

## CAPÍTULO 4

# MÉTODOS CONVENCIONALES DEL CONTROL DE POZOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Existen diferentes métodos de control de pozos, estos se pueden aplicar durante la perforación, terminación e intervención. Por lo tanto, es importante presentar en este capítulo algunos procedimientos para el control de un pozo.

En primera instancia, el control de pozos radica en tener la presión del fondo del pozo constante, durante la entrada de los fluidos hasta su desalojo. Para que esto ocurra, nosotros deberemos identificar la entrada de ellos visualmente y enseguida cerrar el pozo utilizando nuestro equipo de control superficial. Una vez cerrado el pozo, nosotros podemos tomar el control sobre el pozo y será más fácil tener la presión del fondo del pozo constante.

Los principales métodos de control de pozos que mantienen una presión constante en el fondo del pozo son:

- El método del perforador.
- El método de densificar y esperar.
- El método concurrente.

Estos métodos tienen como objetivo aplicar una presión constante en el fondo del pozo, para desalojar el brote, hasta que se obtiene el control total sobre el mismo.

Cada método de control del pozo tiene sus propias ventajas y desventajas por lo que se recomienda identificarlas, a fin de aplicar el método adecuado cuando se presente un brote en el pozo.

---

A continuación se presentan las metodologías para el cierre de pozos durante la etapa de perforación y terminación de pozos, después de esto, durante la etapa de intervención se presentará una metodología totalmente distinta.

## 4.2 PROCEDIMIENTOS DE CIERRE DE UN POZO<sup>1</sup>

Una vez identificado el brote lo más importante es cerrar el pozo, con la finalidad de reducir al mínimo la entrada de fluido invasor, evitando agravar la situación y posibles consecuencias.

A continuación se describirán los procedimientos de cierre que se utilizan normalmente dependiendo la situación en la que se presente el pozo. Para cada uno se exponen ciertas consideraciones y aplicaciones, para cada pozo en particular, esto va a depender de la operación por efectuar y el equipo que se tenga disponible.

### 4.2.1 PROCEDIMIENTOS DE CIERRE AL ESTAR PERFORANDO

Previo a todo procedimiento de cierre de un pozo hay que tener presente lo siguiente:

- Conocer los límites máximos permisibles de presión en superficie.
- Conocer la presión reducida de circulación.
- Tener registrada, en la hoja de control y manejo de un brote los parámetros que se indican: presión y gasto óptimo en la bomba acumuladora de presión para operar el sistema superficial, preventores y válvulas.

Al estar perforando, existen dos procedimientos para cerrar el pozo. A estos procedimientos se les conoce como:

- Cierre suave.
- Cierre duro.

#### PROCEDIMIENTO DE CIERRE SUAVE

---

Este procedimiento de cierre cuenta con dos principales ventajas. La primera, reduce el golpe de ariete y la onda de presión sobre el pozo y las conexiones superficiales. La segunda, Permite observar la presión del espacio anular y en caso de ser necesario, la desviación del flujo.

El procedimiento para cerrar el pozo de forma suave al estar perforando es el siguiente, figura 4-1:

1. Parar la rotaria, levantar la flecha para que su conexión inferior este arriba de la mesa rotaria.
2. Parar el bombeo del lodo.
3. Observar el pozo y mantener la sarta suspendida.
4. Abrir la válvula de la línea de estrangulación.
5. Cerrar el preventor de arietes superior o el preventor anular.
6. Cerrar el estrangulador.
7. Medir el incremento en el nivel de las presas.
8. Anotar las presiones de cierre de TP y TR cada minuto hasta la estabilización de la presión y posteriormente cada cinco minutos sin que se rebase la presión máxima permisible.
9. Observar que los preventores no tengan fugas.
10. Verificar la presión de los acumuladores.

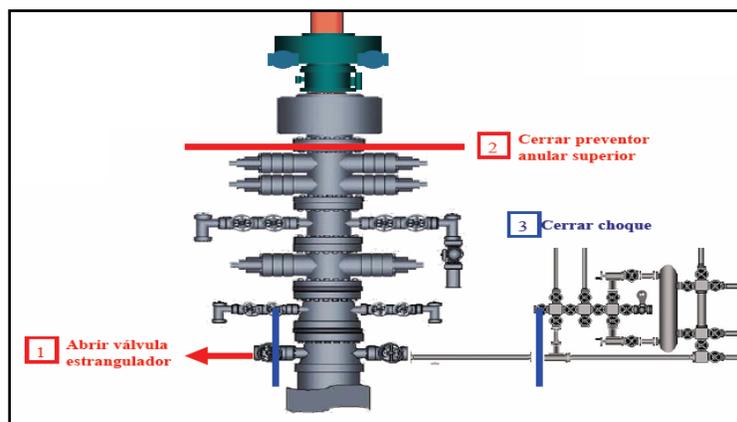


Figura 4-1. Procedimiento de cierre suave al estar perforando.

## PROCEDIMIENTO DE CIERRE DURO

Otra variante de este método es conocida como “cierre duro”, cuyo procedimiento es el siguiente, figura 4-2:

1. Parar la rotaria, levantar la flecha para que su conexión inferior esté arriba de la mesa rotaria.
2. Parar el bombeo de lodo.
3. Cerrar el preventor de arietes superior o el anular.
4. Abrir la válvula de la línea de estrangulación.
5. Colocar yugos o candados (preventor de arietes).
6. Verificar que el pozo esté cerrado.
7. Medir el incremento de volumen de lodo en presas y el incremento de presión.
8. Observar que los preventores no tengan fugas.
9. Registrar presión en TP y TR.

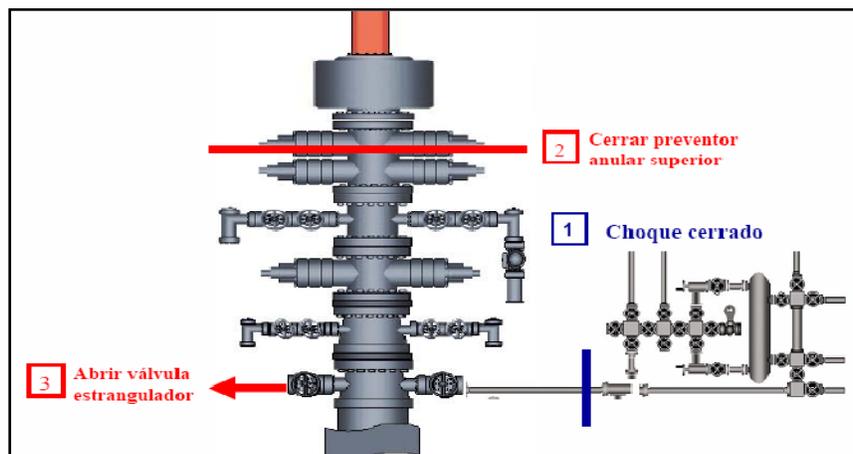


Figura 4-2. Procedimiento de cierre duro al estar perforando.

La presión en la tubería de perforación tendrá que ser siempre menor a la de formación o a la presión de la tubería de revestimiento ya que si esta tiende a sobrepasar las presiones permisibles se puede fracturar la formación, lo que puede provocar un descontrol subterráneo que llegue a alcanzar la superficie, la otra es dañar la TR o tener problemas con el equipo superficial.

#### 4.2.2 PROCEDIMIENTO DE CIERRE AL VIAJAR CON TUBERÍA DE PERFORACIÓN

Durante los procesos de perforación, terminación o el mantenimiento de un pozo se realizan viajes rutinarios con tuberías de perforación y diferentes herramientas integradas las cuales tienen funciones específicas en la construcción del agujero.

Estas actividades deben realizarse con altos márgenes de seguridad que garanticen el control total de las presiones de la formación mientras se introducen o extraen las tuberías.

Una condición que asegura el control del pozo es mantenerlo lleno con un fluido de perforación en condiciones adecuadas de densidad, el cual debe formar una presión hidrostática mayor a la presión de la formación.

Cada movimiento de tubería dentro del pozo requiere la aplicación de medidas preventivas específicas para evitar que ocurran los brotes, por ejemplo:

Antes de sacar tubería es importante conocer la importancia que tiene el uso del tanque de viajes, el cual nos permite mantener siempre lleno el pozo, además de cuantificar adecuadamente la cantidad de fluido de perforación que debemos agregar al momento de extraer tubería sin disminuir la columna hidrostática para garantizar que la presión hidrostática sea mayor que la presión de la formación.

A continuación se describe el procedimiento de cierre al viajar con TP:

1. Suspende el viaje dejando una junta sobre la mesa rotaria.
  2. Sentar la TP en sus cuñas.
  3. Instalar la válvula de seguridad abierta.
  4. Cerrar la válvula de seguridad.
  5. Suspende la sarta en el elevador.
  6. Abrir la válvula de la línea de estrangulación.
  7. Cerrar la válvula del estrangulador cuidando no rebasar la máxima presión permisible en el espacio anular.
  8. Anotar presiones de TP y TR.
-

9. Medir el incremento de volumen en las presas de lodo.
10. Registrar las presiones cada minuto hasta estabilizarse, y después cada cinco minutos.
11. Observar que los preventores no tengan fugas.

#### **4.2.3 PROCEDIMIENTO DE CIERRE AL SACAR O METER HERRAMIENTAS**

Existe la probabilidad de que el brote se manifieste mientras se sacan los lastra barrenas o algunos accesorios del aparejo de fondo si esto ocurre, entonces, deberá aplicar el procedimiento de cierre de pozo al sacar o meter herramienta.

Los pasos que deberán seguirse son muy similares a los anteriores con la variante que al presentarse un influjo al estar metiendo o sacando herramientas, se debe considerar la posibilidad de conectar y tratar de bajar la lingada de TP-HW, ya que los preventores de arietes, harán sello en el cuerpo del HW-TP, esto da la posibilidad de operar preventores de arietes con un factor adicional de seguridad. En caso de tener una emergencia deberá de soltarse la herramienta dentro del pozo para después cerrarlo con el preventor de arietes.

Debido a que los lastra barrenas tienen una forma helicoidal, es recomendable levantar la herramienta completa, junto con la tubería, hasta tenerla fuera del pozo o a una profundidad superior a la del ariete ciego, ya que los preventores de arietes no sellarían de forma eficiente debido a la forma helicoidal de los lastra barrenas. Otra de las ventajas de levantar la herramienta junto con la tubería es evitar futuras operaciones de pesca.

#### **4.2.4 PROCEDIMIENTO DE CIERRE SIN TUBERÍA DENTRO DEL POZO**

En algún momento, durante las operaciones de los pozos se puede dar el caso de no tener tuberías dentro del pozo. En esta condición, el perforador, desde la consola de control remoto abre la válvula hidráulica de la línea de estrangular y cierra el preventor de ariete ciego.

De la misma forma que los casos anteriores, es necesario llevar un registro continuo de la presión en el pozo. El procedimiento en estos casos es el siguiente:

1. Abrir la válvula de estrangulación.
2. Cerrar el preventor de arietes ciegos o de corte.
3. Colocar yugos o candados.
4. Cerrar la válvula de estrangulador cuidando las presiones máximas.
5. Registrar las presiones cada minuto hasta estabilizarse y después cada cinco minutos.
6. Observar que los preventores no tengan fugas.

### 4.3 ANTECEDENTES TEÓRICOS

Es importante que el personal que labora en el área de perforación; interprete los diversos principios, conceptos, y procedimientos que se deben seguir para el control de un influjo en un pozo.

El control de un influjo se fundamenta en el uso de métodos y equipo, que permiten mantener una presión constante contra la formación. Al momento de detectar un influjo en el pozo, es importante analizar el desplazamiento del mismo y a partir de dicho análisis, decidir si es conveniente resolver el problema con alguno de los métodos convencionales de control. El control de pozos, principalmente, está en función de: la densidad, gasto y presión de bombeo y contrapresión impuesta por el estrangulador.

En esta sección se mencionara la información que se requiere tener a la mano, para una pronta intervención es caso de detectarse un influjo, así como los cálculos complementarios para un control más estricto. Ya que, si por alguna razón se presenta un influjo, cuanto más pronto se detecte en superficie y se tomen medidas pertinentes, menor será la magnitud y las consecuencias del mismo.

#### 4.3.1 MODELO DEL TUBO EN U<sup>2</sup>

Todos los procedimientos clásicos de desplazamiento se basan en el modelo del tubo en U, figura 4-3. Es muy importante comprender este modelo así como sus principios. A

menudo, el personal de campo intenta aplicar los métodos clásicos de control de pozos en casos donde el problema no resulta ser clásico. Por tal motivo se recurre al principio del modelo de tubo en U, si el modelo no describe el problema, no debemos recurrir a los métodos convencionales de control.

Como se ilustra en la siguiente figura, el lado izquierdo del Tubo en U representa la tubería de perforación, mientras que el lado derecho representa al espacio anular. Por lo tanto, el tubo en U representa un sistema de circulación donde la barrena se encuentra en el fondo. De no ser posible circular el fluido de perforación desde el fondo del sistema, los métodos convencionales de control de pozos no son aplicables.

Como se ilustra en la figura 4-3, la afluencia de fluidos de la formación ha entrado en el espacio anular (parte inferior derecha del tubo en U). En este momento el pozo ha sido cerrado, lo que significa que el sistema se encuentra cerrado. Bajo esta condición, hay una presión estática en la tubería de perforación,  $P_{TP}$ , y una presión estática en el espacio anular,  $P_{EA}$ . El fluido de la formación,  $\rho_f$ , ha entrado al espacio anular y ocupa un volumen en el sistema el cual está definido por el área transversal del espacio anular y la altura de la afluencia,  $h$ .

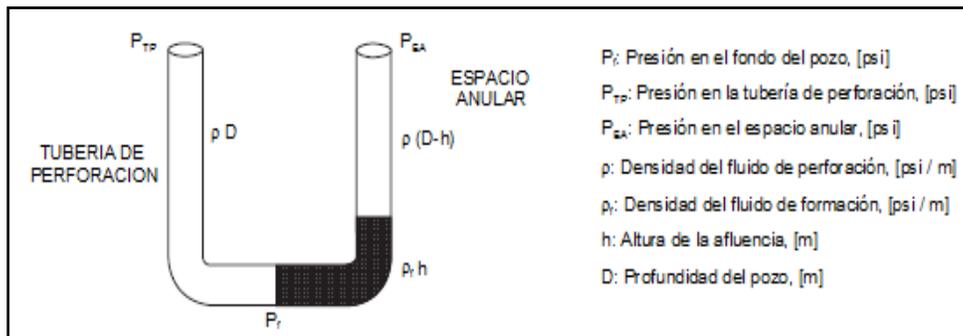


Figura 4-3. Modelo del tubo en U.

Al realizar una inspección del modelo del tubo en U, podemos notar que el lado derecho del tubo en U, el cual representa la tubería de perforación, es más fácil de analizar debido a que las presiones solo dependen de la densidad del fluido de perforación, cuyo valor conocemos. Además, la presión en la tubería de perforación es fácil de medir. En condiciones estáticas, la presión en el fondo del pozo la podemos determinar fácilmente utilizando la siguiente ecuación:

$$P_f = (\rho \times D) + P_{TP}$$

Ec. 4.1

Donde:

- $P_f$ : Presión en el fondo del pozo, [psi]
- $\rho$ : Densidad del fluido de perforación, [psi / m]
- $D$ : Profundidad del pozo, [m]
- $P_{TP}$ : Presión al cierre en la tubería de perforación, [psi]

La ecuación anterior, describe la presión en el fondo del pozo al cierre del mismo en términos de la hidrostática total de la parte derecha del tubo en U, la cual representa a la tubería de perforación. La presión en el fondo del pozo al ser cerrado, también puede ser descrita en términos de la presión hidrostática total sobre la superficie del espacio anular del tubo en U tal y como se expresa en la siguiente ecuación:

$$P_f = (\rho_f \times h) + (\rho \times (D - h)) + P_{EA}$$

Ec. 4.2

Donde:

- $P_f$ : Presión en el fondo del pozo, [psi]
- $\rho_f$ : Densidad del fluido de formación, [psi / m]
- $h$ : Altura de la afluencia, [m]
- $\rho$ : Densidad del fluido de perforación, [psi / m]
- $D$ : Profundidad del pozo, [m]
- $P_{EA}$ : Presión al cierre en la tubería de revestimiento, [psi]

En los procedimientos clásicos del control de pozos, lo importante no es la terminología utilizada durante el análisis, lo importante es mantener constante la presión al cierre en el fondo del pozo,  $P_f$ , de esta forma podemos prevenir una afluencia adicional de los fluidos de la formación. Esta condición debemos mantenerla, mientras es desplazada la afluencia inicial a la superficie. Obviamente la ecuación con la que analizamos el lado derecho del tubo en U, el cual representa la tubería de perforación, es más sencilla ya que todas las variables son conocidas. Por lo tanto, la parte derecha del tubo en U es el que se utiliza para controlar la presión en el fondo del pozo,  $P_f$ .

### 4.3.2 COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO INVASOR<sup>3</sup>

Cuando se tiene un influjo o brote de cualquier fluido, este en términos prácticos no se comprime ni se expande, por lo que al circularlo en el espacio anular la presión no aumentara ya que el aumento dependerá de los cambios en el estado mecánico del pozo o de los diferentes ajustes del estrangulador.

Los brotes de agua salada contienen gas disuelto, razón por la que deben tratarse como un brote gaseoso.

#### CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO INVASOR (GAS)

El gas como fluido compresible ocupara un determinado volumen que depende de la presión a la que esté sometido. Si se le permite expandirse, ocupara un volumen tan grande que desplazara grandes cantidades del fluido de perforación al exterior, con una consecuente disminución de la presión hidrostática, de ahí que el comportamiento del gas natural se toma utilizando la regla de “proporción inversa”. Si se duplica la presión se comprime la mitad, si se reduce la presión se expande al doble de su volumen.

El gas tiene la propiedad de migrar y refleja su presión en superficie por la presión de cierre del pozo. Se debe controlar mediante una purga para permitir la expansión del gas, cuando menos hasta que se tome la decisión de controlar el pozo mediante algún método, de lo contrario se provocara una falla en la formación expuesta o en las conexiones superficiales por una presión excesiva. Trataremos de explicar este comportamiento por medio de un ejemplo.

#### EJERCICIO 4.1

Se requiere calcular el comportamiento del gas sin expansión, con expansión descontrolada y con expansión controlada de acuerdo con los siguientes datos:

DATOS		
PROFUNDIDAD	[m]	3048
DENSIDAD	[gr / cm <sup>3</sup> ]	1.2
VOLUMEN DEL FLUIDO INVASOR	[lt]	159
PRESIÓN DE FONDO	[kg / cm <sup>2</sup> ]	365.7

Tabla 4-1. Datos del ejercicio 4.1.

COMPORTAMIENTO SIN EXPANSIÓN

Cuando la burbuja se va desplazando hacia la superficie incrementa la presión de fondo, de tal forma que si se encuentra a 2286 [m] se tendría la presión de burbuja de 365.7 [kg/cm<sup>2</sup>] mas la presión hidrostática de la columna de lodo correspondiente a la longitud a que se desplazo la burbuja (3048 – 2286 [m]) y que es de 91.4 [kg/cm<sup>2</sup>], dando como resultado 457.2 [kg/cm<sup>2</sup>] de presión de fondo, de esta forma se calcula hasta que la burbuja alcanza la superficie con una presión en el fondo de 731.5 [kg/cm<sup>2</sup>], figura 4-4.

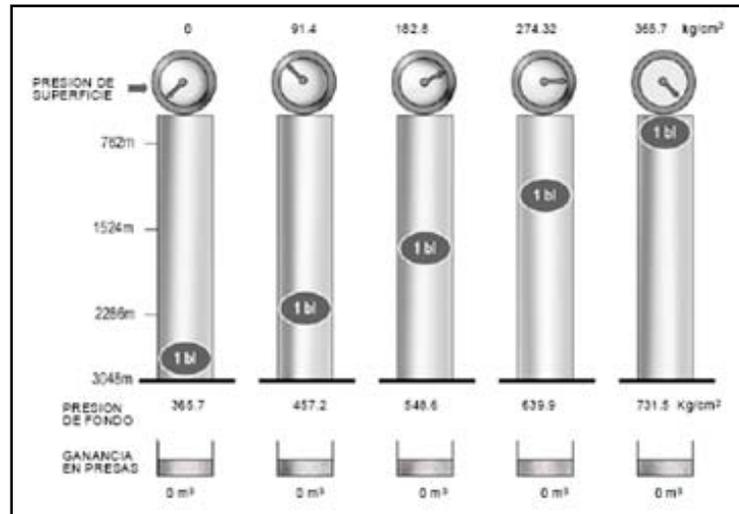


Figura 4-4. Migración de gas sin expansión.

COMPORTAMIENTO CON EXPANSIÓN DESCONTROLADA

Para obtener los cálculos utilizaremos la Ley de Boyle o de proporción inversa.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Ec. 4.3

Donde:

- $P_1$ : Presión de formación
- $V_1$ : Volumen original de gas
- $P_2$ : Presión de una burbuja a una profundidad dada
- $V_2$ : Volumen de una burbuja a una profundidad dada

Si aplicamos la ecuación anterior para las profundidades; 2286 [m], 1524 [m] y 762 [m] y en superficie tendríamos que:

$$P_1 = 365.7 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$V_1 = 159 \text{ [lt]}$$

$$P_2 = 2286 \times \left( \frac{1.20}{10} \right) = 274.3 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$V_2 = P_1 \times \left( \frac{V_1}{P_2} \right) = 365.7 \times \left( \frac{159}{274.3} \right) = 212 \text{ [lt]} = 1.3 \text{ [Bls]}$$

De esta manera obtenemos los resultados para cada una de las profundidades, teniendo en cuenta que en superficie se considera la presión atmosférica de 1.033 [kg/cm<sup>2</sup>].

Los resultados se ilustran en la figura 4-5.

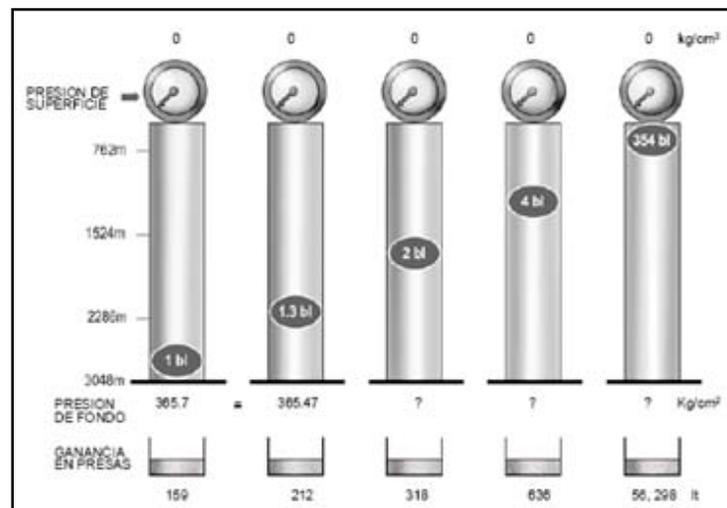


Figura 4-5. Expansión de gas descontrolada.

## COMPORTAMIENTO CON EXPANSIÓN CONTROLADA

Cuando se tiene un brote y se controla la expansión del gas, debe procurarse que se mantenga la presión de fondo igual o ligeramente mayor a la presión de formación. Para esto se opera el estrangulador, para mantener una contrapresión, además de la presión hidrostática del fluido, para igualar a la presión de formación y permitir la expansión del gas. En la figura 4-6, podemos ver los resultados:

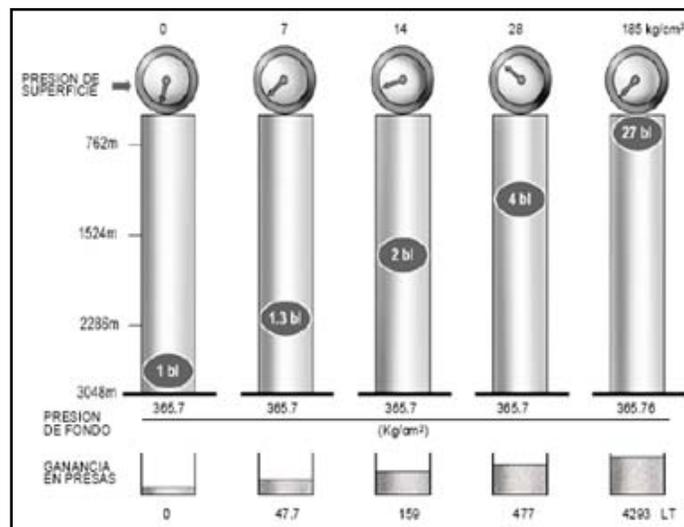


Figura 4-6. Expansión de gas controlada.

En la figura 4-6, se muestra el comportamiento del volumen del influjo (gas) con respecto a la profundidad. Como se puede observar, a medida de que la burbuja de gas se desplaza hacia la superficie, dentro del pozo, esta va incrementando su volumen (se expande) y se ve reflejado en el incremento de volumen en presas.

#### 4.3.3 INFORMACIÓN REQUERIDA PARA EL CONTROL DE POZOS<sup>4</sup>

La información que se debe tener disponible en la instalación, al estar realizando las tareas de perforación de pozos principalmente son:

1. Presión reducida de circulación.
2. Estado mecánico del pozo.

3. Gradiente de fractura de la formación.
4. Presiones máximas permisibles.
5. Desplazamientos y volúmenes.
6. Densidad del lodo.

La presión reducida de circulación se puede tomar a partir del valor de presión que nos da el manómetro del tubo vertical al circular el lodo a un gasto reducido ( $\frac{1}{2}$  ó  $\frac{1}{3}$  del régimen normal) y nos proporciona las pérdidas de presión por fricción en el sistema de circulación.

Esta información deberá obtenerse cuando:

- Se efectúen cambios por densidad y viscosidad al lado.
- Variaciones en la geometría de la sarta de perforación.
- Variación en las toberas.
- Cada vez que se perforen 150 [m].
- En cada turno de trabajo.
- Después de haber reparado una bomba.

NOTA: El manómetro o dispositivo para obtener esta presión deberá ser confiable, ya que son susceptibles a sufrir daño o descalibración.

Las razones por la cuales es importante manejar un gasto reducido de circulación son, figura 4-7:

- Se generan menos valores de presión.
- Disminuye la posibilidad de falla en el equipo de bombeo.
- Permite agregar materiales densificantes.
- Se dispone de más tiempo para analizar los problemas relacionados con el control del pozo.
- Facilita la operación de control de presiones en el múltiple de estrangulación.
- Menores pérdidas por fricción.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la presión de la bomba de perforación con dos diferentes gastos. La primera caída de presión es al circular el fluido de perforación al interior de la tubería, la segunda caída de presión es en la barrena y la tercera caída de presión se presenta en el espacio anular. De esta forma el fluido de perforación se desplaza a través del pozo con este comportamiento.

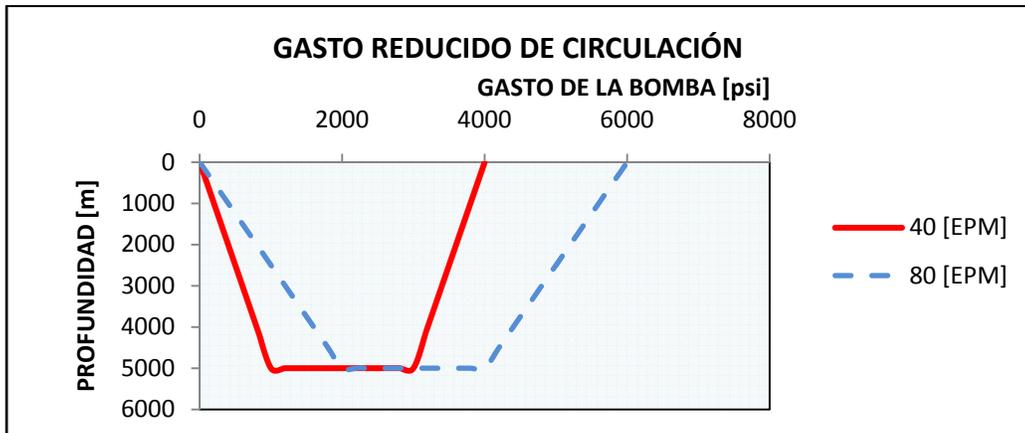


FIGURA 4-7. Gasto de la bomba vs Profundidad.

La presión reducida de circulación nos servirá para determinar la presión inicial y final de circulación al controlar el pozo.

DESPLAZAMIENTO Y CAPACIDAD DE LA BOMBA

Para calcular los desplazamientos de la unidad de bombeo se requieren los siguientes datos, figura 4-8:

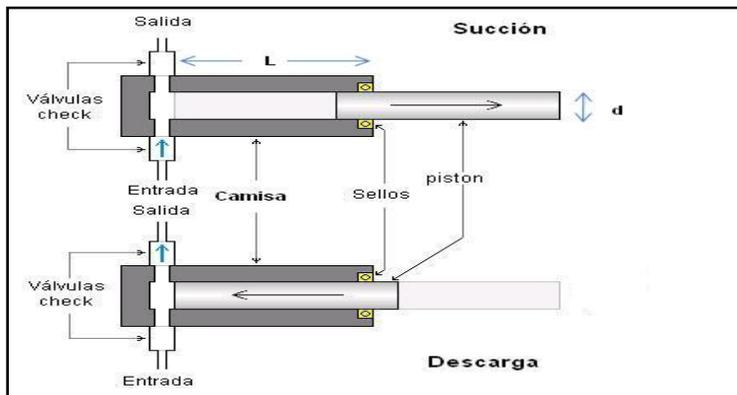


Figura 4-8. Desplazamiento de una bomba.

- Desplazamiento de la bomba
- Eficiencia de la unidad.

La eficiencia de la bomba la podemos conocer con mayor precisión a través del tanque de viajes, con este dato podremos conocer y calcular los tiempos para llevar a cabo el control de un pozo.

- **Desplazamiento de una bomba dúplex doble acción.**

$$Q=0.02574 \times ((2 \times D^2) - d^2) \times L \quad \text{Ec. 4.4}$$

- **Desplazamiento de la bomba triplex simple acción.**

$$Q=D^2 \times L \times 0.0386 \quad \text{Ec. 4.5}$$

Donde:

- Q: Gasto de la bomba, [Emb / Lt]
- D: Diámetro de la camisa, [pg]
- d: Diámetro del vástago, [pg]
- L: Carrera de la bomba, [pg]

- **Capacidad interna de tubulares.**

$$\text{Cap}=D_i^2 \times 0.5067 \quad \text{Ec. 4.6}$$

- **Capacidad del espacio anular.**

$$\text{Cap}_{EA}=(D_i^2 - D_E^2) \times 0.5067 \quad \text{Ec. 4.7}$$

Donde:

- Cap: Capacidad interna del tubular,  $\left[\frac{\text{lt}}{\text{m}}\right]$
- $D_i$ : Diámetro interno de la TR o agujero, [pg]

- $D_E$ : Diámetro externo de la TP o herramientas, [pg]
- $Cap_{EA}$ : Capacidad del espacio anular,  $\left[\frac{lt}{m}\right]$

El personal técnico responsable de efectuar el control, deberá contar con todos los datos necesarios para llenar la hoja de control de brotes recabando la siguiente información:

- Presiones de cierre en las tuberías (PCTP, PCTR).
- Configuración del estado mecánico del pozo.
- Si surgió un brote y fue cerrado el pozo. Volumen ganado en presas.
- Densidad del lodo original.
- Densidad del fluido invasor.
- Densidad del fluido de control a utiliza.

#### 4.3.4 CÁLCULOS REQUERIDOS PARA EL CONTROL DE POZOS<sup>5</sup>

Cuando se detecta un brote, es necesario cerrar el pozo con los procedimientos adecuados para cada situación y elaborar los cálculos básicos para el control total antes de iniciar la circulación. Estos cálculos facilitaran el seguimiento de cada etapa durante el control e incluyen:

1. Tiempo de desplazamiento en el interior de la sarta.
2. Densidad de control.
3. Presión inicial de circulación (PIC).
4. Presión final de circulación corregida por cambio de densidad (PFC).
5. Tiempo total para desalojar el brote del pozo.

##### 1. TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN EL INTERIOR DE LA SARTA

Es necesario conocer esta parámetro para observar el avance realizado al estar circulando un brote y para elaborar la cedula de presión durante el desplazamiento de la densidad de control en el interior de la sarta.

Este tiempo se determina en función de la capacidad interior de la sarta y de las características de la bomba, los cuales se pueden conocer a través de:

- Factores de capacidad de los componentes de la sarta.
- Secciones del espacio anular.

Estos factores se pueden conocer empleando tablas elaboradas para este fin. En caso de no contar con ellas se podrán obtener con las siguientes ecuaciones:

- **Para interior de tubería (TP, tubería pesada HW, herramienta, TR).**

$$\text{Factor de Cap.} = D_i^2 \times 0.5067 \quad \text{Ec. 4.8}$$

- **Para espacio anular (entre tubería de revestimiento o agujero y tuberías).**

$$\text{Factor de Cap.} = (D_i^2 - D_E^2) \times 0.5067 \quad \text{Ec. 4.9}$$

Donde:

- Factor de Cap: Factor de Capacidad de la sección,  $\left[ \frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]$
- $D_i$ : Diámetro interno de la TP, TR o agujero, [pg]
- $D_E$ : Diámetro exterior de la TP o herramienta, [pg]

Se define como “factor de capacidad interior” a los litros necesarios para llenar un metro lineal con la geometría de los diámetros considerados.

#### VOLUMEN ACTIVO DEL LODO EN EL SISTEMA

Este volumen incluye el que se encuentra en el agujero y en presas, es importante conocer siempre estos datos, ya que cuando ocurre un brote el volumen de fluido invasor será equivalente al incremento de volumen de lodo en la presa.

Cuando es necesario incrementar la densidad, se determina la cantidad de material densificante mínimo para efectuar el control. Para conocer el volumen de fluido en el

sistema es necesario utilizar los factores de capacidad, los cuales se determinan de la siguiente manera:

$$V_T = F_{CAP} \times L_T \quad \text{Ec. 4.10}$$

$$V_{EA} = F_{CAP} \times L_S \quad \text{Ec. 4.11}$$

Donde:

- $V_T$ : Volumen de la tubería, [lt]
- $F_{CAP}$ : Factor de capacidad, [lt / m]
- $L_T$ : Longitud de la tubería, [m]
- $V_{EA}$ : Volumen del espacio anular, [lt]
- $L_S$ : Longitud de la sección del espacio anular, [m]
- $V_p$ : Volumen en presa, [m<sup>3</sup>]

#### CAPACIDAD DE BOMBEO DE ACUERDO A LAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA

Requerimos de los siguientes datos:

- Marca y modelo.
- Diámetro de la camisa.
- Longitud de la carrera.
- Emboladas máximas.
- Presión de operación a un gasto establecido presión límite de operación.

Para bombas de simple acción, considerando un 90% de eficiencia, se aplica con las siguientes ecuaciones:

$$Q \left[ \frac{\text{lt}}{\text{Emb.}} \right] = 0.0386 \times L \times D^2 \quad \text{Ec. 4.12}$$

$$Q \left[ \frac{\text{gal}}{\text{Emb.}} \right] = 0.0102 \times L \times D^2 \quad \text{Ec. 4.13}$$

Donde:

- Q: Capacidad de la bomba
- L: Longitud de la carrera, [pg]
- D: Diámetro de la camisa, [pg]

Al establecer un gasto (gasto reducido de circulación) en [gal / min] ó [lt / min], es posible conocer el tiempo necesario para desplazar la capacidad del interior de la sarta.

$$T = \frac{V_{tiSARTA}}{Q_R} \quad \text{Ec. 4.14}$$

Donde:

- T: Tiempo de desplazamiento, [min]
- $V_{tiSARTA}$ : Volumen total del interior de la sarta, [lt]
- $Q_R$ : Gasto reducido de circulación,  $\left[\frac{\text{lt}}{\text{min}}\right]$

## 2. DENSIDAD DE CONTROL, $D_c$

Para controlar un pozo se requiere que la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo equilibre la presión de formación. La densidad que cumple lo anterior se conoce como densidad de control, para calcularla se deberá de auxiliar de la lectura de presión de cierre estabilizada en TP, por ser la que generalmente presenta la mínima contaminación.

$$\text{Inc. Dens.} = \frac{P_{CTP} \times 10}{h} \quad \text{Ec. 4.15}$$

$$D_c = D_o + \text{Inc. Dens.} \quad \text{Ec. 4.16}$$

Donde:

- Inc. Dens.: Incremento a la densidad, [ gr /cm<sup>3</sup>]
- $P_{CTP}$ : Presión al cierre estabilizada en TP, [kg/cm<sup>2</sup>]
- h: Profundidad vertical, [m]
- $D_o$ : Densidad original del lodo, [ gr /cm<sup>3</sup>]
- $D_c$ : Densidad de control del lodo, [ gr /cm<sup>3</sup>]

## 3. PRESIÓN INICIAL DE CIRCULACIÓN, PIC

Para establecer la circulación de un pozo donde se ha presentado un brote, es necesario que la presión inicial de circulación sea equivalente a la suma de las caídas de presión por fricción en el sistema y la presión hidrostática en TP.

La caída de presión por fricción en el sistema se refiere a la presión reducida, pre-registrada cuando se presentan las mismas condiciones de profundidad de la barrena, gastos y densidad del flujo en el momento del brote.

La presión hidrostática en TP es igual a la presión de cierre en TP estabilizada (PCTP), por lo que tenemos:

$$PIC = P_R + PCTP$$

Ec. 4.17

Donde:

- PIC: Presión inicial de circulación, [kg / cm<sup>2</sup>]
- P<sub>R</sub>: Presión reducida, [kg / cm<sup>2</sup>]
- PCTP: Presión al cerrar en TP, [kg / cm<sup>2</sup>]

Existe un método alternativo para conocer la PIC, se emplea bajo las siguientes condiciones:

- Cuando se utiliza una bomba diferente a las del equipo (unidad de alta presión).
- Cuando la profundidad de la barrena sea diferente a la profundidad donde se registro la P<sub>R</sub>.
- Cuando las condiciones de fluido de perforación haya sufrido un cambio sustancial.
- Cuando se requiera circular un gasto diferente a Q<sub>R</sub>.
- Para verificar el valor pre-registrado de P<sub>R</sub>.
- Cuando no se haya determinado de antemano la P<sub>R</sub>.

#### PROCEDIMIENTO

- a) Bombear lento, abriendo simultáneamente el estrangulador y manteniendo la presión en el anular igual a PCTR hasta alcanzar el gasto reducido de circulación.
  - b) Una vez alcanzado Q<sub>R</sub> y ajustando el estrangulador para mantener PCTR, permita que bajo estas condiciones la presión en TP se estabilice.
  - c) La presión de TP estabilizada será igual a la presión por fricción a las condiciones de gasto, densidad de lodo y profundidad de la barrena en ese momento.
-

#### 4. PRESIÓN FINAL DE CIRCULACIÓN, PFC

Cuando se utiliza un lodo con una densidad diferente a la original para controlar un brote y este se bombea a través de la sarta, se genera una mayor columna hidrostática por lo que se necesitara menor presión en la superficie para controlar la presión de formación. Y como ya sabemos, al tener un lodo más pesado las pérdidas de presión por fricción serán mayores, y será necesario una mayor presión en la bomba. Al parecer, estas dos condiciones se contraponen, para solucionar este problema se tiene que determinar la presión necesaria para circular el lodo cuando este ha llegado a la barrena o al extremo de la tubería, ya que la presión hidrostática que habría generado la columna de lodo será la suficiente para equilibrar la presión de formación (si la densidad de control es la correcta).

Esta presión es solo necesaria para circular el lodo con densidad de control de la barrena a la superficie (a gasto constante), se le llama presión final de circulación PFC y se calcula con la siguiente ecuación:

$$PFC = P_R \times \frac{D_c}{D_o} \quad \text{Ec. 4.18}$$

Donde:

- PIC: Presión inicial de circulación, [kg / cm<sup>2</sup>]
- P<sub>R</sub>: Presión reducida, [kg / cm<sup>2</sup>]
- D<sub>o</sub>: Densidad original del lodo, [ gr /cm<sup>3</sup>]
- D<sub>c</sub>: Densidad de control del lodo, [ gr /cm<sup>3</sup>]

#### CALCULOS COMPLEMENTARIOS

A continuación enunciaremos los parámetros complementarios para llevar a cabo el control del pozo de una forma adecuada, los cálculos son los siguientes:

1. Determinación del tipo de brote.
2. Cantidad de barita necesaria para densificar el lodo.
3. Incremento en el volumen de lodo por adición de barita.

## 1. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE BROTE

Los fluidos de la formación asociados con un brote son: aceite, agua, gas o una combinación entre ellos. Existen diferencias en el comportamiento de las presiones que van ligadas a un brote de aceite, agua o gas a medida que estos circulan.

Las presiones en TP y en TR, así como el aumento en el volumen de las presas (medidas con suficiente precisión), se emplean para estimar el tipo de brote mediante el cálculo de la densidad del fluido invasor, a través de la ecuación:

$$D_{fi} = D_o \times \left( \frac{10 \times (P_{CTR} - P_{CTP})}{L_b} \right) \quad \text{Ec. 4.19}$$

Donde:

- $D_{fi}$ : Densidad del fluido invasor, [gr / cm<sup>3</sup>]
- $D_o$ : Densidad original del lodo, [gr / cm<sup>3</sup>]
- $P_{CTP}$ : Presión al cerrar en TP, [kg /cm<sup>2</sup>]
- $P_{CTR}$ : Presión al cerrar en TR, [kg /cm<sup>2</sup>]
- $L_b$ : Longitud de la burbuja, [m]

DENSIDAD [gr / cm <sup>3</sup> ]	TIPO DE BROTE
$D_{fi} < 0.69$	GAS
$0.69 \leq D_{fi} \leq 0.92$	ACEITE CON ALGUNA CANTIDAD DE GAS
$0.92 < D_{fi}$	AGUA SALADA

Tabla 4-2. Tipos de brote.

Midiendo el incremento de volumen en las presas y con el factor de capacidad anular en la sección donde se estima está localizada la burbuja, la longitud se determina con la siguiente ecuación:

$$L_b[m] = \frac{\text{Incremento de volumen en presas [lt]}}{\text{Capacidad del espacio anular } \left[ \frac{\text{lt}}{\text{m}} \right]} \quad \text{Ec. 4.20}$$

Ya que obtenemos la longitud de la burbuja, calculamos la densidad del fluido invasor con la ecuación 4.19. En la siguiente tabla podemos determinar el tipo de brote que se presenta a partir de la densidad del fluido invasor.

## 2. CANTIDAD DE BARITA NECESARIA PARA DENSIFICAR EL LODO

Ya que se conoce la densidad del lodo de control, se necesita calcular la cantidad de barita para poder aumentar el peso del lodo hasta obtener la densidad requerida.

$$N_{SB} = \frac{85 \times (D_c - D_o)}{(4.15 - D_c)} \quad \text{Ec. 4.21}$$

Donde:

- Densidad de la Barita=4.15 [ gr /cm<sup>3</sup>]
- Do: Densidad original del lodo, [ gr /cm<sup>3</sup>]
- Dc: Densidad del lodo de control, [ gr /cm<sup>3</sup>]
- N<sub>SB</sub>: Numero de sacos de Barita, [scs / m<sup>3</sup>]

## 3. INCREMENTO EN EL VOLUMEN DE LODO POR ADICIÓN DE BARITA

Cuando se incrementa la densidad del lodo, también se estará incrementando su volumen. Es conveniente conocer este aumento de volumen antes de agregar el material densificante, con la finalidad de disponer la capacidad de almacenamiento suficiente. Dicho incremento se calcula a partir de la ecuación:

$$I_v = \frac{N_{SB} \text{ Totales}}{85} \quad \text{Ec. 4.22}$$

Donde:

- I<sub>v</sub>: Incremento de volumen, [m<sup>3</sup>]
- N<sub>SB</sub>: Numero de sacos de Barita, [scs / m<sup>3</sup>]

#### 4.4 MÉTODO DEL PERFORADOR

En el método del perforador, el influjo se circula hacia fuera del agujero usando el lodo existente. El peso del lodo se eleva hasta el nivel requerido y se circula alrededor del pozo. Para este método se requiere mucha experiencia de la persona que estará controlando el estrangulador.

Se requieren dos circulaciones completas como mínimo para este método. Dado que se realizan por separado la circulación del influjo y densificar el lodo, este es considerado el método de control de pozos más simple y el que requiere menos cálculos matemáticos. Sin embargo, esto da lugar, a circular bajo presión por un tiempo relativamente largo, posiblemente el más largo de los tres métodos, con una posibilidad creciente de problemas de estrangulación. También, las presiones anulares producidas durante la primera circulación son más altas que las producidas con cualquier otro método.

Se debe tener especial precaución con este método ya que las presiones anulares son muy altas cuando se presenta un influjo de gas. La presión anular podría ser mayor inmediatamente al llegar a superficie. Este método se hizo el más apropiado para el control de pozos durante la perforación de pozos críticos, así como durante la perforación en aguas profundas. También se recomienda para pozos altamente desviados y para pozos horizontales donde los influjos se pueden presentar por la presión de suaveo. En general el método del perforador se hace útil cuando la información disponible del pozo es limitada.

#### VENTAJAS DEL MÉTODO DEL PERFORADOR<sup>6</sup>

- Mínimo tiempo de espera, se puede comenzar el control inmediatamente.
- El influjo puede ser circulado desde el pozo.

#### DESVENTAJAS DEL MÉTODO DEL PERFORADOR<sup>7</sup>

- Se producen altas presiones en superficie.

- El pozo se encuentra más tiempo bajo presión. En teoría: mientras se realizan las dos circulaciones.
- Mucho tiempo de estrangulamiento.

## PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO DEL PERFORADOR<sup>8</sup>

### Primera Circulación (con densidad original)

1. Registre presiones estabilizadas en TP y TR.
2. Lentamente inicie el bombeo y abra el estrangulador para alcanzar el régimen reducido y la presión que se observó al cierre en TR.
3. Obtenido lo anterior registre la presión en la TP.
4. Mantenga ésta presión en la TP constante, manipulando el estrangulador hasta evacuar el brote. Si el pozo lo permite maneje un margen de seguridad de 0 a 100 [psi].
5. Después de evacuar el brote, simultáneamente cierre el pozo y pare el bombeo. El pozo deberá quedar con presiones iguales en TP y TR. Estas presiones también deberán ser iguales como mínimo a la registrada al cierre estabilizada de TP. Ahora el pozo está bajo control pero no muerto.

NOTA 1: El objetivo de circular el lodo hacia el pozo, es balancear la presión de formación. El lodo debe tener el peso más bajo posible para controlar al pozo. Una vez controlado el pozo, será necesario aumentar la densidad del lodo para proporcionar un mejor margen de seguridad.

NOTA 2: Algunos operadores prefieren continuar circulando el pozo mientras que el lodo de control se mezcla. No hay una razón teórica por lo que esto no se deba hacer, aunque esto puede provocar un desgaste adicional al equipo, principalmente al estrangulador.

### Segunda Circulación (con densidad de control)

1. Las presiones en TP y TR deberán ser iguales.

2. Lentamente inicie el bombeo y abra el estrangulador para alcanzar el régimen reducido y la presión observada en TR. Mantenga esta situación hasta que el lodo de control llegue a la barrena, operando el estrangulador.
3. Al llegar el lodo de control a la barrena se registre la presión observada en la TP, ahora ésta presión es la que se debe mantener hasta que el lodo de control llegue a la superficie.
4. Pare la bomba y verifique el flujo.
5. Si no hay flujo, usted ha controlado totalmente el pozo.

NOTA: Si el influjo era gas y si no fue removido en su totalidad en la primera circulación, la opción de mantener constante la presión en la TR podría llevar a presiones anulares más altas.

En la siguiente imagen se observa el comportamiento del método del perforador a partir del modelo del tubo en U<sup>9</sup>.

La presión en la tubería de perforación bajara conforme se vaya llenando con el lodo más pesado. En la práctica, si todo el influjo fue removido correctamente en la primera circulación, el estrangulador no necesita ser tocado hasta que el lodo de control alcance la barrena.

Una vez que el lodo llega a la barrena, la presión que se mantiene en la tubería de perforación es solo la requerida para circular el lodo de control alrededor del pozo. Esta es la presión reducida de circulación  $P_R$ , que se incrementa un poco por el peso extra en el lodo.

De la siguiente figura:

- PCTP: Presión al cierre en la tubería de perforación
- PCTR: Presión al cierre en la tubería de revestimiento
- PIC: Presión inicial de circulación
- PTR: Presión en la tubería de revestimiento
- PTP: Presión en la tubería de perforación
- PFC: Presión final de circulación

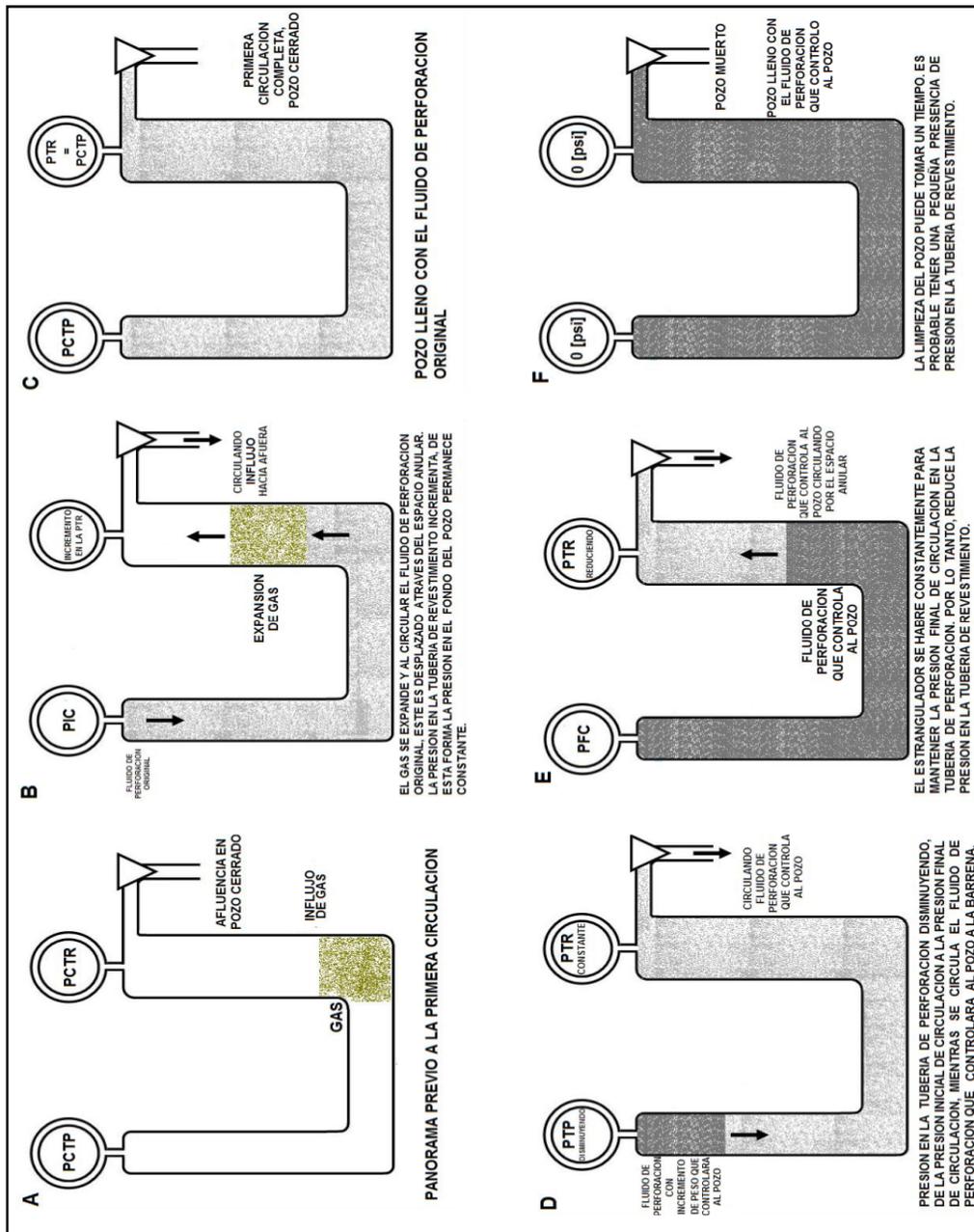


Figura 4-7. Método del perforador analizado a partir del modelo del tubo en U.

La presión en la tubería de perforación comienza a caer debajo de la PIC, alcanzando la presión final de circulación PFC, cuando el lodo de control alcanza la barrena. Después de eso la presión en la tubería de perforación se mantiene en la presión final de circulación la cual es controlada por medio del estrangulador, así el lodo de control llega hasta el espacio anular.

Debido a la posibilidad de que espacio anular no quede totalmente limpio, durante la primera circulación, es preferible que la presión en la tubería de perforación se esté variando mientras el lodo de control se bombea alrededor del pozo. Esto permitirá que la presión de la tubería de perforación elimine la posibilidad de que queden pequeñas burbujas de gas en el anular lo cual puede generar que la información sea incorrecta.

En la figura 4-8, podemos observar dos graficas en las cuales se representan las variaciones de presión durante la circulación del pozo.

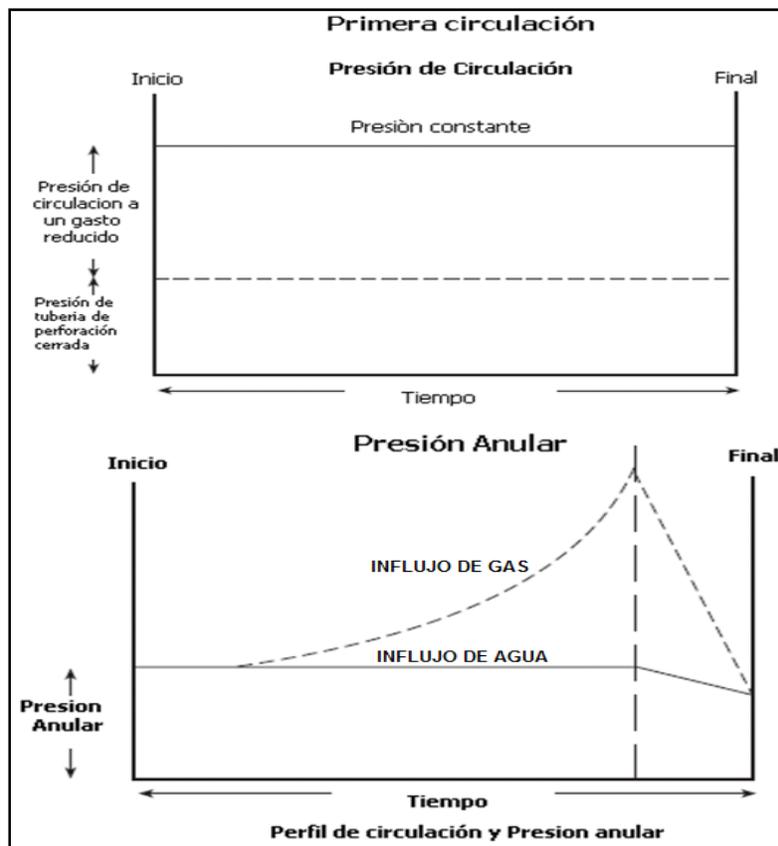


Figura 4-8. Método del perforador, primera circulación<sup>10</sup>

En la primera grafica observamos que la presión de circulación con gasto reducido y la presión registrada al cierre en la TP, se mantienen constantes durante toda la circulación. En la segunda imagen observamos el comportamiento de presión en el espacio anular de dos tipos de influjos. En el caso del gas observamos un incremento notable de presión, esto se debe a la expansión del mismo. Antes de finalizar la circulación, la presión por

presencia de gas baja notablemente, esto se debe a que en ese momento el gas comienza a ser desalojado del pozo. En el caso del agua, la presión que genero en el espacio anular se mantiene constante y baja en el momento que empieza a desalojar el pozo.

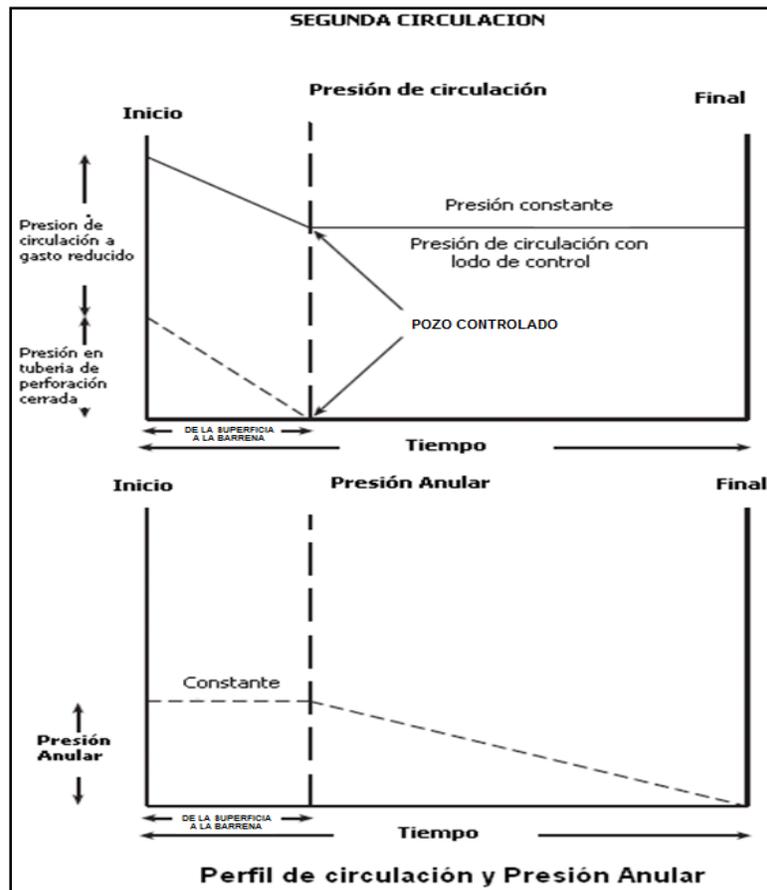


Figura 4-9. Método del perforador, segunda circulación.<sup>11</sup>

ADVERTENCIA: La existencia de un gasto predeterminado de control da al personal del equipo una impresión de que se debe circular a ese gasto exclusivamente por lo que se sugiere un procedimiento para evitar problemas posteriores.

Este procedimiento consiste en:

1. Observación de la lectura de la presión en TR.
2. Ajuste de las bombas al nuevo gasto de control. Ajustar el estrangulador para mantener la presión en TR observada.

3. Tan pronto como el perforador tenga las bombas preparadas para el nuevo gasto, checar la presión en la TP.
4. Compruebe el tamaño del orificio del estrangulador, en relación con el gasto de control.

NOTA: Este procedimiento es satisfactorio durante el control que proporciona el lodo de control en la columna. Sin embargo es preferible mantener constante el gasto de las bombas el mayor tiempo posible. Cualquier decisión para cambiar el gasto de la bomba debe tomarse con anticipación o de forma temprana.

#### 4.5 MÉTODO DE DENSIFICAR Y ESPERAR O MÉTODO DEL INGENIERO

El método de densificar y esperar también es conocido como el método del ingeniero o el método de una circulación. Este método, en teoría, mata al pozo durante una circulación. En la siguiente imagen<sup>12</sup>, figura 4-10, podemos visualizar el método del ingeniero basándonos en el modelo del tubo en U, de esta forma podemos analizar paso a paso el comportamiento de este método.

Una vez que se cerró el pozo y se estabilizaron las presiones, la presión registrada al cerrar la tubería de perforación es utilizada para calcular la densidad del fluido de perforación para matar el pozo. El procedimiento de incrementar la densidad del fluido de perforación se realiza en las presas del mismo. Cuando está listo, el fluido de perforación que controlara al pozo es bombeado a la tubería de perforación. Al comenzar el proceso, debemos aplicar una presión suficiente en la tubería de perforación para poder hacer circular el fluido de perforación, además, debemos considerar la presión con la cual cerraremos la tubería de perforación. Esta presión disminuye constantemente hasta que el fluido de perforación llega a la barrena. La presión requerida es simplemente la necesaria para bombear el fluido de perforación que controlara al pozo.

De la siguiente figura:

- PCTP: Presión al cierre en la tubería de perforación
  - PCTR: Presión al cierre en la tubería de revestimiento
-

- PIC: Presión inicial de circulación
- PTR: Presión en la tubería de revestimiento
- PTP: Presión en la tubería de perforación
- PFC: Presión final de circulación

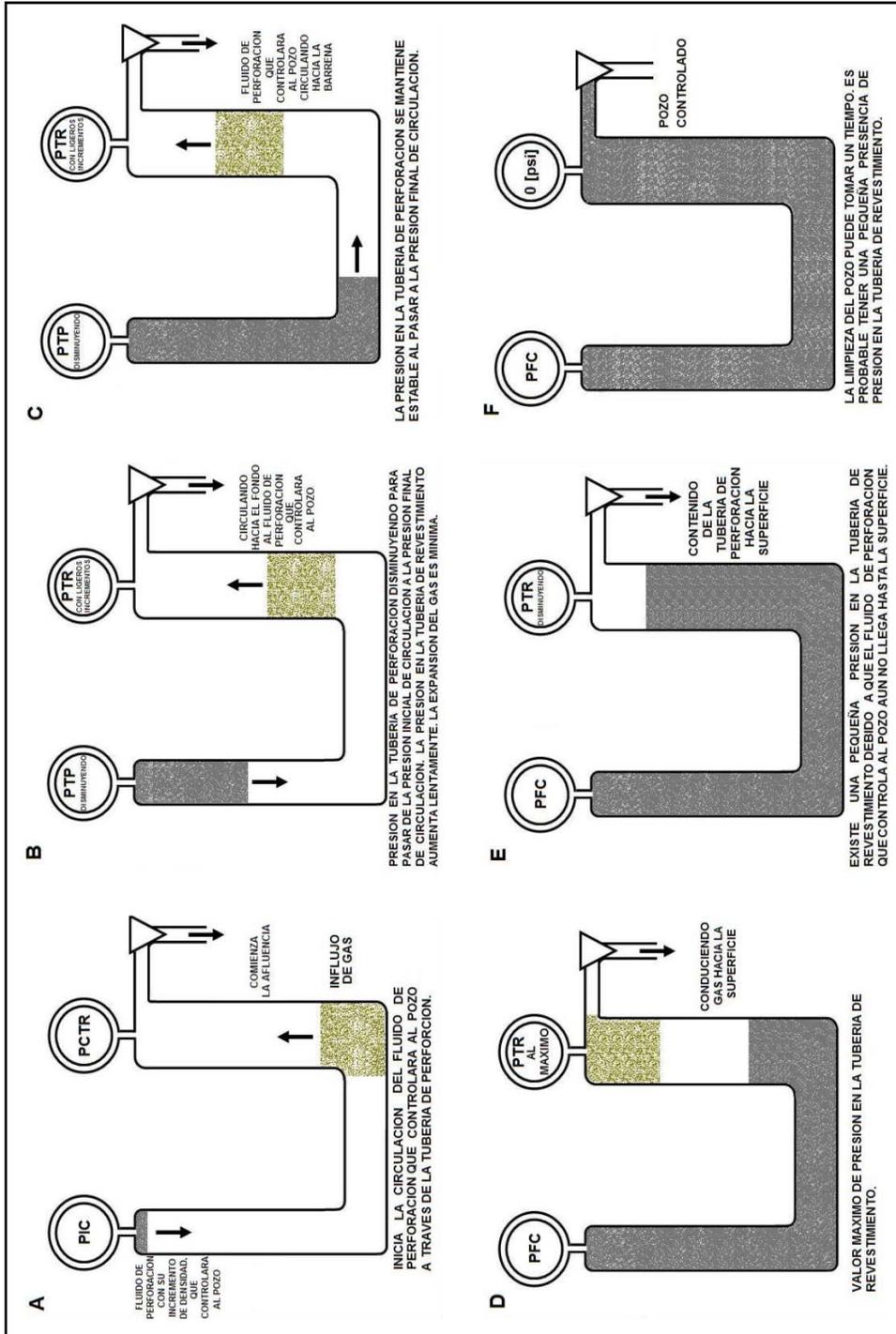


Figura 4-10. Método de densificar y esperar o método del ingeniero analizado a partir del modelo del tubo en U.

El estrangulador se ajusta para reducir la presión de la tubería de perforación mientras que el fluido de perforación es bombeado a la sarta de perforación. Con el fluido de perforación en la barrena y la cabeza estática, el fluido en la tubería de perforación equilibra la presión de formación. Para el resto de la circulación, la afluencia es bombeada a la superficie, seguido del contenido en la tubería de perforación. La presión de la tubería de perforación se ajusta al final circulando presión por el estrangulador ajustado.

El método de densificar o darle peso al fluido de perforación y esperar es un método clásico para el control de pozos. Como su nombre lo indica, el pozo es cerrado mientras se incrementa la densidad con la cual se mata al mismo. Por lo tanto, en este método se incrementa la densidad del fluido de perforación y se bombea, mientras el fluido se está bombeado el gas es desplazado. El resultado de este método es que con una sola circulación y un lapso de espera se mata al pozo. La principal diferencia entre este método y el método del perforador es que para el método del perforador se requiere circular el fluido de perforación en dos ocasiones mientras que el método de densificar y esperar solo se circula en una ocasión.

Anteriormente el proceso de incrementar el peso o densidad del fluido de perforación era muy lento, durante este tiempo, frecuentemente, el gas migraba y se adhería a la tubería de perforación. Hoy en día los equipos utilizados para realizar la mezcla del fluido de perforación han optimizado el factor tiempo en cuanto a incrementar la densidad del fluido de perforación. Los equipos pueden incrementar la densidad en el equipo superficial tan rápido como es bombeado, prácticamente de forma inmediata.

El método de densificar y esperar es un método complicado pero ofrece algunas ventajas distintivas. En primer lugar, optimiza casi en un 50 % el tiempo para matar al pozo. Los nuevos equipos para mezclar el fluido de perforación permiten mezclar la barita a velocidades de hasta 600 sacos por hora. Por lo tanto el tiempo requerido para incrementar la densidad del fluido de perforación es mínimo, esto implica reducir al mínimo el tiempo para matar al pozo.

#### **VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE DENSIFICAR Y ESPERAR<sup>13</sup>**

---

**Ventajas**

- Baja presión de superficie, esto implica menor esfuerzo del equipo.
- En teoría: Menor tiempo de circulación con el estrangulador abierto.
- Menor presión del pozo una vez que el fluido de perforación circula a través del espacio anular.
- En una sección larga de pozo abierto, este es el método menos probable para inducir pérdida de circulación.
- Este método requiere una circulación menos que el método de perforador.

**Desventajas**

- Existe un considerable tiempo de espera, esto implica migración de gas.
- Hay que recurrir al método volumétrico para compensar el efecto de la migración de gas.
- Si se requiere un gran aumento de densidad del fluido de perforación, es difícil de realizarse de manera uniforme en una etapa.

**PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO DE DENSIFICAR Y ESPERAR<sup>14</sup>**

1. Abra el estrangulador y simultáneamente inicie el bombeo del lodo con densidad de control a un gasto reducido (QR).
2. Ajustando el estrangulador, iguale la presión en el espacio anular a la presión de cierre de la tubería de revestimiento (PCTR).
3. Mantenga la presión en el espacio anular constante, con ayuda del estrangulador, hasta que la densidad de control llegue a la barrena.
4. Cuando el lodo de control llegue a la barrena, lea y registre la presión en la tubería de perforación.
5. Mantenga constante el valor de presión en la tubería de perforación, auxiliándose del estrangulador; si la presión se incrementa, abra el estrangulador; si disminuye, ciérrelo.

6. Continúe circulando manteniendo la presión en la tubería de perforación constante, hasta que el lodo de control llegue a la superficie.
7. Suspnda el bombeo y cierre el pozo.
8. Lea y registre las presiones en las tuberías de perforación y de revestimiento.
9. Si las presiones son iguales a cero, el pozo estará bajo control. Si las presiones son iguales entre sí, pero mayores a cero, la densidad del lodo bombeado no fue la suficiente para controlar el pozo, por lo que se deberá repetir el procedimiento con base en las presiones registradas. Si la presión en tubería de perforación es igual a cero, pero en tubería de revestimiento se registra alguna presión, será indicativo que no se ha desplazado totalmente el espacio anular con densidad de control (o que hubo ingreso adicional de fluidos de la formación al pozo).

## DESCRIPCIÓN

Una vez que el lodo esté preparado con la densidad de control y se comience a bombear a un gasto reducido de circulación, la presión que se registre en la tubería de perforación, sólo al momento de igualarla en el espacio anular con la presión de cierre en tubería de revestimiento (PCTR), será similar a la inicial de circulación (PIC).

Al bombear lodo con la densidad de control a través de la sarta de perforación, se observará disminución paulatina en la presión de la tubería de perforación, hasta un valor llamado presión final de circulación (PFC), que será cuando la densidad de control llegue a la barrena. Entonces se observará que el abatimiento de presión en tubería de perforación será similar al calculado en la cédula de bombeo.

Una vez que el lodo de control ha llegado a la barrena, la PFC deberá mantenerse constante durante el viaje del lodo, con densidad de control a la superficie (ajustando el estrangulador).

Cuando salga el lodo con densidad de control a la superficie, la presión en el espacio anular deberá ser cero. Para observar si no hay flujo, se deberá suspender el bombeo; si no lo hay, el pozo estará bajo control.

---

Cuándo se haga presente el efecto de la expansión del gas cerca de la superficie, la declinación en la presión de la tubería de revestimiento cesará y empezará a incrementarse hasta alcanzar su máxima presión, la cual ocurrirá cuando la burbuja de gas llegue a la superficie. Durante la salida de la burbuja, se observará disminución en la presión de la tubería de revestimiento, originada por la súbita expansión de la misma.

Se recomienda cerrar ligeramente el estrangulador, ya que de esta forma no se permite la disminución excesiva de presión en el espacio anular, puesto que se tendría un volumen equivalente a la capacidad de la tubería de perforación con densidad original.

A medida que se circula el lodo con densidad de control, la presión en la tubería de revestimiento continuará disminuyendo con menor rapidez hasta llegar casi a cero (cuando el lodo con densidad de control salga a la superficie), donde el estrangulador deberá estar totalmente abierto y esta presión solo será igual a las pérdidas por fricción en las líneas y el múltiple estrangulación.

Si al haber circulado completamente el lodo de control y suspendido el bombeo, las presiones en las tuberías de perforación y de revestimiento no son iguales a cero, se deberá a alguna de las razones siguientes:

- a) La densidad de control no es la suficiente para controlar el pozo.
- b) Se tendrá un brote adicional en el espacio anular, causado por permitir que la presión disminuyera al estar circulando el brote.

Para comprobar que esta presión no es producida por fluidos entrampados cerca de la superficie, se deberá purgar el pozo con una pequeña cantidad de flujo que no exceda el medio barril; si con este purgado no se observa una disminución de presión, se deberá aumentar la densidad del lodo, para lo cual se debe tomar en cuenta las nuevas presiones de cierre registradas en las tuberías de perforación y de revestimiento, circulando el brote en la forma ya indicada.

En la figura 4-11, podemos observar dos graficas en las cuales se muestra el comportamiento de la presión de circulación y la presión en el espacio anular durante el método del ingeniero.

---

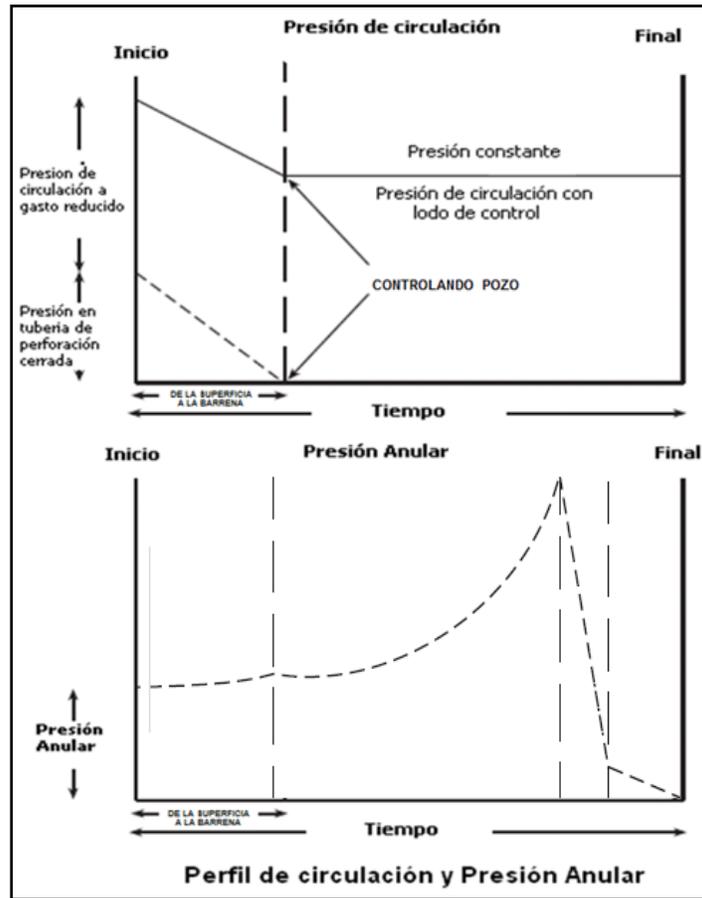


Figura 4-11. Comportamientos de presión del método del ingeniero.<sup>15</sup>

En la primer grafica, observamos que la presión registrada al cerrar en TP es menor que la presión de circulación. Ambas tienen una caída de presión considerable al circular de la superficie hacia el fondo del pozo, a través de la TP. En cuanto la circulación deja la barrena y comienza a desplazarse a través del espacio anular, la presión se mantiene constante.

En la segunda grafica observamos el comportamiento de presión en el espacio anular. Primero se observa una presión casi constante pero con una ligera tendencia a incrementarse, esto sucede al circular de la superficie al fondo del pozo. Cuando la circulación comienza en el espacio anular, se observan notables cambios en la presión. Primero hay un incremento notable el cual se debe a la expansión de gas dentro del pozo. En cuanto el gas comienza a desalojar el pozo la presión en el espacio anular baja

---

notablemente hasta llegar a un punto donde los decrementos de presión son más pequeños.

#### **4.6 MÉTODO CONCURRENTES<sup>16</sup>**

Si queremos utilizar este método para el control de un flujo, se inicia la circulación con la PIC (presión inicial de circulación) y se empieza a adicionar barita al sistema de lodos hasta alcanzar la densidad de control. Lo que significa que aumentamos la densidad del lodo mientras circulamos. El método aplica un incremento gradual en la densidad del lodo hasta que el flujo es desalojado a la superficie, por lo cual requeriría varias circulaciones hasta completar el control del pozo.

#### **PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO CONCURRENTES**

1. Registrar las presiones en la tubería y en el espacio anular (PCTP y PCTR).
2. Iniciar el control a una presión reducida de circulación y mantener PIC constante, hasta totalizar las emboladas necesarias del interior de la sarta de perforación hasta la barrena.
3. El operador del estrangulador debe controlar y registrar las emboladas de la bomba y graficar en una tabla la nueva densidad a medida que se va densificando.
4. Cuando llegue a la barrena, se determina circular un fluido más denso hasta el fondo del pozo; registrando todas las variaciones de densidad del fluido para ajustar las presiones en las tuberías.
5. Al llegar hasta la barrena el lodo con densidad calculada, se tiene la PFC, por lo que se deberá mantener constante la presión hasta que el lodo densificado salga a superficie.

#### **DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO**

- Su premisa consiste en que puede utilizarse una vez registradas las presiones de cierre.

- Puede aplicarse al tener calculadas las máximas presiones permisibles en el espacio anular (TR), resistencia al fracturamiento de la formación y en las conexiones superficiales de control.
- Hay un mínimo de retraso de tiempo para iniciar la circulación.
- Es el método más usado cuando el incremento a la densidad es elevado y requerido.
- Las condiciones de viscosidad y gelatinosidad del lodo pueden controlarse.
- Hay menor presión a la salida de la TR durante el control, en relación con el método del perforador.
- El número de circulaciones requeridas será en función del aumento en el peso del lodo, el volumen activo y condiciones del fluido en el sistema; así como la capacidad de los accesorios y equipos de agitación y mezclado.

#### **DESVENTAJAS QUE AFECTAN SU APLICACIÓN**

- a) Los cálculos requeridos para mantener la presión de fondo constante son más complejos en relación a los métodos del perforador y de densificar y esperar.
- b) Se requiere mayor tiempo de circulación durante la etapa de control.
- c) La presión de superficie en la TR y la densidad equivalente del lodo, desde la zapata son elevadas en relación a los otros métodos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Petróleos Mexicanos. Pemex Exploración y Producción. **Un Siglo de la Perforación en México. Tomo 13 - Control de Brotes.**
2. Grace Robert D. with contributions by: Bob Cudd, Richards S. Carden and Jerald L. Shursen. **Blowout and Well Control Handbook.** Gulf Professional Publishing Company. 2003.
3. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
4. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
5. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
6. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
7. Enterprise Oil. **Well Control Manual.** 2001. October revision.
8. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
9. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
10. Enterprise Oil. **Well Control Manual.** 2001. October revision.
11. Enterprise Oil. **Well Control Manual.** 2001. October revision.
12. Enterprise Oil. **Well Control Manual.** 2001. October revision.
13. Schlumberger. **Well Control Manual.** 1999 Revision 0.
14. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
15. Enterprise Oil. **Well Control Manual.** 2001. October revision.
16. Petróleos Mexicanos. Pemex Exploración y Producción. **Un Siglo de la Perforación en México. Tomo 13 - Control de Brotes.**