuberías de diámetro más pequeño, los gradientes deben de ser mayores que el anterior. Véase Figs. 1-2 y 1-3.

Posteriormente, cuando el nivel de líquido baja hasta el punto en el cual se inicie la aportación de fluidos por parte de la formación productora, el gradiente de presión para continuar con el espaciamiento de las válvulas cambiará, dependiendo del ritmo de llenado del pozo. Ciertamente, un pozo que produzca a un ritmo de 100 bl/día no puede tener las válvulas tan espaciadas como otro pozo que produzca a 10 bl/día. Las Figs. 1-2 y 1-3 muestran gradientes de presión confiables para usarse en el diseño de instalaciones de B.N.I. para un gasto deseado.

Estos son gradientes que pueden ser obtenidos en descargas de flujo continuo y por lo tanto, ofrecen un factor de seguridad en la descarga de flujo intermitente. En algunos casos, las válvulas pueden ser espaciadas incrementando el gradiente de descarga con la profundidad de cada válvula.

Gradientes menores a 0.01 lb/pg²/pie han sido observados cuando un pozo descarga a una presión de cero lb/pg² con un exceso de gas del 100 % (1) .

De lo anterior, se puede resumir que básicamente existen dos formas para llevar a cabo el espaciamento de las válvulas en una instalación de B.N.I.. La primera de ellas es considerando un sólo gradiente promedio de descarga desde la superficie hasta el fondo del pozo, como puede observarse en la Fig. 1-4, que, como ya se mencionó anteriormente, el valor promedio del gradiente de descarga recomendado es de 0.04 lb/pg²/pie.

La segunda manera de llevar a cabo un espaciamento de válvulas consiste en tomar diferentes gradientes de descarga desde la superficie hasta el fondo, partiendo con un determinado gradiente en la superficie e incrementándolo en un valor que puede ser desde 0.002 a 0.005 lb/pg²/pie, dependiendo dicho incremento de la producción del pozo y del porcentaje de agua que se esté manejando. La Fig. 1-5 muestra el método de espaciamento de válvulas considerando gradientes de descarga variables.

I.4.5.- DIFERENCIA ENTRE LA PRESION DE APERTURA DE LA VALVULA OPERANTE Y LA CARGA DEL FLUIDO A BOMBARSE.

Otra importante consideración para el diseño de una instalación de B.N.I. es la selección de una diferencial correcta entre la carga existente en la tubería de producción y la presión de apertura de la válvula operante.

Una presión de fondo fluyendo baja puede ser obtenida elevando cargas ligeras en la tubería de producción. Diferenciales de presión del orden de 300 a 400 lb/pg² son frecuentes. Sin embargo, una selección arbitraria para iniciar cualquier diseño es considerar valores de 200 a 300 lb/pg². La Fig. 1-6, muestra cómo varía la recuperación de fluidos con

respecto a la carga inicial en la T.P. de acuerdo al volumen de gas inyectado.

I. 4. 6. - DIAMETRO DEL ORIFICIO DE PASO PRINCIPAL DE GAS DE LA VALVULA OPERANTE.

El tamaño del orificio de paso principal de gas de las válvulas de bombeo neumático, tiene un efecto determinante sobre la recuperación y la relación gas inyectado-líquido (RGIL). Para una tubería de producción de 2 pg de diámetro, se recomienda que este orificio tenga un diámetro mínimo de $\frac{1}{2}$ pg (Fig. 1-7).

Se han realizado pruebas experimentales para observar el efecto del diámetro de orificio principal de las válvulas de B.N.I. y se ha encontrado que las válvulas con orificios mayores son más eficientes⁽³⁾. La tabla I-1 muestra el diámetro de orificio equivalente a utilizarse con otras tuberías de producción. Se observa que se requiere un diámetro de orificio de $\frac{21}{64}$ pg para una tubería de producción de $1\frac{1}{4}$ pg para que sea equivalente a un asiento de $\frac{1}{2}$ pg con una tubería de producción de 2 pg de diámetro interior.

I. 4. 7. - RECUPERACION DE LIQUIDOS.

Una porción del volumen de líquido del bache inicial se pierde en el recorrido hacia la superficie. Un rango aproximado de esta pérdida es del 5 al 7 % por cada 1000 pies de elevación de fluido. Sin embargo, esto varía según el diámetro de la tubería de producción y el volumen de gas inyectado por ciclo. El punto de la relación gas-líquido mínimo no coincide con el punto de la recuperación máxima.

Para calcular el porcentaje de recuperación por ciclo se puede emplear la siguiente expresión ⁽¹⁾ :

$$B_p = \frac{C_t (P_t - P_{wh})}{G_s} * \left[1 - SF \frac{D_v}{1000} \right] \dots (1-2)$$

Para calcular la producción diaria de líquido recuperado con B.N.I., se puede utilizar la siguiente fórmula ⁽¹⁾ :

$$Q_{LR} = N_c * B_p \dots (1-3)$$

$$N_c = \frac{1440}{3 * \left(\frac{D_v}{1000} \right)} \dots (1-4)$$

I. 4. 8. - VOLUMEN DE GAS REQUERIDO POR CICLO.

Teóricamente, el volumen de gas necesario para desplazar un bache de líquido en un pozo, es el volumen de gas que se requiere para llenar la tubería de producción hasta la superficie, a la presión media que se alcance por debajo del bache. Si por alguna razón no se cuenta con información suficiente, una aproximación para determinar el volumen de gas necesario para elevar un bache de líquido hasta la superficie, es considerando una RGIL de 200 a 400 [(pies³ /bl)/1000 pies]. En instalaciones con cámara de acumulación o en instalaciones de B.N.I. convencional con alta RGA y con poca o ningún porcentaje de agua, se requerirá aproximadamente de 200 a 300 (pies³/bl)/1000 pies de elevación ⁽¹⁴⁾.

En base a lo anterior, el volumen requerido por ciclo de gas de inyección se calcula usando la Ley General de los gases, es decir ⁽¹⁾ :

$$Vg = Ctp \frac{Pmf Ts}{Z Tmf Ps} \dots (1-5)$$

I.4.9.- CICLOS DE INYECCION.

El tiempo de estabilización de la presión, es el tiempo requerido para que el líquido resbalado y las gotas de líquido en suspensión dentro de la burbuja de gas se asienten en el fondo de la tubería de producción y pasen a formar parte del siguiente bache a ser elevado.

Para una tubería de producción de 2 pg de diámetro interior, la duración del ciclo de bombeo se puede estimar con la siguiente expresión empírica ⁽²⁾ :

$$Tmin = 1.5 * [Dv/1000] \dots (1-6)$$

El tiempo de estabilización de la presión se puede reducir considerablemente desplazando baches más ligeros. Conforme aumenta la diferencia entre la presión en la tubería de revestimiento y la carga en la tubería de producción, el tiempo de estabilización de la presión disminuye. Al tenerse un valor alto en la diferencia de presiones antes mencionada, se bombean cargas más ligeras, obteniéndose con esto, las velocidades del bache más altas y, por consiguiente, mayores recuperaciones y menor tiempo de estabilización de la presión.

I.5.- CONTROL DE INYECCION DE GAS EN LA SUPERFICIE

Existen dos formas principales de controlar la inyección de gas en un pozo de B.N.I.. A continuación, se describe cada uno de ellas :

I.5.1.- CONTROL POR ESTRANGULADOR

El control por estrangulador puede ser usado para regular la inyección de gas en pozos de B.N.I. con válvulas desbalanceadas y con suficiente amplitud (spread). Este tipo de control requiere de mucha atención antes de seleccionar el diámetro correcto del estrangulador. Los gastos de inyección de gas deben ser regulados para coincidir con las características de aportación de fluidos del pozo. Por ejemplo, puede desearse descargar un pozo cada 30 minutos con una presión de apertura de la válvula de 750 lb/pg^2 y una presión de cierre de 700 lb/pg^2 . Esto significa que el diámetro del estrangulador debe permitir que se eleve la presión de 700 a 750 lb/pg^2 en un intervalo de tiempo de 30 minutos. Otros pozos pueden requerir el mismo levantamiento de presión en la T.R. (50 lb/pg^2) en 2 horas o en algún otro intervalo de tiempo, dependiendo de las características del pozo. En muchos casos, este tipo de control es para pozos con un suministro bajo en el volumen de gas disponible, utilizando el espacio anular para su almacenamiento.

Aún cuando esto representa un método de control, debe tenerse un cuidado muy especial en la selección de una válvula de BN, con el objeto de escoger, considerando las características del pozo, la amplitud adecuada para poder proporcionar el volumen de gas requerido. Una amplitud excesiva provocará el uso de mucho gas, en cambio una amplitud demasiado pequeña causará que el pozo

no produzca el gasto deseado. También, este tipo de control puede incrementar los problemas por congelamiento en la línea.

I.5.2.- CONTROL CICLICO DE TIEMPO

Un control cíclico de tiempo es el medio más común en el control de la inyección de gas para flujo intermitente y es relativamente fácil de ajustar. Un control de este tipo, puede ajustarse fácilmente para inyectar gas el tiempo que sea necesario, así como también ajustar el intervalo entre ciclos de inyección.

I.6.- INTERPRETACION DE REGISTROS DE PRESION SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL EN POZOS DE B.N.I.

I.6.1.- REGISTRO DE PRESION SUPERFICIAL EN LA T.R.

Un rápido incremento en la presión del espacio anular después de que el controlador cíclico de tiempo abre, es deseable en muchas instalaciones de B.N.I.. Si la presión en la línea de inyección de gas no es adecuada o la diferencia entre la presión de la línea de inyección y la presión de operación en la T.R. no es suficiente, entonces la presión en el espacio anular se incrementará muy lentamente. Un pozo profundo con bajo nivel de fluido, o un pozo con una T.R. de diámetro grande, ocasionarán que se tenga un pequeño incremento en la presión del espacio

anular en comparación con un pozo cuyo nivel de fluido es alto y con una T.R. de diámetro pequeño. Un dispositivo de estrangulación en la línea de inyección de gas, también incrementará el tiempo requerido para que la presión en la T.R. alcance la presión de apertura de la válvula operante.

Un rápido decremento en la presión de la T.R., es generalmente un indicio de que la válvula operante está trabajando en buenas condiciones. Sin embargo, el mismo decremento ocurriría en muchas instalaciones con tuberías de revestimiento de diámetros pequeños o instalaciones con una tubería flexible, aunque la operación de la válvula pueda ser pobre o mala. Un rápido decremento en la presión de la T.R., puede ser esperado en muchas instalaciones con válvulas operadas por la presión de la T.P., debido a la apertura de varias válvulas en cada ciclo. Una diferencia de presión baja a través de la válvula operante debido a una presión alta en la T.P., provocará un pequeño decremento en la presión de la T.R. después de que la válvula haya abierto. La presión en la T.R. comprendida entre la presión de cierre de la válvula operante y la apertura del controlador de inyección de gas superficial en una instalación de BNI con empacador, suele ser un indicador de fallas muy común. Si la presión se mantiene constante, no existen fugas en el sistema. Si la presión de la T.R. disminuye, puede haber una fuga en algunos de los siguientes elementos : una o varias válvulas de BN, el empacador, la tubería de producción, o el cabezal del pozo. Si la presión en la T.R. se incrementa, el controlador cíclico de tiempo tiene una fuga.

El cambio de presión en la T.R. durante la inyección de gas, debe ser el mismo en cada ciclo. Una variación en esta presión, puede ser debida a fluctuaciones de presión en la línea de inyección de gas, algún desperfecto en el controlador cíclico de tiempo, cambio en la profundidad de operación, etc.

I.6.2.- REGISTRO DE PRESIÓN SUPERFICIAL EN LA T.P.

El registro de presión en la T.P. es importante para analizar el funcionamiento de una instalación de B.N.I.. Los factores importantes en el análisis de esta presión son : 1) si el incremento de la presión en la T.P. es rápido o lento y, 2) la máxima presión registrada cuando el bache de líquido llega a la superficie.

En muchas instalaciones de B.N.I., un incremento de presión considerable y rápido en la T.P., indica una buena operación del sistema. En cambio, un incremento de presión en la T.P. pequeño y lento, indica que la longitud del bache inicial es probablemente corta debido a una baja presión de fondo o a una frecuencia de ciclos de inyección demasiado alta. Un incremento de presión demasiado lento, puede ser originado por una excesiva contrapresión en la cabeza del pozo debido a una restricción en la línea de flujo, como por ejemplo: un estrangulador, parafina o tapones de arena, numerosas curvas y placas portaorificio cerca del pozo, línea de escurrimiento larga o de diámetro pequeño, etc. En general, un incremento de presión pequeño y lento, puede ser debido a : una excesiva aereación de fluido, una gran contrapresión en la línea de escurrimiento o, la producción de un bache de líquido demasiado pequeño, lo cual indica, en todos los casos, que el sistema no se encuentra operando eficientemente.

I.6.3.- ESTUDIOS HIPOTETICOS DE PRESIONES SUBSUPERFICIALES EN UNA INSTALACION DE B.N.I.

La Fig. 1.8 muestra un caso hipotético de un estudio de presión de fondo fluyendo en una instalación de B.N.I.. Parece ser una buena instalación ya que la inyección de gas al interior de la T.P. se lleva a cabo desde la válvula más profunda.

El tiempo entre ciclos es de 25 min. La carga inicial en la tubería de producción es de 440 lb/pg² y la presión máxima alcanzada debajo del bache de líquido es de 625 lb/pg². La recuperación es excelente debido a que la presión mínima alcanzada en la T.P. es de 90 lb/pg².

La Fig. 1.9 muestra una gráfica donde el registrador de presión es colocado debajo de la válvula más profunda (abajo de 5950 pies), aun cuando la válvula operante es la inmediata superior , es decir, la válvula localizada a 4950 pies. Para una mejor información, el registrador de presión debe colocarse unos 30 pies por debajo de la segunda válvula y repetir la gráfica.

La Fig. 1.10 es un caso en el cual el pozo no está produciendo líquidos, probablemente debido a un obturamiento de arena en la T.P. ya que el registrador de presión fue colocado ligeramente por debajo de la válvula más profunda.

1.6.4.- ESTUDIOS DE CASOS REALES DE PRESIONES SUBSUPERFICIALES EN UNA INSTALACION DE BNI.

Varios casos reales de campo son dados a continuación y fueron presentados por Winkler (1) .

La Fig. 1.11 muestra un estudio de presión de fondo fluyendo en una instalación convencional de BNI. Aunque el tiempo entre ciclos es de 6 hrs., un tiempo más pequeño que el anterior no incrementaría la producción debido a que la entrada de fluidos sigue una línea recta entre cada ciclo. Una recuperación excelente es obtenida ya que se observa una presión mínima baja de 66 lb/pg².

La Fig. 1.12 muestra un estudio típico de un pozo con B.N.I. y presenta las siguientes observaciones:

- 1.- La válvula abre inicialmente con una carga de presión en la T.P. de 385 lb/pg² .
- 2.- La línea A muestra un incremento de presión a medida que aumenta la presión en la T.R. por debajo del bache.
- 3.- La presión máxima alcanzada por debajo del bache fue de 658 lb/pg².
- 4.- La válvula cierra en la parte superior de la línea B y la presión se abate rápidamente. Se observa una presión mínima alcanzada de 323 lb/pg².

La Fig. 1.13 muestra el estudio de la presión en una instalación de B.N.I. con cámara de acumulación. La válvula abre

a una presión de 292 lb/pg^2 y se incrementa a un máximo de 885 lb/pg^2 cuando la válvula de BN abre. Esto es debido a que la carga de líquido se desplaza en forma de U desde el interior de la cámara a la tubería de producción. Una presión mínima de 222 lb/pg^2 podría indicar relativamente operaciones ineficientes en las que una diferencia de carga de líquido de $292 - 222 = 72 \text{ lb/pg}^2$ es removida en cada ciclo. Dependiendo del diámetro de la T.R., esto puede o no ser una buena recuperación en cada ciclo.

I.6.5.- ANALISIS DE REGISTROS DE PRESION DURANTE UN CICLO DE BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE

Numerosas variaciones de presión se tienen presentes por debajo del bache en una instalación de B.N.I.. Existen registros de presión tomados en tuberías de producción de 2 y $1\frac{1}{4}$ pg. Cada uno de ellos representa el comportamiento de la presión a diferentes profundidades durante un ciclo completo de elevación de líquido. La Fig. 1.14 muestra un registro típico en el cual se inyectó gas en una T.P. de 2 pg de diámetro y a una profundidad de 5940 pies, a través de una válvula de BN con un puerto de 1 pg de diámetro. La presión fue registrada a las profundidades de 5936, 4290, 2493, 1685, 967, 477, y a cero pies. El volumen del bache de líquido inicial fue de 2.345 bls (95% agua salada).

La siguiente información puede ser obtenida del registro mostrado en la Fig. 1.14.

- 1.- En el tiempo $t = 0$, la carga inicial en la T.P. fue de 350 lb/pg^2 .
- 2.- Al llevarse a cabo la inyección de gas, el bache de líquido

es acelerado hasta alcanzar una presión en la T.P. de 600 lb/pg² en dos o tres minutos.

3.- El bache alcanza la superficie en 4 minutos, 35 segundos como puede observarse en la curva de presión correspondiente a una profundidad de cero pies (presión de la T.P. en la superficie). La presión de 5936 pies comienza a disminuir en este instante, aunque la válvula operante todavía no haya cerrado.

4.- Una vez que el bache se produce en la superficie, la presión de 5936 pies cae hasta aproximadamente 530 lb/pg² en 8 minutos, tiempo en el cual la válvula de BN cerró.

5.- La presión entonces cae rápidamente hasta un mínimo de 208 lb/pg² en aproximadamente 12 minutos. La presión mínima representa una combinación de la contrapresión del pozo, el resbalamiento de líquido, y el fluido alimentado por la formación productora.

6.- La presión mínima justamente se mantiene constante por 4 o 5 minutos, tiempo durante el cual las gotas de líquido fueron aún producidas en la superficie, tendiendo a reducir la presión a 5936 pies. Sin embargo, el resbalamiento de líquido y la aportación de fluidos por la formación compensan la reducción de la presión, dando como resultado una presión constante. La forma de la curva que describe la presión mínima, antes de elevarse nuevamente la presión, varía dependiendo del gasto de producción de líquidos (para este pozo fue de 82 bl/día).

7.- En aproximadamente 18 minutos, la presión a 5936 pies comienza a mostrar un decidido incremento debido a la aportación de líquidos de la formación productora.

Del registro de presión tomado a 4290 pies, se pueden hacer observaciones similares a las hechas en 5936 pies. Estas son :

1.- La presión estabilizada en la T.P. en un tiempo $t = 0$ fue de 80 lb/pg^2 , indicando que la parte superior del bache estuvo inicialmente por debajo de este punto.

2.- La parte superior del bache alcanzó los 4290 pies aproximadamente en 1 minuto, tiempo en el cual la presión comienza a incrementarse.

3.- La presión continúa incrementándose conforme pasa el bache de líquido por 4290 pies, pero no alcanzará el nivel de presión de 600 lb/pg^2 obtenida a 5936 pies. La presión máxima de 575 lb/pg^2 es el resultado a las pérdidas del bache, tales como el resbalamiento de líquido.

4.- La presión comienza a disminuir aproximadamente en el mismo valor que a 5936 pies (530 lb/pg^2) y esto ocurre cuando el bache de líquido es producido en la superficie y después de que la válvula de BN cerró.

5.- Después de 12 minutos, la presión en 4290 pies continúa disminuyendo debido a que la aportación de fluidos por la formación productora no alcanza este punto.

6.- Después de aproximadamente 18 minutos, la presión tiende nuevamente a estabilizarse en 80 lb/pg^2 . Esto representa el tiempo requerido para que el resbalamiento en la T.P. se asiente completamente, y es de vital importancia para determinar la óptima frecuencia de ciclos de inyección.

Los registros de presión a 2493, 1685, 969, y 477 pies

muestran la misma tendencia que los registros tomados a 4290 y 5936 pies. En el momento en el cual el bache alcanza estas profundidades, puede determinarse fácilmente. Después de alcanzar sus máximos, la presión continuamente disminuye, resultando constante aproximadamente a los 18 minutos. A menores profundidades, presiones máximas menores son apreciadas, indicando más resbalamiento de líquido.

La curva de presión en la superficie (profundidad cero) muestra lo siguiente:

- 1.- En el instante $t = 0$, la contrapresión en la T.P. fue de 65 lb/pg².
- 2.- El líquido alcanzó la superficie en 4 minutos, 35 segundos.
- 3.- La presión alcanzó un máximo de 195 lb/pg².
- 4.- La presión cayó inmediatamente, indicando que la mayor parte de la producción ha sido recuperada. Una producción posterior en forma de gotas y de fluidos finamente dispersados, siguen a la producción del bache intacto.
- 5.- El gas que viene por debajo del bache de líquido (cola de gas) se escapó o liberó completamente en 14 minutos.

La Fig. 1.15 muestra otro registro de 5940 pies, usando una válvula con un puerto de 1 pg para elevar una carga de 350 lb/pg². Este registro en particular, se obtuvo para la mínima relación gas-líquido posible para estas condiciones (2100 pies³/ciclo). Como se observa, solo el 55 % del bache fue recuperado.

La Fig. 1.16 muestra la elevación de un bache con las mismas características de los anteriores, con la excepción de que en este caso el diámetro del puerto de la válvula fue de 5/16 pg. Este diámetro resultó demasiado pequeño y no permitió que la presión por debajo del bache alcanzara a la presión de la T.R. (presión de apertura de la válvula operante).

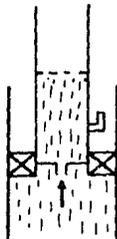


FIG. 1-A.- FORMACION DEL BACHE DE LIQUIDO.

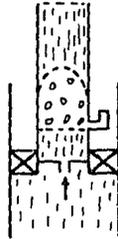


FIG. 1-B.- RESBALAMIENTO DE LIQUIDO EN FORMA DE GOTAS.

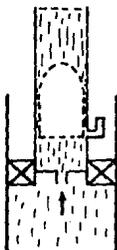


FIG. 1-C.- RESBALAMIENTO DE LIQUIDO SOBRE LAS PAREDES DE LA TUBERIA DE PRODUCCION.

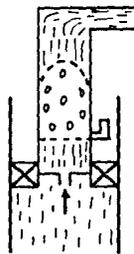


FIG. 1-D.- VALVULA DE B.N. CERRADA.

CICLO DEL BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE⁽⁵⁾

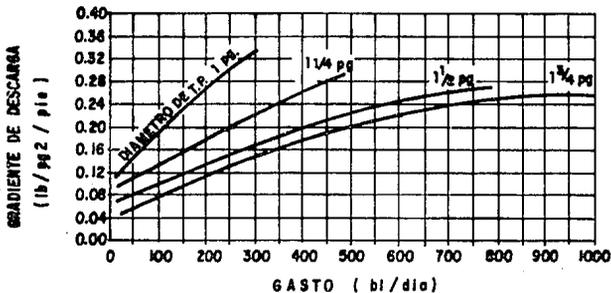


FIG. 1-2.- GRADIENTE DE DESCARGA EN FUNCION DEL GASTO DE DISEÑO.⁽¹⁾

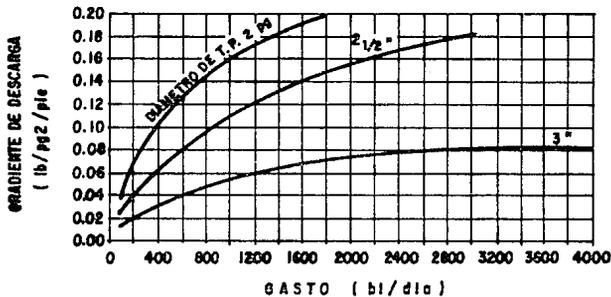


FIG. 1-3.- GRADIENTE DE DESCARGA EN FUNCION DEL GASTO DE DISEÑO.⁽¹⁾

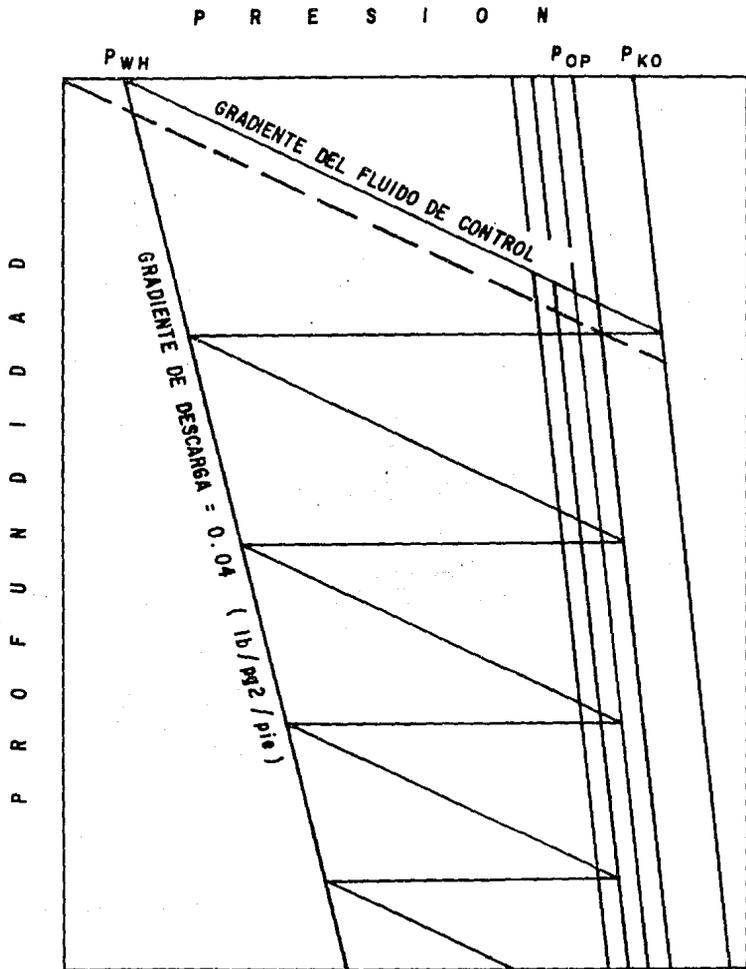


FIG. 1-4.- METODO DE ESPACIAMIENTO DE VALVULAS PARA BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE CONSIDERANDO UN GRADIENTE DE DESCARGA CONSTANTE.⁽¹⁾

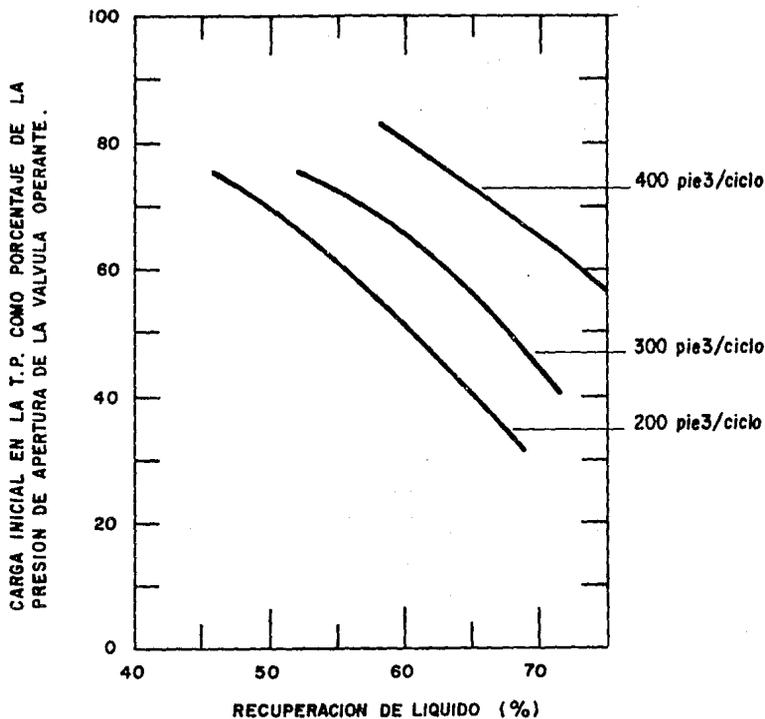


FIG. 1-6.- PORCENTAJE DE LIQUIDO RECUPERADO EN FUNCION DEL VOLUMEN DE GAS INYECTADO Y DEL PORCENTAJE DE CARGA INICIAL EN LA T.P.⁽¹⁾

DIAMETRO ASIENTO PRINCIPAL (pg)	REC. LIQ. (%)	RGL (pie ³ /bl)	CARGA INICIAL EN T. P. (lb/pg ²)
5/16	58	2 550	275
1/2	65	2 300	250
1	74	2 020	208

PRESION
(lb/pg²)

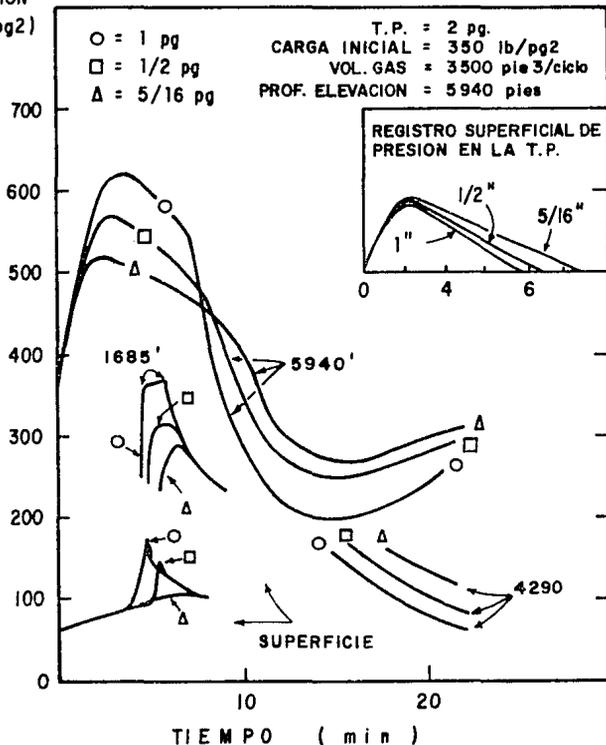


FIG. 1-7.- REGISTRO DE PRESION EN LA TUBERIA DE PRODUCCION PARA DIAMETROS DE ASIENTO DE 1, 1/2 Y 5/16 pg.⁽¹⁾

DIAMETRO DE TP (pg)	2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2 1/2	3
DIAMETRO DE ASIENTO (pg)	FRAC.	FRAC.						
1	27/64	17/32	11/16	13/64	57/64	17/64	1 1/2	
1 1/16	9/32	23/64	15/32	9/16	19/32	49/64	1 1/32	
1/2	13/64	17/64	21/64	13/32	7/16	9/16	3/4	
3/8	5/32	13/64	1/4	19/64	21/64	27/64	9/16	
5/16	1/8	11/64	7/32	1/4	17/64	11/32	15/32	

TABLA I - 1

DIAMETROS DE ASIENOS PRINCIPALES PARA VALVULAS COLOCADAS EN DIFERENTES TUBERIAS DE PRODUCCION EQUIVALENTES A ASIENOS DE VALVULAS USADAS EN UNA T. P. DE 2 pg.⁽¹⁾

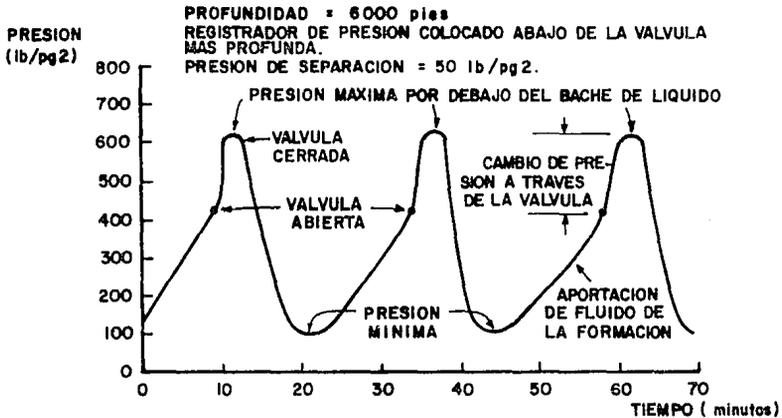


FIG. 1-8.- REGISTRO TÍPICO DE PRESION DE UNA INSTALACION CONVENCIONAL DE BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE (11)

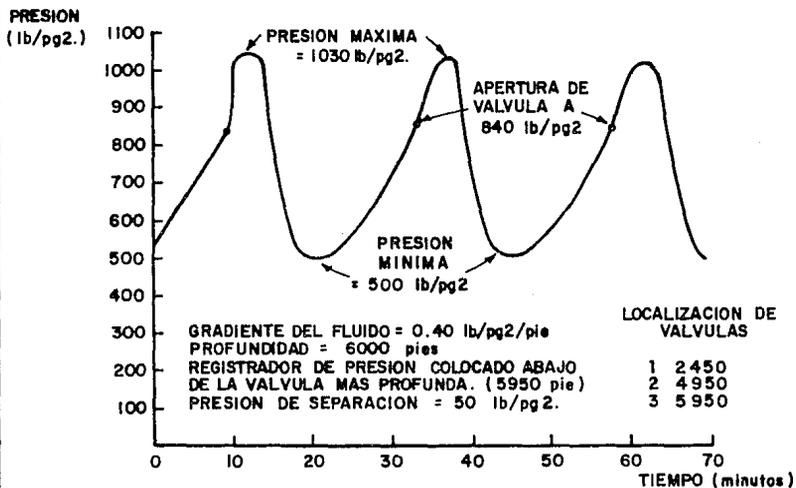


FIG. 1-9.- REGISTRO DE PRESION EN UNA INSTALACION CONVENCIONAL DE BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE CON LA PENULTIMA VALVULA DEL APAREJO OPERANDO (4950 pie) (11)

PRESION
(lb/pg2)

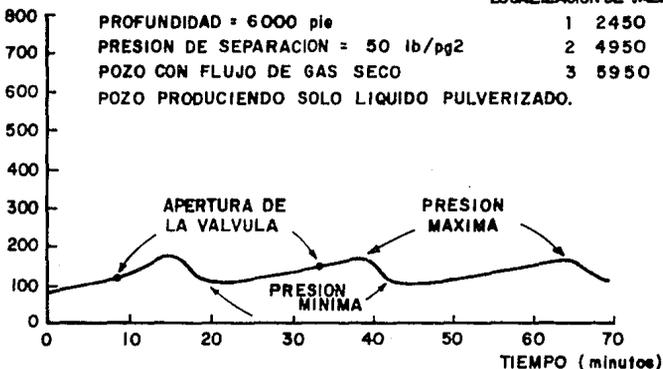


FIG. 1-10.- REGISTRO DE PRESION EN UNA INSTALACION CONVENCIONAL DE BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE CON FLUJO DE GAS SECO.⁽¹⁾

PRESION
DE FONDO
(lb/pg2.)

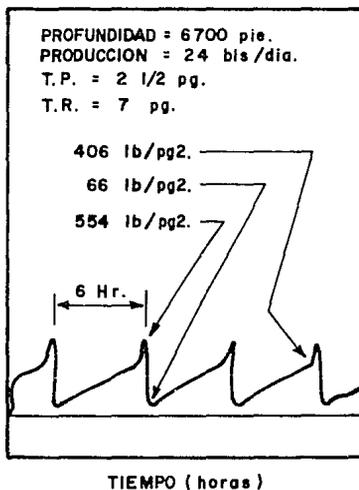


FIG. 1-11.- REGISTRO DE PRESION DE FONDO FLUYENDO EN UNA INSTALACION CONVENCIONAL DE BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE.⁽¹⁾

VALVULA DE BOMBEO NEUMATICO OPERANTE (700 lb/pg2)

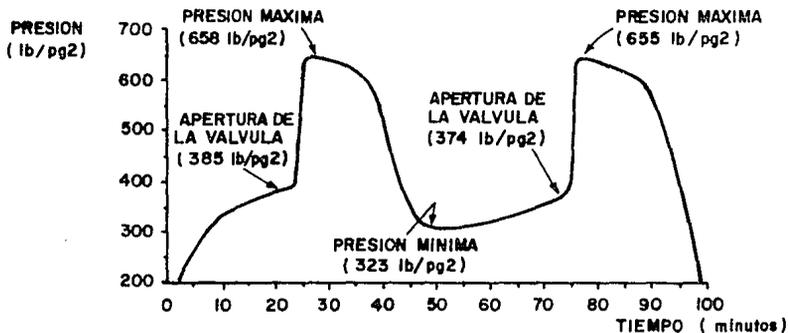


FIG. 1-12.- REGISTRO REAL DE PRESION DE FONDO FLUYENDO EN UN POZO CON BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE.⁽¹⁾

VALVULA DE BOMBEO NEUMATICO OPERANTE (900 lb/pg2)

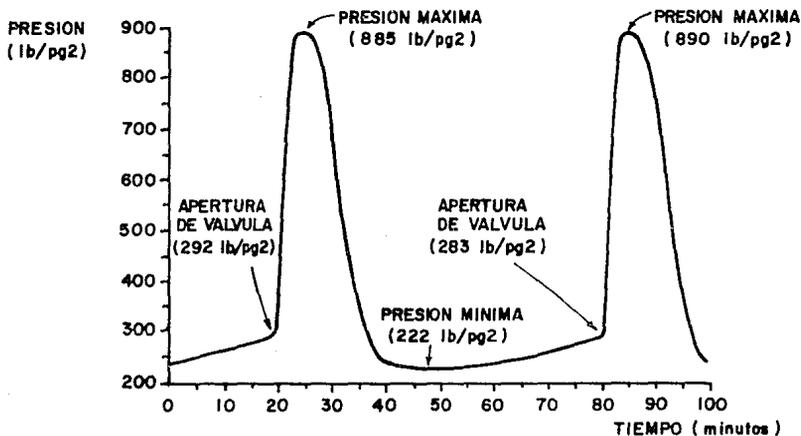


FIG. 1-13.- REGISTRO DE PRESION DE FONDO FLUYENDO TOMADO ARRIBA DE UNA VALVULA DE PIE (6580 pies) Y EN UNA INSTALACION CON CAMARA DE ACUMULACION.⁽¹⁾

PRESION
(lb/pg2)

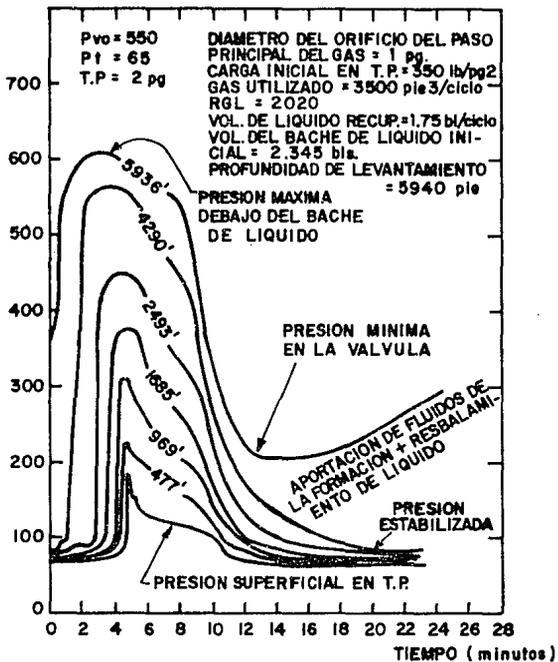


FIG. 1-14.- REGISTROS TÍPICOS DE PRESION EN UNA INSTALACION DE BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE CON VALVULA DE 1 pg DE DIAMETRO EN EL PASE PRINCIPAL DE GAS. ⁽¹⁾

PRESION
(lb/pg²)

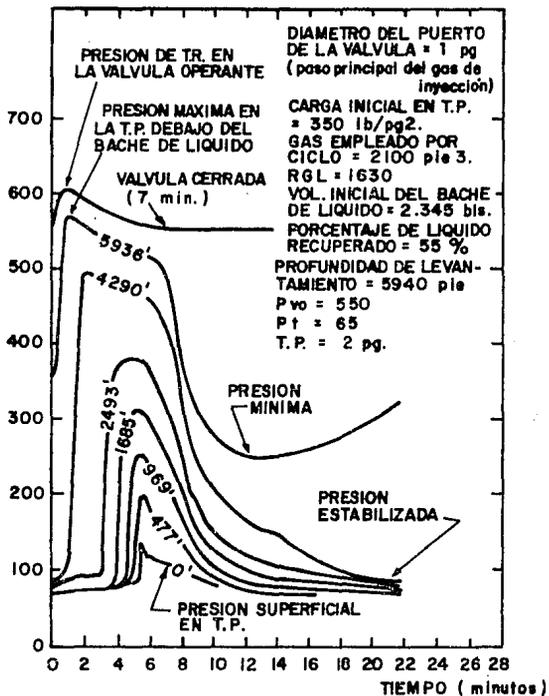


FIG. 1-15.- REGISTROS TÍPICOS DE PRESION EN UNA INSTALACION DE B. N. I. CON VALVULA DE 1pg. DE DIAMETRO EN EL PASO PRINCIPAL DE GAS Y MINIMA RGL.⁽¹⁾

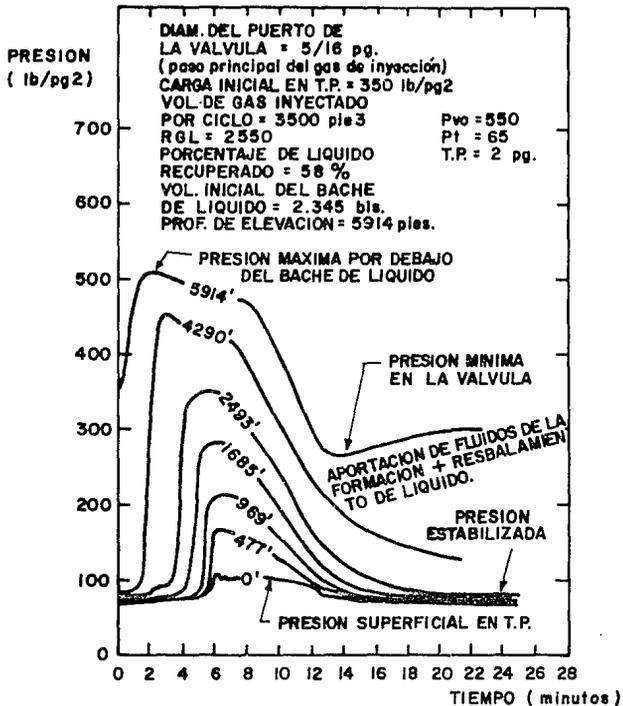


FIG. 1-16.- REGISTROS TÍPICOS DE PRESION EN UNA INSTALACION DE B.N.I. CON VALVULA DE 5/16 pg. DE DIAMETRO EN EL PASO PRINCIPAL DEL GAS DE INYECCION.⁽¹⁾

CAPITULO II

MODELO MATEMATICO QUE DESCRIBE EL FENOMENO DEL FLUJO INTERMITENTE

II.1 CONSIDERACIONES DEL MODELO

(3)

Fernández, O.E. y colaboradores desarrollaron un modelo hidrodinámico en el cual involucran las variables de mayor interés dentro del flujo intermitente y las relacionan unas con otras mediante un sistema ordinario de ecuaciones diferenciales. La aplicación del modelo se enfoca básicamente a simular un ciclo completo del B.N.I. y las suposiciones que se hicieron para llevar a cabo la simulación fueron las siguientes :

- a) Se considera un proceso isotérmico.
- b) El colgamiento de líquido por debajo del bache es constante y uniforme para cualquier tiempo dado.
- c) No existe entrada de líquido a la tubería de producción durante la inyección de gas.
- d) Una vez que se alcanza la presión de apertura de la válvula operante, el número de moles de gas contenidas en el espacio anular ya no aumenta y sólo se consideran aquellas moles que existían un instante antes de que abriera la válvula.

II.2 PROPIEDADES FISICAS DE LOS FLUIDOS DEL POZO

Las propiedades físicas de los fluidos se midieron en un laboratorio a condiciones de presión atmosférica y temperatura variable, siendo el rango de temperaturas usado de 60 a 110 °F . Para el desarrollo del modelo, se consideró constante la densidad del líquido, sin embargo, para conocer su viscosidad, se empleó la siguiente expresión ⁽⁹⁾ :

$$\mu_L = \exp (6.627 - 0.0260866 * Tmf) \quad \dots (2-1)$$

II.3 ECUACIONES BASICAS DEL MODELO

Las variables utilizadas para describir el fenómeno del B.N.I. están representadas en la Fig. 2.1 * . La simulación del modelo en forma dinámica requiere de ecuaciones que describan el complejo comportamiento del flujo intermitente. A continuación, se presentan las ecuaciones que emplea el modelo para simular el fenómeno de flujo intermitente.

II.3.1 COMPORTAMIENTO DE LA PRESION EN EL ESPACIO ANULAR .

El comportamiento de la presión en el espacio anular puede conocerse utilizando la siguiente ecuación de estado ⁽⁹⁾ :

$$pV = ZnRT \quad \dots (2-2)$$

* Las figuras se presentan al final del capítulo.

Derivando la ecuación anterior con respecto al tiempo y considerando el subíndice 1 para describir los cambios de presión frente a la válvula operante que ocurren en el espacio anular, obtenemos :

$$\frac{dp_1}{dt} = \left[\frac{n_1 R T_1}{V_1} \frac{dZ_1}{dt} + \frac{Z_1 R T_1}{V_1} \frac{dn_1}{dt} \right] \dots (2-3)$$

Para el primer incremento de tiempo seleccionado, la dZ_1/dt es igual a cero. Para tiempos posteriores, la derivada puede ser evaluada considerando incrementos finitos de tiempo, es decir :

$$\frac{dZ_1}{dt} \approx \frac{\Delta Z_1}{\Delta t} = \frac{Z_{1ini} - Z_{1fin}}{\Delta t} \dots (2-4)$$

donde :

Z_{1ini} = Z_1 obtenida con la P_1 del instante de tiempo anterior (t).

Z_{1fin} = Z_1 obtenida con la P_1 del instante de tiempo en estudio ($t + \Delta t$).

La temperatura (T_1) y la densidad relativa del gas de inyección se consideran iguales para cualquier instante de tiempo dado.

II.3.2 COMPORTAMIENTO DE LA PRESION EN LA BURBUJA DE GAS DENTRO DE LA TUBERIA DE PRODUCCION.

La ecuación (2-2) también puede aplicarse a la burbuja de gas dentro de la tubería de producción y considerando el subíndice 3 para representar los parámetros que cambian dentro de la burbuja y por debajo del bache de líquido tenemos :

$$\bar{p}_g V_g = Z_g n_g R T_g \quad \dots (2-5)$$

Donde \bar{p}_g es el promedio aritmético de la presión que se tiene directamente por debajo del bache (P_B), y la presión que se tiene en la tubería de producción a la profundidad de la válvula de inyección (P_2). Así que :

$$\bar{p}_g = \frac{P_B + P_2}{2} \quad \dots (2-6)$$

Derivando la ecuación (2-5) con respecto al tiempo, tenemos :

$$\frac{d\bar{p}_g}{dt} = \left[\frac{n_g R T_g}{V_g} \frac{dZ_g}{dt} + \frac{Z_g R T_g}{V_g} \frac{dn_g}{dt} - \frac{\bar{p}_g}{V_g} \frac{dV_g}{dt} \right] \quad \dots (2-7)$$

La dZ_g/dt se obtiene de la misma forma que la dZ_1/dt vista anteriormente.

II.3.3 FLUJO DE GAS A TRAVES DE LA VALVULA DE B.N.

La suma de moles de gas del espacio anular y de la burbuja dentro de la tubería de producción debe ser constante e igual a las moles de gas iniciales (antes de la inyección) en el espacio anular, es decir :

$$n_{inv} = n_1 + n_g \quad \dots (2-8)$$

Derivando la expresión anterior con respecto al tiempo, obtenemos :

$$\frac{dn_1}{dt} = - \frac{dn_g}{dt} \quad \dots (2-9)$$

Como : $n_g = \frac{m_g}{M}$ y $\frac{dn_g}{dt} = \frac{1}{M} \frac{dm_g}{dt}$,

entonces la ecuación (2-9) se puede expresar de la siguiente manera :

$$\frac{dn_1}{dt} = - \frac{1}{M} \frac{dm_g}{dt} \quad \dots (2-10)$$

donde dm_g/dt representa el gasto másico que pasa a través de la válvula operante y el cual puede ser obtenido con la siguiente expresión (9) :

$$\frac{dm_g}{dt} = 76.035 \left[\frac{Cd Y d^2}{(1 - \beta^4)^{\frac{1}{2}}} \right] \left[\rho_{g1} (p_1 - p_2) \right]^{\frac{1}{2}} \dots (2-11)$$

La densidad del gas (ρ_{g1}), puede calcularse de la ecuación (2-2) como :

$$\rho_{g1} = \frac{p_1 M}{Z_1 R T_1} \dots (2-12)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2-11) y (2-12) en (2-10), y considerando que : $M = 28.97 \text{ SGg}$ y $R = 10.73$ tenemos :

$$\frac{dn_1}{dt} = - 0.02978 d^2 \frac{Cd Y}{(1 - \beta^4)^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{p_1 (p_1 - p_2)}{SGg T_1 Z_1} \right]^{\frac{1}{2}} \dots (2-13)$$

Esta última expresión, nos proporciona el cambio de moles con respecto al tiempo que pasan a través del orificio de la válvula operante.

II.3.4 MOVIMIENTO DEL BACHE DE LIQUIDO (9)

La dinámica del bache de líquido, puede ser estudiada aplicando los conceptos de continuidad y cantidad de movimiento sobre un volumen arbitrario de control, el cual representa al bache de líquido en movimiento (Fig.2.2). Las ecuaciones que ayudan a entender el desplazamiento del bache son :

A) ECUACION DE CONTINUIDAD (9) :

$$\iiint_{V_a(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{v}_a \cdot d\vec{A} = - \iint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_a) \cdot d\vec{A}$$

*
... (2-14)

B) ECUACION DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO (9) :

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \iint_{S(t)} (\rho \vec{v}) (\vec{v}_a \cdot d\vec{A}) +$$

$$\iint_{S(t)} \rho \vec{v} ((\vec{v} - \vec{v}_a) \cdot d\vec{A}) = - \iint_{S(t)} p d\vec{A} -$$

$$\iint_{S(t)} (\vec{n} \cdot \vec{\tau}) d\vec{A} + \iiint_{V(t)} \rho \vec{g} dV$$

*
... (2-15)

* VER APENDICE

De la ecuación (2-14) se obtiene la velocidad de la película de líquido (9) :

$$V_f = \frac{V_z A - V_b f A_B}{A - A_B} \quad \dots (2-16) \quad *$$

o bien, si la velocidad de la película de líquido (V_f), es expresada en términos del colgamiento de líquido (H_L), tenemos :

$$V_f = \frac{V_b f (H_L - 1) + V_z}{H_L} \quad \dots (2-17)$$

De la ecuación (2-15), se obtiene la siguiente expresión :

$$\frac{dV_z}{dt} = -g + \frac{144 g_c (p_B - p_T)}{(\rho_L L_s)} - \frac{F f_L V_z^2}{(2 d_i)} - \frac{V_z}{L_s} + \frac{A_B V_B^2}{(A L_s)} + \frac{(A - A_B) V_f^2}{(A L_s)} \quad \dots (2-18) \quad *$$

la cual representa la aceleración que sufre el bache de líquido desde la profundidad de la válvula operante hasta la superficie.

La posición frontal del bache de líquido (Z_r), puede obtenerse con la siguiente expresión :

* VER APENDICE

$$\frac{dZ_T}{dt} = - V_z \quad \dots (2-19)$$

II.3.5 MOVIMIENTO DE LA BURBUJA DE GAS.

Varios investigadores han observado que existe una relación de tipo lineal entre la velocidad frontal del bache (V_z) y la velocidad frontal de la burbuja (V_{bf}). De Moraes, Davidson y Harrison⁽⁸⁾ desarrollaron una correlación para el movimiento de una burbuja de gas elevándose a través de un líquido que fluye ascendentemente dentro de una tubería. Para perfiles de velocidad laminar, determinaron que ⁽⁸⁾ :

$$V_{bf} = C_1 V_z + C_2 (gd)^{\frac{1}{2}} \quad \dots (2-20)$$

Donde : $C_1 = 2.16$ y $C_2 = 0.347$

Para perfiles de velocidad de líquido turbulento, encontraron que ⁽⁸⁾ :

$$V_{bf} = C_1 V_z + C_2 (gd)^{\frac{1}{2}} \quad \dots (2-21)$$

para $\frac{V_z}{(gd)^{\frac{1}{2}}} < 2.0$, los valores de C_1 y C_2 son :

$$C_1 = \frac{\text{Log } N_{reL} + 0.21}{\text{Log } N_{reL} - 0.74} \quad \dots (2-22)$$

$$C_2 = 0.347$$

Para $\frac{V_z}{(gd)^{\frac{1}{2}}} > 2.0$, encontraron (8) :

$$V_{bf} = C_1 V_z + C_2 \frac{1}{3} (gd)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{3} C_3^{-\frac{1}{3}} \quad \dots (2-23)$$

donde :

$$C_1 = \frac{\text{Log } N_{reL} + 0.089}{\text{Log } N_{reL} - 0.74} \quad \dots (2-24)$$

$$C_2 = \frac{V_z}{(gd)^{\frac{1}{2}}} \frac{0.083}{\text{Log } N_{reL} - 0.74} \quad \dots (2-25)$$

$$C_3 = \frac{V_z}{(gd)^{\frac{1}{2}}} \frac{5.84}{\text{Log } N_{reL} - 0.74} \quad \dots (2-26)$$

La posición frontal de la burbuja de gas (V_{bf}), puede expresarse también como (9) :

$$\frac{dZ_g}{dt} = - V_{bf} \quad \dots (2-27)$$

El cambio de volumen en la burbuja de gas se puede obtener con la siguiente expresión (9) :

$$\frac{dV_g}{dt} = V_z A \quad \dots (2-28)$$

II.3.6 CAIDA DE PRESION ENTRE LA PARTE SUPERIOR DE LA BURBUJA
(P_B) Y EL PUNTO DE INYECCION DE GAS (P_2).

Esta caída de presión puede obtenerse considerando un gradiente de presión en régimen permanente, es decir ⁽⁹⁾ :

$$144 \frac{dp}{dz} = \frac{g}{g_c} \rho_g + \frac{Ff_b \rho_g V_g^2}{2 g_c di} \dots (2-29)$$

o bien como :

$$P_B = P_2 - \frac{L_B}{144} \left[\frac{Ff_B \rho_B V_B^2}{2 g_c di} + \frac{g}{g_c} \rho_B \right] \dots (2-30)$$

El término por elevación en la ecuación anterior se considera cero. El factor de fricción de la burbuja se obtuvo con la ecuación de COLEBROOK y WHITE cuando la viscosidad del aceite fuera menor a 30 cp. Para viscosidades mayores a la anterior, se empleó la fórmula siguiente ⁽⁹⁾ :

$$Ff_B = 0.059(1 + 55.9(\delta/r)) \dots (2-31)$$

La ecuación (2-31) se obtuvo experimentalmente y considera la fricción del gas y del líquido arrastrado por el mismo gas dentro de la burbuja.

El espesor de película, δ , y el diámetro de la burbuja de gas, d_B , se calcularon suponiendo que el líquido se encuentra uniformemente distribuido a todo lo largo de la burbuja (Fig. 2.3). Estas variables pueden calcularse de la siguiente manera :

$$d_B = (d_i (1 - H_L))^{\frac{1}{2}} \quad \dots (2-32)$$

$$\delta = \frac{d_i - d_B}{2} \quad \dots (2-33)$$

Para encontrar los valores de p_B y de p_2 , es necesario resolver la ecuación (2-7), con el objeto de obtener para el instante ($t + \Delta t$) el valor de la presión media de la burbuja de gas (\bar{p}_g) y posteriormente con las ecuaciones (2-6) y (2-30) calcular p_B y p_2 .

II.3.7 RESBALAMIENTO Y COLGAMIENTO DE LIQUIDO ⁽⁹⁾

Una vez evaluadas las posiciones frontales del bache de líquido (Z_T) y de la burbuja de gas (Z_B), puede encontrarse la longitud del bache intacto (bache de líquido no penetrado por la burbuja de gas), de la siguiente manera ⁽⁹⁾ :

$$L_s = Z_B - Z_T \quad \dots (2-34)$$

Con el valor obtenido de (L_s) para un instante de tiempo dado, es posible determinar el resbalamiento de líquido con la siguiente expresión ⁽⁹⁾ :

$$FB = L_{si} - L_s \quad \dots (2-35)$$

La longitud de la burbuja de gas se obtiene con la siguiente expresión (9) :

$$L_B = D_V - Z_B \quad \dots (2-36)$$

El colgamiento de líquido se obtiene dividiendo la longitud de líquido penetrado por el gas por la longitud de la tubería de producción que se tiene debajo del bache hasta la profundidad de la válvula operante, es decir (9) :

$$H_L = \frac{L_{si} - L_s}{L_B} \quad \dots (2-37)$$

$$H_L = \frac{FB}{L_B} \quad \dots (2-38)$$

Un diagrama esquemático del flujo intermitente en tres sucesivos incrementos de tiempo es mostrado en la Fig. 2.4 .

II.3.8 PROCEDIMIENTO DE CALCULO.

El programa comienza estableciendo, con los datos proporcionados, las condiciones iniciales de todos los parámetros necesarios para describir el fenómeno del B.N.I.. Una vez determinadas estas condiciones, procede a resolver siete ecuaciones diferenciales ordinarias dependientes del tiempo (ecuaciones : 2-3,2-7, 2-11,2-13, 2-18, 2-19, 2-27), las cuales utilizan el método numérico de RUNGE-KUTTA de sexto orden

orden para cada incremento de tiempo seleccionado. En cada uno de estos incrementos de tiempo, se obtiene una solución de las ecuaciones y posteriormente se evalúa el resbalamiento y colgamiento de líquido. Para calcular este último, se supone que el líquido resbalado se encuentra uniformemente distribuido a todo lo largo de la burbuja de gas. Una vez que se encuentran los valores de p_1 y p_2 , se determina el volumen de gas existente por debajo del bache de líquido con la ecuación (2-5).

El procedimiento anterior continúa hasta que el bache de líquido alcanza la parte superior de la T.P.. Posteriormente, durante la producción de éste en la superficie (Fig. 2.5), ocurren cambios importantes en el sistema, como el cambio de velocidad del bache en la línea de escurrimiento (cuando el diámetro de la línea es diferente al de la T.P.), el rápido incremento en la aceleración del bache en la T.P. debido a una disminución en la carga hidrostática , etc.

Cuando el bache de líquido se encuentra en posición horizontal, se inicia la simulación del desplazamiento de éste desde la cabeza del pozo hasta que llega al separador, lugar en donde termina el procedimiento de cálculo. Al final del capítulo V, se presenta el diagrama de flujo del programa de cómputo.

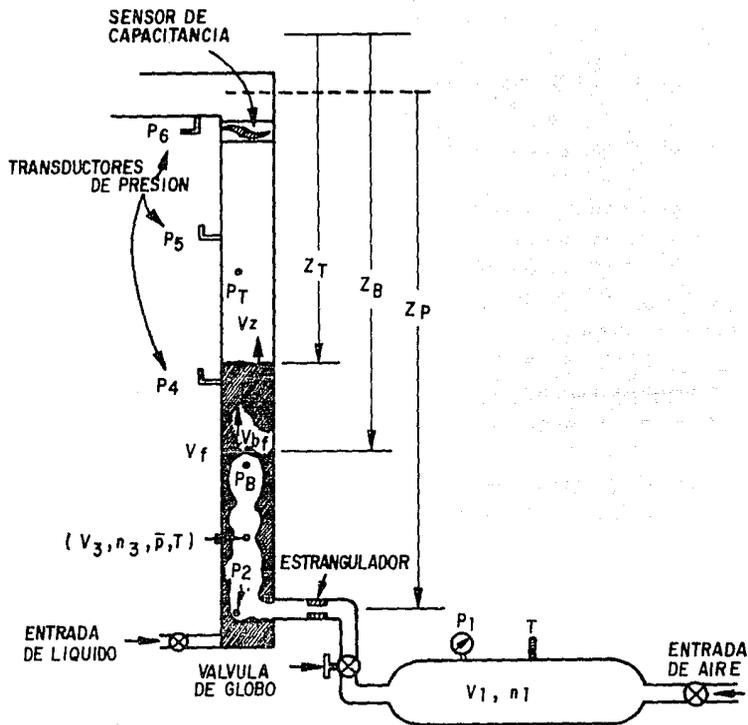


FIG. 2-1.- MODELO HIDRODINAMICO DEL BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE.⁽⁹⁾

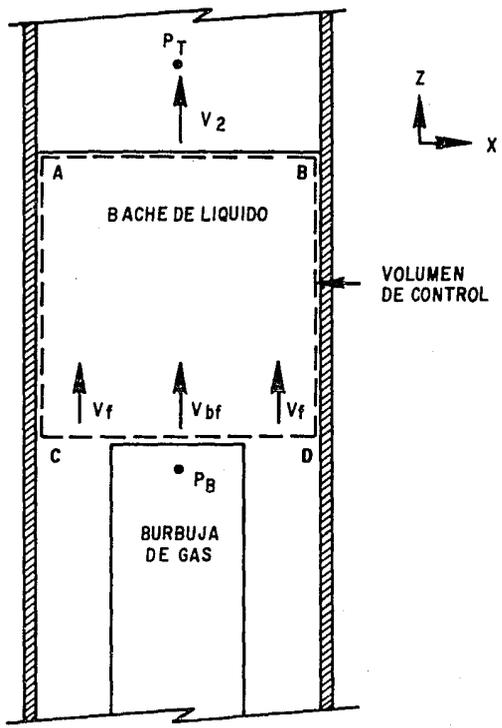


FIG. 2-2.- VOLUMEN DE CONTROL DEL BACHE DE LIQUIDO ⁽⁹⁾

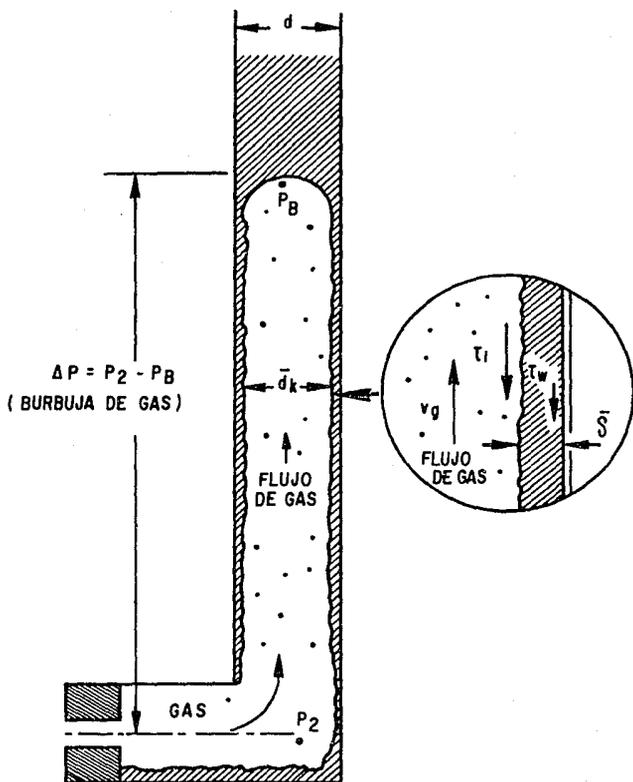


FIG. 2-3.- DISTRIBUCION DE LIQUIDO EN LA REGION DE FLUJO ANULAR A TRAVES DE TODA LA BURBUJA DE GAS⁽⁹⁾

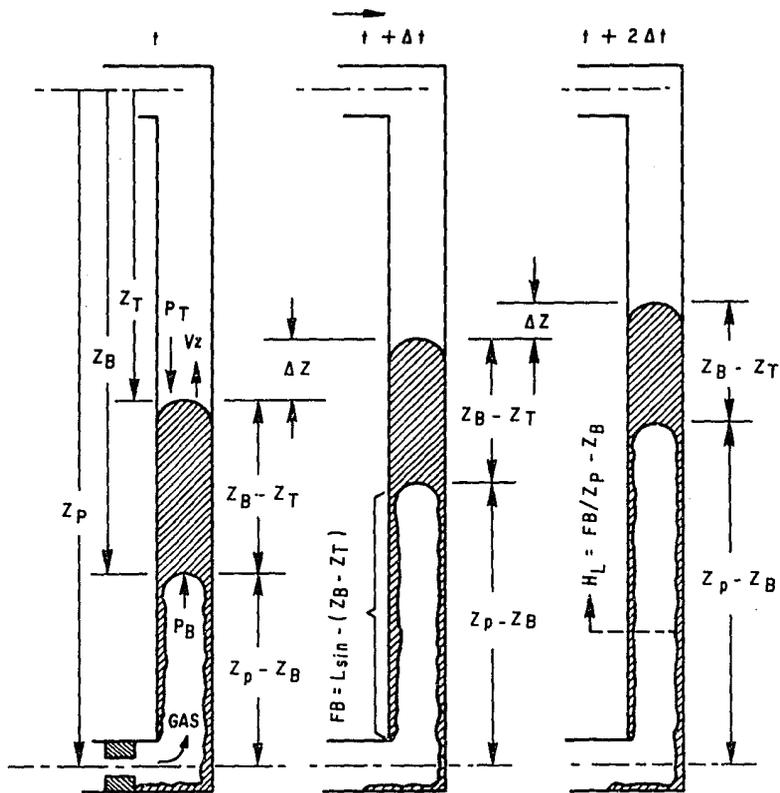


FIG. 2-4.- DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL MODELO DE FLUJO DEL BOMBEO NEUMATICO INTERMITENTE.⁽⁹⁾

CAPITULO III

VALIDACION DEL MODELO

Para llevar a cabo la simulación de un ciclo completo de B.N.I., es necesario efectuar una gran cantidad de cálculos. Por esta razón, se elaboró un programa de cómputo que nos permita conocer con precisión las variables más importantes del flujo intermitente y, a la vez, proporcionar el diseño completo del aparejo de válvulas de BN que deberá ir dentro del pozo. Como ya existe un programa de cómputo llamado BONEI, el cual fue desarrollado por Zuñiga, P.H. ⁽¹⁰⁾, el nombre seleccionado para el programa de cómputo de este trabajo fue BONEI versión 2, que en forma simplificada puede ser llamado BONEI-2. La diferencia entre ambas versiones radica fundamentalmente en los trabajos de investigación que cada una de ellas empleó como base para su desarrollo.

La validación del modelo, se llevó a cabo con la comparación de una serie de gráficas y datos medidos experimentalmente en instalaciones de la Universidad de Tulsa con resultados obtenidos del programa BONEI-2. El error de lo medido y calculado se presenta en el subtema III.8

III.1.- VELOCIDAD MEDIA INSTANTANEA DEL BACHE DE LIQUIDO

La Fig. 3-1* muestra la variación de la velocidad media instantanea, con respecto al tiempo, del bache de líquido obtenida en el trabajo de Fernández, O.E. ⁽⁹⁾ y la calculada con el programa de este trabajo, para una tubería de 2 pg de diámetro y un líquido de 66.55 cp de viscosidad. En la figura, puede observarse que el bache sufre una aceleración bastante rápida en el primer segundo de tiempo transcurrido desde que la válvula abrió. Posteriormente, esta aceleración disminuye y ocasiona que la velocidad del bache se estabilice y permanezca casi constante.

* Las figuras se presentan en la parte final del capítulo.

Cuando el bache llega a la superficie, una parte de éste pasa a la línea de escurrimiento y la otra queda en el interior de la T.P., originando esta última, una reducción en la carga hidrostática y, por consecuencia, un incremento nuevamente en la aceleración y velocidad del bache. El modelo tiende a predecir valores ligeramente menores de la velocidad del bache de líquido en los primeros segundos de la simulación y, posteriormente, el modelo predice valores muy cercanos a los medidos experimentalmente.

III.2.- LIQUIDO PENETRADO POR LA BURBUJA DE GAS.

La pérdida de líquido en la T.P. durante el tiempo de viaje del bache hasta la superficie es mostrada en la Fig. 3-2. En esta figura, se observa como el líquido penetrado por la burbuja presenta una relación lineal con la longitud de tubería recorrida por el bache.

III.3.- PRESION EN LA PARTE SUPERIOR DE LA BURBUJA DE GAS.

La Fig. 3.3 muestra la variación de la presión de burbuja (P_b) con respecto al tiempo. En ella puede observarse que en el instante en el que inicia la inyección de gas, la presión de burbuja es igual a la carga hidrostática ejercida por el bache de líquido inicial. La presión rápidamente se eleva hasta la presión de inyección y posteriormente, disminuye continuamente debido a que existe una caída de presión entre la parte superior de la burbuja y el punto de inyección y, además, a la disminución en la carga hidrostática del bache de líquido debida al resbalamiento.

Cuando el bache alcanza la parte superior de la T.P., la presión en la burbuja rápidamente disminuye debido al incremento en la velocidad del gas, y al decremento en la carga hidrostática del bache debido a la producción del mismo.

III.4.- COLGAMIENTO DE LIQUIDO.

Una película de líquido se forma rápidamente después de iniciar la inyección de gas y esto origina un rápido decremento en el colgamiento de líquido promedio calculado, (Fig. 3-4). El modelo supone que la película de líquido está distribuida uniformemente debajo del bache y es formada por el líquido penetrado por la burbuja. De esta manera, se supone que el colgamiento de líquido presenta, para cualquier instante de tiempo dado, un valor promedio constante en su espesor. Esta suposición fue necesaria considerarla dentro del modelo hidráulico, debido a que no se llevo a cabo la medición del colgamiento de líquido en la sección de prueba vertical. Después de un período corto de tiempo, el colgamiento de líquido promedio comienza a disminuir ligeramente hasta que el bache es producido en la superficie. Este resultado es una consecuencia de la Fig. 3-2, la cual muestra un comportamiento casi lineal entre el líquido penetrado por la burbuja y el tiempo que tarda el bache de líquido en llegar a la superficie.

III.5.- TIEMPO DE VIAJE DEL BACHE DE LIQUIDO A LA SUPERFICIE

Los valores medidos y calculados del tiempo necesario para producir el bache de líquido en la superficie son mostrados en

las Figs. 3-5 y 3-6. En estas figuras se observa la variación del tiempo con la presión de inyección para dos diferentes diámetros de tubería. Así mismo, se puede observar una disminución del tiempo de producción del bache al incrementarse la presión de inyección, como es de esperarse.

III.6.- RECUPERACION DE LIQUIDO EN LA SUPERFICIE.

La Fig. 3-7 muestra la fracción de líquido producida del bache con relación a la presión de inyección para una tubería de 2 pg de diámetro. En la figura se observa una buena aproximación de lo medido y calculado en un rango de 40 a 60 psig. Sin embargo una desviación significativa entre los valores medidos y calculados es notada para tuberías de 3 pg a bajas presiones de inyección y cuando la viscosidad se incrementa (Fig. 3-8).

III.7.- RELACION GAS INYECTADO - LIQUIDO.

Los valores de la relación gas inyectado - líquido (RGIL) medidos y calculados fueron graficados en función de la presión de inyección para tuberías de 2 y 3 pg de diámetro (Figs. 3-9 y 3-10). De acuerdo a los resultados del modelo, la RGIL se incrementa con un aumento en la presión de inyección y disminuye para diámetros de tuberías grandes. Sin embargo, en la práctica se observa que a bajas presiones de inyección y diámetros de tubería grandes, se obtienen RGIL altas debido al volumen del gas de inyección y al resbalamiento de líquido. En las figuras se observa una buena aproximación de los datos medidos y calculados, aunque estos últimos resultaron ser ligeramente mayores para

tuberías de 2 pg de diámetro y ligeramente menores para tuberías de 3 pg.

III.8.- COMPARACION DE LOS RESULTADOS MEDIDOS Y CALCULADOS.

La comparación de los resultados más importantes medidos experimentalmente en instalaciones de la UNIVERSIDAD de TULSA y los calculados con el programa BONEI-2, se hace mediante la presentación de siete gráficas, en las cuales se muestra la información de 25 pruebas experimentales para una tubería de 2 pg de diámetro y 10 pruebas para una de 3 pg. En cada una de ellas, se puede observar una zona en la que quedan agrupados la mayoría de los datos calculados, así como también una línea trazada a 45° , la cual representa el cero por ciento de error entre lo medido y lo calculado.

La Fig. 3-11 muestra que para tuberías de 2 pg, el error cometido en el cálculo del tiempo de producción del bache líquido fue de $\pm 10\%$. En cambio para una tubería de 3 pg, el error fue del $- 20\%$.

En la Fig. 3-12 se observa que para tuberías de 2 pg, el error cometido en el cálculo de la velocidad promedio del bache de líquido fue de $\pm 15\%$, sin embargo, para tuberías de 3 pg, el error fue de $+ 25\%$.

En la Fig. 3-13 se aprecia que para tuberías de 2 y 3 pg de diámetro, el error cometido en el cálculo de la longitud del bache producido fue de $\pm 20\%$ aproximadamente.

En la Fig. 3-14, el error cometido para tuberías de 2 pg de

diametro en el cálculo de la presión en T.P. a la profundidad de la válvula operante fue de - 5 % . Para una tubería de 3 pg. este error fue del - 10 % .

En la Fig. 3-15 se observa que para tuberías de 2 pg. el error cometido en el cálculo del colgamiento de líquido (HL) fue de + 30 % , sin embargo, para una tubería de 3 pg de diámetro, el error fue de - 20 % .

En la Fig. 3-16 se aprecia un considerable error en el cálculo del resbalamiento de líquido, ya que para tuberías de 2 pg de diámetro el error fue de + 60 % y en cambio para tuberías de 3 pg, el error fue de + 30 % .

En la Fig. 3-17, el error cometido en el cálculo de la relación gas inyectado - líquido para tuberías de 2 y 3 pg de diámetro fue de ± 15 % .

De las figuras 3-11 a la 3-17, puede observarse que el error entre lo medido experimentalmente y lo calculado con el modelo matemático es aceptable, sin embargo, deben de hacerse algunos ajustes en el cálculo de la velocidad de la burbuja de gas para cada campo en particular, con el objeto de disminuir el error básicamente en las figuras 3-13, 3-15 y 3-16.

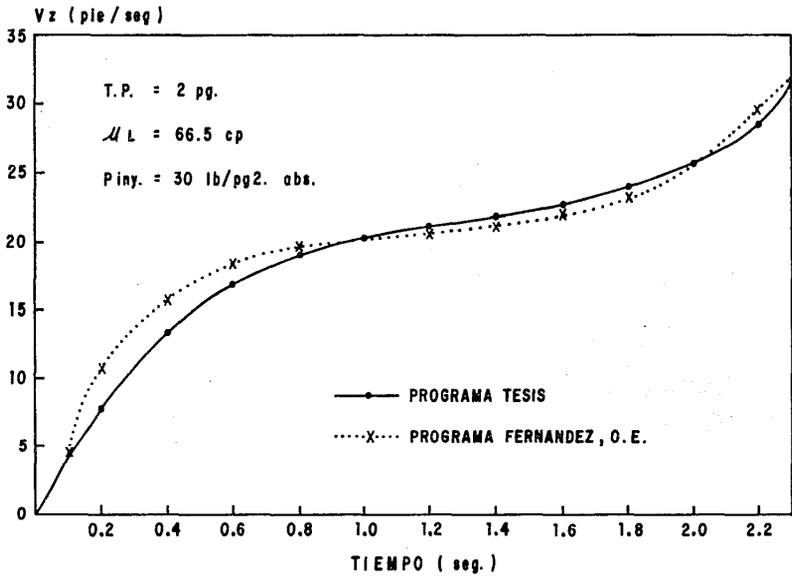


FIG. 3-1.- VARIACION DE LA VELOCIDAD MEDIA INSTANTANEA DEL BACHE DE LIQUIDO EN FUNCION DEL TIEMPO.

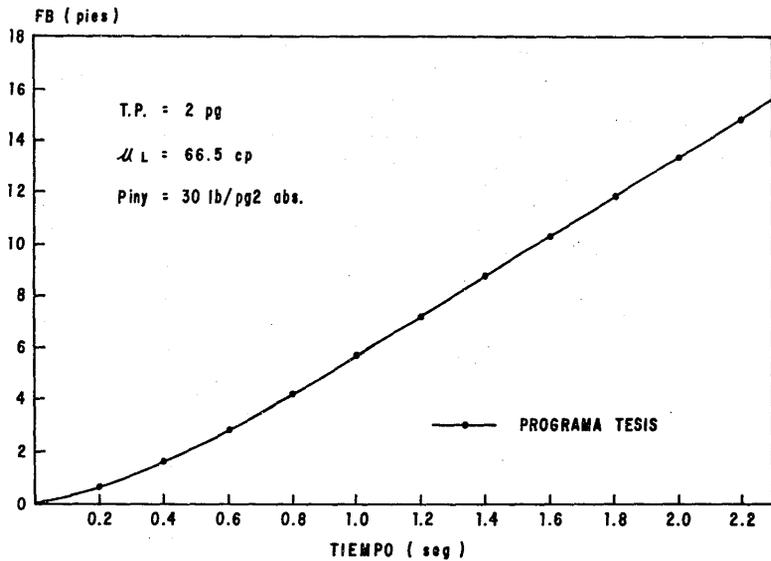


FIG. 3-2.- VARIACION DEL RESBALAMIENTO DEL LIQUIDO EN FUNCION DEL TIEMPO.

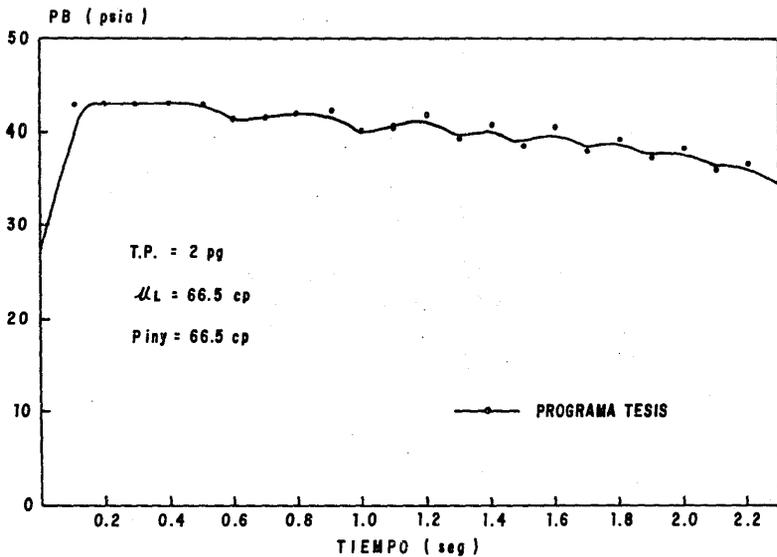


FIG. 3-3.- VARIACION DE LA PRESION DE BURBUJA EN FUNCION DEL TIEMPO.

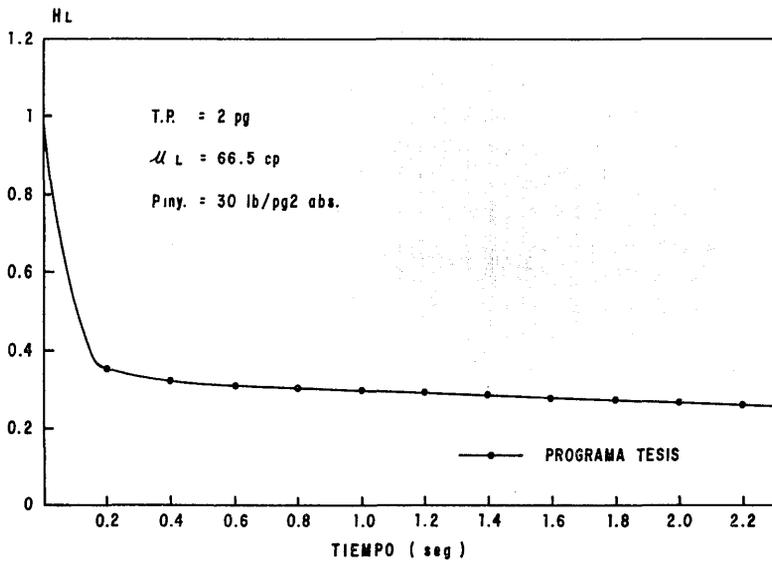


FIG. 3 -4.- VARIACION DEL COLGAMIENTO DE LIQUIDO EN FUNCION DEL TIEMPO.

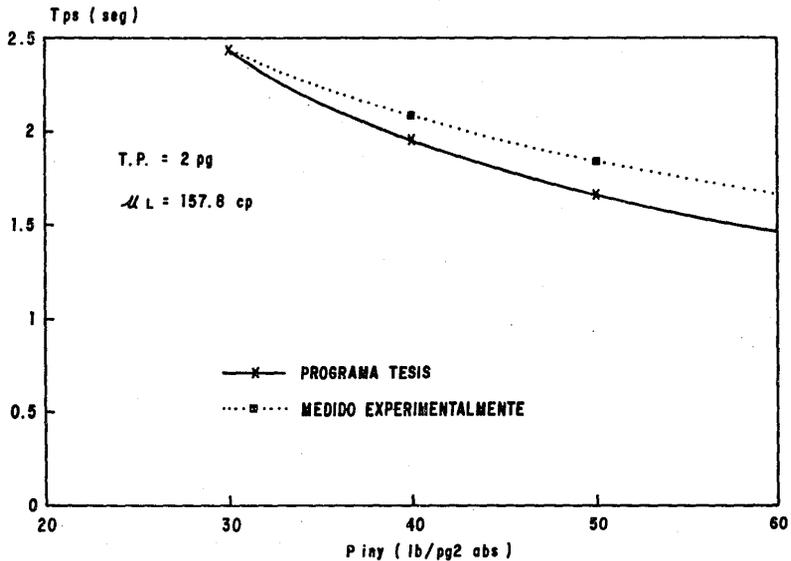


FIG. 3-5.- VARIACION DEL TIEMPO DE PRODUCCION DEL BACHE DE LIQUIDO EN LA SUPERFICIE EN FUNCION DE LA PRESION DE INYECCION.

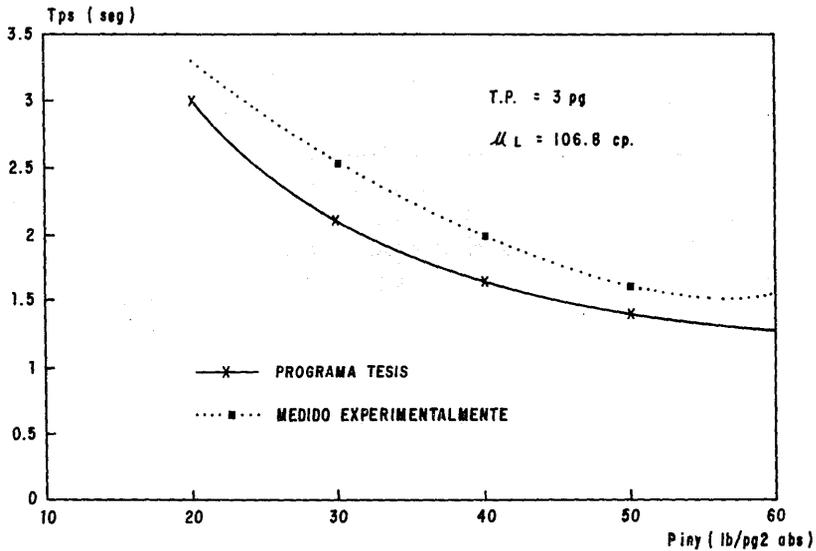


FIG. 3-6.- VARIACION DEL TIEMPO DE PRODUCCION DEL BACHE DE LIQUIDO EN LA SUPERFICIE EN FUNCION DE LA PRESION DE INYECCION.

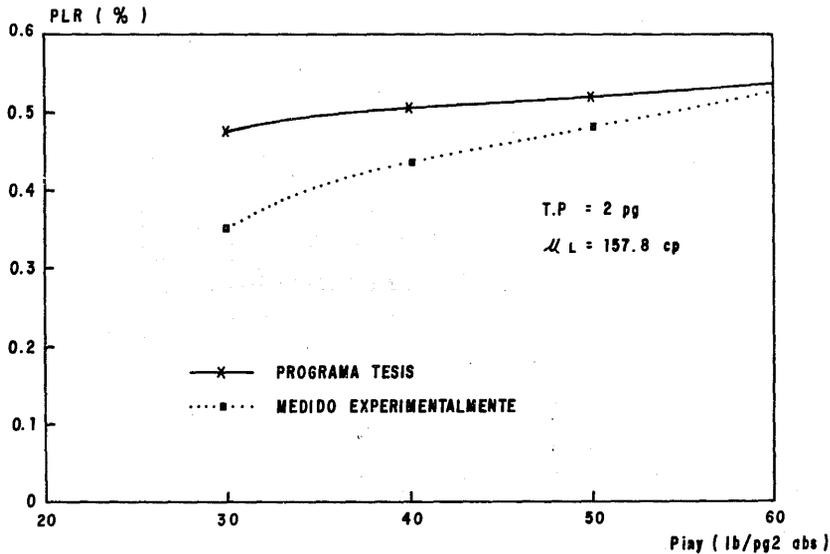


FIG. 3-7.- VARIACION DEL PORCENTAJE DE LIQUIDO RECUPERADO EN LA SUPERFICIE EN FUNCION DE LA PRESION DE INYECCION.

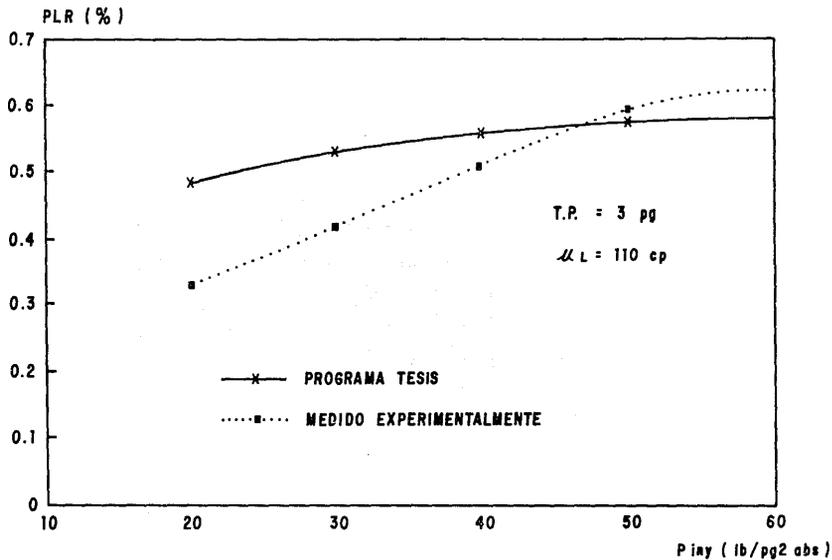


FIG. 3-8.- VARIACION DEL PORCENTAJE DE LIQUIDO RECUPERADO EN LA SUPERFICIE EN FUNCION DE LA PRESION DE INYECCION.

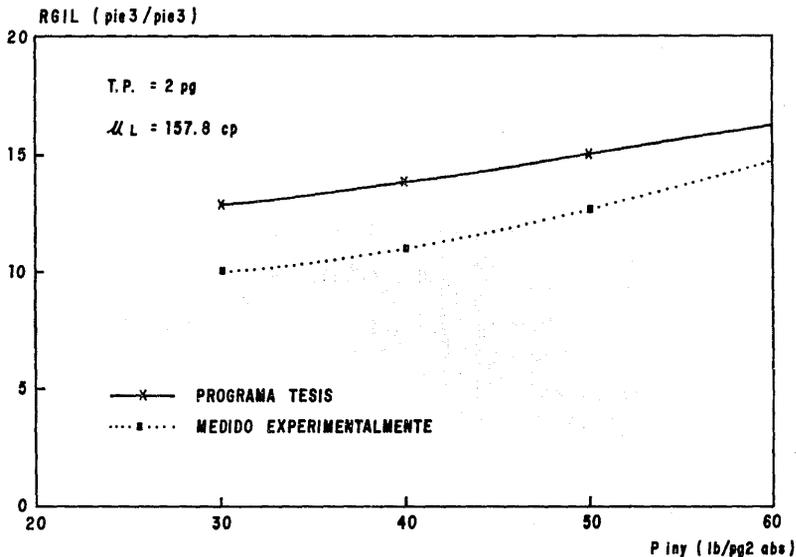


FIG. 3-9.- VARIACION DE LA RELACION GAS INYECTADO — LIQUIDO EN FUNCION DE LA PRESION DE INYECCION.

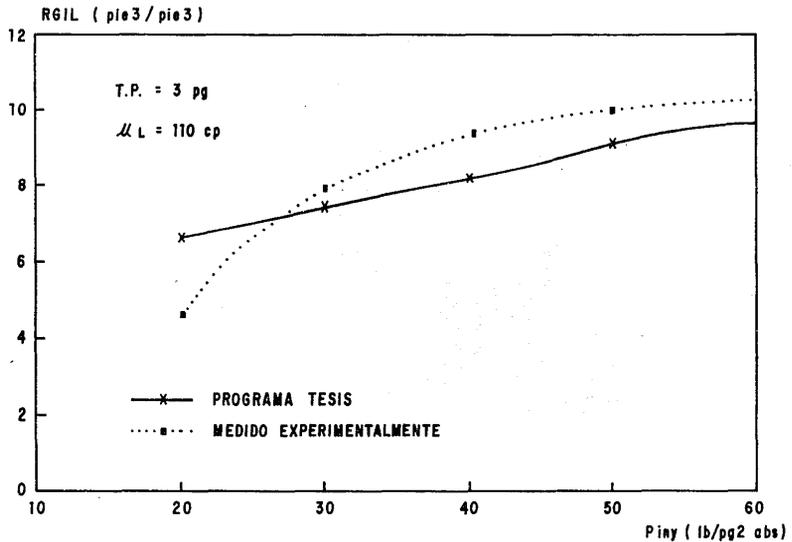


FIG. 3-10.- VARIACION DE LA RELACION GAS INYECTADO — LIQUIDO
 EN FUNCION DE LA PRESION DE INYECCION

t_{Pc} (seg)

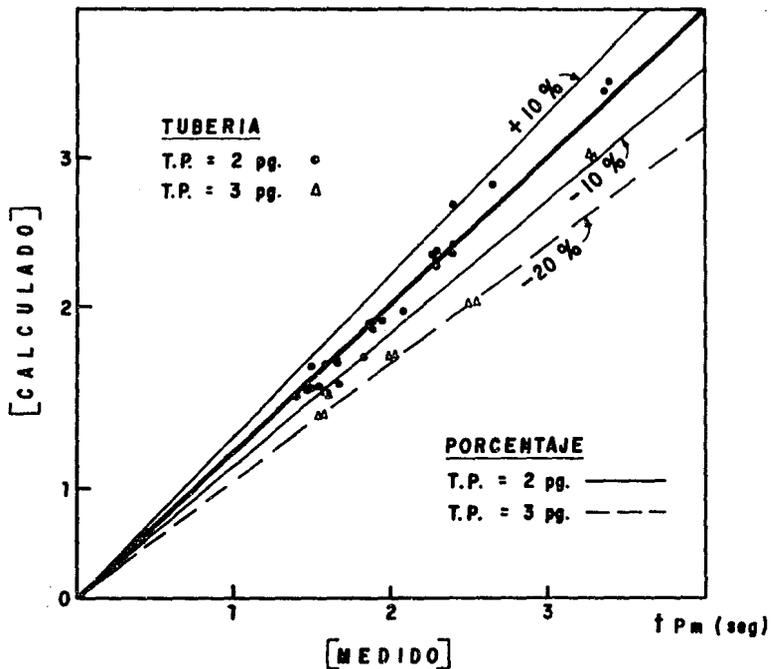


FIG. 3-11.— TIEMPO DE PRODUCCION DEL BACHE DE LIQUIDO EN LA SUPERFICIE.

V_{sc} (pie/seg)

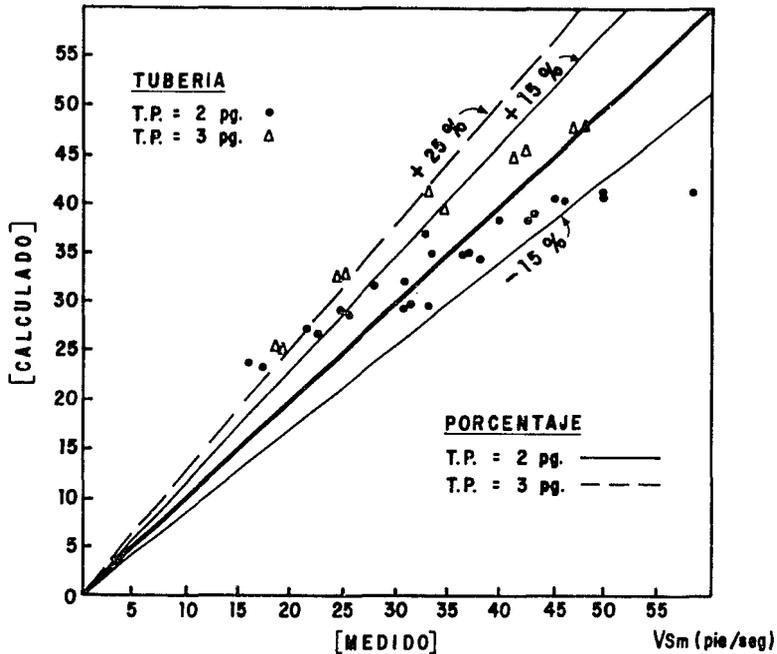


FIG. 3-12.- VELOCIDAD PROMEDIO DEL BACHE DE LIQUIDO EN SU ASCENSO A LA SUPERFICIE.

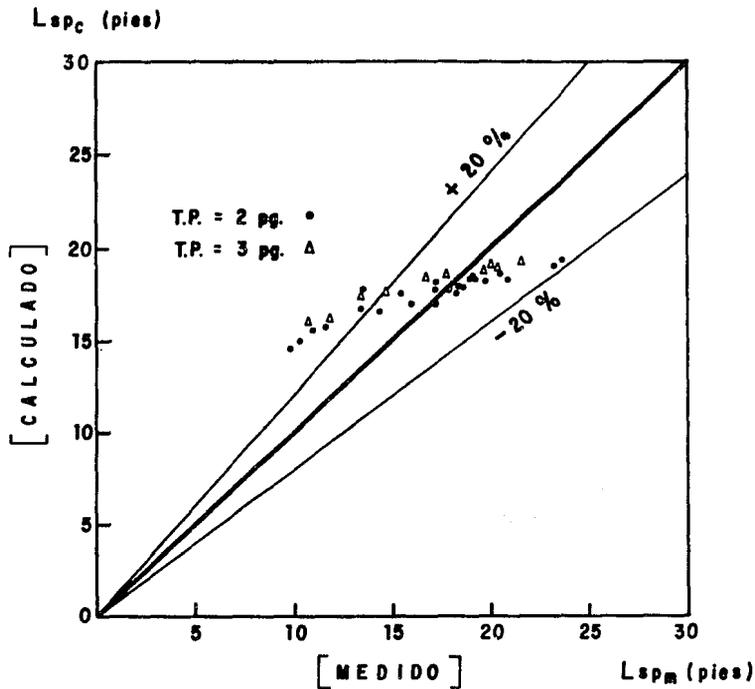


FIG. 3-13.- LONGITUD DEL BACHE DE LIQUIDO
 PRODUCIDO EN LA SUPERFICIE.

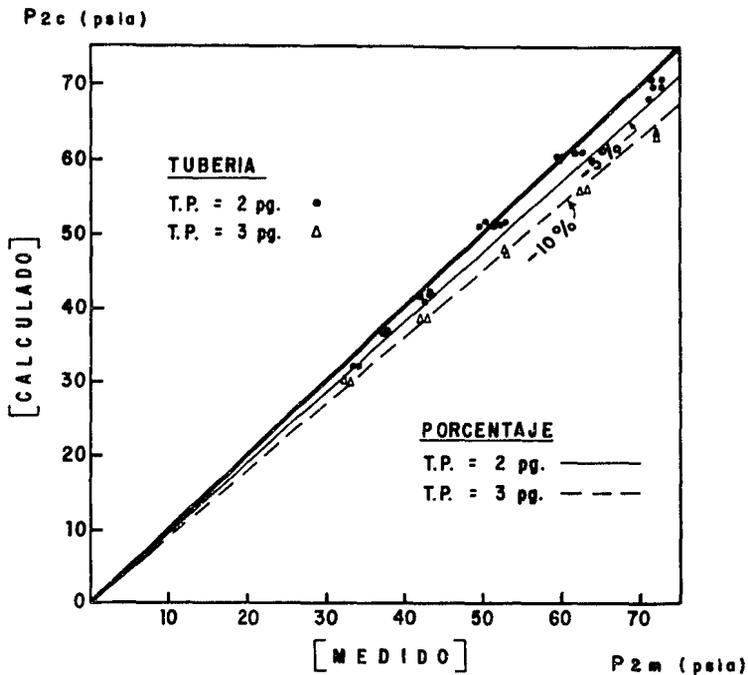


FIG. 3-14.- PRESION DENTRO DE LA T.P. FRENTE A LA VALVULA DE B.N. OPERANTE.

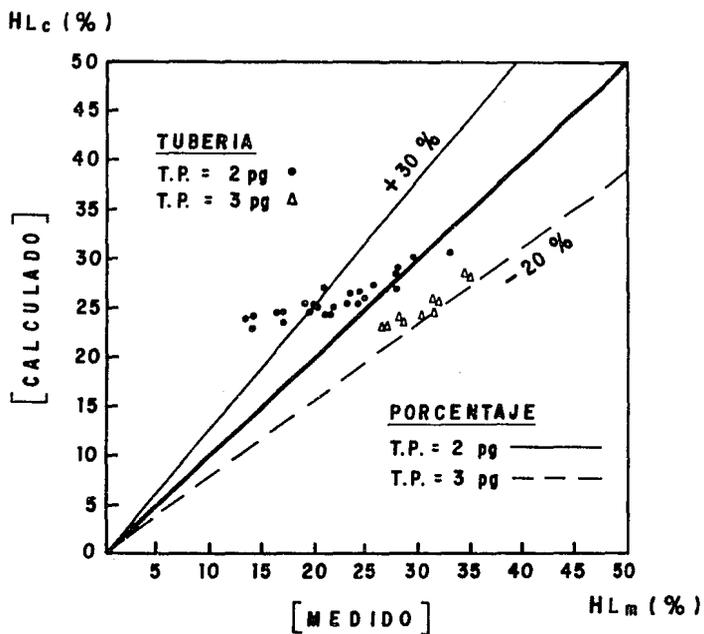


FIG. 3-15.- COLGAMIENTO DE LIQUIDO EN LA TUBERIA DE PRODUCCION.

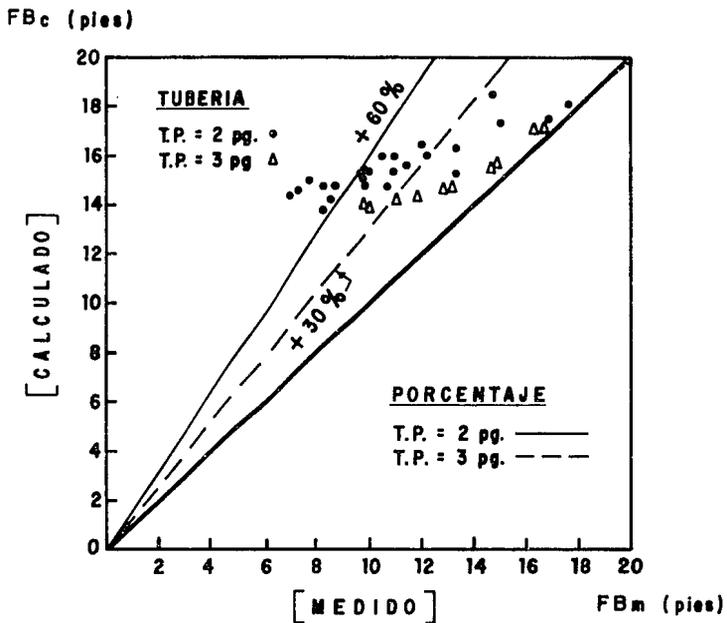


FIG. 3-16.— RESBALAMIENTO DE LIQUIDO EN LA TUBERIA DE PRODUCCION.

RGILc (pie³/pie³)

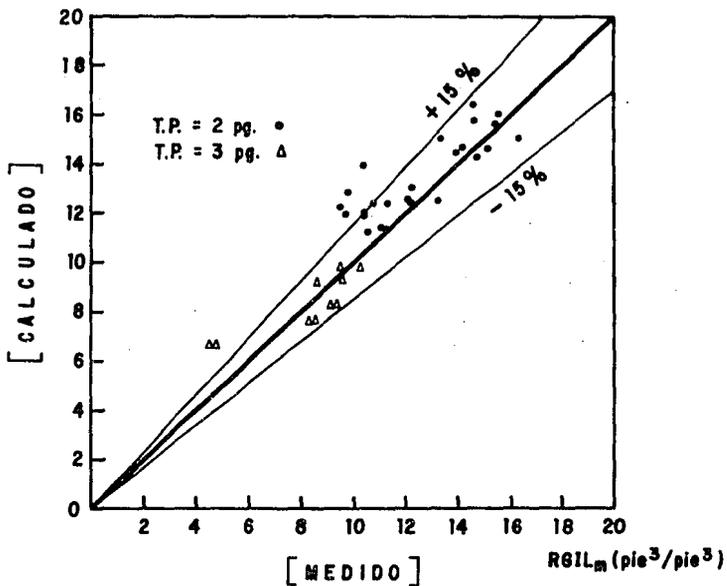


FIG. 3-17.- RELACION GAS INYECTADO - LIQUIDO.

CAPITULO IV

APLICACION DEL MODELO PARA EL DISEÑO DE UNA INSTALACION DE B.N.I.

IV.1 ESPACIAMIENTO Y CALIBRACION DE VALVULAS

El programa de computo lleva a cabo el espaciamiento de válvulas de una instalación de B.N.I., empleando cualquiera de los dos procedimientos siguientes :

- a) Realiza un espaciamiento de válvulas con decrementos constantes en la presión de operación, manteniendo constante un gradiente de descarga mínimo.
- b) Realiza un espaciamiento de válvulas manteniendo la presión de operación fija, con incrementos constantes en el gradiente de descarga entre una y otra válvula.

Cualquiera de los dos procedimientos anteriores proporciona un espaciamiento adecuado de válvulas. Para pozos que producen con más del 10 % de agua, es conveniente emplear el segundo procedimiento, con el objeto de dar un espaciamiento menor entre válvula y válvula a mayor profundidad de inyección. De esta manera, se logran alcanzar puntos de inyección más profundos con menor dificultad. El gradiente mínimo recomendable para iniciar un espaciamiento de válvulas es de $0.04 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$ para tuberías de producción de $2^3/\text{a}$ y $2^7/\text{a}$. El incremento en el gradiente puede ser desde 0.002 hasta $0.005 \text{ lb/pg}^2/\text{pie}$, dependiendo del porcentaje de agua que vaya a manejar la instalación.

Dentro del programa de cómputo se contempla que el espaciamiento mínimo entre las válvulas más profundas del aparejo no deberá ser menor de 300 pies.

La calibración de las válvulas de un aparejo de B.N.I. puede llevarse acabo siguiendo también dos procedimientos :

- a) La calibración de las válvulas se efectúa considerando decrementos en la presión superficial de cierre entre válvula y válvula. El decremento en la presión puede variar de 10 a 25 lb/pg², dependiendo del tipo de válvulas empleadas (10 lb/pg² para válvulas desbalanceadas y 25 lb/pg² para válvulas balanceadas).
- b) La calibración de las válvulas se lleva a cabo considerando constante la presión superficial de cierre para todas las válvulas, excepto las últimas tres a las cuales se les reduce la presión superficial de cierre 10, 15 o 20 lb/pg². Este procedimiento se emplea cuando la presión del gas de inyección es relativamente baja para la profundidad de la válvula operante.

IV.2 OBTENCION DEL DIAMETRO DEL ORIFICIO DE LA VALVULA OPERANTE

Para determinar el diámetro del orificio de control (sección piloto) de una válvula de B.N., el programa inicialmente deja que se establezca la velocidad del bache dentro de la TP, es decir, cuando ya no existan cambios bruscos en la aceleración del mismo. Posteriormente, comenzando con el diámetro de orificio más pequeño, pregunta en cada incremento de tiempo si la velocidad del bache no es inferior a 17 pies/seg (Esta velocidad corresponde a los 1000 pies/min que la literatura técnica recomienda para obtener un levantamiento eficiente)⁽²⁾; si esta velocidad resulta menor, entonces el programa pasa automáticamente al siguiente diámetro disponible y vuelve a iniciar los cálculos. El procedimiento de selección del diámetro termina cuando el bache llega a la superficie con una velocidad

mayor o igual a la señalada. Si por alguna razón se terminan los diámetros disponibles, el programa sugiere emplear una longitud inicial del bache más pequeño que las anteriores, y así reiniciar nuevamente los cálculos.

IV. 3 VOLUMEN DE GAS INYECTADO.

El volumen de gas requerido por ciclo a condiciones estándar, se determina empleando la siguiente ecuación, obtenida a partir de la Ley General de los gases, para dos condiciones de presión (9).

$$V_g = 379 \left[\frac{V_{ea}}{R T_1} \right] \left[\frac{P_{mo}}{z_{1mo}} - \frac{P_{mc}}{z_{1mc}} \right] \dots (4-1)$$

IV. 4 APORTACION DE FLUIDOS DE LA FORMACION

La aportación de fluidos de la formación se considera dentro del programa hasta que la válvula de BN operante cierra. Una vez que ocurre esto, comienza a tomarse en cuenta para los cálculos de la presión en la T.P. frente a la válvula y en la formación de un nuevo bache de líquido.

Para poder contar con la aportación de fluidos que el pozo puede aún proporcionar, es necesario conocer su índice de

productividad. Si por alguna razón se desconoce éste, se puede suponer un valor y obtener los resultados que proporciona el programa. Posteriormente, con el número de ciclos por día y la producción del pozo, se podrá ajustar y mejorar el valor supuesto.

A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas para obtener el líquido aportado por la formación :

$$P_{wf} = P_2 + \frac{(PMD - D_v) \rho_L}{144} \quad \dots (4-2)$$

$$Q_L = \frac{IP (P_{ws} - P_{wf})}{86400} \quad \dots (4-3)$$

$$L_{sF} = Q_L * \left[\frac{\Delta t}{C_t} \right] \quad \dots (4-4)$$

IV.5 LONGITUD DEL BACHE INICIAL

Una vez determinada la presión de cierre a la profundidad de la válvula operante, puede encontrarse simultáneamente su presión de apertura, P_{vo} , la presión dentro de la T.P. frente a esta válvula, P_2 , y la longitud inicial del bache, L_{si} . La obtención de los tres parámetros anteriores, previamente conociendo los valores de F_{whg} , ρ_L , P_{vc} , RA y $PCTP$, se ilustra con el siguiente procedimiento :

- 1.- Se supone $P_t = 0$
- 2.- Se calcula el valor de P_{vo} con la ecuación :

$$P_{vo} = \frac{P_{vc} - P_t * RA}{1 - RA} \quad \dots (4-5)$$

- 3.- Se calcula el valor de L_{si} con la ecuación :

$$L_{si} = \frac{(PCTP * RA - P_{whg}) 144}{\rho_L} \quad \dots (4-6)$$

- 4.- Se calcula el valor de P_t con la ecuación :

$$P_t = P_{whg} + (\rho_L * L_{si} / 144) \quad \dots (4-7)$$

- 5.- El programa regresa al punto 2 por ser este procedimiento de ensaye y error, y se detiene hasta que se alcanza una tolerancia determinada. Generalmente la convergencia ocurre a la 5^a o 6^a iteración.

Dentro del programa de cómputo se considera que $P_2 = P_t$.

IV.6 VOLUMEN DE LIQUIDO RECUPERADO.

El volumen de líquido recuperado lo determina el programa de cómputo cuando el bache se encuentra completamente en la línea de

escurrimiento, es decir, en el instante cuando inicia su recorrido por esta línea. Cuando se obtiene la longitud del bache de líquido intacto en la superficie, el volumen recuperado se determina simplemente con la siguiente expresión :

$$VLR = LsH * ALe \quad \dots (4-8)$$

IV.7 RELACION GAS INYECTADO - LIQUIDO

Una vez determinado el volumen de gas a condiciones superficiales y el volumen de líquido recuperado, ambos para cada ciclo, entonces es posible determinar la relación gas inyectado - líquido (RGIL) con la siguiente expresión :

$$RGIL = \frac{Vg}{VLR} \quad \dots (4-9)$$

IV.8 NUMERO DE CICLOS POR DIA

Para obtener el número de ciclos por día que se deben de tener en una instalación de BNI, es necesario conocer o suponer el índice de productividad del pozo y considerar los siguientes aspectos :

1.- Una vez que la válvula operante cierra, se empieza a

cuantificar la formación de un nuevo bache de líquido, el cual estará constituido inicialmente por el líquido aportado por la formación productora y posteriormente también por el líquido no producido del bache anterior.

2.- Para la formación de la nueva columna de líquido dentro de la TP, no se considera el resbalamiento del líquido del bache que se está produciendo hasta que éste inicie su recorrido por la línea de descarga.

3.- En cada incremento de tiempo considerado, se pregunta si la diferencia entre la longitud del bache de líquido inicial y la longitud acumulada del nuevo bache es menor o igual a cero. Si la respuesta es afirmativa, entonces el tiempo entre ciclos (TEC) corresponderá al período de tiempo en estudio. Si por el contrario, la respuesta es negativa, se continuará obteniendo en el siguiente incremento de tiempo una longitud acumulada del bache.

Cuando se ha obtenido el tiempo necesario para establecer las condiciones iniciales de un nuevo ciclo, el número de ciclos por día (N_c) se determina con la siguiente expresión :

$$N_c = \frac{86400}{TEC} \quad \dots (4-10)$$

IV.9 FLUJO EN LA LÍNEA DE DESCARGA

En el instante en que la posición frontal de la burbuja, Z_b , es igual a cero, el bache del líquido inicia su recorrido dentro

de la línea de escurrimiento. En esta parte, el flujo se considera horizontal y la longitud del bache se supone la misma desde que sale del pozo hasta que llega al separador. Las ecuaciones que se utilizan para simular el flujo en esta sección son las mismas que se emplean para simularlo verticalmente, con excepción de las siguientes ecuaciones :

$$\frac{d\bar{p}_g}{dt} = \left[\frac{n_g R \bar{T}_g}{V_g} \frac{dZ_g}{dt} - \frac{\bar{p}_g}{V_g} \frac{dV_g}{dt} \right] \dots (4-11)$$

$$\frac{dV_z}{dt} = \frac{144 g_c (P_{wh} - P_{sep})}{\rho_L L_s} - \frac{F f_L V_z^2}{2 d_i} - \frac{V_z}{L_s} + \frac{A_B V_B^2}{A L_s} + \frac{(A - A_B) V_f^2}{A L_s} \dots (4-12)$$

IV.10 PRESION SUPERFICIAL DE CIERRE Y DE APERTURA DE LA VALVULA OPERANTE

Después de obtener las presiones de apertura y cierre de la válvula operante a la profundidad de colocación de esta, es

posible encontrar las presiones superficiales de cierre y apertura empleando la siguiente ecuación :

$$P_1 = \frac{P_2}{\text{EXP} \left[\frac{0.01875 \text{ SGg Dv}}{\bar{Z}_1 \bar{T}_1} \right]} \dots (4-13)$$

Al utilizar la expresión anterior, se tiene que seguir un procedimiento de ensaye y error, ya que el valor de \bar{Z}_1 está en función de P_1 y P_2 .

IV.11 LEVANTAMIENTO DEL BACHE POR EXPANSION DE GAS.

Cuando la presión en el espacio anular a la profundidad de la válvula operante alcanza la presión de cierre de la válvula, se suspende la inyección de gas y el bache de líquido comienza a ser desplazado únicamente por expansión. Lo anterior por lo regular ocurre antes de que el bache alcance la superficie. Sin embargo, algunos investigadores opinan que el instante más adecuado es cuando la parte superior del bache logra llegar a la superficie, ya que se ha observado que el bache adquiere mayores velocidades durante la descarga del mismo a la línea de escurrimiento, aún después de haber cesado la inyección de gas. Esta observación demuestra que la pérdida de presión por carga hidrostática es mayor que la pérdida de presión por expansión. En cambio, si la inyección cesa antes de que el bache llegue a la superficie, inmediatamente se manifiesta una disminución en su velocidad, dando como resultado que el tiempo de viaje aumente y

se tenga una mayor penetración del líquido por la burbuja de gas. Por otra parte, se puede decir que resulta más eficiente desplazar el bache de líquido por flujo y expansión de gas hasta que éste llegue a la superficie que si se hiciera exclusivamente por expansión de gas. Sin embargo, el consumo de gas se eleva y tal vez la recuperación de líquido ya no sea lo suficientemente grande como para mantener o disminuir la relación gas inyectado - líquido (RGIL). Por esta razón, es necesario definir cual de los dos aspectos es el que debe de optimizarse, es decir, si se debe obtener la mayor recuperación de líquidos aún cuando la cantidad de gas sea demasiado grande o bien disminuir el consumo de gas reduciendo la recuperación de líquidos.

Las ecuaciones que se consideraron para el proceso de expansión de gas fueron las mismas que las empleadas en el capítulo II, con la diferencia de que aquí ya no existe entrada de moles de gas a la T.P., es decir, la dn_1/dt es igual a cero.

IV.12 RESULTADOS

El programa de cómputo **BONE-2** requiere de 28 datos, de los cuales la gran mayoría puede obtenerse fácilmente. Los datos que por alguna razón se desconozcan, el programa indicará, cuando sea posible, teclear un cero en ellos e internamente los calculará mediante una correlación. Los resultados que proporciona el programa simulan el comportamiento completo de un ciclo del B.N.I. e incluye también el espaciado y la calibración de todas las válvulas del aparejo, proporcionando las características más importantes de la válvula que deberá ser la operante. En el capítulo siguiente se presentan dos ejemplos de

campo, y en cada uno de ellos se muestran dos tablas : una con los parámetros de interés en cada ciclo, y la otra con las profundidades y presiones de calibración de las válvulas que utilizará el aparejo de B.N..

CAPITULO V
EJEMPLOS DE APLICACION

V.1 APLICACION DEL PROGRAMA BONEI-2

En este capítulo se presentan los datos de dos pozos y la aplicación del programa de cómputo **BONEI-2** para obtener el diseño completo de la instalación, así como también los parámetros de interés necesarios para el ingeniero de producción.

A) DATOS DEL POZO No. 1 :

- 1.- Nombre del pozo (max. 25 caracteres) : EJEMPLO 1
- 2.- Fecha de intervención (d/m/a) : 19/Mayo/92
- 3.- Diámetro interior T.P. (pg) : 1.995
- 4.- Diámetro exterior T.P. (pg) : 2.375
- 5.- Diámetro interior T.R. (pg) : 5.921
- 6.- Diámetro interior L.Esc. (pg) : 4.0
- 7.- Profundidad del empacador (pies) : 7246
- 8.- Longitud L.Esc. (pies) : 1640
- 9.- Rugosidad promedio T.P. y L.Esc. (pies) : 0.00015
- 10.- Presión de arranque iny. gas, Pko (psig) : 900
- 11.- Presión de operación iny. gas, Pop (psig) : 850
- 12.- Presión de separación, Psep (psig) : 50
- 13.- Presión estática del yacto., Pws (psig) : 1920
- 14.- Porcentaje inicial de carga en T.P. (%) : 40
- 15.- Temp. del gas de iny. cabezal del pozo (°F) : 77
- 16.- Temp. frente al intervalo productor (°F) : 203
- 17.- Temp. en T.P. cabezal del pozo (°F) : 140
- 18.- Prof. media del intervalo productor (pies) : 8200
- 19.- Índice de productividad (bls/dia/psi) : 0.31
- 20.- Gasto de líquido esperado (bls/dia) : 315
- 21.- Porcentaje de agua en el pozo (%) : 11
- 22.- Dens. relativa gas inyección [aire = 1] : 0.65

- 23.- Dens. relativa del aceite [agua = 1] : 0.812
- 24.- Dens. relativa del agua producida [agua = 1] : 1.2
- 25.- Dens. relativa del fluido de control [agua = 1] : 0.8
- 26.- Visc. del aceite medida a cond. de flujo (cp) : 2.65
- 27.- Visc. del gas de inyección (cp) : 0.0
- 28.- Visc. del agua producida a cond. de flujo (cp) : 1.5

*** RESULTADOS DEL PROGRAMA BONEI-2 ***

1.- NOMBRE DEL POZO	:	EJEMPLO 1
2.- PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA VALVULA OPERANTE	=	7186.00 (pies)
3.- TEMPERATURA DE LA VALVULA OPERANTE	=	187.00 (G.F.)
4.- PRESION DE APERTURA DE LA VALVULA OPERANTE	=	923.30 (psi)
5.- PRESION DE CIERRE DE LA VALVULA OPERANTE	=	866.30 (psi)
6.- PRESION INICIAL EN T.P. FRENTE A LA VALV. OP.	=	369.30 (psi)
7.- LONGITUD INICIAL DEL BACHE	=	884.00 (pies)
8.- PORCENTAJE DE CARGA EN LA T.P. C/R A LA Pvo	=	40.00 (%)
9.- DIAMETRO DEL ORIFICIO DE CONTROL (SECC. PILOTO)	=	5/16 (pg)
10.- VOLUMEN DE LIQUIDO RECUPERADO POR CICLO	=	2.04 (bls)
11.- PORCENTAJE DE LIQUIDO RECUPERADO	=	59.51 (%)
12.- RELACION GAS INYECTADO-LIQUIDO	=	2367.76 (pie3/bl)
13.- TIEMPO DE VIAJE DEL BACHE A LA SUPERFICIE	=	4.11 (min)
14.- NUMERO DE CICLOS POR DIA	=	135.00
15.- PRODUCCION DIARIA DE LIQUIDOS	=	275.26 (bls)
16.- VOLUMEN DE GAS REQUERIDO POR DIA	=	651.86 (mpcpd)
17.- VELOCIDAD PROMEDIO DE ASCENSO DEL BACHE	=	26.89 (pie/seg)
18.- TIEMPO DE INYECCION DE GAS POR CICLO	=	2.45 (min)
19.- PROF. DEL BACHE AL CIERRE DE LA VALVULA OPERANTE	=	2317.59 (pies)

ESPACIAMIENTO Y CALIBRACION DE VALVULAS DE B.N.I. DEL POZO : EJEMPLO 1

VALV. No.	PROF. (m)	TEMP. (G.F.)	DIAM. ORIF. (pg)	R (Ap/Ab)	Pso (psi)	Psc (psi)	Pvo (psi)	Pvc (psi)	Ptrcaj. (psi)	Ptroaj. (psi)
1	748	115	5/16	0.1030	850	763	905	812	725	810
2	1364	146	5/16	0.1030	839	753	936	840	710	790
3	1902	173	5/16	0.1030	827	743	960	861	695	775
4	2191	187	5/16	0.1030	781	733	923	866	680	760

FECHA DE DISEÑO : 19/MAYO/92

B) DATOS DEL POZO No. 2 :

1.- Nombre del pozo	(max. 25 caracteres)	: EJEMPLO 2
2.- Fecha de intervención	(d/m/a)	: 19/Mayo/92
3.- Diámetro interior T.P.	(pg)	: 1.995
4.- Diámetro exterior T.P.	(pg)	: 2.375
5.- Diámetro interior T.R.	(pg)	: 5.921
6.- Diámetro interior L.Esc.	(pg)	: 2.950
7.- Profundidad del empacador	(pies)	: 5836
8.- Longitud L.Esc.	(pies)	: 4920
9.- Rugosidad promedio T.P. y L.Esc.	(pies)	: 0.00015
10.- Presión de arranque iny. gas, Pko	(psig)	: 600
11.- Presión de operación iny. gas, Pop	(psig)	: 550
12.- Presión de separación, Psep	(psig)	: 100
13.- Presión estática del yacto., Pws	(psig)	: 2272
14.- Porcentaje inicial de carga en T.P.	(%)	: 50
15.- Temp. del gas de iny. cabezal del pozo	(°F)	: 86
16.- Temp. frente al intervalo productor	(°F)	: 151
17.- Temp. en T.P. cabezal del pozo	(°F)	: 86
18.- Prof. media del intervalo productor	(pies)	: 6038
19.- Índice de productividad	(bls/dia/psi)	: 0.133
20.- Gasto de líquido esperado	(bls/dia)	: 220
21.- Porcentaje de agua en el pozo	(%)	: 30
22.- Dens. relativa gas inyección	[aire = 1]	: 0.7
23.- Dens. relativa del aceite	[agua = 1]	: 0.87
24.- Dens. relativa del agua producida	[agua = 1]	: 1.2
25.- Dens. relativa del fluido de control	[agua = 1]	: 0.9
26.- Visc. del aceite a cond. de flujo	(cp)	: 6.0
27.- Visc. del gas de inyección	(cp)	: 0.0
28.- Visc. del agua producida a cond. de flujo	(cp)	: 0.0

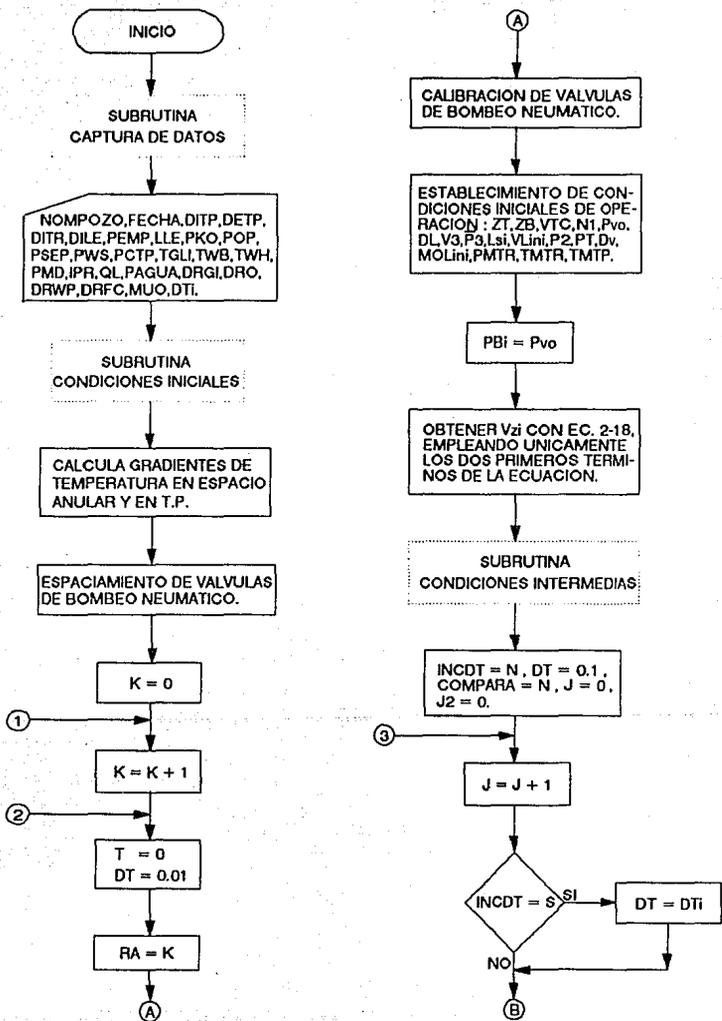
1.- NOMBRE DEL POZO	:	EJEMPLO 2
2.- PROFUNDIDAD DE COLOCACION DE LA VALVULA OPERANTE	=	5776.00 (pies)
3.- TEMPERATURA DE LA VALVULA OPERANTE	=	148.00 (G.F.)
4.- PRESION DE APERTURA DE LA VALVULA OPERANTE	=	489.30 (psi)
5.- PRESION DE CIERRE DE LA VALVULA OPERANTE	=	440.30 (psi)
6.- PRESION INICIAL EN T.P. FRENTE A LA VALV. OP.	=	244.30 (psi)
7.- LONGITUD INICIAL DEL BACHE	=	367.00 (pies)
8.- PORCENTAJE DE CARGA EN LA T.P. C/R A LA Pvo	=	50.00 (%)
9.- DIAMETRO DEL ORIFICIO DE CONTROL (SECC. PILOTO)	=	7/16 (pg)
10.- VOLUMEN DE LIQUIDO RECUPERADO POR CICLO	=	1.05 (bls)
11.- PORCENTAJE DE LIQUIDO RECUPERADO	=	46.94 (%)
12.- RELACION GAS INYECTADO-LIQUIDO	=	3071.60 (pie3/bl)
13.- TIEMPO DE VIAJE DEL BACHE A LA SUPERFICIE	=	4.54 (min)
14.- NUMERO DE CICLOS POR DIA	=	200.00
15.- PRODUCCION DIARIA DE LIQUIDOS	=	210.45 (bls)
16.- VOLUMEN DE GAS REQUERIDO POR DIA	=	646.52 (mpcpd)
17.- VELOCIDAD PROMEDIO DE ASCENSO DEL BACHE	=	27.33 (pie/seg)
18.- TIEMPO DE INYECCION DE GAS POR CICLO	=	3.21 (min)
19.- PROF.DEL BACHE AL CIERRE DE LA VALVULA OPERANTE	=	1497.33 (pies)

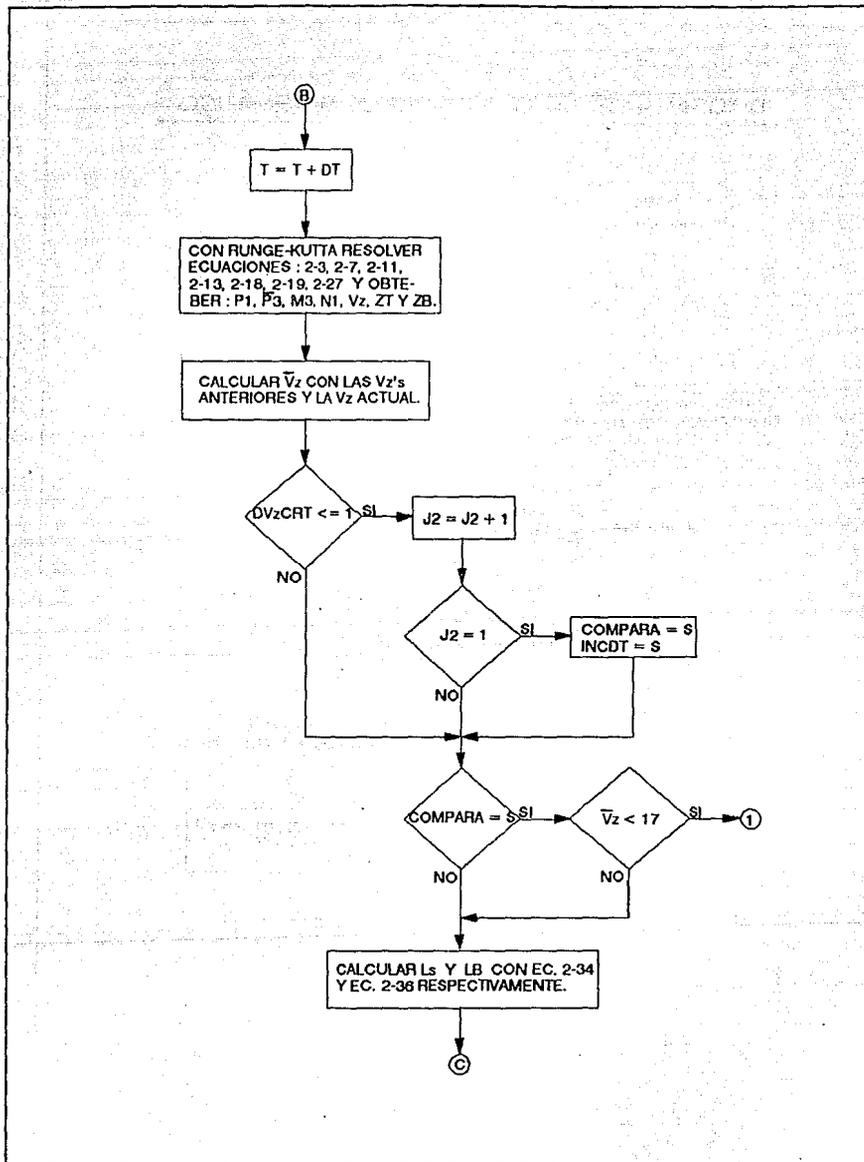
ESPACIAMIENTO Y CALIBRACION DE VALVULAS DE B.N.I. DEL POZO : EJEMPLO 2

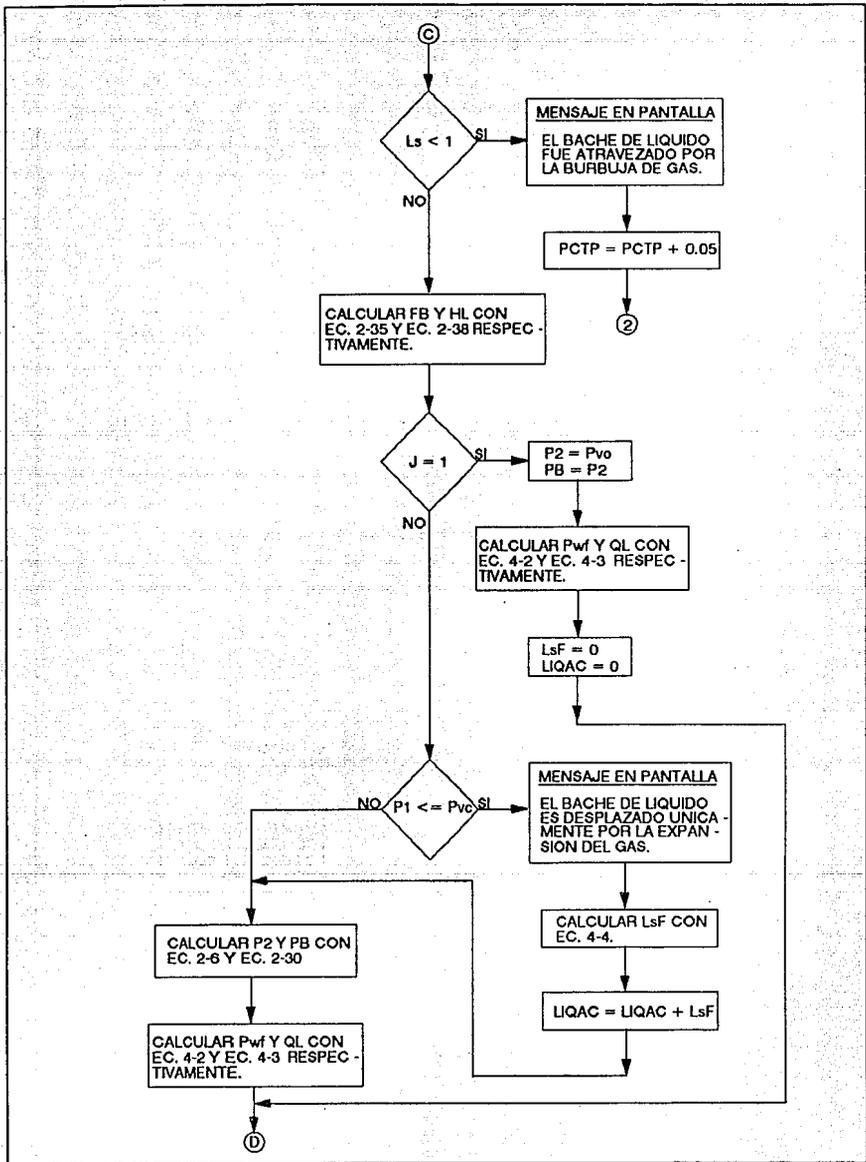
VALV. No.	PROF. (m)	TEMP. (G.F.)	DIAM.ORIF. (pg)	R (Ap/Ab)	Pso (psi)	Psc (psi)	Pvo (psi)	Pvc (psi)	Ptrcaj. (psi)	Ptroaj. (psi)
1	391	100	7/16	0.2000	550	440	569	455	420	525
2	702	111	7/16	0.2000	537	430	571	457	410	515
3	979	121	7/16	0.2000	525	420	571	457	405	505
4	1223	129	7/16	0.2000	512	410	569	455	395	495
5	1437	137	7/16	0.2000	499	400	564	451	385	485
6	1623	143	7/16	0.2000	487	390	558	446	380	475
7	1761	148	7/16	0.2000	422	380	489	440	370	465

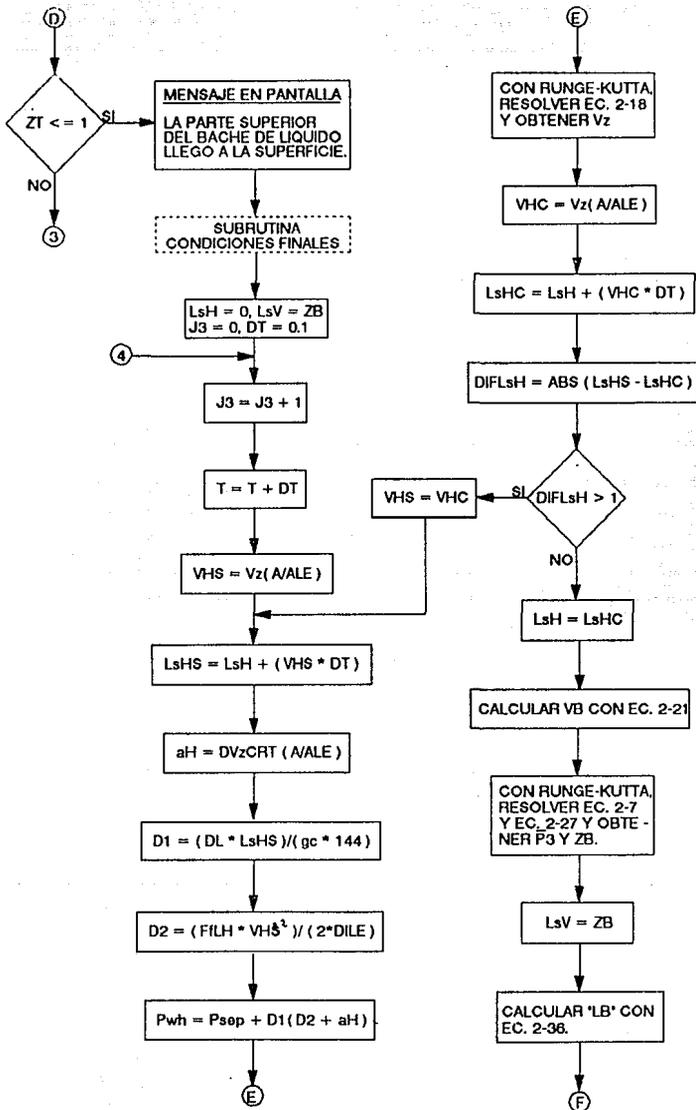
FECHA DE DISEÑO : 19/MAYO/92

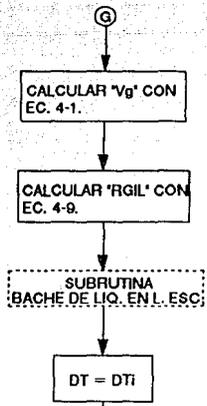
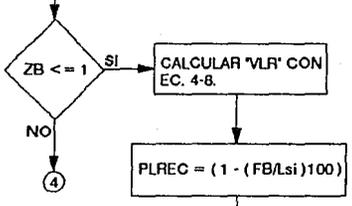
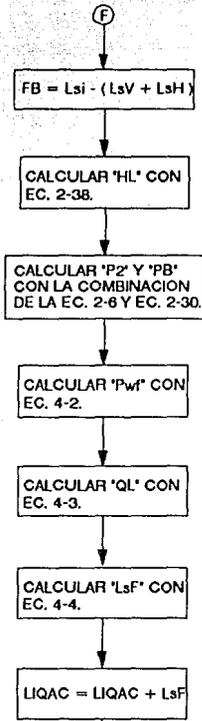
DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO MATEMATICO





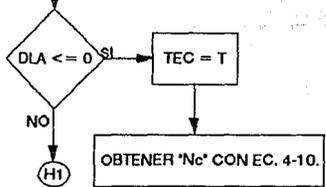
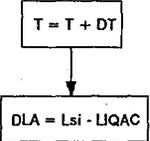






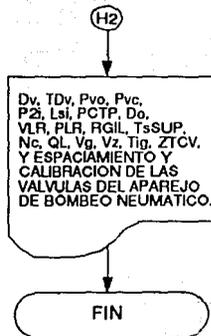
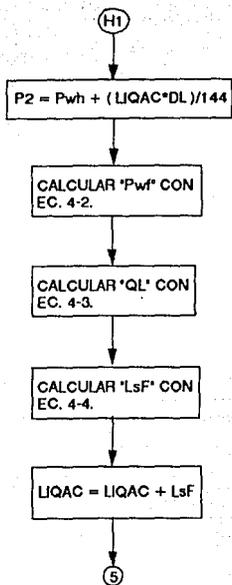
MENSAJE EN PANTALLA

- SE CONSIDERA FLUJO HORIZONTAL
- LA LONGITUD DEL BACHE ES LA MISMA EN TODO EL TRAYECTO.
- SE EMPLEARON LAS MISMAS ECUACIONES QUE EN EL FLUJO VERTICAL CON EXCEPCION DE LAS ECUACIONES 4-11 Y 4-12.



(G)

(H2)



CAPITULO VI
CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1.- El programa de cómputo desarrollado en este trabajo, permite diseñar y analizar instalaciones de B.N.I. partiendo de una sólida fundamentación teórica. Con esto se pretende dejar a un lado el empirismo y se desea que el programa se convierta en una herramienta útil para el ingeniero de producción.

2.- Se observa con el programa de cómputo, que el bache sufre una rápida aceleración en los primeros instantes de haberse iniciado la inyección de gas y, posteriormente, se estabiliza y avanza con una velocidad casi constante hasta que llega a la superficie, en donde nuevamente adquiere una rápida aceleración.

3.- El modelo permite determinar si el bache de líquido es capaz de llegar a la superficie o bien, si la burbuja de gas lo penetra por completo durante su recorrido ascendente. Si ocurre esto último, el programa proporciona la profundidad donde se llevó a cabo dicho rompimiento y sugiere modificar el porcentaje de carga inicial en la T.P..

4.- Debido a que el fenómeno intermitente es de naturaleza variable (dependiente del tiempo), se usan incrementos de tiempo bastante pequeños para suponer un comportamiento permanente dentro de cada uno de ellos. Con la ejecución de varias corridas del programa, se encontró que con incrementos de tiempo de 0.1 a 0.7 seg, el programa proporciona resultados confiables. Con valores fuera de este rango, el programa no converge.

5.- El programa BONEI - 2 puede instalarse en cualquier tipo de PC, sin embargo, se recomienda utilizar una máquina con procesador 286 o mayor para disminuir su tiempo de ejecución.

6.- Al incrementar la presión de inyección en el sistema, es posible obtener, si el índice de productividad del pozo lo permite, un aumento en la recuperación total de líquidos (Fig. 3-7).

7.- Existe una aproximación adecuada entre los datos medidos experimentalmente y los calculados con el programa de cómputo. Sin embargo, el resbalamiento de líquido calculado para tuberías de 2 y de 3 pg. de diámetro resultó ser mucho mayor al medido (+ 60 y + 30 % respectivamente). Para disminuir esta gran diferencia, se recomienda ajustar los coeficientes numéricos C_1 , C_2 y C_3 empleados en el cálculo de la velocidad frontal de la burbuja de gas para un campo en particular.

8.- El modelo matemático empleado, contempla la posibilidad de llevar a cabo la simulación de un ciclo completo para líquidos con viscosidades de hasta 150 cp (medidos a condiciones medias de flujo). Para valores de viscosidad mayores al anterior, podría emplearse el B.N.I. con múltiples puntos de inyección o bien, emplear otros sistemas de elevación artificial, como por ejemplo, bombeo mecánico de cavidades progresivas.

9.- El modelo considera que durante el viaje del bache de líquido a la superficie, se presentan tres patrones de flujo

diferentes :

- a) Flujo del bache de líquido intacto.
- b) Flujo de la burbuja de gas.
- c) Flujo de una película de líquido adherida a las paredes de la T.P. y rodeando a la burbuja de gas.

10.- El programa desarrollado, proporciona los parámetros de mayor interés para el ingeniero de Producción, así como también el diseño completo de un aparejo de B.N.I..

NOMECLATURA

- A Area de la sección transversal de la tubería de producción, pie².
- Ab Area de los fuelles de una válvula de B.N., pg².
- Ab Area de la sección transversal de la burbuja de gas, pie².
- Ap Area del orificio de control (sección piloto) de una válvula de B.N., pg².
- a_H Aceleración del bache de líquido en la línea de descarga, pie/seg².
- ALE Area de la sección transversal de la línea de escurrimiento, pie².
- Bp Recuperación de líquido por ciclo, bl.
- Cd Coeficiente de descarga.
- C₁ Coeficiente numérico.
- C₂ Coeficiente numérico.
- C₃ Coeficiente numérico.
- Ct Capacidad de la tubería de producción, bl/pie.
- Ctp Capacidad de la tubería de producción, pie³.

- d Diámetro interior, pie.
- Dv Profundidad de colocación de la válvula operante, pie.
- Dvs: Profundidad de colocación de la válvula superior del
aparaje de B.N., pie.
- FB Resbalamiento de líquido, pie.
- Ff Factor de fricción, adimensional.
- g Aceleración de la gravedad, pie/seg².
- gc Constante gravitacional, 32.174 (lbf pie/lbf seg²).
- Gs Gradiente estático del fluido de la formación,
lb/pg²/pie.
- Gfc Gradiente del fluido de control, lb/pg²/pie.
- H_L Colgamiento de líquido (adim.).
- IP Índice de productividad del pozo, bls/día/lb/pg².
- L Longitud, pie.
- La Longitud de la burbuja de gas, pie.
- Ls Longitud intacta del bache de líquido para un Δt dado, pie.
- Lsi Longitud inicial del bache líquido, pie.
- Lsf Longitud del bache aportada por la formación, pie.

- L_s Longitud del bache en la línea de escurrimiento, pie.
- M Masa molecular del gas, lbm/mole-lbm.
- m Masa, lbm.
- n Número de moles, mole-lbm.
- \vec{n} Vector normal.
- N_c Número de ciclos por día.
- p Presión, lb/pg² abs.
- p_z Presión en la T.P. a la profundidad de válvula operante, lb/pg² abs.
- \bar{p}_g Presión media del volumen de gas en la T.P., lb/pg² abs.
- p_B Presión en la burbuja de gas justamente por debajo del bache líquido, lb/pg² abs.
- p_S Presión base, 14.7 lb/pg² abs.
- p_t Presión en la TP frente a la válvula operante en el momento de iniciar su movimiento ascendente el bache de líquido, lb/pg².
- p_{mf} Presión media de flujo, lb/pg² abs.
- p_{ko} Presión máxima disponible del gas de inyección, lb/pg².

- P_{VO} Presión de apertura de la válvula operante a la profundidad de esta, lb/pg^2 abs.
- P_{VC} Presión de cierre de la válvula operante a la profundidad de esta, lb/pg^2 abs.
- P_{sep} Presión de separación, lb/pg^2 abs.
- P_{wf} Presión de fondo fluyendo, lb/pg^2 .
- P_{wh} Presión de T.P. en el cabezal del pozo, lb/pg^2 abs.
- P_{whg} Presión de TP en el cabezal del pozo, lb/pg^2 man.
- P_{ws} Presión estática del yacimiento, lb/pg^2 .
- PCTP Porcentaje de carga en la T.P. en relación a la presión de apertura de la válvula operante, %.
- Q_L Gasto de líquido medido a c.a., $bl/seg.$
- Q_{LR} Gasto de líquido recuperado, $bl/día.$
- R Constante universal de los gases $10.73 \text{ lb/pg}^2 \text{ abs}$
 $\text{pie}^3/\text{lbm mole } ^\circ R.$
- RA Relación de areas (A_p/A_b).
- RGIL Relación gas inyectado - líquido, pie^3/bl .
- r Radio de la T.P., $\text{pie}.$
- SF Factor de pérdida por resbalamiento (5 a 7 % /1000 pie)

SGg	Densidad relativa del gas (aire = 1).
T	Temperatura, °R.
Ts	Temperatura base, 60 °F.
T _{mf}	Temperatura media de flujo, °F.
t	Tiempo, seg.
Tc	Tiempo entre ciclos, seg.
Tmin	Tiempo mínimo entre ciclos de inyección, min.
V	Volumen, pie ³ .
Vg	Volumen de gas inyectado medido a c.a., pie ³ .
v	Velocidad, pie/seg.
\vec{v}	Vector velocidad.
v _f	Velocidad de la película de líquido, pie/seg.
v _z	Velocidad frontal del bache líquido, pie/seg.
v _{bf}	Velocidad frontal de la burbuja, pie/seg.
Vrec	Volumen de líquido recuperado, bl.
Y	Factor de expansión.
Z	Elevación, pie.

Z_B Posición frontal de la burbuja de gas, pie.

Z_T Posición frontal del bache líquido, pie.

z Factor de compresibilidad del gas.

SIMBOLOS GRIEGOS :

β Relación entre el diámetro del orificio de la válvula de bombeo neumático y el diámetro de la T.P..

δ Espesor de la película de líquido, pie.

μ Viscosidad, cp.

ρ Densidad, lbm/pie³.

Δ Incremento.

SUBINDICES :

B Burbuja.

c Calculado.

c.a. Condiciones atmosféricas.

c.f. Condiciones de flujo.

f Película de líquido.

fi Final.
g Gas.
H Dirección horizontal.
i Interfacial.
in Inicial.
iny Inyección.
L Líquido.
m Medida.
p Longitud de la T.P..
P Producido.
Re Número de Reynolds.
S Superficie.
s Bache.
T Superior.
TP Tubería de producción.
z Dirección vertical.

- 1 Condiciones del espacio anular a la profundidad de la válvula operante.
- 2 Condiciones de la T.P. a la profundidad de la válvula operante.
- 3 Condiciones promedio en la burbuja de gas.

REFERENCIAS

- 1.- Brown, K. E.: " The Technology of Artificial Lift Methods, " Penn Well Books, Vol 2a Tulsa, Ok. 1980 .
- 2.- Craft, B.C., Holden, W.R. and Graves, E.D.: " Well Desing : Drilling and Production, " Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.
- 3.- Brown, K.E. and Jessen, F.W.: " Evaluation of Valve Port Size, Surface Chokes and Fluid Fall-Back in Intermittent Gas-Lift Installation. " J.Pet.Tech. (March 1962) 315-322; Trans., AIME, 225.
- 4.- White, G.W. et al.: " An Analytical Concept of the Static and Dynamic Parameters of Intermittent Gas-Lift, " J.Pet.Tech. (March 1963) 301-308; Trans., AIME, 228.
- 5.- Brill, J.P., Doerr, T.C. and Brown, K.E. : " An Analytical Description of Liquid Slug Flow in Small-Diameter Vertical Conduits, " J.Pet.Tech. (March 1967) 419-432; Trans., AIME, 240.
- 6.- Neely, A.B., Montgomery, J.W., and Vogel, J.V.: " A Field Test and Analytical Study of Intermittent Gas-Lift, " Soc. Pet. Eng. J. (Oct. 1974) 502-512; Trans., AIME, 257.
- 7.- Hughmark, G.A.: " Film Thickness, Entrainment and Pressure Drop in Upward Annular and Dispersed Flow, " AIChE J. (1973) Vol. 19, No. 5, pp. 1062 - 1064.

- 8.- Collins,R. et al.: " The Motion of a Large Gas Bubble Rising Through Liquid Flowing in a Tube, " J.Fluid Mech. (1978) Vol. 89, pp. 497 - 514.
- 9.- Fernández,O.E. et al.: " Hydrodynamic Model for Intermittent Gas Lifting of Viscous Oil, " Thesis, U of Tulsa (1982).
- 10.- Zúñiga, P.H.: " Diseño y Estudio Analítico del Bombeo Neumático Intermitente, " Tesis,U.N.A.M.,Facultad de Ingeniería (1969).
- 11.- CRANE : " Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías, " McGraw - Hill/Interamericana de México, 1989.
- 12.- Bird,R.B., Stewart,W.E., and Lightfoot,E.N.: " Fenómenos de Transporte, " John Wiley & Sons Inc., New York, 1987.
- 13.- Ross,S.L.: " Differential Equations, " John Wiley & Sons Inc., New York, 1974.
- 14.- Winkler,H.W. and Smith, S. : Camco Gas Lift Manual, CAMCO, Inc., Houston, 1962 .
- 15.- Flores,M.J. : Notas de la materia Producción de Pozos I, 1983 .

A P E N D I C E

A) ECUACION DE CONTINUIDAD ^(12)

La ecuación de continuidad se deduce aplicando un balance de materia a un elemento estacionario de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$, a través del cual circula un fluido (Fig. A.1), es decir :

$$\left[\begin{array}{c} \text{velocidad} \\ \text{de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de} \\ \text{materia} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{velocidad} \\ \text{de} \\ \text{entrada} \\ \text{de} \\ \text{materia} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{velocidad} \\ \text{de} \\ \text{salida} \\ \text{de} \\ \text{materia} \end{array} \right]$$

... (A - 1)

La forma integral de la ecuación de continuidad puede obtenerse con la siguiente expresión diferencial :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho v) = 0 \quad \dots (A - 2)$$

La ecuación anterior es válida para cada punto fijo (x,y,z,t). Sea V(t) un volumen arbitrario de control, el cual puede cambiar de tamaño, forma, o posición en función del tiempo. Si la ecuación (A - 2) es integrada sobre V(t) para un tiempo dado, tenemos :

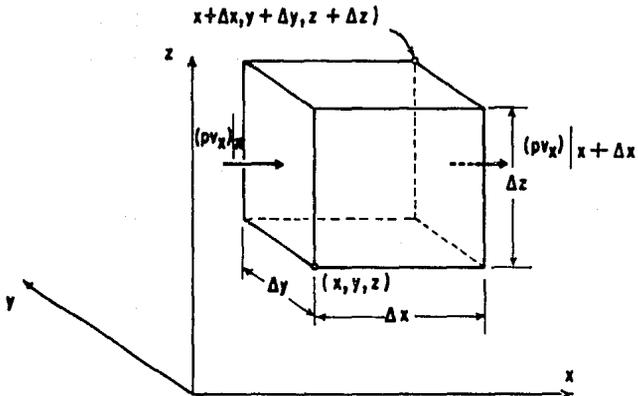


FIG. A-1.- REGION DE VOLUMEN $\Delta x \Delta y \Delta z$ FIJA EN EL ESPACIO, A TRAVES DE LA CUAL ESTA CIRCULANDO UN FLUIDO.

$$\iiint_{V(t)} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) \right] dV = 0 \quad \dots (A-3)$$

o, usando el teorema de la divergencia :

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_{S(t)} \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad \dots (A-4)$$

donde $S(t)$ representa la superficie de $V(t)$, es decir, el área de flujo a través de la cual el fluido puede entrar y salir del sistema. Si para cada punto en la superficie, $S(t)$, \vec{v}_s representa la velocidad superficial en ese punto, entonces la ecuación (A-4) puede ser escrita como :

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{v}_s \cdot d\vec{A} + \iint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} = 0 \quad \dots (A-5)$$

donde :

La primera integral, representa el cambio de masa que sufre el volumen de control debido a los cambios de densidad que se tienen dentro del mismo.

La segunda integral, representa la pérdida de masa debida al cambio de tamaño, forma, o posición del volumen de control.

La tercera integral, representa el gasto másico transportado a través de la superficie del volumen de control (flujo másico). Esta integral tiene también la siguiente interpretación :

$$- \iint_{S(t)} \rho (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot d\vec{A} = \frac{dm_L}{dt} \quad \dots (A - 6)$$

$$= (\text{gasto másico de entrada} - \text{gasto másico de salida})$$

donde m_L representa la masa total de líquido en el volumen de control.

La primera integral es igual a cero debido a que el líquido se considera incompresible.

$$\iiint_{V_a(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = 0 \quad \dots (A - 7)$$

Aunque en realidad ningún fluido es totalmente incompresible, en la práctica se puede admitir con mucha frecuencia que la densidad es constante, con lo que se obtiene una considerable simplificación en los cálculos sin cometer un error apreciable.

La segunda integral puede interpretarse de la siguiente manera :

$$\int_{S(t)} \rho \vec{v}_n \cdot d\vec{A} = \rho_L v_z A - \rho_L v_{bf} A \quad \dots (A-8)$$

La ecuación (A - 6) tiene la siguiente interpretación :

$$\frac{dm_L}{dt} = - \rho_L (v_{bf} - v_f) (A - A_B) \quad \dots (A-9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (A - 7), (A - 8) y (A - 9) en la ecuación (A - 5) obtenemos :

$$\rho_L v_z A - \rho_L v_{bf} A = - \rho_L (v_{bf} - v_f) (A - A_B) \quad \dots (A-10)$$

Agrupando términos y simplificando, encontramos la velocidad de la película de líquido, es decir :

$$v_f = \frac{v_z A - v_{bf} A_B}{A - A_B} \quad \dots (A-11)$$

B) ECUACION DE MOVIMIENTO. ^(12)

Para un elemento de volumen $\Delta x \Delta y \Delta z$, como el utilizado en la sección anterior, se puede escribir el siguiente balance de cantidad de movimiento :

$$\left[\begin{array}{c} \text{velocidad de} \\ \text{acumulacion} \\ \text{de} \\ \text{cantidad} \\ \text{de} \\ \text{movimiento} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{velocidad de} \\ \text{entrada de} \\ \text{cantidad} \\ \text{de} \\ \text{movimiento} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{velocidad de} \\ \text{salida de} \\ \text{cantidad} \\ \text{de} \\ \text{movimiento} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{suma} \\ \text{de las} \\ \text{fuerzas que} \\ \text{actúan} \\ \text{sobre el} \\ \text{sistema} \end{array} \right] \quad \dots (A - 12)$$

La ecuación (A - 12) corresponde exactamente a una aplicación de la ecuación (A - 1) para sistemas en estado no estacionario. Además de tener en cuenta el comportamiento no estacionario, se permite que el fluido se mueva en una dirección arbitraria a través de las seis caras del elemento de volumen (Fig.A.2). Es preciso resaltar que la ecuación (A - 12) es la ecuación de un vector, con componentes para cada una de las tres direcciones coordenadas (x,y,z).

La forma integral de la ecuación de movimiento puede obtenerse de la siguiente expresión diferencial :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + [\vec{\nabla} \rho \vec{v} \vec{v}] = - \vec{\nabla} p - [\vec{\nabla} \tau] + \rho \vec{g} \quad \dots (A - 13)$$

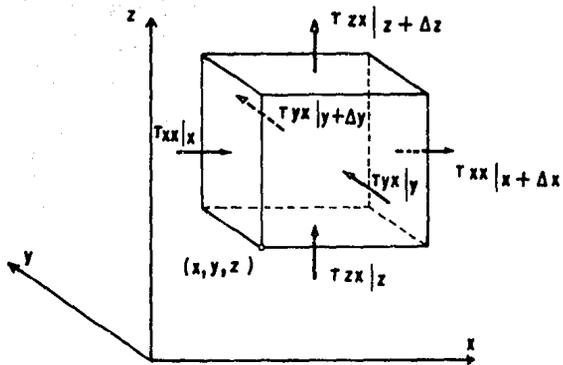


FIG. A-2.- ELEMENTO DE VOLUMEN $\Delta x \Delta y \Delta z$, EN EL QUE SE SEÑALA CON FLECHAS LA DIRECCION EN QUE SE TRANSPORTA EL COMPONENTE x DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO A TRAVES DE LAS SUPERFICIES.

Al igual que la ecuación (A - 2), si la ecuación (A - 13) es integrada sobre un volumen de control, $V(t)$, y nuevamente usando el teorema de la divergencia, tenemos :

$$\begin{aligned} & \iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \iint_{S(t)} (\rho \vec{v}) (\vec{v}_s d\vec{A}) + \\ & \iint_{S(t)} (\rho \vec{v}) (\vec{v} - \vec{v}_s) d\vec{A} = - \iint_{S(t)} p d\vec{A} - \\ & \iint_{S(t)} (\vec{n} \cdot \tau) dA + \iiint_{V(t)} \rho \vec{g} dV \quad \dots (A - 14) \end{aligned}$$

donde \vec{v}_s es la velocidad superficial, \vec{n} es el vector normal exterior en cada punto de $S(t)$, y τ es el tensor de esfuerzos.

El primer término de la ecuación (A - 14) representa, el cambio de cantidad de movimiento en el volumen de control, $V(t)$, debido a los cambios de densidad y velocidad. El segundo término representa, la reducción de cantidad de movimiento debida a un cambio en el tamaño, forma, o posición del volumen de control. El tercer término representa el flujo de cantidad de movimiento a través de la superficie del volumen de control. El cuarto término representa, el cambio de cantidad de movimiento debido al efecto de las fuerzas de presión actuando sobre la superficie del volumen de control. El quinto término representa, el cambio de

cantidad de movimiento debido al efecto de las fuerzas viscosas. El último término representa, el cambio de cantidad de movimiento debido al efecto de la fuerza de gravedad actuando sobre la masa total del fluido en el volumen de control.

La interpretación de cada una de las integrales es la siguiente :

$$\iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV \approx \rho_L \frac{\partial v_z}{\partial t} A (z_B - z_T) \quad \dots (A - 15)$$

$$\iint_{S(t)} (\rho_L \vec{v}) (\vec{v}_n dA) = \rho_L v_z^2 A - \rho_L v_{bf} A_B - \rho_L v_f v_{bf} (A - A_B) \quad \dots (A - 16)$$

$$\iint_{S(t)} \rho_L \vec{v} ((\vec{v} - \vec{v}_n) \cdot d\vec{A}) = \rho_L v_f (v_{bf} - v_f) (A - A_B) \quad \dots (A - 17)$$

Las tres últimas integrales representan las diferentes fuerzas actuando sobre el fluido del volumen de control, y son evaluadas de la siguiente manera :

$$\iint_{S(t)} p d\vec{A} = (p_T A - p_B A) \quad \dots (A - 18)$$

$$\int \int_{S(t)} (\vec{n} \cdot \vec{\tau}) dA = \frac{f_L \rho_L v_z^2 (Z_B - Z_T) A}{2g_c d} \dots (A - 19)$$

$$\int \int \int_{V(t)} \rho \vec{g} dV = \rho_L A (Z_B - Z_T) g \dots (A - 20)$$

Sustituyendo las ecuaciones (A - 15), (A - 16), (A - 17), (A - 18), (A - 19) y (A - 20) en la (A - 14), obtenemos la siguiente expresión :

$$\rho_L \frac{\partial v_z}{\partial t} A (Z_B - Z_T) = -\rho_L A (Z_B - Z_T) g - p_T A + p_B A - \frac{f_L \rho_L v_z^2 (Z_B - Z_T) A}{2 g_c d} + v_{bf}^2 A \rho_L + v_f^2 (A - A_B) \rho_L - v_z^2 A \rho_L \dots (A - 21)$$

Dividiendo la ecuación anterior por $\rho_L A (Z_B - Z_T)$ tenemos :

$$\frac{dv_z}{dt} = -g - \frac{144 g_c (p_T + p_B)}{\rho_L (Z_B - Z_T)} - \frac{f_L v_z^2}{2 d} + \frac{v_{bf} A_B}{A (Z_B - Z_T)}$$

$$+ \frac{v_f (A - A_B)}{A (Z_B - Z_T)} - \frac{v_z^2}{(Z_B - Z_T)} \dots (A - 22)$$