



30
2 ej

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**Método Dinámico y su Aplicación para el
Control de Pozos Descontrolados en
Localizaciones Terrestres.**

T E S I S

que para obtener el Título de:
Ingeniero Petrolero
P r e s e n t a :
MAURICIO SASTRE ORTIZ

México, D. F

Junio 1991

FALLA DE ORIGEN



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 |
|---|--------|
| INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO 1 | |
| CAUSAS E INDICADORES DE BROTES Y EQUIPO PARA SU DETECCION | 2 |
| 1.1. Causas de los brotes | 3 |
| 1.1.1. Densidad insuficiente del lodo | 4 |
| 1.1.2. Llenado inadecuado del agujero durante los viajes | 4 |
| 1.1.3. Efecto de sondeo del pozo al sacar la tubería demasiado rápido | 5 |
| 1.1.4. Lodo contaminado | 7 |
| 1.1.4.1. Lodo contaminado por gas | 7 |
| 1.1.4.2. Lodo contaminado por agua salada | 8 |
| 1.1.5. Pérdidas de circulación | 10 |
| 1.2. Indicadores de un brote | 10 |
| 1.2.1. Indicadores de un brote mientras se está perforando | 16 |
| 1.2.2. Indicadores de un brote durante las conexiones | 17 |
| 1.2.3. Indicadores de un brote mientras se efectúa un viaje | 17 |
| 1.3. Equipo de detección | 19 |
| 1.3.1. Equipo normal | 19 |
| 1.3.2. Equipo especial | 25 |
| 1.3.3. Localización de instrumentos | 26 |

CAPITULO 2

| | |
|---|----|
| DESCONTROL E INCENDIO DE UN POZO | 27 |
| 2.1. Descontrol de un pozo | 28 |
| 2.1.1. Causas que originan un descontrol | 28 |
| 2.1.1.1. Instalación defectuosa del equipo superficial de control | 28 |
| 2.1.1.2. Insuficiencia de capacidad o número de preventores | 29 |
| 2.1.2. Tipos de descontrol | 29 |
| 2.2. Incendio de un pozo | 30 |
| 2.2.1. Incendios de aceite crudo | 30 |
| 2.2.1.1. Mecánica de ignición de un aceite crudo | 30 |
| 2.2.1.2. Materiales inflamables y materiales combustibles | 31 |
| 2.2.1.3. El triángulo de un incendio | 31 |
| 2.2.1.4. Reducción de los volúmenes de la mezcla vapor-aire | 33 |
| 2.2.1.5. Propagación de la flama | 34 |
| 2.2.1.6. Fuentes de ignición | 34 |
| 2.2.1.7. El calor como fuente de ignición y de partículas calientes | 35 |
| 2.2.1.8. Las chispas eléctricas como una fuente de ignición | 35 |
| 2.2.1.9. Impactos que originan chispas | 36 |
| 2.2.1.10. El agua como una fuente de ignición | 37 |
| 2.2.1.11. Confinamiento de un incendio | 38 |
| 2.2.2. Incendios de gas | 38 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 2.2.2.1. Composición del gas natural | 38 |
| 2.2.2.2. Propiedades del metano | 39 |

CAPITULO 3

| | |
|--|----|
| CONTROL DE UN POZO MEDIANTE LA INSTALACION DEL EQUIPO SUPERFICIAL DE CONTROL ("TAPPING") | 42 |
| 3.1. Suministro y manejo del agua | 43 |
| 3.1.1. Fuentes de agua | 43 |
| 3.1.2. Factores de planeación | 43 |
| 3.1.3. Aspectos importantes en el manejo del equipo de bombeo | 46 |
| 3.1.4. Bases para sostener el equipo de bombeo | 46 |
| 3.1.5. Escudos protectores contra el calor | 47 |
| 3.1.6. Rutas de las tuberías de agua | 48 |
| 3.1.7. Distribución de los monitores de agua | 49 |
| 3.1.8. Factores de utilización de agua | 52 |
| 3.2. Retiro del equipo de perforación dañado | 53 |
| 3.2.1. Monitoreo de atmósferas tóxicas o asfixiantes | 53 |
| 3.2.2. Formación de cuadrillas de trabajo | 53 |
| 3.2.3. Sistemas de comunicación | 54 |
| 3.2.4. Disposición del puesto de emergencia para primeros auxilios | 54 |
| 3.2.5. Utilización de equipos de protección para el personal | 54 |
| 3.2.6. Retiro de equipo sin protección de agua | 55 |
| 3.2.7. Utilización de tractores para el retiro del equipo | 55 |
| 3.2.8. Utilización del equipo de rescate con gancho | 55 |
| 3.2.9. Acondicionamiento del terreno para facilitar el retiro de equipo | 58 |
| 3.2.10. Maniobras para recuperar la subestructura del equipo | 58 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 3.2.10.1. | Recuperación de la subestructura por bloques | 59 |
| 3.2.10.2. | Recuperación de la subestructura por secciones | 59 |
| 3.2.11. | Utilización de equipos de corte de oxiacetileno | 59 |
| 3.2.12. | Utilización de dispositivos anti-chispa en el equipo motorizado | 61 |
| 3.2.13. | Monitoreo de atmósferas explosivas | 61 |
| 3.2.14. | Desplazamiento total del equipo de perforación | 62 |
| 3.3. | Extinción del fuego de un pozo incendiado | 62 |
| 3.3.1. | Acondicionamiento de la localización | 62 |
| 3.3.2. | Formulación de un programa completo para sofocar el fuego | 62 |
| 3.3.2.1. | Extinción del fuego mediante la aplicación de agua | 62 |
| 3.3.2.2. | Extinción del fuego mediante la aplicación de nitrógeno y polvo químico seco | 63 |
| 3.4. | Instalación del equipo superficial de control | 63 |
| 3.4.1. | Dimensiones del equipo superficial de control | 63 |
| 3.4.2. | Construcción de una fosa de trabajo alrededor del pozo | 63 |
| 3.4.3. | Utilización de unidades tractorperforadoras (tracdril) | 65 |
| 3.4.4. | Instalación del cabezal de estrangulación | 65 |
| 3.4.5. | Achique de la fosa de trabajo | 66 |
| 3.4.6. | Cortes de las tuberías de revestimiento | 66 |
| 3.4.7. | Revisión de la excentricidad de la tubería de revestimiento | 66 |
| 3.4.8. | Simulacros de la colocación del equipo superficial de control | 66 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.4.9. | Extinción del fuego | 67 |
| 3.4.10. | Instalación del equipo superficial de control | 67 |
| 3.4.11. | Posible reignición de los gases del pozo | 69 |
| 3.4.12. | Soldado del cabezal de control instalado | 69 |
| 3.5. | Control del pozo | 69 |
| 3.5.1. | Control del flujo | 69 |
| 3.5.2. | Control del pozo | 71 |
| 3.5.3. | Perforación de un pozo de alivio | 72 |

CAPITULO 4

| | | |
|---|---|----|
| CONTROL DE UN POZO MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DINAMICO | | 73 |
| 4.1. | El pozo de alivio | 75 |
| 4.1.1. | Factores criticos | 75 |
| 4.1.2. | Localización del pozo de alivio | 77 |
| 4.1.2.1. | El registro ELREC | 79 |
| 4.1.2.2. | La herramienta Magrange | 80 |
| 4.1.3. | El cono de incertidumbre | 82 |
| 4.1.4. | Planeación del pozo de alivio | 85 |
| 4.2. | Método dinámico | 88 |
| 4.2.1. | Parámetros de diseño | 91 |
| 4.3. | Ejemplo de aplicación | 93 |
| 4.3.1. | Capacidad de flujo del pozo descontrolado | 93 |
| 4.3.1.1. | Gasto máximo | 93 |
| 4.3.1.2. | Gasto del descontrol | 95 |

| | |
|--|-----|
| 4.3.2. Fluido inicial de control | 98 |
| 4.3.2.1. Fluido ideal | 99 |
| 4.3.2.2. Gasto para el control dinámico del pozo C-II-2 del Campo Arun | 103 |
| 4.3.3. Dimensiones del pozo de alivio | 104 |
| 4.3.4. Requerimientos de potencia para el bombeo | 107 |
| 4.3.5. Máxima presión de fondo del agujero permisible para evitar que la tubería de perforación sea arrojada del agujero descontrolado | 108 |
| 4.4. Procedimiento de una operación de control dinámico | 110 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 112 |
| APENDICES | 115 |
| Apéndice A | 116 |
| Apéndice B | 121 |
| Apéndice C | 127 |
| Apéndice D | 138 |
| NOMENCLATURA | 153 |
| BIBLIOGRAFIA | 155 |

INTRODUCCION

El control de pozos y la prevención de reventones ha llegado a ser por varios aspectos, un tema de particular importancia en la industria petrolera. Entre otros podemos citar:

- La pérdida de vidas humanas
- La contaminación del medio ambiente
- La destrucción de recursos naturales
- Los altos costos de perforación

Por lo anterior, es importante y necesario que el personal que trabaja en un equipo de perforación comprenda los principios y procedimientos que deben seguirse para controlar apropiadamente un reventón.

Un brote puede ser definido como un desequilibrio de presiones, en el cual, la presión de la formación atravesada es mayor que la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo sobre el fondo del agujero o la cara de la roca. Cuando esto ocurre, la presión de poro introduce fluidos de la formación hacia el interior del pozo. A este flujo se le llama comunmente brote. Si el flujo se maneja adecuadamente, y se reduce a cero se dice que ha sido controlado. Un reventón es el resultado de un brote no controlado.

El propósito del presente trabajo es exponer de manera general uno de los problemas que en potencia más afectan a la posible explotación de los yacimientos, como lo es el "descontrol y control de pozos petroleros en localizaciones terrestres durante la perforación", así como la aplicación del "método del control dinámico" como una posible solución.

CAPITULO 1

CAUSAS E INDICADORES DE BROTES Y EQUIPO PARA SU DETECCION

El personal operativo se enfrenta día tras día con los diversos problemas involucrados en la perforación de pozos, entre éstos se encuentran las pérdidas de circulación, pegaduras de tuberías, el control de desviaciones y el control de pozos.

La severidad de un brote depende entre otros factores de la permeabilidad y porosidad de la formación, así como de la diferencia de presión entre la presión del fluido de la formación y la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo.

Una consideración importante adicional en el control de pozos, es la presión que la formación puede soportar sin que se fracture. La medida de resistencia de la formación al rompimiento de su estructura es comúnmente llamado gradiente de fractura, el cual se expresa generalmente como densidad equivalente de lodo.

Un brote se clasifica de diversas maneras, una clasificación depende del tipo de fluido de la formación que entró al pozo. Los brotes conocidos incluyen los de gas, aceite, agua salada, aguas con cloruro de magnesio, gas sulfhídrico y bióxido de carbono, además de una posible combinación de algunos de ellos. Si entró gas al agujero, el brote se llamará "brote de gas".

Otro método para clasificar a los brotes es el del incremento de la densidad del lodo requerido para controlar el pozo y evitar un reventón potencial. Por ejemplo, si un brote requirió un incremento de 0.08 gr/cm^3 , en la densidad del lodo para controlar el pozo, el brote debe llamarse "brote de 0.08 gr/cm^3 ".

1.1. Causas de los brotes

Los brotes ocurren como resultado de que la presión de formación es mayor que la hidrostática, lo cual origina que los fluidos fluyan de la formación al agujero. En casi todas las operaciones de perforación se intenta mantener una presión hidrostática mayor que la de la formación y, por lo tanto, prevenir brotes.

Sin embargo, en ocasiones, por diversas causas, la presión de formación excederá a la presión hidrostática ejercida por el lodo y ocurrirá un brote, siendo dichas causas las siguientes:

- Densidad insuficiente del lodo
- Llenado inadecuado del agujero durante los viajes
- Efecto de sondeo del pozo al sacar la tubería demasiado rápido
- Lodo contaminado
- Pérdidas de circulación

1.1.1. Densidad insuficiente del lodo

Esta es una de las causas principales para que se presente un brote. En este caso, cuando se perfora una zona permeable, la presión ejercida por la columna de lodo es menor que la presión de poro, como resultado de esto, los fluidos invaden el agujero y consecuentemente se tiene un brote. Las presiones anormales de formación, frecuentemente se encuentran asociadas a esta causa.

Los brotes causados por densidad insuficiente de lodo pudieran parecer tener la solución obvia de perforar con densidades de lodo altas; sin embargo, esto no es recomendable por varias razones:

- Se puede exceder el gradiente de fractura de la formación e inducir una pérdida de circulación.
- Se incrementa el riesgo de tener pegaduras de tubería por presión diferencial.
- Se reduce significativamente la velocidad de penetración.

Por lo tanto, la mejor solución será mantener la presión hidrostática ejercida por el lodo, ligeramente mayor que la presión de formación, hasta el valor en que la densidad del lodo se acerque al gradiente de fractura; requiriéndose una sarta de tubería de revestimiento.

1.1.2. Llenado inadecuado del agujero durante los viajes

El llenado incorrecto del agujero durante los viajes, es otra causa determinante de los brotes. Al sacar la tubería de perforación, el nivel del lodo en el pozo disminuye debido al

volumen de acero que ha sido extraído y que deberá ser reemplazado por lodo. Pero si conforme se extrae la tubería, el pozo no es llenado, la presión hidrostática puede reducirse tanto que sea menor que la presión de poro, provocándose así el brote. Esto es más crítico cuando se saca la herramienta (de mayor desplazamiento), como es el caso de los lastrarrenas y la tubería pesada. De lo anterior se deduce la vital importancia de llenar el pozo periódicamente, evitando con esto un posible brote.

De acuerdo con la experiencia obtenida del campo al estar sacando la tubería, debe llenarse el espacio anular con lodo antes de que la presión hidrostática de la columna de lodo disminuya 5 kg/cm² o cada 5 lingadas de tubería de perforación, lo que de un decremento menor en la presión hidrostática.

Esto implica que se debe indicar al perforador, el número de lingadas de tubería de perforación o lastrarrenas que puedan sacarse del pozo antes de llenar nuevamente el espacio anular, así como el volumen de lodo requerido para llenar el pozo cada vez que se realice un viaje de tubería. Para facilitar esta tarea se anexan las tablas correspondientes en el apéndice A.

1.1.3. Efecto de sondeo del pozo al sacar la tubería demasiado rápido

El efecto de sondeo se refiere a la acción de pistón y cilindro que ejerce la sarta de perforación dentro del pozo. Es decir, cuando se mueve la sarta hacia arriba, ésta tiende a levantar el lodo con mayor rapidez de la que el lodo tiene para caer por la sarta y la barrena. En algunas ocasiones, la barrena o los estabilizadores se "embolan" con sólidos de la formación, haciendo más crítico dicho efecto, figura 1.1.

La presión de sondeo es negativa en relación con la presión hidrostática, lo que provoca una reducción en ésta. Tal disminución puede ser lo suficientemente grande, como para que la presión de formación llegue a ser mayor y la presencia de un brote potencial se desarrolle. Algunas de las variaciones que controlan la presión de sondeo son:

- Velocidad de extracción de la tubería (cuando se perfora la zona del yacimiento, se recomienda que sea de 3 minutos por lingada)
- Geometría del agujero
- Efecto de embolamiento de la sarta
- Propiedades reológicas del lodo (viscosidad y gelatinosidad altas, enjarre grueso)

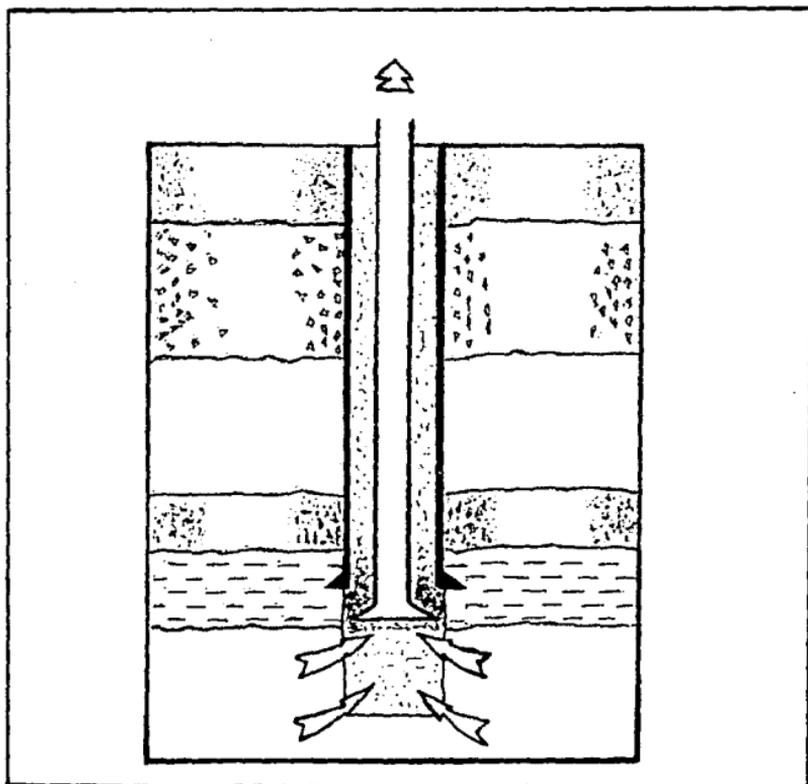


Fig. 1.1 Efecto de sondeo del pozo al sacar la tubería demasiado rápido.

En la Tabla 1.1, se tienen las presiones de sondeo (kg/cm^2) en función del diámetro del pozo y de la velocidad de extracción de la tubería. La densidad del lodo que se utiliza para este caso es de 1.88 g/cm^3 y el diámetro de la tubería de perforación es de $4 \frac{1}{2}$ ".

Como se muestra en la Tabla 1.1, la velocidad para sacar la tubería es una de las variables que puede ser controlada durante el proceso de perforación cuando se realiza un viaje. Por lo que para disminuir la presión de sondeo, es necesario reducir la velocidad con que se extrae la tubería.

Tabla 1.1
Presiones de Sondeo (kg/cm^2)

| Diámetro agujero (pg) | Velocidad de extracción de la tubería (seg/ling) | | | | | |
|-----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 15 | 22 | 30 | 45 | 68 | 75 |
| 8 1/2 | 19.44 | 11.76 | 8.73 | 6.90 | 5.92 | 5.28 |
| 6 1/2 | 41.50 | 24.23 | 16.03 | 13.52 | 11.20 | 9.88 |
| 5 3/4 | 64.88 | 36.90 | 27.75 | 20.35 | 16.27 | 14.08 |

De este modo, a la presión reducida por no llenar el pozo se le suma la disminución en la presión por sondeo, que es ejercida en todos los puntos a través del agujero abierto abajo de la barrena, aún cuando la sarta de perforación se encuentre dentro de la última tubería de ademe cementada en el pozo.

1.1.4. Lodo contaminado

1.1.4.1. Lodo contaminado por gas

El lodo contaminado por gas es a menudo la causa de un brote, por lo que es importante que se comprendan las condiciones que ocasionan esta contaminación.

Al perforar demasiado rápido, se puede desprender el gas contenido en los recortes, en tal cantidad que reduzca sustancialmente la densidad del lodo. Al reducir ésta lógicamente también se reduce la presión hidrostática en el pozo. De manera que si ésta es menor que la presión de formación, entrará una cantidad adicional de gas al pozo, produciéndose un brote. El gas se detecta en la superficie bajo la forma de lodo "cortado".

Sin embargo, aun cuando la densidad del lodo pueda reducirse apreciablemente, esto no significa que necesariamente se presentará un brote. Como la mayor proporción de la expansión del gas toma lugar cerca de la superficie, la presión hidrostática del lodo solo sufre un decremento normalmente pequeño. Aún así, es importante estar enterado de la reducción en la presión de fondo, cuya magnitud puede ser estimada usando la Tabla 1.2, la cual fue determinada utilizando la ecuación de "Strong" White, que es la siguiente:

$$\Delta P_{BH} = 32.66 \left[\frac{P_1 - P_2}{P_2} \right] \log (Phy_1) \quad (1.1)$$

Por esta causa, han ocurrido brotes que se han transformado en reventones. Por lo que, para reducir su efecto, se recomienda efectuar las siguientes prácticas:

- Reducir el ritmo de penetración
- Aumentar el gasto de circulación
- Circular el tiempo necesario para desgasificar el lodo

1.1.4.2. Lodo contaminado por agua salada

Si se perfora una formación porosa y permeable conteniendo agua salada con presión mayor que la del lodo, puede ocurrir un brote. El brote puede ser detectado por el incremento de cloruros en el lodo, cambios en su densidad o en sus propiedades reológicas o por incremento en el nivel de las presas.

Tabla 1.2
Reducción de la presión hidrostática por la contaminación de gas

| Profundidad (metros) | $\rho_1 = 1.20$ | | | $\rho_1 = 1.60$ | | |
|-------------------------|---------------------------------------|------|------|---------------------------------------|------|------|
| | ΔP para una ρ_2 igual a: | | | ΔP para una ρ_2 igual a: | | |
| | 1.00 | 0.80 | 0.60 | 1.40 | 1.20 | 1.00 |
| 500 | 0.82 | 2.00 | 4.10 | 0.62 | 1.40 | 2.60 |
| 1,000 | 0.96 | 2.40 | 4.80 | 0.72 | 1.70 | 3.00 |
| 2,000 | 1.10 | 2.70 | 5.50 | 0.82 | 1.90 | 3.45 |
| 3,000 | 1.20 | 2.90 | 5.90 | 0.88 | 2.10 | 3.70 |
| 4,000 | 1.23 | 3.10 | 6.20 | 0.92 | 2.15 | 3.90 |
| 5,000 | 1.28 | 3.20 | 6.40 | 0.95 | 2.20 | 4.00 |
| 6,000 | 1.31 | 3.30 | 6.60 | 0.98 | 2.30 | 4.10 |
| 7,000 | 1.34 | 3.36 | 6.70 | 1.00 | 2.34 | 4.20 |

| Profundidad (metros) | $\rho_1 = 2.00$ | | |
|-------------------------|---------------------------------------|------|------|
| | ΔP para una ρ_2 igual a: | | |
| | 1.80 | 1.50 | 1.20 |
| 500 | 0.51 | 1.50 | 3.00 |
| 1,000 | 0.59 | 1.80 | 3.50 |
| 2,000 | 0.66 | 2.00 | 4.00 |
| 3,000 | 0.71 | 2.10 | 4.30 |
| 4,000 | 0.74 | 2.20 | 4.40 |
| 5,000 | 0.76 | 2.30 | 4.60 |
| 6,000 | 0.79 | 2.36 | 4.70 |
| 7,000 | 0.80 | 2.40 | 4.80 |

1.1.5. Pérdidas de circulación

Algunos brotes son causados ocasionalmente por pérdidas de circulación, como resultado de un decremento en la presión hidrostática debido a un bajo nivel en el lodo. Cuando este tipo de brote se presenta, el problema puede llegar a ser extremadamente severo, puesto que una gran cantidad de fluido de la formación puede entrar al agujero antes de que en la superficie sea detectado. Un procedimiento recomendado para este caso es llenar el agujero con agua a fin de controlar el nivel del fluido.

Con el objeto de reducir las pérdidas de circulación, se recomienda efectuar las siguientes prácticas:

- Emplear la densidad mínima de lodo, que permita perforar el pozo con seguridad.
- Mantener el mínimo de sólidos en el pozo
- Mantener los valores reológicos del lodo en condiciones óptimas de operación
- Reducir las caídas de presión en el espacio anular
- Evitar incrementos bruscos de presión
- Reducir la velocidad de introducción de la sarta de perforación

1.2. Indicadores de un brote

Es casi imposible que ocurra un brote sin que existan señales previas. Puesto que el pozo y las presas forman un circuito de circulación cerrado, la adición de cualquier fluido al sistema deberá mostrar un cambio en el gasto o en el volumen total del mismo.

Existe un gran número de señales que pueden ser observadas en la superficie, y es responsabilidad de cada uno de los miembros del personal de supervisión, saber reconocerlas e interpretarlas; para realizar las acciones adecuadas correspondientes al proceso de control.

Una señal es solo una advertencia de una situación de brote, y el que éste se convierta en un problema serio o no, depende de la habilidad con que se maneje.

A continuación, se describen las principales señales de un brote:

A. Incremento en la velocidad de penetración

Un aumento en la velocidad de penetración, puede ser un indicador de un posible brote. La velocidad de penetración está en función de varios factores como son: el peso sobre la barrena, la velocidad de rotación, la densidad del lodo, la hidráulica del pozo, etc. Pero también está determinada por la presión diferencial entre la presión hidrostática del lodo y la presión de formación. Es decir, que si la presión de formación es mayor que la presión hidrostática dentro del pozo, aumentará considerablemente la velocidad de penetración de la barrena. Cuando esto ocurre, y no haya cambio en alguna de las otras variables, se puede sospechar la presencia de un posible brote, más aún cuando se esté perforando en zonas de presión anormal o del yacimiento.

B. Incremento en el gasto de la línea de flujo

Un incremento en el flujo de salida mientras se está bombeando con un gasto constante, es uno de los indicadores primarios de la presencia de un brote.

Este incremento es interpretado como una indicación de que la formación está ayudando al equipo de bombeo, a desplazar el fluido hacia la superficie por el espacio anular y consecuentemente, forzando a sus fluidos a introducirse al pozo.

El incremento en el gasto (debido al yacimiento) está controlado por la permeabilidad de la formación, la presión diferencial y la longitud de la sección penetrada como lo describe la ley de Darcy:

$$q = \frac{7.07 A h \Delta P}{\mu \ln(r_e/r_w)} \quad (1.2)$$

Una vez que empieza el flujo hacia el pozo, la razón de incremento está controlada por la longitud del yacimiento. Este término ejerce una poderosa influencia en el gasto hacia el pozo y puntualiza la importancia del efecto de penetrar mucho en el yacimiento.

Si el flujo es gas, el gasto también está influenciado por la ley general de los gases.

C. Incremento en el volumen de las presas de lodo

Generalmente, una ganancia o aumento de volumen en presas al estar perforando, es un indicativo de que se tiene un brote. El volumen de lodo en presas puede medirse mediante un dispositivo automático denominado indicador de nivel en presas. Ver inciso 1.3.1.A.

D. Flujo en el pozo sin bombeo

Cuando el equipo de bombeo no tiene el lodo en circulación, el flujo continuo del pozo es un indicativo de que un brote está progresando. La única excepción para esto, es cuando existe descompensación hidrostática entre la tubería de perforación y el espacio anular.

E. Disminución en la presión de bombeo y aumento en su velocidad

Cuando un brote ocurre mientras se está perforando, los fluidos debidos al brote estarán únicamente en el espacio anular. La presencia de dichos fluidos, cuando tienen una densidad menor que la del lodo, causará que la presión hidrostática en el espacio anular sea menor que la presión hidrostática dentro de la sarta de perforación. Esta diferencia de presiones ayudará a que el lodo dentro de la sarta fluya hacia el espacio anular más fácilmente (por la descompensación de las columnas) con la consiguiente disminución de la presión de bombeo y el aceleramiento de la bomba de lodo, lo cual se manifiesta con el aumento de las emboladas.

Sin embargo hay que hacer notar que una disminución de presión de bombeo puede deberse también a las siguientes causas:

- Una reducción en el gasto de circulación
- Un agujero o fisura en la tubería de perforación
- Una junta de la sarta lavada por presión
- Al desprendimiento de una tobera de la barrena
- Un cambio en las propiedades del lodo

Como se observa, la decisión final se tomará después de haber ponderado varios indicadores del brote.

F. Llenado anormal del pozo al efectuar viajes de tubería

El volumen de lodo requerido para llenar el pozo, debe ser igual al volumen de acero de la tubería que ha sido extraído. Si el pozo es llenado con una cantidad menor de lodo que el calculado, se tendrá el indicativo de que está ocurriendo un brote. Ahora bien, si la cantidad de lodo necesaria para llenar el pozo es mayor que el volumen de acero de tubería extraído, se tendrá la posibilidad de una pérdida de lodo, con el consiguiente riesgo de que se produzca un brote.

Para el caso en que se introduce tubería de perforación, se desplazará lodo hacia afuera. El volumen de lodo desplazado tendrá que ser igual al volumen de acero de la tubería introducido. Si el volumen de lodo desplazado es mayor que el volumen de acero introducido, se debe considerar que fluidos de la formación están entrando al pozo; es decir, estará ocurriendo un brote. En caso contrario, si el volumen de lodo desplazado es menor que el volumen de acero de la tubería introducida o no hay desplazamiento de lodo, se tendrá una pérdida del mismo, con el riesgo de que ocurra un brote.

Estadísticamente, la mayor parte de los brotes ocurren durante los viajes de acuerdo con la figura 1.2, siendo la extracción de tubería del pozo una operación más crítica que la introducción; debido al efecto de sondeo y a la práctica incorrecta de no mantener el pozo suficientemente lleno con lodo.

Cuando se realiza un viaje, es más difícil detectar un brote en sus inicios. Por lo que se hace necesario llevar un control del volumen de acero de tubería de perforación introducido o extraído del pozo y el correspondiente volumen de lodo requerido para el llenado. El volumen de lodo puede medirse mediante:

- Indicador de nivel en presas, ver inciso 1.3.1.A
- Contador de emboladas, ver inciso 1.3.1.B
- Indicador de flujo en la línea de flote, ver inciso 1.3.1.C
- Tanque de viajes, ver inciso 1.3.1.D

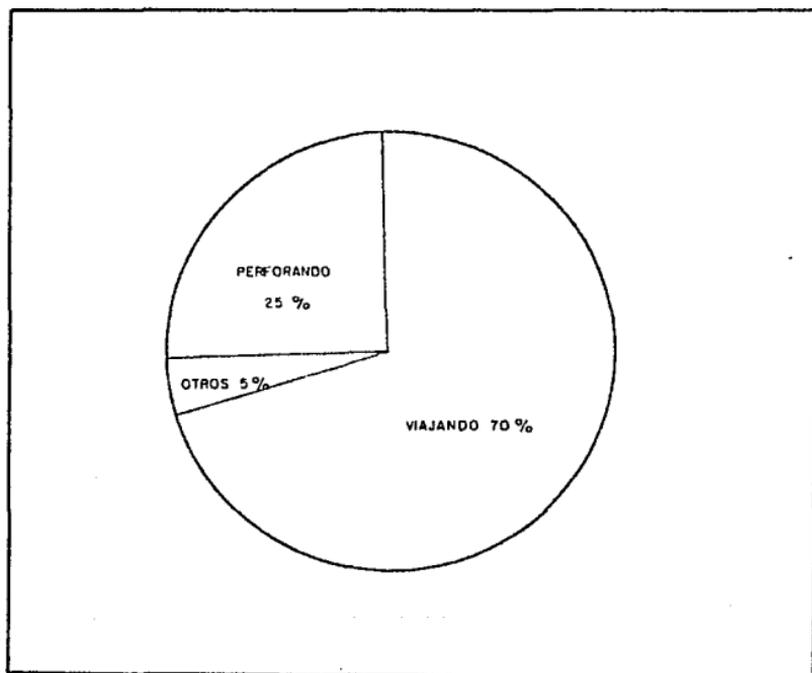


Fig. 1.2 Incidencia de brotes

G. Aumento en el peso de la sarta

El fluido de perforación en el pozo, provoca un efecto de flotación, el cual reduce el peso efectivo de la sarta que debe ser soportado por el sistema de izaje.

Los lodos más pesados tienen mayor efecto de flotación que los lodos ligeros. Cuando ocurre un brote y fluidos de la formación de menor densidad que el lodo entran al agujero, el efecto de flotación se reduce. Como consecuencia, el peso observado de la sarta se incrementa.

H. Disminución en la densidad del lodo de salida

La reducción del peso del lodo, observada en la línea de salida, ocasionalmente puede causar un brote. Algunas de las razones para que la densidad disminuya son:

- Gas de los recortes
- Influjos de agua salada
- Influjo de aceite

Esta reducción puede ser imperceptible cuando el brote es de agua, y solo se presenta cuando el fluido alcanza la superficie.

La contaminación del lodo por gas, puede ser el resultado de lo siguiente:

- 1) Perforando a través de una formación cargada con gas, usando densidad adecuada

En este caso no ocurre un brote, pero el gas liberado de los recortes, provoca la contaminación del lodo. La cantidad de gas aportado por los recortes, depende del diámetro del agujero, la velocidad de penetración, la densidad del lodo y la presión y porosidad de la formación.

El problema puede tornarse serio, si la velocidad de penetración es alta, ya que la cantidad de gas liberado de los recortes, puede ser suficiente para causar la reducción en la

presión de fondo, de tal modo que provoque un brote.

2) Perforando a través de lutita que contiene gas de alta presión

Como la lutita es prácticamente impermeable, el gas solo es liberado de los recortes y de las paredes del agujero. El incremento en la velocidad de penetración y la inestabilidad del agujero se encuentran con frecuencia asociados con este tipo de formación, especialmente si la presión hidrostática es menor que la presión de poro.

Si se localiza un lente permeable cargado de gas, junto con las lutitas, puede presentarse un flujo o burbuja de gas.

La detección de un aumento de cloruros y porcentaje de agua; pueden ser indicadores de qué fluidos de la formación están entrando al pozo y por consecuencia, sea el origen de un posible brote. Sin embargo, un aumento de cloruros puede ser también originado al ser perforada una sección salina.

Cuando las propiedades reológicas cambien, debe tenerse presente que tal variación pudo ser causada por la entrada de un fluido invasor. Lo cual se manifiesta en una variación de la viscosidad, relación agua/aceite y en la precipitación de los sólidos.

Ninguno de los indicadores mencionados anteriormente es absoluto, por lo tanto, se deben analizar en conjunto. Sin embargo, cuando exista la presencia de alguno de estos indicadores, se justifica el tener que investigar de inmediato la causa, ya que se requiere una pronta respuesta a cualquier indicador para poder mantener el control del pozo.

1.2.1. Indicadores de un brote mientras se está perforando

La secuencia de eventos que ocurren cuando se perfora en un yacimiento cuya presión es mayor a la presión hidrostática del fluido de perforación es:

- Incremento en la velocidad de penetración
- Incremento en el gasto de la línea de flujo
- Incremento en el volumen de las presas de lodo
- Disminución de la presión de bombeo y aumento en su velocidad
- Disminución en la densidad del lodo de salida

No necesariamente siempre, se notarán todos estos eventos en cada caso.

1.2.2. Indicadores de un brote durante las conexiones

Cuando se perfora con una presión diferencial pequeña, el flujo hacia el pozo puede ocurrir cuando se hacen conexiones. Esto resulta de la reducción de presión en el pozo, es un valor mínimo igual al que tiene la caída de presión en el espacio anular.

La ocurrencia de un brote durante conexiones, está señalada por una serie de eventos muy similares que al estar perforando:

- Flujo en el pozo sin bombeo
- Incremento en el volumen de las presas de lodo
- Disminución de la presión de bombeo y aumento en su velocidad
- Disminución en la densidad del lodo de salida

La protección requerida contra un brote durante una conexión, es la constante observación de la línea de flote. El sensor de flujo debe ser capaz de indicar una condición de no-flujo absoluto, para que así detecte el pequeño flujo en el espacio anular, durante una conexión.

1.2.3. Indicadores de un brote mientras se efectúa un viaje'

Los brotes que ocurren durante un viaje, representan el peligro potencial más grande. Los procedimientos de control de brotes, requieren que la sarta se localice lo más cercano posible al fondo del pozo. Con la tubería fuera del agujero, es imposible

llevar lodo densificado al fondo de él. El brote puede ser controlado sin la sarta dentro, por el método volumétrico, pero las posibilidades de error son mayores y el problema de control es complejo.

Los siguientes, son indicadores de brotes al estar efectuando un viaje:

- Incremento en el volumen de las presas
- Flujo en el pozo sin bombeo
- Llenado anormal del pozo al efectuar viajes de tubería

Una de las más grandes dificultades relacionadas a la detección de brotes, se presenta en agujeros reducidos. La magnitud del brote es acentuada por el poco volumen anular, ya que pequeñas entradas de fluido de formación, causarían altas presiones superficiales, por lo que el problema se torna crítico.

La medición de esos pequeños volúmenes es difícil y en muchos casos casi imposible. Una entrada de 1.5 m^3 (10 bbl) de fluido de formación en un agujero de $9 \frac{7}{8}$ " , causa dificultades mínimas, pero en un agujero de 8", induce altas presiones y acentúa los problemas de atascamiento por derrumbes.

No existen soluciones fáciles en la medición del flujo dentro de un agujero pequeño. Los problemas pueden reducirse con el uso de presas de área pequeña, de línea de flujo de diámetro moderado y por sistemas automáticos de alarma.

1.3. Equipo de detección

1.3.1. Equipo normal

A. Indicadores de nivel de presas de lodo

Este dispositivo sirve para indicar el nivel del lodo en las presas, y a su vez, detectar el inicio de un brote o una pérdida de lodo.

Actualmente existen numerosos dispositivos indicadores del nivel del lodo en presas. Algunos incluyen alarmas audibles y graficadores que proporcionan un registro continuo del nivel.

Otros son vistos directamente por el perforador en pantallas que muestran las variaciones del nivel, incluyendo además, una alarma audible con límites ajustables de máximo y mínimo, resultando muy superior a los procedimientos rústicos usados en los equipos como, por ejemplo, una tuerca sostenida con una cuerda para verificar el nivel del lodo.

El dispositivo se basa en los sensores (vástago y flotador) instalados en las presas, los cuales transmiten una señal eléctrica al registrador, donde se procesa y manda, convertida en valores numéricos, a la pantalla ubicada en el piso de trabajo. Estos dispositivos requieren de un mantenimiento rutinario, para poder garantizar la efectividad de su operación; por consiguiente, el mantenimiento y buen uso son necesarios, para obtener una respuesta más confiable.

La tecnología moderna de sensores introduce ya al mercado, equipos con menores requerimientos de mantenimiento y mayor precisión.

B. Contador de emboladas de la bomba

El registro de las emboladas de la bomba de lodo, es muy valioso para verificar la perforación, ya que el contador puede indicar volúmenes pequeños (de 1 a 5 paradas) con mayor exactitud que los indicadores de nivel de presas. Existen varios tipos de contadores de emboladas. Algunos proporcionan una señal luminosa por cada embolada.

Cuando se está controlando un brote, la velocidad de bombeo unida con totalizadores de emboladas permiten efectuar balances volumétricos.

C. Indicadores de flujo en la línea de flote

La primera señal evidente de un brote en la superficie es, precisamente, el flujo o incremento del mismo por la línea de flote. Los indicadores de flujo miden el gasto en porcentaje, que pasa por la línea de flote. Por lo que un aumento en el gasto de salida, cuando se circula con gasto constante, o cuando no se está circulando y se tiene flujo por la línea de flote, podrán ser

detectados por este dispositivo, antes de que el nivel de presas registre un incremento suficiente como para ser registrado. Esto resulta de mayor importancia cuando se tiene un sistema superficial de presas demasiado grande. El indicador de flujo no solamente determina las señales de posibles brotes. También indica la presencia de pérdidas de lodo, ya sean totales o parciales.

Generalmente, el más común de los indicadores de flujo, figura 1.3, consiste en una "paleta" colocada en la línea de flote. Un resorte, colocado a tensión en dicha paleta y ajustado al instrumento de medición, sirve como registrador.

Si el flujo se incrementa o disminuye, la paleta cambiará de posición y creará una nueva tensión del resorte, la cual es registrada e interpretada por el sensor, y enviada posteriormente como un valor numerico a la pantalla junto al perforador.

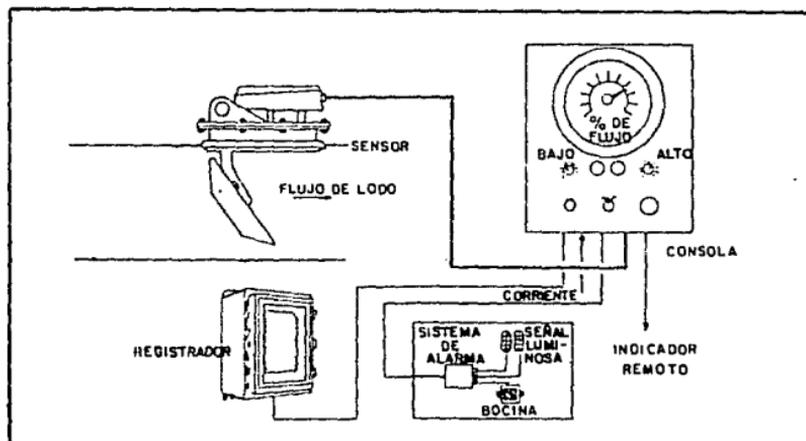


Fig.1.3 Indicador de flujo en la línea de flote

La mayoría de estos dispositivos cuentan con alarmas audibles con límites de máximo y mínimo.

Al igual que el indicador de nivel en presas, requiere de un mantenimiento rutinario y de buen uso, para garantizar un servicio adecuado.

D. Tanque de viajes

El tanque de viajes adecuadamente diseñado y usado, es un dispositivo que permite medir correctamente el lodo necesario para llenar el pozo, cuando se extrae la tubería del mismo. De igual manera, mide el volumen de lodo desplazado por la tubería al ser introducida al pozo. En otras palabras, es un dispositivo que facilita la medición correcta del volumen de lodo durante los viajes, por lo que es de gran utilidad en la detección oportuna de brotes y pérdidas de circulación.

El tanque de viajes debe contener un volumen que pueda cubrir el máximo, cuando el pozo sea perforado a su profundidad total.

Existen principalmente dos diseños de tanques de viajes, los cuales son:

- Tanque de viajes con bomba centrífuga, figura 1.4. Este es el diseño más conveniente, ya que permite determinar el volumen de lodo, tanto en la introducción como en la extracción de tubería.
- Tanque de llenado, ubicados en el piso del equipo y a la altura de la línea de flote, figuras 1.5 y 1.6. Son dispositivos de gran utilidad, puesto que permiten medir correctamente el volumen de lodo para llenar el pozo, cuando se saca tubería ya que, como se mencionó anteriormente, la mayoría de los brotes se producen al estar viajando.

Para que el tanque de viajes proporcione medidas correctas, es necesario que se mantenga limpio. Debiendo lavarse inmediatamente después de ser usado, además de que debe llenarse con lodo que haya pasado por el equipo de control de sólidos.

El tanque de viajes puede tener entre otros usos los siguientes:

- Medir el volumen de lodo, cuando se introduce tubería de revestimiento dentro del pozo.

- Monitorear la introducción de tubería a presión dentro del pozo, mediante la medición correcta del volumen desplazado del lodo.
- Determinar correctamente el volumen para llenar el pozo, al ocurrir una pérdida de circulación.

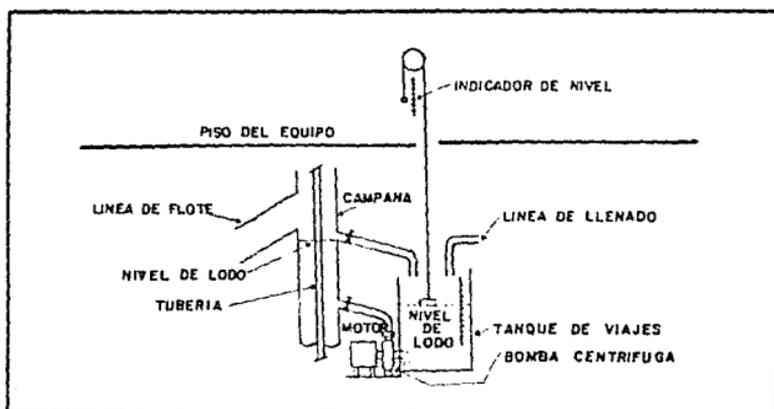


Fig. 1.4 Tanque de viajes con bomba centrífuga.

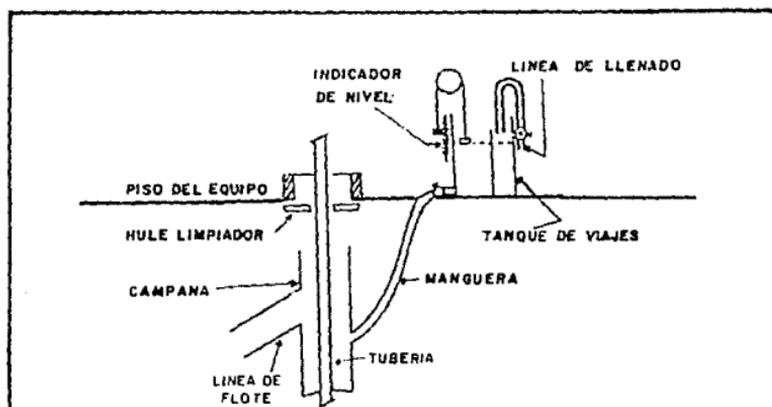


Fig. 1.5 Tanque de llenado localizado en el piso del equipo.

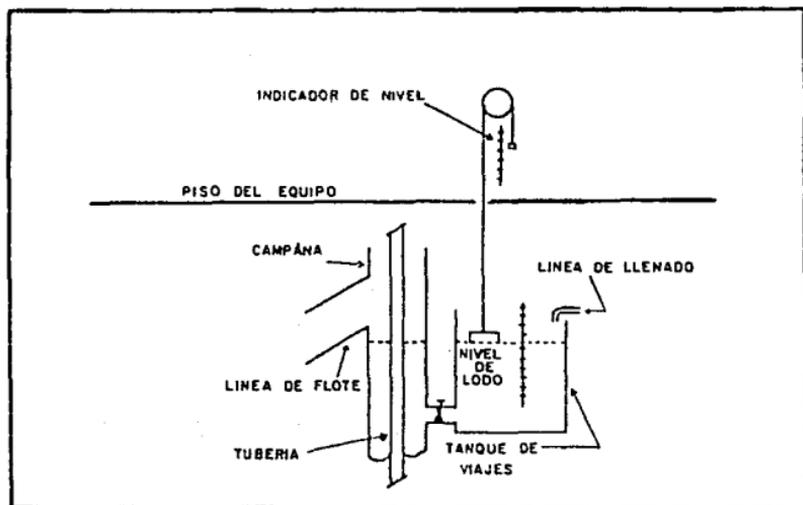


Fig. 1.6 Tanque de llenado localizado en el nivel de la línea de flote.

E. Registrador de velocidades de penetración

La medición de la velocidad de penetración (ROP) es usada para detectar zonas porosas y de transición, lo cual indica la proximidad a un yacimiento de alta presión. La ROP, proporciona generalmente la primer señal de incremento en la presión cuando una zona porosa o de alta perforabilidad, está siendo penetrada, indicándonos un brote potencial.

F. Detector de gas

Existen varios tipos de detectores de gas disponibles que funcionan con diferentes principios. Sin embargo, generalmente todos reportan el contenido de gas como una unidad de lodo. Al detectar la presencia de cualquier tipo de gas en el lodo, se hace sonar una alarma y/o se actúa una señal luminosa.

Para mayor eficiencia del detector, el lodo no debe tener contacto con la atmósfera y se le hará pasar por un desgasificador antes de llegar a éste. También se evitará el empleo de recodos y puntos bajos.

Tienen el inconveniente de no funcionar con altas concentraciones de gas y de proporcionar continuas falsas alarmas.

G. Medidor de la densidad del lodo

Esta medición puede hacerse manualmente, pero para una mayor rapidez y exactitud, se recomienda usar un registrador eléctrico. Este indicador nos dice cuando el flujo de lodo tiene una densidad mayor o menor a la usada inicialmente. La medida debe hacerse a la entrada y salida del pozo, ya sea en la línea de muestreo y/o en la línea de flujo.

Se emplean dos sensores del mismo tipo, uno en la presa de succión y otro en la presa de salida, los cuales miden la presión hidrostática diferencial en un par de diagramas separados por una distancia conocida. Una celda recibe la señal de la diferencia de presiones y la convierte en forma proporcional a corriente eléctrica. Esta corriente es directamente proporcional a la densidad del lodo, la cual es calibrada a unidades de campo.

Otro método para determinar correctamente el peso del lodo, es el densómetro. Este sofisticado equipo utiliza una celda radiactiva a través de la cual se hace pasar el lodo. Una vez que las calibraciones se han computado, el peso del lodo se registra en equipos correspondientes dentro del panel, proporcionando la medida en unidades de campo.

H. Registradores de presión en superficie.

Las presiones en la superficie, son medidas por manómetros colocados en el tubo vertical para la tubería de perforación y en el espacio anular, para la de revestimiento.

1.3.2. Equipo especial

A. Medidor de flujo diferencial

El uso de medidores de flujo electromagnéticos para la medición de la diferencia entre el volumen de entrada y salida del fluido, reemplazará eventualmente la medida del nivel en las presas de lodo, para la detección de brotes.

B. Cromatógrafos

Este aparato se encarga de analizar la composición del gas existente en el lodo. El procedimiento de la obtención de la muestra es el mismo que el empleado por el detector de gas.

C. Equipo de laboratorio

1) Análisis de recortes

Los principales datos obtenidos de este análisis, son la densidad de la lutita y la fluorescencia de las muestras. La densidad de la lutita es usada para detectar sellos de yacimientos con altas presión, ya que la lutita bajo compactada regularmente proviene de esta zona.

2) Análisis de lodo

Se determinan las características de los recortes que vienen acompañando al lodo de perforación, tales como: resistividad, salinidad, cambio de capacidad catiónica, etc., para así detectar zonas de alta presión.

D. Medidor de temperatura

En muchas ocasiones, las anomalías de la temperatura del lodo es un indicador efectivo de zonas de transición, por lo que se recomienda el uso de algún dispositivo que mida esta

temperatura a la entrada y salida del pozo.

E. Registrador de datos de perforación

Estos datos deben ser conocidos como una regla, para la determinación de cálculos tales como el exponente "d", distribución de la energía hidráulica, velocidades anulares, etc.

1) Torque

Es muy importante mantener una vigilancia del torque durante todo el tiempo, en las operaciones de perforación. El rango de operación normal tiene un límite superior e inferior. El instrumento de medición es calibrado directamente en unidades de trabajo.

2) Peso sobre la barrena (PSB)

Esta medición se exhibe en el tablero de control, sobre la carátula del indicador de peso.

3) Velocidad de rotación (RPM)

Generalmente, es la cantidad de vueltas que realiza la sarta en cada minuto. Esta medida también se detecta en el tablero de control.

1.3.3. Localización de instrumentos

Dependiendo del tipo de unidad perforadora en particular, la distribución de los instrumentos se encuentra generalmente dividida entre la sala de control y el piso de perforación.

Para el óptimo empleo del equipo existente, se recomienda que todos los centros operacionales, sean intercomunicados telefónicamente.

CAPITULO 2

DESCONTROL E INCENDIO DE UN POZO

2.1. Descontrol de un pozo

El descontrol de un pozo, es el flujo precipitado y sin control, de los fluidos del yacimiento, en la superficie o bajo ella.

2.1.1. Causas que originan un descontrol.

La principal causa que origina un descontrol se debe en un porcentaje muy elevado al error humano, es negativa la creencia de que el principal origen del problema sea debido a las altas presiones de las formaciones, pues se ha demostrado que en condiciones normales la densidad del lodo, antes del brote, ha sido la adecuada para ejercer una presión hidrostática contra la formación suficiente para evitarlo.

En cambio los pozos en su mayoría se han descontrolado al efectuar un viaje con la tubería de perforación. Es importante también tomar en cuenta para tales efectos la mala conservación del equipo, así como también no probar con periodicidad las conexiones superficiales de control y no tener un programa adecuado de preventores. Es conveniente capacitar a las cuadrillas para estos casos e inclusive practicar simulacros de brotes en el pozo, con el fin de mantener al personal preparado en caso de ocurrir tales; pues se puede dar el caso que el equipo presente buenas condiciones, pero si no le se da el debido uso el resultado será altamente negativo.

2.1.1.1. Instalación defectuosa del equipo superficial de control

Generalmente, la instalación superficial es supervisada adecuadamente, sin embargo, en lo que se debe tener mayor cuidado es en las pruebas que se hacen a las conexiones y líneas, ya que por efectos del trabajo pueden ser deterioradas en mayor o menor grado, dando motivo a alguna fuga y un posible brote ó descontrol. Una programación periódica de pruebas, ayudaría en gran parte a solucionar el problema en la forma más económica: previniéndolo.

2.1. Descontrol de un pozo

El descontrol de un pozo, es el flujo precipitado y sin control, de los fluidos del yacimiento, en la superficie o bajo ella.

2.1.1. Causas que originan un descontrol.

La principal causa que origina un descontrol se debe en un porcentaje muy elevado al error humano, es negativa la creencia de que el principal origen del problema sea debido a las altas presiones de las formaciones, pues se ha demostrado que en condiciones normales la densidad del lodo, antes del brote, ha sido la adecuada para ejercer una presión hidrostática contra la formación suficiente para evitarlo.

En cambio los pozos en su mayoría se han descontrolado al efectuar un viaje con la tubería de perforación. Es importante también tomar en cuenta para tales efectos la mala conservación del equipo, así como también no probar con periodicidad las conexiones superficiales de control y no tener un programa adecuado de preventores. Es conveniente capacitar a las cuadrillas para estos casos e inclusive practicar simulacros de brotes en el pozo, con el fin de mantener al personal preparado en caso de ocurrir tales; pues se puede dar el caso que el equipo presente buenas condiciones, pero si no le se da el debido uso el resultado será altamente negativo.

2.1.1.1. Instalación defectuosa del equipo superficial de control

Generalmente, la instalación superficial es supervisada adecuadamente, sin embargo, en lo que se debe tener mayor cuidado es en las pruebas que se hacen a las conexiones y líneas, ya que por efectos del trabajo pueden ser deterioradas en mayor o menor grado, dando motivo a alguna fuga y un posible brote ó descontrol. Una programación periódica de pruebas, ayudaría en gran parte a solucionar el problema en la forma más económica: previniéndolo.

Se debe tener especial cuidado en contar con extensiones manuales en los preventores, instaladas correctamente y en buen estado de trabajo; así como bombear agua (cada vez que los preventores sean probados) a través del múltiple de estrangulación para comprobar que éste se encuentra libre de tapones debido al asentamiento de barita, cemento, etc.

2.1.1.2. Insuficiencia de capacidad o número de preventores.

El número de preventores así como el tipo de ellos, está determinado por las presiones (de la zona) que se esperan encontrar, de acuerdo con estudios y experiencias obtenidas. Al ocurrir el descontrol y como última medida de seguridad para encerrarlo, se hacen funcionar los preventores con el fin de cerrar el pozo. Algun defecto o mal diseño de ellos, puede ocasionar un siniestro de magnitud considerable. Es por lo tanto conveniente, operarlos continuamente, observando su buen funcionamiento o en caso contrario, subsanar cualquier anomalía.

2.1.2. Tipos de descontroles

Existen dos tipos de descontroles, el normal y el inducido, definiéndose cada uno como sigue:

A. Descontrol normal

Se dice que es normal cuando las conexiones superficiales de control no se encuentran cerradas y los fluidos de la formación invaden el pozo, levantando la columna de lodo y expulsándola hacia la superficie, con mayor ó menor intensidad.

B. Descontrol inducido

Este descontrol es el que tiene lugar al cerrar el pozo, por fracturamiento de las formaciones (en algún punto debajo de la superficie) debido a la contrapresión ocasionada al activar los preventores para contenerlo. Por lo tanto, ocurre también cuando

la presión sobre la formación alcanza tal valor, que sobrepasa al gradiente de fractura de la misma, observándose pérdida de fluidos de perforación; igualmente ocurre por rotura en la tubería de revestimiento, a pozo abierto o cerrado.

El factor principal durante la perforación de un pozo, es la planeación y seguridad, que conducen a prevenir posibles descontrolés, ya que ésto traerá consigo un notable ahorro de tiempo y recursos. La presencia de un brote significa en muchas ocasiones la suspensión inmediata de la perforación. además, existirá la necesidad de hacer una erogación extra en el acondicionamiento del lodo a fin de resolver el problema, ya que el agujero puede ser dañado ocasionando así pegaduras de tubería, pescas, o bien, en caso extremo, la pérdida de vidas humanas, del pozo y ocasionalmente del equipo.

2.2. Incendio de un pozo*

2.2.1. Incendios de aceite crudo

2.2.1.1. Mecánica de ignición de un aceite crudo

Todas las sustancias arden únicamente en forma de vapor. Un sólido o líquido debe ser convertido en vapor o separado en finas partículas y mezclado con oxígeno (en la proporción correcta) para arder. La ignición de un aceite crudo, tiene diversas características notables:

- 1) Crudos de baja densidad pueden tener un punto de inflamación alto o bajo, dependiendo del punto de inflamación de las fracciones ligeras del crudo.
- 2) Crudos de alta densidad generalmente tienen puntos de inflamación bajos.

* Nota: podría ser útil revisar las definiciones de los términos utilizados en este capítulo, para lo cual se sugiere consultar el apéndice B.

- 3) Si la presión de vapor se incrementa, el punto de inflamación disminuye. La presión de vapor depende de la cantidad de hidrocarburos ligeros presentes en el crudo.
- 4) Un crudo con un punto de inflamación bajo, a una temperatura superior a la de su punto de ignición, arderá continuamente cuando una chispa o flama sea aplicada cerca de su superficie.

Esto es importante para entender que es el vapor el que arde, y que la relación de porcentajes de concentración de vapor (combustible) y aire (oxígeno) debe ser la correcta, para continuar ardiendo. La flama, que es el resultado de una combustión, por sí sola no puede ser extinguida. El único medio para detener la combustión y extinguir la flama, es alterar la mezcla ardiente de vapor y aire; es decir, matar el fuego.

2.2.1.2. Materiales inflamables y materiales combustibles

Los materiales inflamables son encendidos fácilmente, debido a su rapidez para formar un vapor. La madera requiere de considerable energía para ser convertida en vapor y se clasifica como un combustible. Los materiales combustibles inflamados, únicamente pueden ser controlados por enfriamiento; mientras que los materiales inflamables no. Los incendios de aceites con un punto de inflamación alto, pueden ser extinguidos por enfriamiento. Por ejemplo, el diesel deja de arder si su temperatura superficial es reducida a 65 °C; sin embargo, la gasolina debe ser enfriada a -43 °C, lo cual no puede hacerse con agua. Una cortina de agua no extinguirá un incendio de gasolina por enfriamiento; logrará sin embargo, extinguir la flama si la cortina es concentrada lo suficiente para reducir el porcentaje de aire a menos del 94 %, de la mezcla de aire-vapor.

2.2.1.3. El triángulo de un incendio

El uso y descripción de un triángulo, como los componentes básicos de un incendio, ha sido utilizado durante muchos años.

Aunque esta es una descripción útil, no hace énfasis en las mezclas de combustible-vapor y aire-oxígeno necesarias para una combustión en presencia de calor. El triángulo de un incendio de aceite crudo se presenta en la figura 2.1.A, mientras que la versión modificada del lenguaje, se muestra en la figura 2.1.B. El personal que combate incendios generalmente se enfrenta a los componentes combustible-vapor y aire-oxígeno de un incendio, debido a que la combustión ya está iniciada.

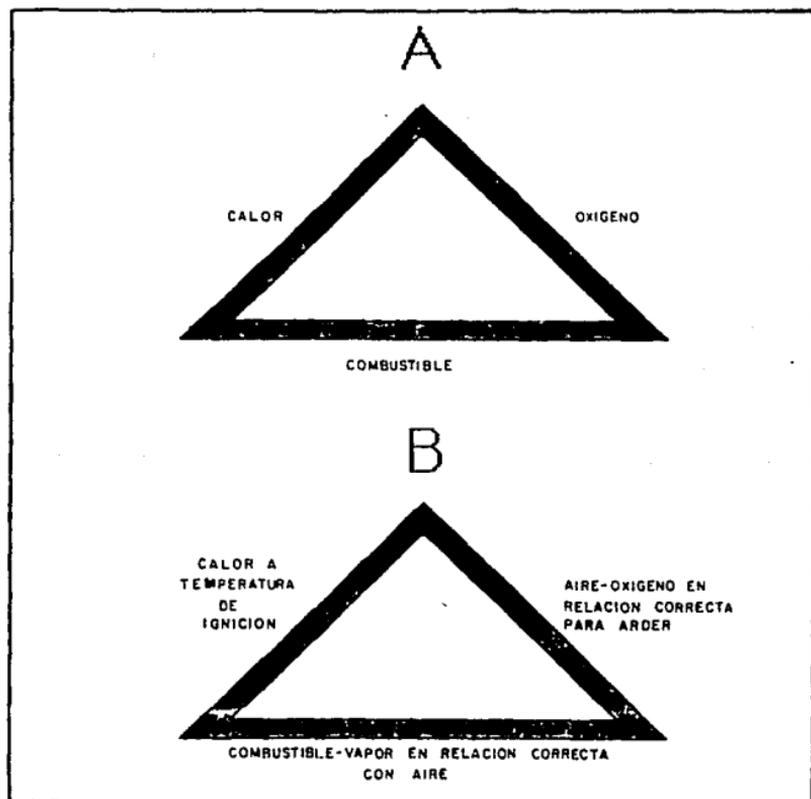


Fig. 2.1 Triángulos del fuego

Se ha dicho que para extinguir un incendio, uno de los lados del triángulo debe ser eliminado, lo cual no es técnicamente correcto. Los incendios son extinguidos por la alteración de la relación ardiente de vapor y aire (de un crudo o gas específico) fuera de su rango inflamable. Esto se hace reduciendo las relaciones combustible-vapor y aire oxígeno. Si uno u otro es eliminado o reducido, el incendio se extinguirá rápidamente. Por ejemplo, una flama se extingue, por la ausencia de oxígeno ó combustible.

Muchos hidrocarburos líquidos están en el rango inflamable del 1 al 7 % de vapor y del 99 al 93 % de aire; mientras que los hidrocarburos gaseosos son inflamables en el rango del 1.9 al 9.5 % de vapor y del 98.1 al 90.5 % de aire. Un incendio de un hidrocarburo líquido (crudo) se extinguirá cuando la mezcla aire-oxígeno sea reducida abajo del 93 % y abajo del 90.5 %, para un hidrocarburo gaseoso. Para eliminar el incendio, el porcentaje combustible-vapor para los líquidos, debe ser reducido abajo del 1 % y abajo del 1.9 %, para los gases.

2.2.1.4. Reducción de los volúmenes de la mezcla vapor-aire

La presión de vapor gobierna la razón de duración de un incendio. Mientras mayor sea la proporción de oxígeno introducido a la mezcla más rápido será consumida, y más difícil será su separación a un rango no inflamable. Además, la presión de vapor alta (de los materiales combustibles) únicamente puede ser reducida por enfriamiento, mientras que la extinción final debe ser completada con la reducción de la mezcla de aire-vapor abajo del 93 % en volumen de aire. Esto puede hacerse con espuma o relleno del volumen de aire con material inerte ó gas, al igual que en las deshidratadoras químicas.

A veces se utilizan explosivos para extinguir la flama de un pozo descontrolado e incendiado. Este método elimina el oxígeno disponible y mata el fuego. Pero si no se aplica enfriamiento antes de la detonación y continuamente después de la misma, puede presentarse una re-ignición.

2.2.1.5. Propagación de la flama

La propagación de la flama ocurre cuando los vapores de los alrededores del fuego están dentro del rango inflamable. Cuando la concentración de vapor es muy alta, la flama deja de propagarse debido a que la mezcla es muy rica para arder. El peligro existe cuando el material producido tiene una tendencia a acumularse, como es el caso de la gasolina ó los gases pesados, como el ácido sulfhídrico (H_2S), que pueden acumularse y combinarse con el aire formando una mezcla combustible adyacente al fuego, existiendo el peligro de una explosión.

2.2.1.6. Fuentes de Ignición

La ignición de un incendio debe originarse de una fuente. La fuente es calor aplicado en las condiciones correctas para una combustión. Una lista general de las fuentes de ignición conocidas es la siguientes:

- 1) Soldar
- 2) Mártillar, raspar, lijar y acciones de fricción similares
- 3) Líneas calientes
- 4) Calor por fricción
- 5) Electricidad estática
- 6) Chispas eléctricas
- 7) Relámpagos
- 8) Ignición espontánea
- 9) Fumar, cerillos, y otros medios productores de flamas
- 10) Aluminio pintado ó hierro/acero siendo clavado

La duración de la fuente y el tipo de material influyen la ignición. Por ejemplo, el hidrógeno contra la gasolina, la temperatura de ignición publicada para el hidrógeno es de $585^{\circ}C$ y de $288^{\circ}C$ para la gasolina. El hidrógeno es mucho más susceptible a encenderse debido a que se requiere menos energía, menos volumen y una aplicación de calor más corta para producir su ignición. Se necesitan 0.00002 Joules para encender el hidrógeno, contra 0.001

de la gasolina. El factor de energía es de 500 veces menos energía entre los dos materiales. Esto se explica por el menor volumen requerido debido a que los espacios de aire son más pequeños alrededor de las moléculas de hidrógeno que de las de gasolina, requiriéndose menos calor para puentear estos espacios y provocar la ignición.

La ignición es una combinación de acciones químicas. Es la liberación de la energía necesaria para disparar los factores iniciales requeridos para la combustión. Las acciones y los factores son: temperatura, energía liberada, volumen de calor y la duración del mismo.

2.2.1.7. El calor como fuente de ignición y de partículas calientes

La ignición debida a una chispa producida por el contacto de un metal con otro metal, como el golpe de un martillo, es extremadamente improbable. La "chispa" no lo es del todo, ya que es una partícula calentada. Las superficies de estos fragmentos son tan pequeñas que las más altas temperaturas accesibles no podrían ser suficientes para lograr la ignición; por lo que para encender el vapor formado por los productos del petróleo, se requiere de una temperatura mucho mayor a aquellas producidas por el simple golpe de un metal con otro.

El proceso de ignición de un encendedor (disco sobre pedernal) a sido incorrectamente descrito como la chispa de un metal con otro. La descripción actual de la ignición de un encendedor disco-pedernal, es que es el calor generado por el disco sobre el pedernal dentro de la mezcla atmosférica correcta de aire-vapor en la mecha, no de la chispa del disco de metal. El fenómeno de la partícula calentada es uno de los más mal entendidos, dentro del campo de la seguridad contra incendios.

2.2.1.8. Las chispas eléctricas como una fuente de ignición

Una chispa eléctrica encenderá, bajo condiciones normales, los vapores del petróleo. La chispa eléctrica es muy caliente y similarmente a las superficies calentadas, requiere de un

volumen propio para causar un incendio.

El nivel de energía es un factor importante. Por ejemplo, la baja autoinducción, como en una lámpara eléctrica de bolsillo de dos pilas, es insuficiente para crear una chispa que ocasione la ignición. Pero si añadimos este tipo de chispa a circuitos de más alto amperaje, como a los de una bobina de un automóvil, el mismo encendido causará la ignición. Lo cual quiere decir que son las características del circuito y el encendido mismo, los que gobiernan su capacidad para ocasionar la ignición.

El filamento de las lámparas de bolsillo y de algunos bulbos eléctricos, puede no ser lo suficientemente grande para producir el volumen necesario de superficie calentada, y ocasionar la ignición de un vapor. Pero (cuando se funden) en ocasiones son una fuente de ignición. Esto sucede porque el filamento se parte en dos y la energía combinada, liberada de la superficie calentada y del arco formado (cuando el filamento se parte) es suficiente para causar la ignición. En forma separada, ninguna sería una fuente de ignición. El problema de la chispa eléctrica ha sido controlado de la siguiente forma:

- 1) Suministrando una cubierta sólida alrededor de las posibles fuentes de ignición, llamadas cubiertas anti-explusiones.
- 2) Aislando la fuente de ignición de mezclas inflamables.
- 3) Diseñando circuitos intrínsecos, incapaces de ocasionar una ignición.

2.2.1.9. Impactos que originan chispas

Existen tres condiciones mediante las cuales la energía producida por un golpe (zapapico, martillo, etc.) puede ocasionar una chispa:

- 1) Golpeando el acero con un metal ó con un material resistente a las chispas, en donde las partículas de acero

estén parcialmente libres; aquí, la partícula interrumpe esa libertad, se oxida y causa la chispa.

- 2) Produciendo una reacción térmica al golpear un metal con un compuesto metálico (generalmente óxido). El compuesto se reduce químicamente para producir una chispa, a una temperatura extremadamente alta.
- 3) El impacto de un metal contra una roca tiene la posibilidad de crear una chispa, independientemente del tipo de metal o material con que se golpee. En este caso la energía del impacto es convertida en energía eléctrica, cuando se rompen los cristales de la roca bajo el esfuerzo de tensión. La generación de chispas se logra especialmente con cuarzo, sílice y areniscas.

En un pozo descontrolado existe la premisa de suponer que la corriente de gas y aceite fluyendo sin control, podría acarrear arena (sílice) a una velocidad suficiente que cualquier impacto ocasione una chispa, ó de que un metal pudiera golpear una pintura a base de óxido y de éste modo crear una fuente de ignición. Parece ser que es altamente razonable que un flujo tan prolífico de gas, acarreando material sólido, pueda producir múltiples fuentes de ignición. Si un hombre puede generar una chispa con una herramienta de metal, un flujo de gas puede fácilmente exceder el nivel de energía. Lo Único que se necesita para una explosión y un incendio, es que la mezcla correcta de aire-vapor se presente donde la chispa o la fuente de calor sea generada.

2.2.1.10. El agua como una fuente de ignición

El agua nunca ha sido directamente responsable de un incendio, pero muy a menudo es indirectamente responsable. Las características de expansión del agua son de 1500 veces su volumen líquido a 100 °C y presión atmosférica. Así, las mezclas de agua-aceite más calor, pueden ser una situación muy peligrosa. El agua en movimiento a altas velocidades, genera cierta fricción,

originando un comportamiento que en su debido orden puede causar la acumulación de electricidad estática. Esto puede conducir a una explosión, cuando la fricción alcance el punto en el cual se produzca una chispa. Por ejemplo: un relámpago es el resultado del movimiento a altas velocidades del agua-vapor por el aire.

2.2.1.11. Confinamiento de un incendio

Al fluir crudo de un pozo descontrolado, se puede presentar una acumulación junto al fuego (alrededor del cabezal del pozo) de una porción no quemada del mismo. El confinar este aceite no quemado, es esencial para evitar una propagación del incendio. Esto puede lograrse construyendo un sistema de diques similar a aquellos formados por las cisternas que rodean a los tanques de almacenamiento de crudo y gasolina. Se debe tener mucho cuidado con la acumulación de hidrocarburos y es mejor removerlos de su sitio inmediatamente.

2.2.2. Incendios de gas

2.2.2.1. Composición del gas natural

Para entender la combustión del gas, lo mejor es estudiar las características del metano, pues constituye la mayor parte de todos los gases naturales. En un análisis cromatográfico de masas del gas natural común, generalmente se encuentra la siguiente composición:

| <u>Composición</u> | <u>Porcentaje</u> |
|--------------------|-------------------|
| Metano | 60.70 |
| Etano | 5.50 |
| Propano | 1.60 |
| Butano | 0.50 |
| Pentano | 0.50 |
| Nitrogeno | 0.90 |
| Helio | 0.30 |
| Naftenos | 0.04 |

Además, los numerosos factores que están involucrados en el estudio del azar de la combustión del metano, son: la volatilidad, la densidad del vapor, la relación de la mezcla con aire, el rango de inflamabilidad de la mezcla, la temperatura mínima de ignición espontánea, los requerimientos de energía, la relación de quemado, la radiación de la flama, etc. Actualmente no hay medios para fijar la importancia de cada factor, además de que todos ellos pueden ser influenciados por el medio ambiente circundante, lo cual es útil para comparar las características del metano con otros materiales combustibles. Esta comparación se muestra en la Tabla 2.1.

2.2.2.2. Propiedades del metano

Las propiedades del metano también son importantes para entender sus características de ignición. Sus valores son:

| | |
|--|--|
| Peso molecular..... | 16.04 |
| Densidad del gas a 0 °C..... | 0.7188 gr/lt = 0.04475 lb/pie ³ |
| Densidad del gas a -181.5 °C..... | 1.753 gr/lt = 0.1094 lb/pie ³ |
| Punto de ebullición..... | -161.5 °C = 111.7 °K = -258.5 °F |
| Densidad del líquido a -164 °C.... | 415 gr/lt = 25.9 lb/pie ³ = 3.46 lb/gal |
| Calor de vaporización..... | 2.21 kcal/mole = 138 cal/gr = 248 Btu/lb |
| Calor de combustión (líquido H ₂ O)..... | 212.8 kcal/mole = 13.27 kcal/gr = 23,910 Btu/lb |
| Calor de combustión (gas H ₂ O)..... | 189.7 kcal/mole = 11.8 Kcal/gr = 21,240 Btu/lb |
| Temperatura crítica..... | -82.5 °C = 190.7 °K = -116.5 °F |
| Presión crítica..... | 45.8 atmosferas |

* Densidad del aire a 0 °C = 1.1573 gr/lt = densidad del metano a -104 °C.

Calculada asumiendo un comportamiento ideal.

Tabla 2.1

Comparación de las características de combustión del metano con las de otros combustibles.

| | (A) | (B) | (C) | (D) | (E) | (F) |
|-------------|---------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
| Combustible | Temp. de Ignición Espontánea °C | Temp. de Ignición de un Gas Caliente °C | Vel. Láminar de quemado cm/seg | Energía Min. de Ignición M. J. | Rango Flamable % | Índice del límite de Oxígeno % |
| Metano | 537 | 1325 | 39 | 0.3 | 5.0-14.0 | 12.1 |
| Propano | 468 | 990 | 44 | 0.3 | 2.2-9.5 | 11.4 |
| n-Butano | 405 | 990 | - | 0.3 | 1.9-8.5 | 12.1 |
| n-Hexano | 248 | - | - | 0.3 | 1.2-7.5 | 11.9 |
| 1-Octano | 418 | - | - | 0.3 | 1.1-8.0 | - |
| n-Dodecano | 204 | - | - | - | - | - |
| Benceno | 562 | 1020 | 46 | - | 1.4-7.0 | 11.2 |
| Etileno | - | 900 | 74 | 0.8 | 3.1-28.6 | 10.0 |
| Propileno | - | 1060 | 51 | - | 2.0-11.1 | 11.5 |
| Hidrógeno | - | 750 | 170 | 0.02 | 4.0-75.0 | 5.0 |

(A). Temperaturas mínimas de ignición espontánea de combustibles en el aire.

(B). Comparación entre la temperatura de ignición de un gas caliente y la temperatura límite de su flama.

(C). Energía de activación en combustión a alta temperatura.

(D). Concepto de energía mínima de ignición y su aplicación a la seguridad industrial.

(E). Límite de inflamabilidad de los gases y vapores.

(F). Concentración mínima de oxígeno para mantener la propagación de la flama cuando la mezcla aire-combustible sea diluida con nitrógeno.

Un atributo favorable del metano son sus características de dispersión. El metano es más ligero que el aire por lo que flota en el mismo, permitiendo una pequeña dispersión si las cantidades son limitadas. Este atributo es opuesto al de los combustibles más pesados que el aire, los cuales permanecen sin dispersarse en forma de capas o estratos a lo largo del suelo. Sin embargo, el metano puede acumularse en áreas confinadas (techos), dentro de una estructura contenedora.

Una revisión de la información indica que los incendios de metano se extinguen mejor con un gas inerte. La alta temperatura de ignición espontánea indica que una re-ignición después de extinguido el incendio (debido a las superficies calentadas por el fuego) no será problema; como lo sería en el caso del punto de inflamación bajo de un incendio de aceite crudo. Sin embargo, muchos pozos de gas descontrolados acarrean algunas cantidades de condensados que son un aceite de un punto de inflamación bajo.

Un pozo descontrolado e incendiado puede ser extremadamente peligroso para el personal, el equipo y el medio ambiente.

CAPITULO 3

CONTROL DE UN POZO MEDIANTE LA INSTALACION DEL EQUIPO SUPERFICIAL DE CONTROL ("TAPPING")

3.1. Suministro y manejo del agua

3.1.1. Fuentes de agua

A pesar de que resulta aparente el que una fuente de agua, para el enfriamiento y el ataque de un pozo incendiado, sea un factor lógico y obvio para ser tomado en cuenta cuando se planean las localizaciones de los pozos, son pocos los casos que lo consideran, pues nadie planea tener reventones e incendios. Si ocurre un reventón y el pozo se incendia, uno de los primeros requerimientos para la contención y el control del pozo incendiado, será una fuente de agua para enfriarlo. Puede o no ser adecuada para su uso, el agua disponible. Los factores que afectan su utilización son: acceso limitado, problemas del terreno o problemas de contaminación por la utilización de aguas salobres o saladas sobre terrenos ambientalmente sensitivos.

Una vez que estos problemas han sido resueltos, y que se dispone de una fuente de abastecimiento de agua para su uso, se debe implementar un plan para su aprovechamiento. Los siguientes temas tratan acerca del manejo del agua, cada uno de ellos tiene un impacto directo en el éxito de los resultados del control del pozo incendiado.

3.1.2. Factores de planeación

Cuando se planea el control de un pozo incendiado, se deben discutir y resolver los siguientes aspectos:

A. Presas de agua

Una presa de agua activa en las cercanías del pozo, es esencial. Para seleccionar el lugar de ésta, se deben tomar en cuenta las consideraciones de cada uno de los siguientes puntos:

1) Dimensiones y ubicación

El volumen de agua es de primordial importancia para el control del pozo. Por lo tanto, se debe construir una presa de tamaño adecuado. Una buena presa debe tener aproximadamente 60 de largo por 30 de ancho por 5 metros de profundidad; la cual, cuando este totalmente llena, tendrá 9.000 metros cúbicos de capacidad, abasteciendo unos 11.000 litros por minuto, durante 13 horas aproximadamente. Para evitar problemas de abastecimiento de agua, debe llenarse continuamente la presa con agua de otro lugar; además, se recomienda que la presa se ubique a favor de los vientos dominantes y a 200 metros de la localización.

2) Tanques portátiles de almacenamiento

Quando se dispone de tanques portátiles y en cantidad suficiente para almacenar volúmenes sustanciales de agua, resulta obvio que ésta deberá utilizarse racionadamente. El tener que transportar el agua en pipas desde lugares distantes, limita severamente el volumen de agua disponible para ser rociada sobre el fuego por periodos prolongados de tiempo. Sin embargo, si el agua puede bombearse desde otro sitio, hasta los tanques portátiles, los únicos factores limitantes para su uso son: a) gasto de abastecimiento y b) volumen de agua disponible en los tanques, si el suministro es interrumpido.

B. Distribución de tuberías

Las rutas que siguen las tuberías que proporcionan el agua son: 1) a las presas de bombeo y 2) al pozo incendiado, mediante tuberías conectadas desde las bombas y que afectan enormemente la movilidad alrededor del pozo. Al escoger el sitio para la distribución del agua, se deben tomar en cuenta las consideraciones de los puntos contenidos en el inciso 3.1.8.

C. Localización del drenaje

Cuando se utilizan grandes cantidades de agua en un incendio, el problema de su escasez puede solucionarse utilizando el agua ya disparada hacia el fuego, mediante un drenaje que la conduzca de vuelta hacia la presa de bombeo para su reutilización. Sin embargo, si la presa es relativamente pequeña y el tiempo de reposo muy corto, el agua drenada estará muy caliente y no producirá enfriamiento efectivo sobre el personal de control del pozo. Cuando el abastecimiento de agua es abundante el agua ya utilizada puede ser drenada a alguna zona conveniente, asegurándose de que no esté contaminada con hidrocarburos o sal.

D. Control de contaminantes

El agua ya utilizada por los sistemas de bombeo, frecuentemente contiene grandes cantidades de fluidos provenientes del pozo. A menudo es necesario construir presas contenedoras para retener estos fluidos y otros contaminantes transportados por el agua. Los hidrocarburos generalmente pueden ser transportados o separados hacia una presa o un tanque diferente para ser desechados más tarde, mientras que el agua puede ser canalizada de la presa contenedora si se juzga seguro el realizarlo. En áreas pantanosas o en las zonas adyacentes a ríos o arroyos, es necesario desplegar equipos contenedores y separadores de aceite, para mantener los contaminantes emitidos fuera del área del pozo.

E. Viento

Es un factor que puede tener efectos terribles en el control de un pozo incendiado. Su dirección y velocidad frecuentemente pueden cambiar muchas veces al día. Esto no solo afecta al patrón de riesgo, sino también dónde serán recogidos los contaminantes del pozo. Otro punto a considerar son las nubes de los gases no quemados, que pueden concentrarse alrededor del equipo de bombeo si la dirección del viento cambia repentinamente. Este factor debe considerarse, si es posible, cuando se seleccione el sitio para las presas de agua.

3.1.3. Aspectos importantes en el manejo del equipo de bombeo

Diversos tipos de bombas se usan en el control de un pozo incendiado, algunas de las cuales se muestran en el apéndice C.

En las motobombas que tengan dos o más succiones, es recomendable instalar válvulas de bloqueo en cada una de ellas, inmediatas al múltiple de succión, de tal forma que la revisión y el mantenimiento de dichas succiones sea individual y no haya necesidad de sacar de operación la bomba. Para evitar posibles obstrucciones por arena y basura en las succiones y mejorar su operación, se recomienda instalar válvulas check y flotadores en los extremos de cada una de ellas, además de seleccionar mangueras de succión del tipo más ligero, para facilitar su manejo.

Para el suministro de agua desde sitios cuya distancia es menor a 10 kilómetros, se recomienda usar motobombas centrífugas de un solo paso ("de volumen") con capacidades de hasta 8,000 GPM, accionadas con motores de combustión interna y montadas en patines o en su defecto, interconectar unidades de contraincendio de menor capacidad, en paralelo, a través de un múltiple y que descarguen a una línea de al menos 10 pulgadas de diámetro.

A fin de evitar pérdidas de presión en un arreglo en paralelo, se recomienda no hacer concurrir las descargas al cabezal general en ángulo recto, debiéndolas realizar de acuerdo a una configuración tipo "Y". Para disminuir el tiempo de habilitación del cabezal necesario, se recomienda tenerlo prefabricado en secciones, a manera de ejecutar el trabajo mínimo de soldadura, al momento de requerirse. El arreglo de este cabezal, puede ser similar al mostrado en el apéndice C.

3.1.4. Bases para sostener el equipo de bombeo

Una vez que se ha seleccionado el lugar para construir la presa de agua, se deben fabricar bases de apoyo para colocar el equipo de bombeo. Estas deben ser lo suficientemente firmes y grandes, para sostener todo el equipo y permitir el acceso al personal que las mantendrá en operación. De esta forma, se evitarán problemas de asentamiento del equipo, derrumbes y pisadas

peligrosas alrededor de las bombas. Las bases pueden construirse de duelas o tablones (1" x 12" x 30' ó 4" x 12" x 30', respectivamente); o bien, colocar el equipo de bombeo sobre grandes patines metálicos.

3.1.5. Escudos protectores contra el calor

Estos escudos deben construirse y colocarse para proteger al equipo de bombeo, al personal y a las tuberías y mangueras utilizadas, del calor radiante y/o de las flamas asociadas con el pozo incendiado, figura 3.1. El calor radiante afecta enormemente la operación del equipo de bombeo, así como al personal asignado para mantener su funcionamiento. Las líneas abastecedoras de agua, cercanas al fuego, deben cubrirse con tierra o con láminas de estaño, para prevenir que el calor las afecte o caliente el agua dentro de ellas. Todas las válvulas y múltiples de distribución de agua, deben protegerse del calor.

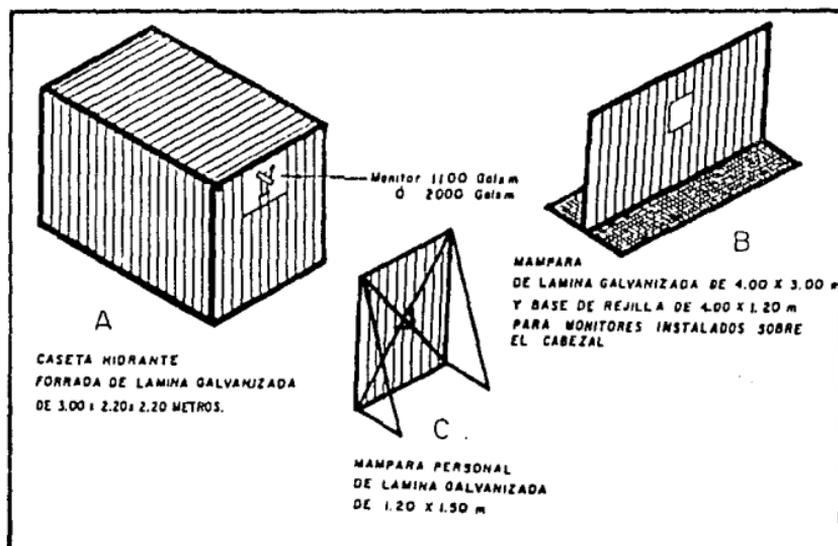


Fig. 3.1 Caseta hidrante y mamparas protectoras

3.1.6. Rutas de las tuberías de agua

Cuando se seleccionan las rutas de las líneas de agua, se deben tomar en consideración los siguientes puntos:

1) Librar el pozo

El acceso al pozo deberá quedar libre, para permitir el tránsito del equipo pesado, que removerá los escombros y realizará las operaciones para la instalación del equipo superficial de control y de Snubbing.

2) Viento

Como se mencionó anteriormente, los cambios de dirección del viento, pueden afectar contrariamente las operaciones de control. Se debe procurar que las líneas de abastecimiento de agua, no se ubiquen únicamente de un solo lado de la localización del pozo.

3) Pérdidas por fricción

El gasto de agua para controlar el incendio, puede ser afectado enormemente por las pérdidas de presión en la tubería, cuando se tienden líneas de tamaño muy reducido, así como por el uso de gran cantidad de codos y uniones y las grandes distancias desde las bombas hasta los monitores de descarga. Por ello el tamaño de la línea de descarga de una bomba, debe ser de medida superior a la de la brida en la descarga de tal bomba. Las tuberías ramificadas de la línea principal, deben de ser de un tamaño suficiente que les permita manejar el volumen y la presión dados para cada tobera seleccionada. Se recomienda que las tuberías y las mangueras conectadas desde las líneas de abastecimiento hasta los monitores, no sean mayores de 30 metros en longitud.

4) Protección contra el calor

Como se mencionó anteriormente, la protección (contra el calor) de los monitores, mangueras, equipo y personal, es vital para el éxito de las operaciones de control.

5) Utilización de líneas existentes

Cuando la situación lo permita, se recomienda que, para el transporte del agua, se utilicen los ductos existentes, tales como: oleoductos, gasoductos, sistemas de bombeo neumático, sistemas de inyección de agua, líneas de descarga de pozos, etc.; que pasen próximos o atraviesen el área del problema.

6) Utilización de mangueras flexibles

Para el caso en que las fuentes de abastecimiento de agua no se localicen próximas al problema, y no se disponga de líneas existentes para el transporte del agua (como las mencionadas en el inciso anterior) se recomienda, para facilitar el tendido de ductos, la utilización de mangueras flexibles de hule de 8 pulgadas de diámetro, con extremos bridados, dotadas con carrete motopropulsado; de características similares al de la marca Uniroyal.

3.1.7. Distribución de los monitores de agua

Cuando se planea el ataque y control de pozos incendiados, uno de los aspectos más importantes y útiles es el uso del agua. La ubicación correcta de los monitores para el control y el enfriamiento del área de trabajo (casi como para proteger al personal que trabaja en las proximidades del pozo incendiado y al equipo) incrementará enormemente la eficiencia de las operaciones de control, mientras se mantiene un nivel de seguridad alto. Los monitores deben ser distribuidos de tal manera que proporcionen lo siguiente:

- Protección de los trabajadores en el pozo
- Protección del equipo pesado utilizado
- Control del incendio
- Facilidad de acceso a/desde el pozo con el equipo necesario

Cuando se distribuyen los monitores, se deben hacer pruebas para prevenir posibles cambios en la dirección del viento, que afectan su alcance y cobertura. Si los monitores pueden ser ubicados desde dos direcciones diferentes y así cubrir la localización, los efectos del aire pueden ser disminuidos. Una combinación de monitores fijos, monitores portátiles y sus mangueras, es una aproximación efectiva para combatir pozos incendiados, dado que brinda un alto nivel de flexibilidad, para ajustar la cobertura del agua debido a cambios en la dirección del viento, del área de trabajo ó de la dirección de aproximación hacia la boca del pozo.

Los monitores utilizados para la protección de las brigadas y en la extinción del fuego, deberán ser instalados dentro de una caseta forrada con lámina galvanizada, dotada de un sistema de enfriamiento (regaderas) en su interior, para protección del personal que opera los monitores, figuras 3.1.A. y 3.2. Dichas casetas serán movidas de acuerdo a las necesidades. Los monitores van conectados al cabezal de distribución, por medio de mangueras flexibles y tubería de aluminio. Los monitores instalados directamente o sobre el cabezal (dentro de la localización del pozo) en vez de caseta deben tener una mampara de protección forrada con lámina galvanizada, como la mostrada en la figura 3.1.B.

Con el fin de evitar pérdidas de tiempo y esfuerzo, se recomienda dejar instaladas las casetas-monitor con sus respectivas conexiones, durante el tiempo que duren las actividades de control del pozo, teniendo la precaución de dejar alimentado el sistema con un flujo mínimo de agua, cuando se suspenda la jornada de trabajo. Esto último, con el objeto de evitar la formación de vapor a presión, producido cuando la línea está vacía y expuesta al calor y que puede provocar el rompimiento de un tubo o una manguera al instante de suministrarle agua.

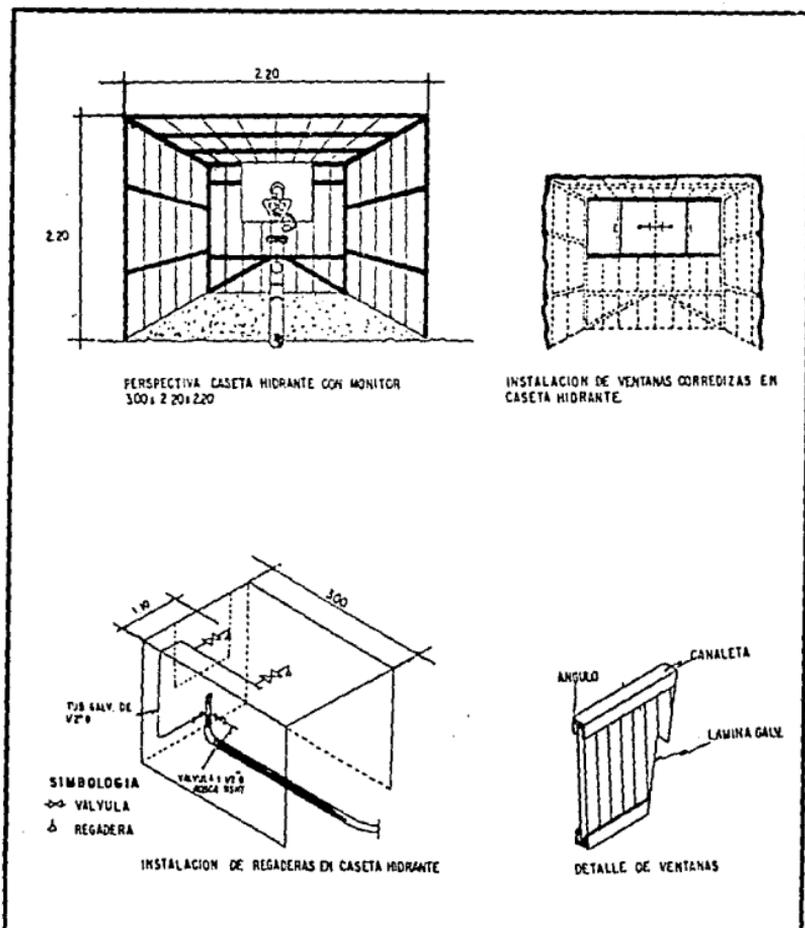


Fig. 3.2 Instalaciones realizadas a una caseta hidrante.

Para la aplicación de agua, se recomienda utilizar monitores con capacidad mínima de 1.100 GPM, que contengan extensiones en las boquillas, para incrementar el alcance del chorro de agua y mejorar su eficiencia.

3.1.8. Factores de utilización del agua

Para determinar el tamaño de los sistemas, así como los gastos de agua a utilizar, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

1) Tamaño del incendio

Un gran incendio o un incendio de aceite y/o gas, es mucho más caliente y requiere de mayor cantidad de agua para su enfriamiento, que uno de aceite y/o gas con flujo de agua salada.

2) Tipo de localización

Si el terreno es duro y rocoso, se encontrarán menos problemas, para el drene de la gran cantidad de agua utilizada. Si la localización es inestable, como una zona pantanosa o una adyacente a un río ó arroyo, se necesitará el equipo de control de contaminantes para eliminar aquellos presentes en el flujo del pozo.

3) Reservas de agua

De ser posible, mantener un nivel alto de agua en las presas o en los tanques en cualquier momento, como medida de seguridad. Esto permitirá a los trabajadores continuar su labor alrededor del pozo en forma segura, y suministrará una reserva de agua suficiente para permitir su drene hacia una área adecuada, en caso de que el abastecimiento de agua (desde las presas o los tanques) fuera interrumpido repentinamente.

4) Sistemas de respaldo

Una vez distribuidas las bombas, las líneas y los monitores; se deberá contar con un equipo de respaldo en el lugar mismo, por si ciertas piezas del equipo fallan (bombas) o se dañan (monitores, toberas, mangueras, líneas de aluminio). Esto ayudará a minimizar las demoras y proporcionará operaciones de control más seguras.

5) Gastos a utilizar

Las descargas de las bombas utilizadas para suministrar el agua para el enfriamiento y la protección del personal, deben adecuarse a la capacidad de flujo del sistema. Por ejemplo, si dicha capacidad es de 3,000 GPM a 100 lb/pg², más de 3,000 GPM ocasionará considerables caídas de presión, dando por resultado un escaso alcance y cobertura.

3.2 Retiro del equipo de perforación dañado

3.2.1. Monitoreo de atmósferas tóxicas o asfixiantes

Se deberá determinar la presencia de gases tóxicos (H₂S) y/o asfixiantes (CO₂, N₂) con la finalidad de establecer un plan de control adecuado.

3.2.2. Formación de cuadrillas de trabajo

Cuando se trabaja alrededor del descontrol, es una buena idea hacerlo con el sistema de "compañeros" y siempre entrar para hacer un trabajo específico, salir y coordinarse con el personal adicional. Lo cual ayudará a mantener todos sus movimientos en forma uniforme segura y combinarse con todas las demás operaciones de trabajo, para el control del pozo.

Para el caso de pozos incendiados, se considera conveniente integrar cuadrillas de personal para el retiro de equipo dañado (que laboren también durante la noche) con el mismo número de elementos que las diurnas, ya que el calor ambiental disminuye notablemente y se cuenta con suficiente visibilidad.

Se recomienda que al entrar a estrobar equipo, se haga en forma ordenada y con personal en un solo frente de trabajo.

Para evitar problemas y reducir posibles inconvenientes entre los equipos de trabajo, es recomendable definir claramente las funciones de cada uno. La formación de un grupo para el control del pozo, no solamente proporcionará mayor seguridad y eficiencia en las maniobras para la colocación del equipo superficial de control, sino que además proporcionará al personal clave y los ingredientes necesarios para contar con una versatilidad total, sobre cualquier operación para el control del pozo.

3.2.3. Sistemas de comunicación

La comunicación entre los diferentes equipos es un deber. Se tendrá que contar con radios para ser utilizados dentro y fuera de la localización; así como con teléfonos (de ser posible). Se debe establecer un sistema de comunicación por medio de señales manuales, para el caso en que el ruido sea mayor que la voz o los radios de comunicación. Al respecto los equipos de trabajo deberán adiestrarse previamente.

3.2.4. Disposición del puesto de emergencia para primeros auxilios

Se deben hacer arreglos para disponer en la localización y en todo momento, de un puesto de emergencia para primeros auxilios; además de ambulancias y servicios médicos generales. La comunicación también a centros hospitalarios vecinos, deberá ser abierta y clara, para hacer expedita la atención de trabajadores enviados.

3.2.5. Utilización de equipos de protección para el personal.

Se recomienda que el personal que entrará a estrobar las partes del equipo, utilice equipo de protección personal ligero (no cnaquetón de bombero; preferentemente de tela "nomex" o de algodón, consistente de ropa interior (camiseta y calzón largo), calcetines de lana, overol, capucha pasamontañas, casco para bombero con visera, botas de piel tipo minero y guantes.

3.2.6. Retiro de equipo sin protección de agua

Quando aún no se disponga de agua para protección del personal, se recomienda iniciar el retiro de las partes del equipo más accesibles (motores, plantas de luz, bombas, presas de lodo, tanques de diesel, etc.) protegiéndose únicamente con mamparas personales (figura 3.1.C.) y escudándose de la radiación con el mismo equipo por retirar. Antes de efectuar dicho retiro, es conveniente estrobar el máximo de equipo, ya que al ir quedando despejada la localización, el personal estará más expuesto al calor radiante, por carecer de la protección que proporciona el mismo equipo.

3.2.7. Utilización de tractores para el retiro de equipo

Para el retiro de equipo, se recomienda emplear tractores de oruga con capacidad similar al modelo D-9 de Caterpillar, con la "jaula" del operador forrada con lámina galvanizada en el techo, los dos costados y la parte posterior; con ventanas para visibilidad de 30 por 30 centímetros y el frente libre (figura 3.3). Es necesario proteger del calor todas las mangueras del sistema hidráulico de los tractores, forrándolos con tela de asbesto.

3.2.8. Utilización del equipo de rescate con gancho

El equipo de rescate con gancho, se emplea en pozos incendiados en los cuales no es posible acercarse para efectuar otras maniobras. Consta de una pluma seccionable de 17 metros de longitud, en cuyo extremo se instala un gancho o algún otro aditamento (ver apéndice C) dependiendo de la operación a efectuar. Esta pluma se halla colocada sobre un chasis con orugas (guayín) en cuya parte media está instalado un caballete en forma de "A" (contrapluma), el cual en su parte superior está sujetado por un tirante que va hasta la parte media superior de la pluma y que sirve para subirla o bajarla (figura 3.4.).

El uso del gancho tiene como objetivo: despejar la boca del pozo para que fluya verticalmente. Para operar el gancho, la

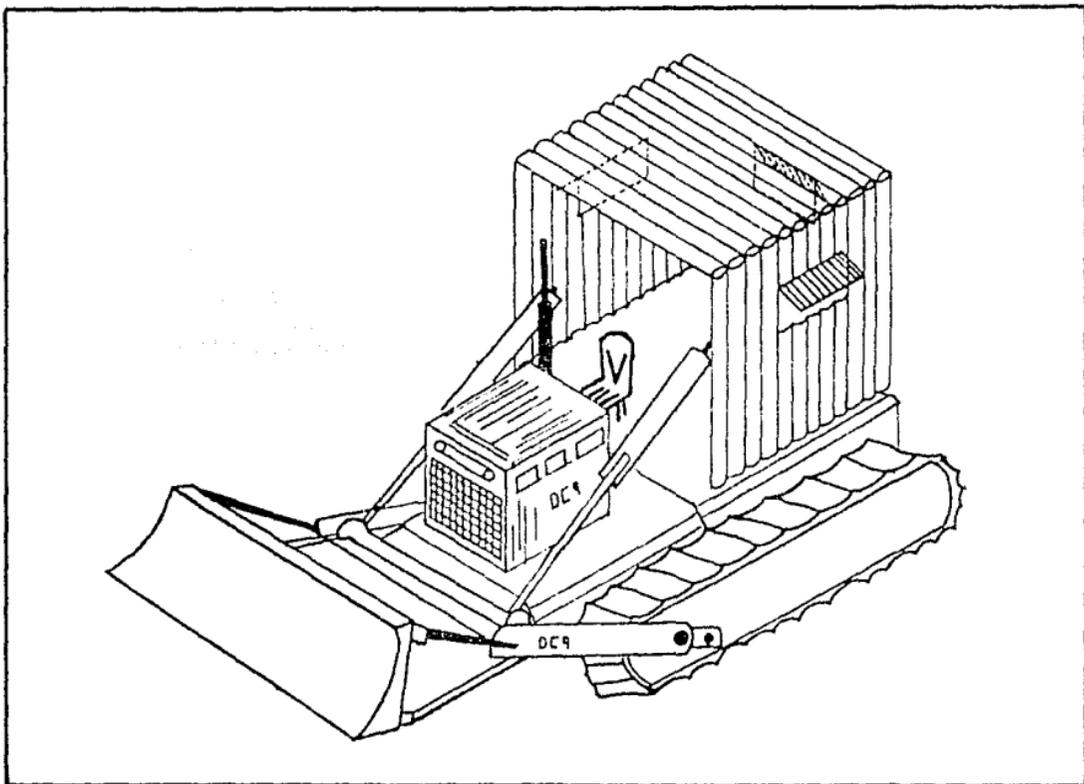


Fig. 3.3 Protección a las cabinas de los tractores

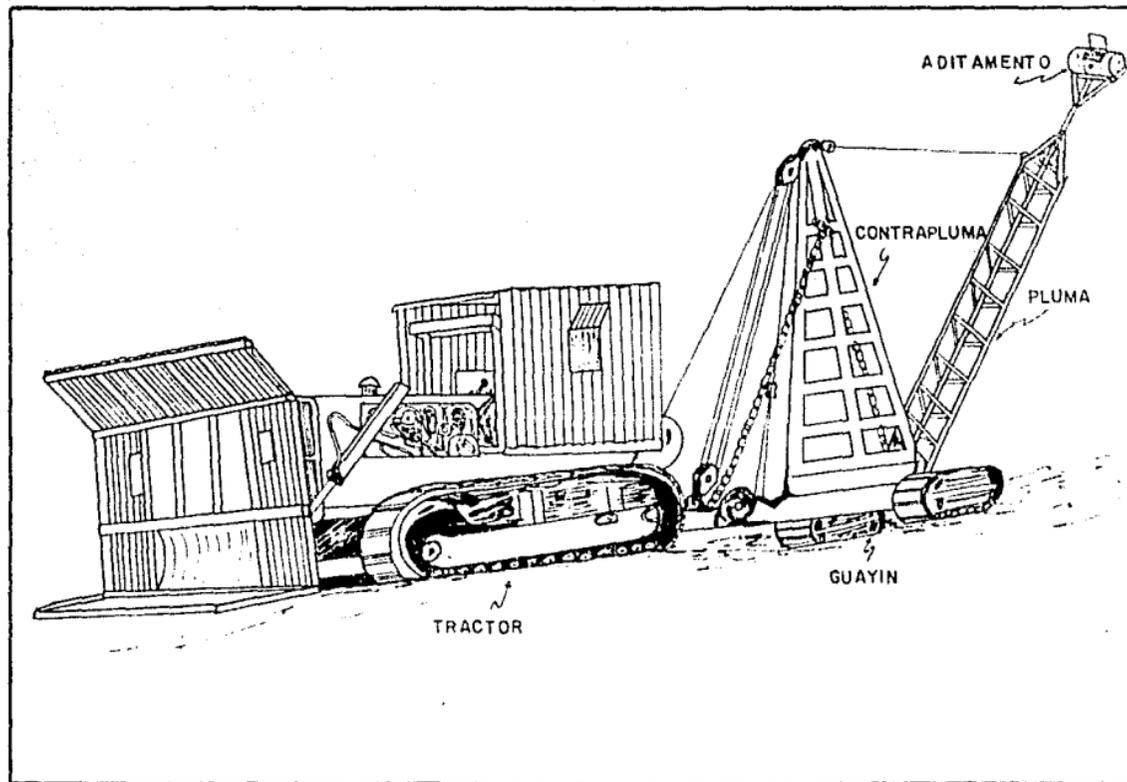


Fig. 3.4 Equipo de rescate con gancho

manobra debe hacerse por la parte frontal del equipo, ya que por lo general en la sección posterior, se encuentran el malacate, sus motores y el freno magnético. En los trabajos con gancho se debe tener la precaución de enganchar las piezas que se encuentren en primer término, ya que si se introduce demasiado, puede quedar atrapado, originando la pérdida del gancho y en ocasiones daños severos a la pluma. La estrategia que debe emplearse, es la de ir rompiendo los miembros estructurales de la periferia, hacia el centro del pozo. En ocasiones, es necesario variar el tipo de gancho, para recuperar alguna pieza específica o usar otros aditamentos (como el rastrillo) para eliminar chatarra y escoria, etc.

Cuando es necesario usar explosivos a boca del pozo para extinguir el fuego, también se usa este equipo. Para ello, se instala en el extremo de la pluma un recipiente donde se aloja la carga explosiva (que consiste regularmente en dinamita). Para conectarla al detonador, se emplea un fulminante y un conductor, el cual va del recipiente (a través de la pluma) hasta la cuchilla del tractor. Para detonar la carga, se coloca el recipiente a un lado del flujo, situando el equipo en tal forma que la cuchilla del tractor, sirva para proteger al operador en el momento de detonar la carga.

3.2.9. Acondicionamiento del terreno para facilitar el retiro de equipo

Es recomendable que para facilitar el manejo de las partes retiradas del equipo, se acondicione una plataforma o plantilla próxima al pozo para realizar las maniobras de acomodo de dichas partes, sobre camiones tipo plataforma petrolera o quinta rueda.

3.2.10. Maniobras para recuperar la subestructura del equipo

Dependiendo de las condiciones en que queden las conexiones superficiales del pozo (después del accidente) y de acuerdo al tipo de patín que contenga a la subestructura del equipo, es recomendable recuperar ésta, ya sea por bloques o por secciones.

3.2.10.1. Recuperación de la subestructura por bloques

Si la situación permite recuperar la subestructura por bloques, se recomienda realizar cortes con equipo de oxiacetileno tipo "bocado" (en la base para estrobar) y desplazar toda la subestructura con el uso de un aparejo de poleas, guarnidas a 8 líneas con cable de acero de 1 3/8" de diámetro, montando cada polea sobre un trineo. El aparejo deberá de anclarse por medio de tres tractores del tipo D-9 Caterpillar o similar. Uno de los extremos del cable guarnido, deberá engancharse al cable del malacate de un camión tipo "Winche", que a su vez será anclado por un tractor del tipo D-9. El otro extremo del cable guarnido, deberá entrelazarse con la última vuelta del mismo y unirlo por medio de grampas, figura 3.5.

En el caso del uso del aparejo, se recomienda estimar el peso a manejar y seleccionar aparejos al doble o triple de la capacidad calculada. En el apéndice C se proporcionan los pesos aproximados de los componentes de un equipo de perforación, así como las resistencias y usos de los cables de acero utilizados en las maniobras.

3.2.10.2. Recuperación de la subestructura por secciones

Si la situación de las conexiones del pozo no permiten recuperar la subestructura por bloques, se recomienda efectuar cortes con equipo de oxiacetileno de secciones de la subestructura, tirando de ellas con estrobos y un tractor del tipo D-9.

3.2.11. Utilización de equipos de corte de oxiacetileno

Es recomendable que los equipos de corte de oxiacetileno, que se tengan que usar en los cortes de la subestructura y otros, para facilitar su manejo, cuenten con cilindros pequeños con capacidad de 0.5 m³ (45 x 10 cm, alto x diámetro). Dichos cilindros y las mangueras, deberán forrarse con tela de asbesto para protegerlos del calor radiante.

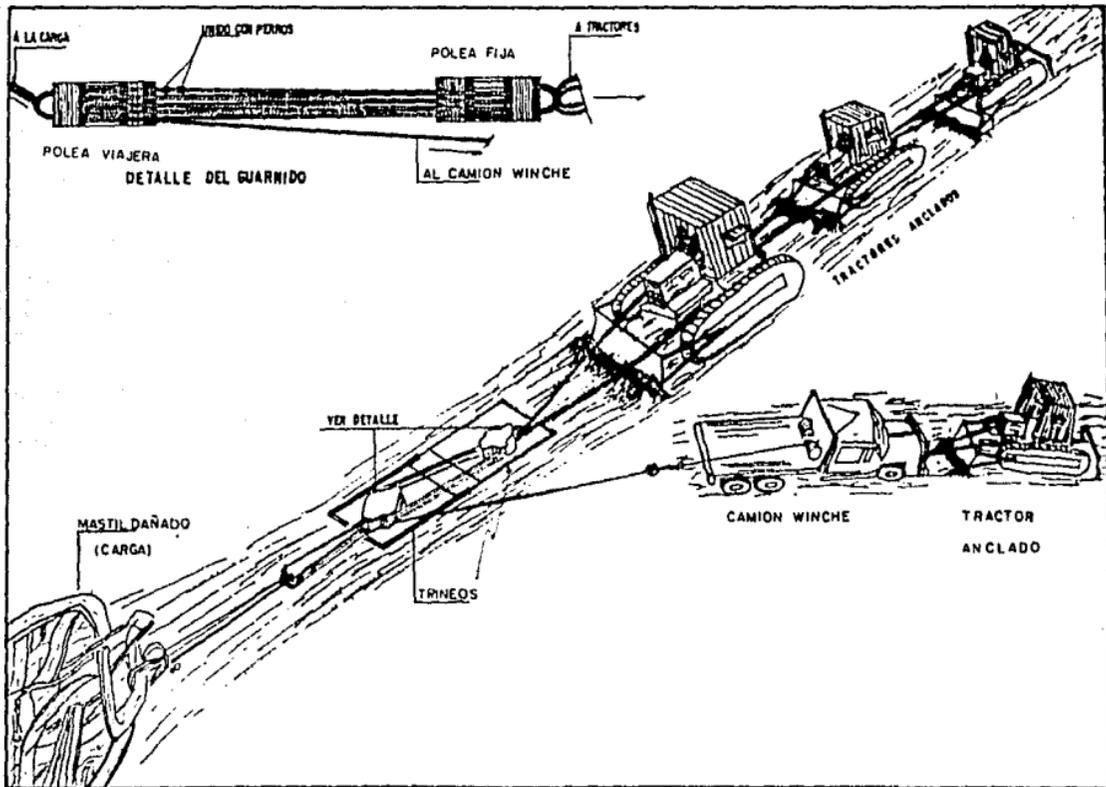


Fig. 3.5 Recuperacion de la subestructura por bloques

3.2.12. Utilización de dispositivos anti-chispa en el equipo motorizado

En el caso de descontrol de pozos con flujo a la atmósfera sin incendio, se recomienda acondicionarle a todos los tractores y camiones tipo plataforma petrolera o quinta rueda, un matachispas en el escape del motor, integrado con mangueras metálicas flexibles desde el escape y ahogadas en agua (dentro de un tambor o medio tambor de 200 litros) figura 3.8.

3.2.13. Monitoreo de atmósferas explosivas

Si el descontrol se presenta sin incendio, se deberá efectuar la labor de monitorear atmósferas explosivas en todas y cada una de las maniobras que se realicen con equipos acondicionados con motor de combustión interna (tractores, camiones, etc.).

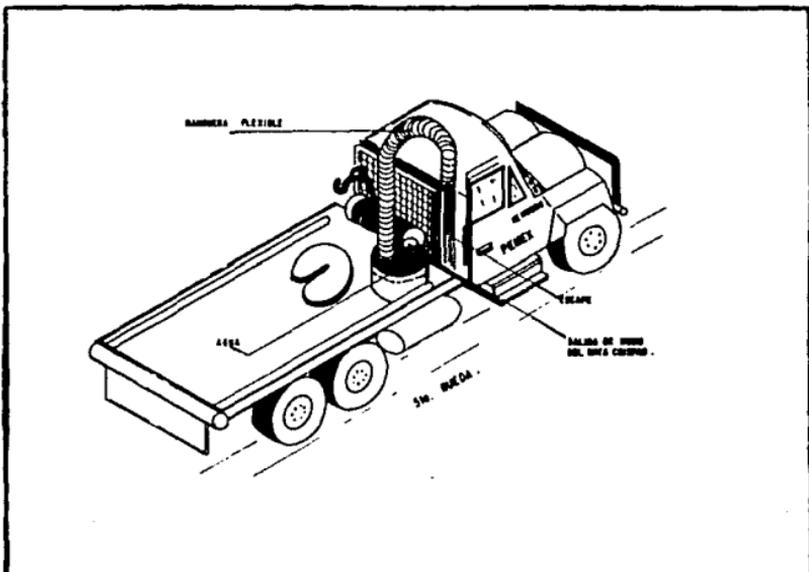


Fig. 3.8 Colocación de dispositivos antichispa en las unidades motorizadas.

3.2.14. Desplazamiento total del equipo de perforación

En el caso del descontrol de pozos sin incendio, siempre que las condiciones del pozo lo permitan (posición de la flecha o de las conexiones superficiales), se recomienda desplazar todo el equipo con el uso del aparato descrito en el inciso 3.2.9.1.

Previo al desplazamiento se deberán colocar tarimas de apoyo prefabricadas con tubería de perforación bien niveladas, por donde deba deslizarse el equipo, colocando al momento de realizar la operación, cortinas de agua en los puntos donde se puede presentar fricción, para prevenir la ignición de los vapores emanados.

3.3. Extinción del fuego de un pozo incendiado

3.3.1. Acondicionamiento de la localización

Previo a la etapa de extinción del fuego y para facilitar la distribución del equipo contra incendio (casetas-monitor), se deberá acondicionar la localización, retirando las partes del equipo afectado, y preparar la boca del pozo para realizar la maniobra de colocación del conjunto de control.

3.3.2. Formulación de un programa completo para sofocar el fuego

Para la extinción del fuego deberá formularse un programa que incluya el realizar en forma paralela los preparativos para atacar el fuego con dos opciones: una mediante la aplicación solamente de agua y otra aplicando nitrógeno y polvo químico seco en forma simultánea. La distribución (sobre la localización) del equipo utilizado en ambas opciones, puede hacerse en forma similar a la mostrada en el apéndice C.

3.3.2.1. Extinción del fuego mediante la aplicación de agua

Para la opción de extinción mediante la aplicación de agua, es conveniente ubicar cuatro casetas con monitor de 2,000 GPM, dos al norte y dos al sur de la boca del pozo. Los chorros de agua deben dirigirse a la flama en forma secuencial. El primer monitor,

debe dirigirse a la boca del pozo, levantándolo gradualmente. En el momento que sea notable la disminución de la flama, se dirige un segundo monitor más arriba del primero (que va "barriendo" la flama). En el caso de no tener éxito repetir el procedimiento pero con cuatro monitores, dos dirigidos simultáneamente para "barrer" y dos para lograr completamente la extinción (figura 3.7).

3.3.2.2. Extinción del fuego mediante la aplicación de nitrógeno y polvo químico seco

Para la inyección del nitrógeno, se recomienda habilitar un cabezal con seis boquillas de aspersión, una cada 60 grados (figura 3.8) el cual debe montarse sobre la tubería de revestimiento, en la parte inferior de la boca por donde está fluyendo el pozo, alimentado por dos líneas de tubería de 2 7/8" de diámetro desde un carro-thermo de 5,000 metros cúbicos de gas nitrógeno. Para la aplicación del polvo químico seco, es necesario habilitar dos líneas de tubería de 2" de diámetro, cada una conectada desde un extintor tipo Fire-Boss de 1,500 libras, ubicados lo más cerca posible del pozo, hasta la propia boca del mismo. Esta recomendación, en la práctica, aún no ha sido probada, pero el mercado mundial dispone ya de paquetes con 10,000 libras de capacidad para ser instalados en la boca del pozo y accionados con un botón, al inicio del incendio.

3.4. Instalación del equipo superficial de control

3.4.1. Dimensiones del equipo superficial de control

Las dimensiones del cabezal y/o preventor a instalar, dependerá de las condiciones en que hayan quedado las conexiones anteriores, ó la boca del pozo.

3.4.2. Construcción de una fosa de trabajo alrededor del pozo

Dependiendo de la profundidad a la que hayan sido instaladas las conexiones anteriores al siniestro, se recomienda habilitar

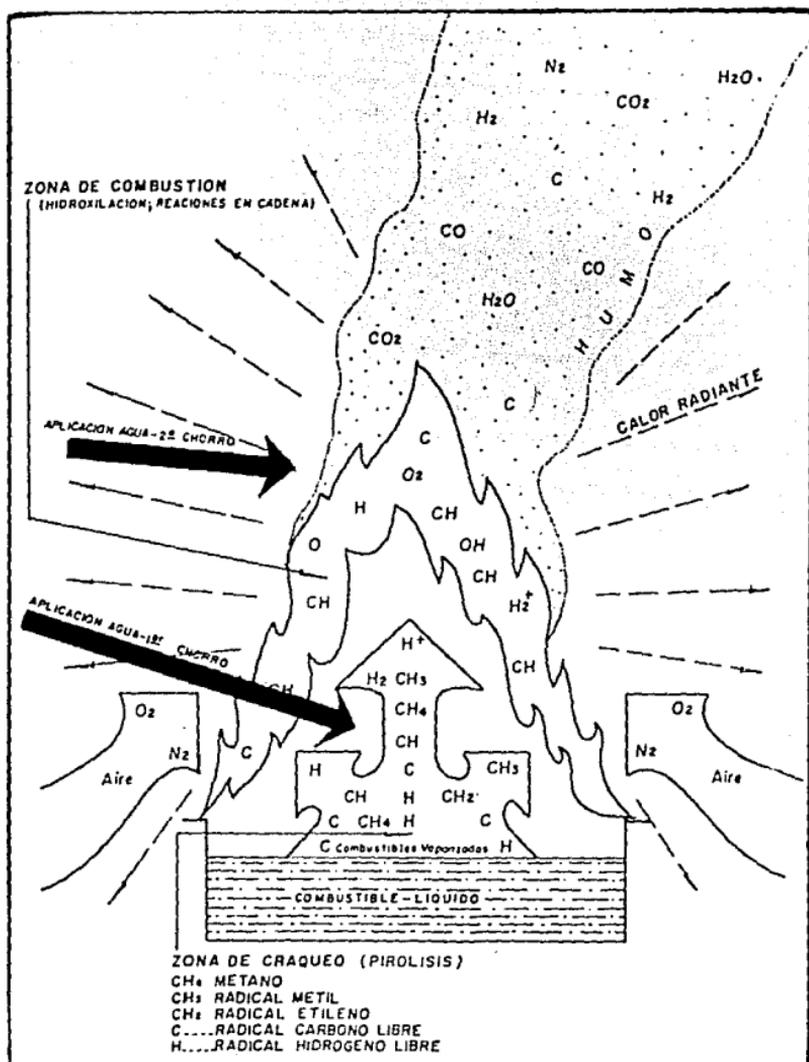


Fig. 3.7 Extinción del fuego mediante la aplicación de chorros de agua.

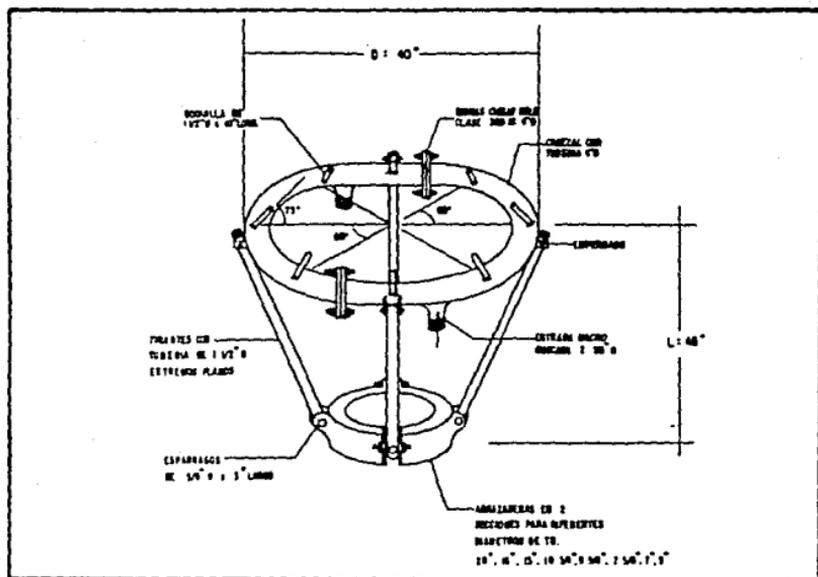


Fig. 3.C: Cabezal circular para la aplicación de nitrógeno.

una fosa de trabajo al pie del pozo (cañon incendiado) preferentemente de 30 x 30 x 3 metros, con la finalidad de efectuar los cortes necesarios a las tuberías de revestimiento.

3.4.3. Utilización de unidades tractorperforadoras (tracdril)

Ante la posible formación de un bloque de fierro fundido alrededor de la tubería de revestimiento, se recomienda tener disponibles unidades tractorperforadoras con barrena de 3" de diámetro, perforar varios agujeros en el bloque para debilitarlo, y posteriormente fracturarlo con tractores.

3.4.4. Instalación del cabezal de estrangulación

En forma simultánea a la actividad del corte de la tubería de revestimiento (y para ganar tiempo) se recomienda instalar desde la orilla de la localización, el cabezal de estrangulación y las líneas a la presa de quema.

3.4.5. Achique de la fosa de trabajo

Para esto, dependiendo del tipo de suelo que se tenga en la localización del pozo, se recomienda utilizar motobombas con capacidad para desplazar volúmenes de agua con alto contenido de partículas sólidas ó, si el terreno es muy arenoso, utilizar una draga de succión (Hydroflo).

3.4.6. Cortes de las tuberías de revestimiento

Estando incendiado el pozo, en las tuberías de revestimiento en las que no se observe flujo de hidrocarburos, los cortes y biseles podrán realizarse con oxiacetileno.

Los cortes en la tubería de revestimiento conductora del flujo, deberán efectuarse a pozo incendiado y con el uso de cortadores neumáticos. Se recomienda proveerse con anticipación de estos dispositivos, preferentemente para cortar tuberías desde 4 hasta 18 pulgadas de diámetro.

Cuando se tenga flujo de hidrocarburos por más de una tubería de revestimiento y no se cuente con el cortador del diámetro requerido, los cortes de dichas tuberías se realizarán con cable de acero, mediante fricción.

3.4.7. Revisión de la excentricidad de la tubería de revestimiento

Antes de efectuar el corte de la tubería de revestimiento que aporta el flujo del pozo, se recomienda que en el punto seleccionado para el corte se calibre la tubería con micrómetro para verificar ausencia de excentricidad.

3.4.8. Simulacros de la colocación del equipo superficial de control

Se recomienda que el grupo de personal técnico que se encargará de la colocación del cabezal y preventores en la boca del pozo, efectúe previamente simulacros de esta maniobra.

3.4.9. Extinción del fuego

Previo a la actividad de instalación del cabezal y preventor, deberá extinguirse el fuego, en los incisos contenidos dentro del punto 3.3 se dan algunas recomendaciones para ello.

3.4.10. Instalación del equipo superficial de control

Con el apoyo de una grúa de 60 toneladas bien anclada y con dos tensores de guía (estrobos de 7/8" de diámetro con longitud mínima de 30 metros), atados cada uno a un camión tipo quinta rueda, se realizará la maniobra de instalación del ó los conjuntos de control.

Para la maniobra de instalación del cabezal, se recomienda pasar el extremo de un estrobo a través de dos cáncamos (ó armellas) apernados, con los "ojos" hacia la parte inferior de la brida y por dos grilletes fijados en "orejas" soldadas a una grampa (que se coloca previamente en la tubería de revestimiento). Se hace lo mismo con el otro estrobo, pero pasándolo por dos cáncamos y dos grilletes instalados diametralmente opuestos a los anteriores. Los extremos de cada estrobo, se atan a los cables de los winches (de dos camiones tipo quinta rueda) colocados en sentido opuesto. El izado del cabezal se hace con la grúa, estrobándolo por cuatro cáncamos apernados con los "ojos" hacia la parte superior de la brida y colocados diametralmente opuestos, figura 3.9.

Para la maniobra de la instalación del preventor, se recomienda pasar el extremo de un estrobo a través de dos orificios de la brida del preventor y por los dos orificios colineales de la brida del cabezal (ya instalado) se hace lo mismo con el otro estrobo, pero pasándolo a través de dos orificios diametralmente opuestos al primero. Los extremos de cada estrobo, se atan a los cables de los winches de dos camiones colocados en sentido opuesto. Además, con cables de manila, deberán atarse dos guías entre las válvulas del carrete de control que va unido al preventor; las cuales serán tiradas por el personal (únicamente para centrar al preventor) mientras se tensan los estrobos guía.

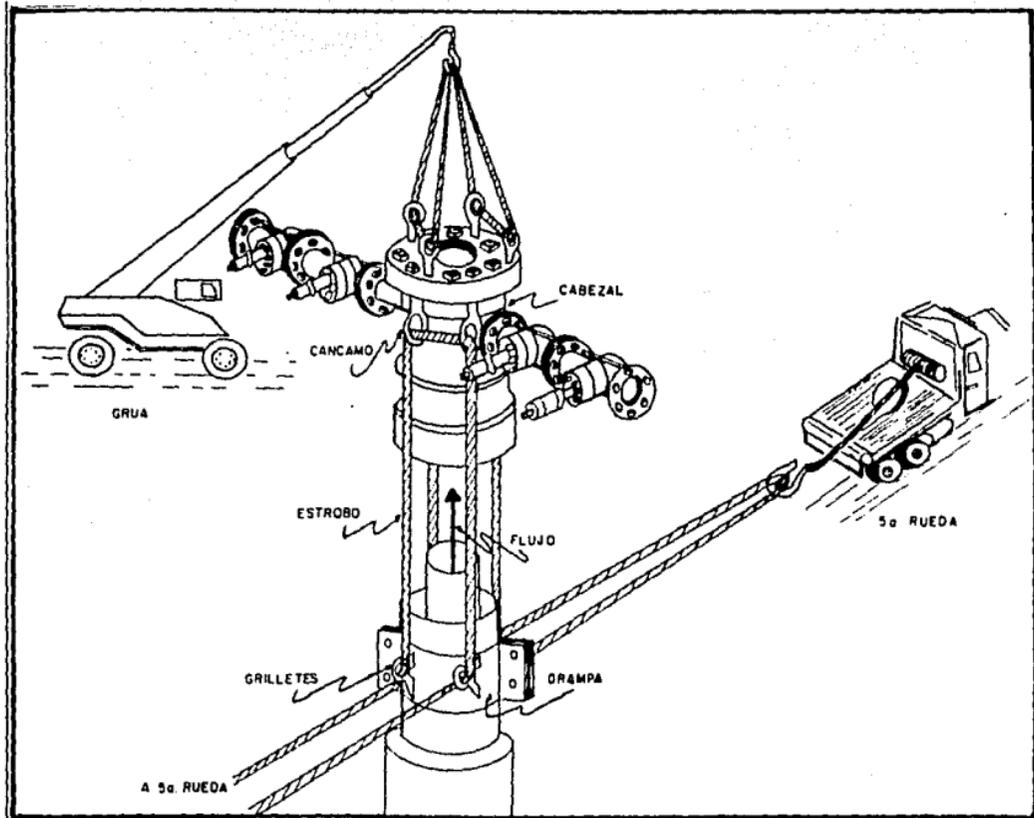


Fig. 3.9 Maniobras para la instalación del cabezal

Después, el personal deberá alejarse del área, por la dispersión del flujo de aceite y/o gas que se produce al chocar el preventor con la corriente. El izado del preventor se hará con la grúa, estrobándolo con cuatro cancamos sobre la brida superior en agujeros diametralmente opuestos, figura 3.10.

Para la colocación de las cuñas se recomienda utilizar tres gatos de 100 toneladas cada uno y de 35 centímetros de longitud, colocados sobre una placa de 2 pulgadas de espesor, la cual deberá sentarse sobre el tubo conductor.

3.4.11. Posible reignición de los gases del pozo

Una de las principales precauciones que se deben observar, es la de mantener al personal de trabajo, alejado del pozo; ya que se puede generar una reignición de los gases del pozo, presentándose el efecto llamado "bola de fuego" cuando se baja el conjunto de control hacia la boca del pozo.

3.4.12. Soldado del cabezal de control instalado

Para mayor seguridad, antes de efectuar el cierre del preventor y con el flujo a la atmósfera, se debe soldar el cabezal de control instalado a la tubería de revestimiento correspondiente. Para esto, se deberá verificar también, la ausencia de una atmósfera explosiva abajo de la boca del pozo, donde se va a soldar.

3.5 Control del pozo

El control del pozo comprende dos etapas: 1) la de poder acceder con seguridad a la boca del pozo (mediante el control del flujo) y 2) la de la recuperación del control primario del mismo.

3.5.1. Control del flujo

El control del flujo mediante el equipo mencionado, ya instalado en la boca del pozo, se conoce como "capping".

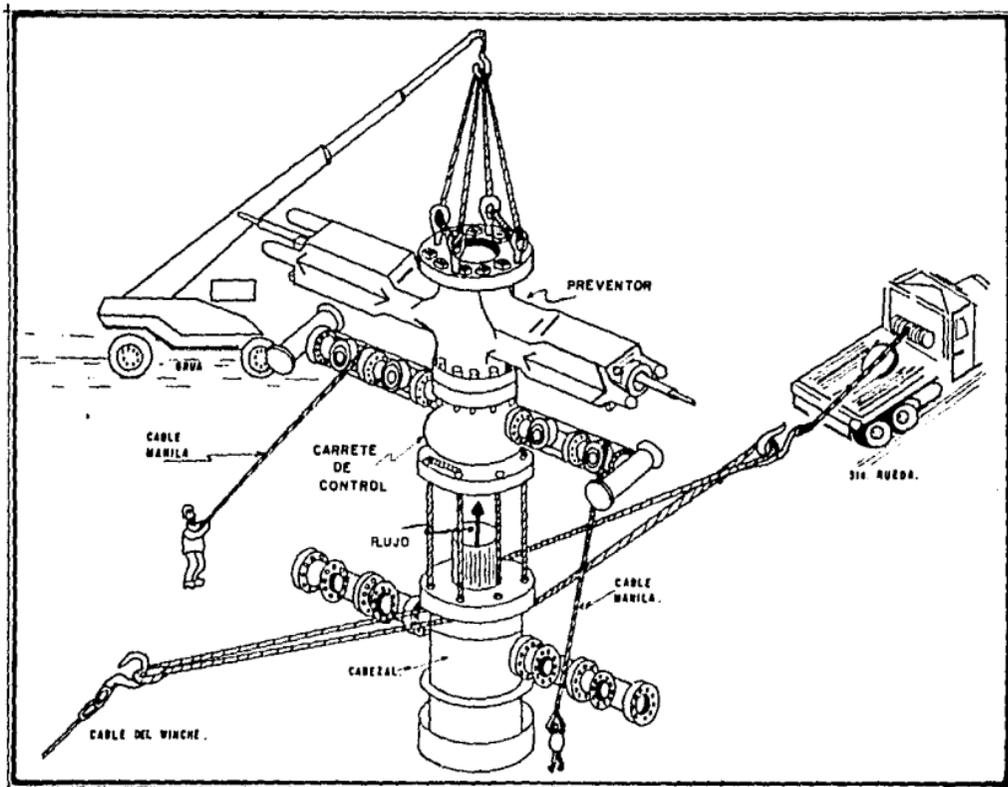


Fig 3.10 Maniobras para la instalación del preventor y del carrete de control

Una vez instalado y asegurado el equipo superficial de control, se cierra el preventor y los fluidos se descargan a través del múltiple de estrangulación y de líneas de tubería, hasta la presa de quemado. Con luces de bengala, se prende el quemador, quedando controlado el flujo. El monitoreo de todas las líneas y conexiones, es imperativo en esta etapa, para prevenir fugas y/o la pérdida del control nuevamente.

3.5.2. Control del pozo

Una vez controlado el flujo, se procede al control total del pozo mediante la introducción de tubería de perforación o de producción, con la finalidad de poder bombear un fluido de control que genere una columna hidrostática suficiente, para evitar que los fluidos de la formación fluyan hacia el pozo. En algunas ocasiones, debido a que el gasto del pozo no es muy alto ó por la presencia de formaciones muy permeables, no es necesario introducir tubería para lograr el control del pozo; ya que únicamente se bombea el fluido de control para conseguirlo, regresando los fluidos del pozo hacia la formación. Esta última alternativa, deberá evaluarse suficientemente en forma previa, para las presiones superficiales que se esperan y puedan manejar con seguridad absoluta.

Para poder introducir tubería al pozo se utiliza el procedimiento conocido como "Snubbing". El snubbing se requiere cuando la presión en la cabeza del pozo excede al peso de la tubería, y se necesita empujar la misma dentro del pozo. Cuando el peso de la sarta excede la presión del yacimiento, el procedimiento se llama stripping. En una operación de Snubbing, ambas operaciones (snubbing y stripping) son comunes. El cambio de una operación de snubbing a stripping se llama punto de balance, el cual es función del peso de la tubería, de su diámetro, de la presión del pozo y de la fricción y resistencia mecánica (al paso de la tubería por el preventor).

3.5.3. Perforación de un pozo de alivio

En muchas ocasiones, al ocurrir el descontrol de un pozo, se inicia la perforación de un pozo de alivio, como alternativa segura para controlarlo (en caso de que el procedimiento descrito anteriormente no pueda ejecutarse) debido a que las tuberías superficiales de revestimiento se encuentran muy dañadas ó a que se trate de un descontrol subterráneo (manifestación superficial del flujo a través de las formaciones, generalmente debido a fallas subsuperficiales de las tuberías de revestimiento y su mala cementación). La perforación adecuada de dicho pozo de alivio, constituye la base del método del control dinámico, descrito en el siguiente capítulo.

CAPITULO 4

CONTROL DE UN POZO MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DINAMICO

El método dinámico, describe una técnica para controlar un reventón utilizando la presión de fricción del flujo para complementar a la presión hidrostática del fluido de control (que está siendo inyectado a través de un pozo de alivio en un punto subsuperficial y hacia arriba del pozo descontrolado). Por lo tanto, se puede utilizar un fluido de control ligero, como el agua. El objetivo es permitir que un reventón sea controlado (sin fracturar la formación que aporta) bombeando la máxima cantidad de fluido que pueda ser circulado a través del pozo de alivio. Para el control óptimo durante la operación, es imprescindible una comunicación franca y estable entre los dos pozos. Al permitir que más fluido sea suministrado a través del pozo alivio, el método dinámico también incrementa la probabilidad de que con un solo pozo de alivio, sea suficiente. Lo que requiere planeación y diseño óptimo del pozo de alivio.

El control absoluto del pozo, comprende de dos etapas: 1) El control dinámico (sustituir el descontrol de fluidos del yacimiento por fluido ligero, a un gasto elevado) y 2) El control estático (sustitución del fluido ligero por el que restablezca el control primario del yacimiento, a un gasto bajo).

Cuando el pozo este dinámicamente controlado, el fluido inicial inyectado (que usualmente es agua) y para mantener al pozo en una condición estática, es remplazado por un lodo más pesado. De hecho, tres pesos de lodo pueden ser requeridos para permitir el control durante la transición del fluido inicial de baja densidad (para el control dinámico) al pesado lodo final. Sin embargo, este lodo final que estáticamente controla el reventón, no necesita ser tan pesado como el lodo utilizado antes de que el reventón ocurriera.

En este capítulo, se describe el desarrollo de los procedimientos y el diseño para un control dinámico, así como un método operacional para ser utilizado en el campo. Las técnicas presentadas para diseñar el sistema pozo de alivio-pozo descontrolado, fluidos de control, gastos de inyección y los caballos de fuerza hidráulica (HHP) requeridos, pueden aplicarse en el mismo pozo sin el uso de computadoras o matemáticas

complicadas, cuando se dispone de la información requerida previamente.

4.1. El pozo de alivio

Como se mencionó anteriormente, se requiere de un pozo de alivio para controlar un reventón, cuando las técnicas de superficie no son viables; debido a una destrucción severa de las tuberías superficiales de revestimiento ó a que se trate de un reventón subterráneo (manifestación superficial del flujo a través de la formaciones, generalmente debido a fallas subsuperficiales en las tuberías de revestimiento y su mala cementación). Los pozos de alivio han mejorado bastante el control de reventones y actualmente se cuenta con las herramientas y la tecnología suficiente para controlar casi cualquier reventón, con un solo pozo de alivio.

4.1.1. Factores críticos

El primer factor crítico es la comunicación hidráulica entre el pozo de alivio y el pozo descontrolado, ya que es la clave para el control de éste último, mediante el primero. La comunicación perfecta entre los pozos consistiría en que por cada barril de fluido de control bombeado a través del pozo de alivio, entrara un barril de dicho fluido al pozo descontrolado; sin embargo, en la realidad esto solo se puede lograr con la intersección los dos pozos, corriendo una tubería en el pozo de alivio, cementándola y disparando luego hacia el pozo descontrolado.

El pozo de alivio puede comunicarse con el pozo descontrolado por cualquier medio directo, como los disparos ó a través de la matriz del yacimiento. Una comunicación matricial, comunmente es exitosa si la roca puede ser activada químicamente, como es el caso de las rocas carbonatadas. En un yacimiento de este tipo, se puede utilizar ácido para activar la roca y producir un agujero de "gusano" que penetre en el yacimiento (aprovechando la variación de la presión en la zona de drene, para que se mueva el ácido hacia el pozo descontrolado) ya que el flujo ayuda a su

transporte, figura 4.1. La efectividad de la comunicación, debe ser suficiente para obtener el gasto óptimo de inyección dentro del pozo descontrolado (necesario para controlarlo dinámicamente) ya que un gasto pequeño, solamente ocasionaría que el fluido inyectado fuera "producido" por el pozo descontrolado, sin lograr su objetivo; mientras que un gasto excesivo, podría ocasionar el fracturamiento de la roca y generar pérdidas excesivas del fluido inyectado hacia la formación, con gasto insuficiente dentro del pozo descontrolado. El objetivo es colocar la cantidad necesaria de fluido de control dentro del pozo descontrolado (al gasto requerido) para que sumando su presión hidrostática y la presión por fricción, suspenda la aportación de fluidos del yacimiento.

También se deben tomar en cuenta los parámetros de la comunicación, tales como los requerimientos de la perforación direccional, los cuales difieren drásticamente en un yacimiento carbonatado y otro de arenisca; debido a que en este último se puede requerir que el pozo descontrolado, sea interceptado y/o comunicado por medio de disparos ó técnicas de fresado. El tipo y el gasto de flujo, también influyen los requerimientos de comunicación, debido a que si el gasto del descontrol es muy grande, se necesitará de un gasto de inyección mayor, para lograr el control dinámico.

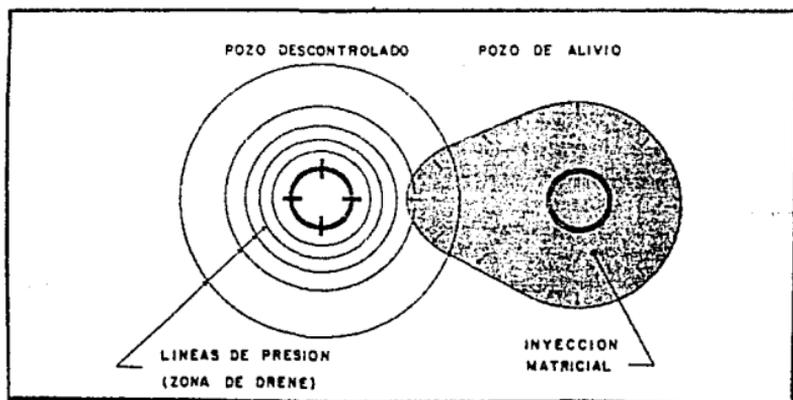


Fig. 4.1 Movimiento del fluido hacia la zona de menor presión

Un segundo factor crítico es la distancia que existe entre ambos pozos, debido a que los problemas de la comunicación aumentan exponencialmente, conforme aumenta la distancia entre ellos. A distancias que excedan los 6 metros, puede fallar un intento de control, debido a problemas de comunicación, tales como la fuga del fluido de control dentro de una formación permeable y al fracturamiento.

La dirección de una fractura natural, es función generalmente de los esfuerzos de la tierra alrededor del agujero. Las fracturas no necesariamente se extienden en dirección del pozo descontrolado. Esto podría ocurrir si el pozo de alivio está en la zona de drene alrededor del pozo descontrolado, lo cual requiere de un espaciamiento muy próximo. El radio de la zona de drene, puede ser muy corto en zonas de alta productividad o si el flujo es restringido (figura 4.2). El radio de una zona de drene significativa, puede ser solo de 0.3 a 1.5 metros (figura 4.2). A distancias que excedan los 6 metros, es difícil de imaginar la forma en que un descontrol pudiera cambiar los esfuerzos, para que una fractura pudiese extenderse directamente desde el pozo de alivio hasta el pozo descontrolado. En muchos intentos de control con pozo de alivio, puede bombearse agua durante semanas hasta alcanzar la comunicación; lo cual probablemente se deba a que la extensión de la fractura, se aleja del pozo descontrolado, (figura 4.3.A) ó al gran espaciamiento y a los grandes volúmenes necesarios para saturar radialmente al descontrol (figura 4.3.B). A veces, el agua probablemente produzca un canal que establece una comunicación efectiva; pero aun así, el espaciamiento reducido continúa siendo un factor determinante.

Otro factor crítico es el hecho de que la vía de comunicación genere grandes pérdidas de fricción, lo cual restringe el gasto de inyección, de allí la gran importancia de la información previa, que permita el diseño óptimo del sistema pozo de alivio-pozo descontrolado.

4.1.2. Localización del pozo descontrolado

Con información previa sobre la ubicación del pozo descontrolado, la perforación del pozo de alivio es relativamente

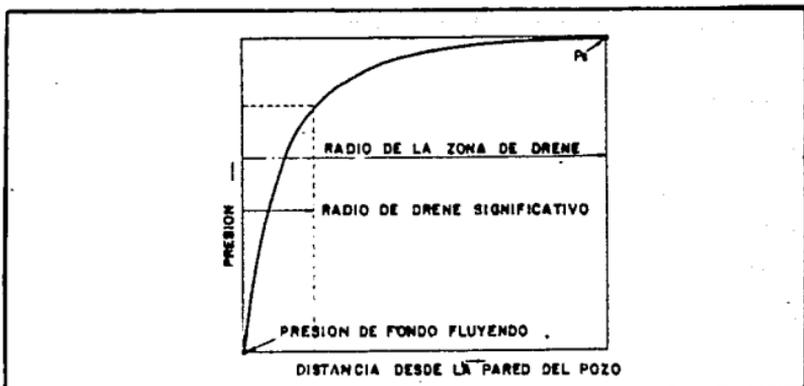
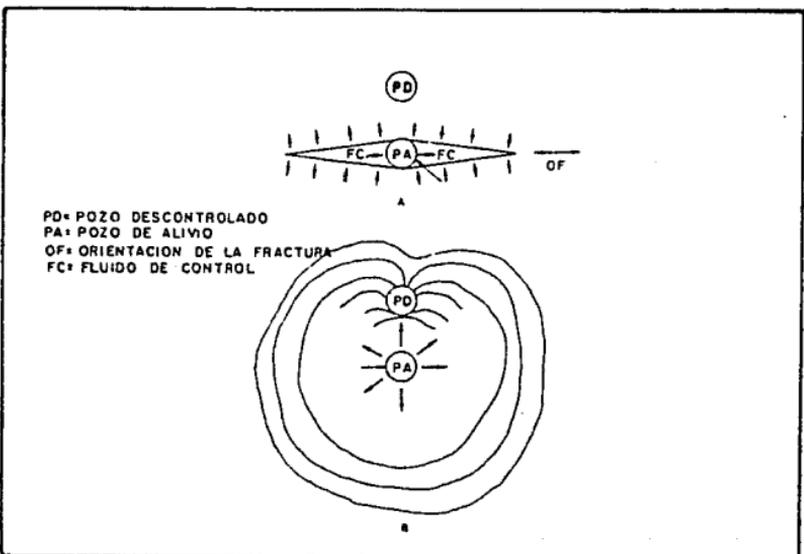


Fig. 4.2 Variación de la presión alrededor de un pozo descontrolado.



simple y rápida; pero cuando no se dispone de ella, gran parte del tiempo empleado puede ser el dedicado a localizarlo por ensayo y error. Esto puede lograrse en la práctica, después de varios intentos, registros, taponamientos y "side tracks", complicando el problema y aumentando tiempos y costos.

Para el caso de no disponer de información se cuenta con avances importantes en la perforación de pozos de alivio, a través de las herramientas con cable que determinan la dirección relativa del pozo descontrolado y su distancia al pozo de alivio. Dos de los dispositivos que tienen esta capacidad son el registro "ELREC" de la Industria Gearhart y la herramienta "Magrange" de la Compañía Tensor.

4.1.2.1. El registro ELREC

El método del registro ELREC (Extended Lateral Range Electrical Conductivity = Conductividad Eléctrica de Rango Lateral Extendido) utiliza sensores magnéticos de fondo orientados (consistentes en un compás y magnetómetros sensibles de corriente alterna), un generador de fondo de corriente alterna y una computadora (figura 4.4). Un campo magnético generado de baja frecuencia (1 Hz) registra (desde cero) qué tanta cantidad igual de corriente, pasa por todos los lados de la herramienta y si la conductividad de la formación es aproximadamente igual en la vecindad alrededor del sensor.

Si una cierta longitud de tubería de revestimiento ó de perforación está suficientemente cercana al pozo de alivio, el efecto de corto-circuito de la tubería, concentrará la corriente en el sensor. En vez de cancelar ó eliminar a la herramienta, el sensor medirá un campo magnético de corriente alterna con una dirección perpendicular a la línea que une al sensor con el pozo descontrolado. La distancia a la tubería de revestimiento, se puede calcular a partir de la amplitud de la señal ELREC y de unas suposiciones como la conductividad de la formación y la resistencia y longitud de la tubería.

La herramienta parece tener un rango efectivo de 81 a 91 metros. La dirección del pozo descontrolado se obtiene con una

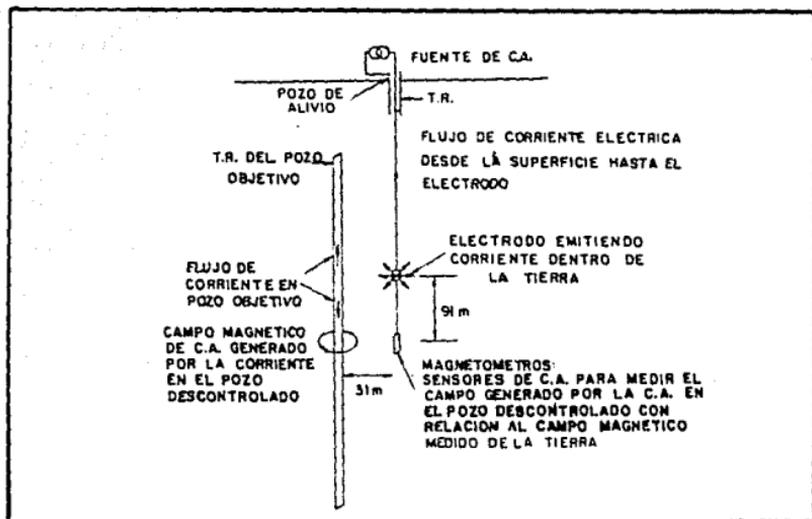


Fig. 4.4 Sistema del registro ELREC

exactitud regular. La distancia al pozo descontrolado se calcula con cierta dificultad, debido a incógnitas tales como la variación de la conductividad horizontal de la formación y la resistencia del acero dentro del pozo descontrolado.

Se puede emplear un esquema de cálculo utilizando las medidas ELREC en varios puntos dentro del pozo de alivio para estimar la distancia (técnica de triangulación). Otra limitación del registro ELREC es que se debe sacar la sarta de perforación cada vez que se requiera de una nueva medida direccional, lo cual podría ocasionar múltiples viajes de la sarta, si lo que se desea es una intercepción del agujero ó una aproximación muy cercana.

4.1.2.2. La herramienta Magrange

Esta alternativa utiliza magnetómetros de gradiente de fondo orientados, que se bajan en una herramienta de registro centralizada con una unión giratoria, para reducir la rotación de

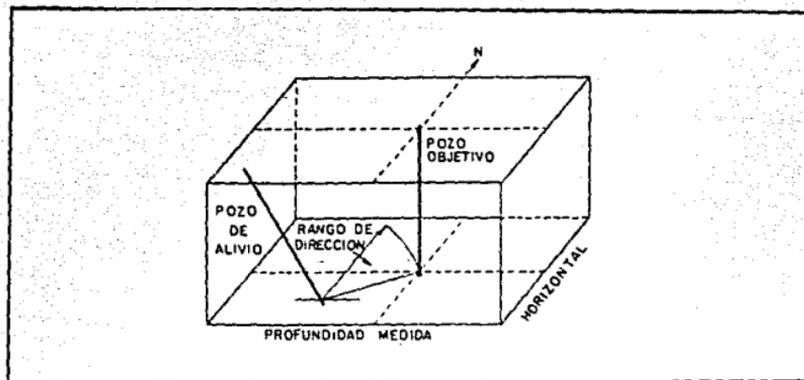


Fig. 4.5 Dirección del objetivo

tanto, se pueden hacer múltiples tomas para establecer medidas direccionales en un intervalo corto del pozo, sin sacar la sarta de perforación. El registro ELREC tiene la ventaja de resultados direccionales casi instantáneos, en vez de dos a seis horas de tiempo de procesamiento que se requieren para obtener esta información a partir de los datos del Magrange.

4.1.3. El cono de incertidumbre

Las herramientas ELREC y Magrange, aunque son de gran servicio en la industria, no serían tan necesarias para la perforación de un pozo de alivio si supiéramos con exactitud la posición del agujero con la profundidad. El problema radica en la imprecisión inherente de las herramientas y las técnicas de registro del pozo. La mayoría de los pozos están registrados solo en su inclinación, más no en su dirección.

Si únicamente se dispone de datos de inclinación, entonces se puede determinar el área, sumando todas las inclinaciones en una misma dirección y girar 360° el curso del pozo desviado. Esto define un cono de incertidumbre dentro del que debe caer el

agujero. Para una profundidad dada, la localización probable del pozo descontrolado está representada por un círculo centrado alrededor de la localización superficial. Un agujero "recto" a 3048 metros con desviación promedio de 0.5° caería dentro de un círculo con diámetro de 53.2 metros. Con la colocación (a ciegas) de un pozo de alivio dentro de este círculo, raras veces se realizará el control.

Cuando se han tomado registros de desviación, entonces se puede analizar su información utilizando la técnica de Walstrom. Se define una elipse de incertidumbre para un solo plano de profundidad y en una vista tridimensional, un elipsoide de incertidumbre (figura 4.6). Con el uso de las condiciones base listadas en la Tabla 4.1, se pueden realizar los cálculos para la localización de la incertidumbre esperada del agujero, con varias técnicas de registro. Los resultados se muestran en la figura 4.7.

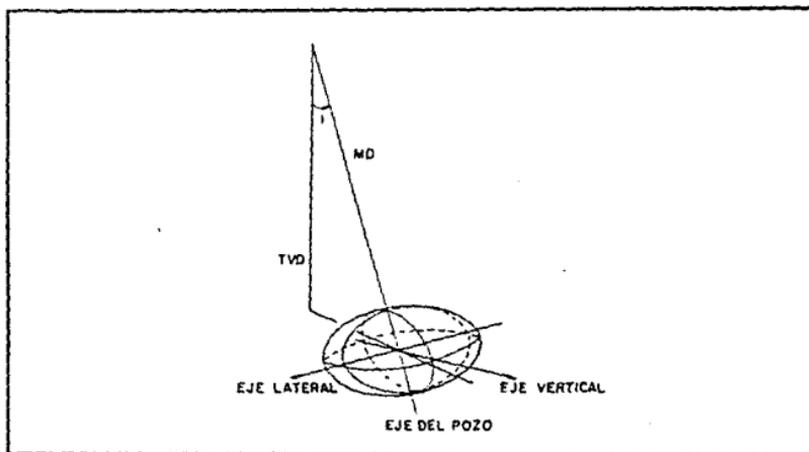


Fig. 4.6 Elipsoide de incertidumbre

El registro giroscópico convencional más preciso de un pozo "recto" descontrolado, daría una elipse de incertidumbre de alrededor de 18.2 por 26.8 metros. Conforme aumenta el ángulo del pozo, también aumenta el tamaño de la elipse. La elipse de

Tabla 4.1

Condiciones representativas de un pozo descontrolado y otro de alivio.

| Suposiciones | | |
|-------------------------------|------------------------|-------|
| Pozo descontrolado | | |
| Profundidad | 3048 metros | |
| Desviación promedio | 0.5° | |
| Pozo de alivio | | |
| Profundidad | 3241 metros | |
| Profundidad vertical | | |
| verdadera (TVDD) | 3048 metros | |
| Inició desviación (KOP) | 0.5° hasta 1493 metros | |
| Desplazamiento | 752 metros | |
| Valores de error | | |
| | Inclinación | Azmut |
| Giroscópico bueno | 0.25° | 1.35° |
| Giroscópico real | 0.50° | 3.75° |
| Magnético bueno | 0.50° | 1.85° |

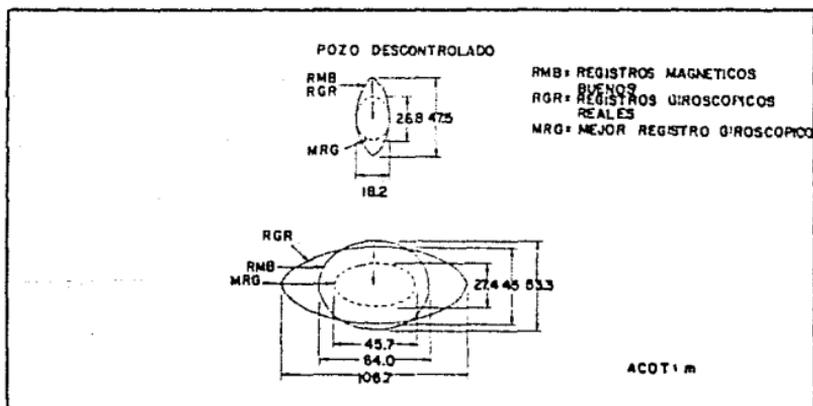


Fig. 4.7. Elipses de incertidumbre del pozo descontrolado (A) y del pozo de alivio (B).

incertidumbre del pozo de alivio (del ejemplo registrado) con las herramientas giroscópicas más precisas, sería de 45.7 por 27.4 metros. Por lo tanto, la mejor herramienta giroscópica convencional disponible tendría una precisión insuficiente, para intentar hacer un pozo de alivio sin el uso de las herramientas ELREC ó Magrange. Sin embargo, la tecnología moderna de navegación y "MWD", permiten mejorar los tiempos de perforación y minimizar las corridas de herramientas con cable, elevando mas aún, el potencial de controlar un reventón, a través de un solo pozo de alivio con el método dinámico.

4.1.4. Planeación del pozo de alivio

Existen varias técnicas para reducir el cono de incertidumbre alrededor de un pozo descontrolado y mejorar las posibilidades de localizarlo, con las herramientas ELREC ó Magrange; éstas son:

- 1) Situar la localización superficial del pozo de alivio a una distancia suficientemente alejada del pozo descontrolado (457 metros aproximadamente) en dirección de los vientos dominantes, por seguridad. Es necesario considerar el ajuste de la localización para aprovechar los echados naturales de la formación y las tendencias regionales de desviación, particularmente en las rocas duras; así como ubicar el pozo de alivio tan cerca como sea posible del eje Este-Oeste, para maximizar la precisión direccional de los registros ELREC ó Magrange.
- 2) Determinar exactamente dónde están las localizaciones superficiales en relación de una con la otra. ¿Cual es su distancia y dirección exactas?
- 3) Hacer un análisis direccional de los pozos vecinos para establecer la inclinación regional y utilizar estos datos, para dirigir el pozo de alivio hacia el cuadrante más probable del cono de incertidumbre.

- 4) Localizar los registros que hayan sido tomados en el pozo descontrolado y estudiarlos. Si el pozo fué perforado recientemente, tratar también de encontrar las herramientas empleadas para correrlos y verificar su calibración.
- 5) Planear pasar a través del cono de incertidumbre en un punto donde el radio del cono sea menor al radio de investigación del ELREC (61 a 91 metros) ó del Magrange (15 a 30 metros). Utilizar un ángulo poco pronunciado de cierre para mejorar las posibilidades de interceptar el radio de investigación de estas herramientas con el pozo descontrolado, por la proyección de la longitud de la cuerda de intersección de los dos agujeros. La trayectoria del pozo de alivio intersectando a la del pozo descontrolado, se parece a un cono intersectando a otro, figura (4. B. A).

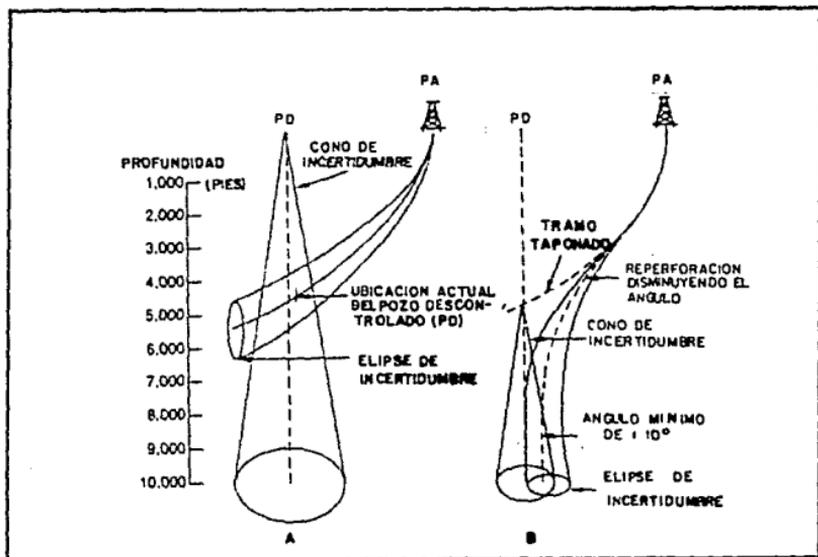


Fig. 4.B Trayectorias del pozo de alivio

6) Se debe tener especial cuidado en conservar un agujero calibrado. Se debe considerar un lodo base aceite para llevar a cabo lo anterior. El Magrange se corre como un registro de medición continua de echados, donde la herramienta se centra en el agujero y el giro de la misma es controlado, lo cual resulta prácticamente imposible en un agujero descalibrado. El ELREC se puede emplear en lodos base aceite si se empuja el electrodo contra la cara de la formación.

Siguiendo estos pasos, puede planearse un pozo de alivio y perforarse para interceptar el cono de incertidumbre alrededor del pozo descontrolado, a una profundidad intermedia (figura 4.8.A). Entre mayor sea el grado de incertidumbre en el pozo descontrolado y más corto el radio de investigación, más somero debe ser el punto de intersección.

A esta profundidad se localiza el pozo descontrolado en relación al pozo de alivio (con el ELREC ó el Magrange) y se recalcula la incertidumbre del pozo descontrolado (a partir de este nuevo punto inicial). Ahora dicho punto está considerablemente más profundo y, como resultado, el cono de incertidumbre es más estrecho con la profundidad, figura 4.8.B.

A la profundidad media de los pozos con una buena corrida inicial y un buen control direccional, se puede dirigir el pozo de alivio en forma de una curva en "S" para reinterseccionar el cono de incertidumbre del pozo descontrolado en ó cerca de la zona del descontrol (más profunda). Esta profundidad estará dictada por el cono de incertidumbre recalculado a partir de la determinación de la posición inicial. Asimismo, a la profundidad intermedia, el diámetro máximo del cono no debe ser mayor que el rango de investigación del ELREC ó del Magrange. El ángulo mínimo de aproximación no debe ser menor de 5° a 10°. El control direccional es difícil en ángulos menores de 5° a 10°, debido a que las tendencias normales a la desviación de las formaciones, tienden a superar las técnicas de control de la perforación direccional.

El agujero también debe ser relocalizado arriba de la zona descontrolada. A un ángulo relativo de 5° entre los pozos, el

ritmo de cierre es de solamente 2.65 metros por cada 30.48 metros perforados; por lo que si la corrida inicial indica una posición relativa del pozo descontrolado a unos 12.2 metros de separación, entonces a un ángulo de cierre de solo 5°, tendrían que perforarse unos 105 metros para llevar al pozo de alivio a unos 3 metros del pozo descontrolado.

Este ejemplo indica que si el pozo de alivio necesita estar a unos 3 metros del pozo descontrolado (en la zona del descontrol) entonces el pozo descontrolado debe ser localizado a unos 105 metros sobre la zona descontrolada. Una vez que el pozo de alivio está en la proximidad del descontrolado, se deberán volver a correr el ELREC ó el Magrange, para volver a localizar la posición del pozo descontrolado con respecto al pozo de alivio. Luego este pozo es dirigido hacia el descontrolado (con un motor de fondo y un desviador). Con el uso de múltiples corridas del Magrange y la reorientación del desviador con la nueva información del objetivo, puede lograrse un paso muy próximo ó la intercepción misma del pozo descontrolado.

4.2. Método dinámico

El método dinámico es una condición temporal donde un reventón es controlado por la inyección de un fluido a través de una vía de comunicación y hacia arriba del pozo descontrolado, a tal gasto que la presión estática de la formación es excedida y el pozo deja de producir. El flujo es multifásico (fluidos producidos más fluido inyectado) antes de que el pozo sea controlado y monofásico (únicamente fluido inyectado) inmediatamente después de que el pozo fue controlado.

El gasto del flujo debe mantenerse de tal forma que la suma de las pérdidas por fricción y de presión hidrostática, exceda a la presión estática de la formación, hasta que el lodo más pesado (para el control estático) pueda remplazar al fluido más ligero (usado durante el control dinámico). El gasto de inyección puede variarse para controlar la presión de fondo del agujero, mediante el ajuste de la componente de la presión de fricción, más o menos en la misma forma en que se controla la presión con un estrangulador

ajustable. cuando convencionalmente se está circulando un brote hacia afuera con un equipo de perforación. La aproximación básica al control dinámico, utiliza métodos desarrollados del análisis del comportamiento de pozos productores y considera al pozo de alivio y al pozo descontrolado, como un sistema.

La figura 4.9 representa un sistema de control dinámico para controlar un reventón. El lado izquierdo del sistema (en forma de "U") representa al pozo de alivio y el lado derecho al pozo descontrolado. Una vía de comunicación, establecida por agujeros de gusano producidos por ácido ó fracturamiento, conecta a los dos pozos. Las fuerzas del pozo descontrolado están representadas por el vector F_v , mientras que las fuerzas de oposición durante el control, están representadas por los vectores F_f (pérdidas por fricción) y F_h (presión hidrostática). Cuando la suma de las fuerzas de oposición exceda a las fuerzas del pozo, éste dejará de fluir.

Se introduce un "tubing" en el pozo de alivio y se llena con agua para monitorear la presión (como se explicará más adelante) y se inyecta el fluido de control por el espacio anular del pozo de alivio, el cual asciende por el pozo descontrolado junto con los fluidos producidos.

Como el objetivo del control es incrementar la presión de fondo del pozo (BHP) dinámicamente para exceder la presión estática de la formación (sin fracturarla) el control y monitoreo de la BHP es la base del éxito en un control dinámico. En un sistema pozo de alivio/pozo descontrolado, como el mostrado en la figura 4.9, la BHP es generada por la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido de control dentro del pozo descontrolado más las caídas de presión por fricción producidas hacia arriba del mismo.

La BHP se controla por la alteración del gasto de flujo en el espacio anular del pozo de alivio para ajustar la presión de fricción) ya que no hay control (o estrangulador) sobre el pozo fluyente, como en una operación de control de un brote. Entonces, la BHP se monitorea mediante la observación de la presión en superficie del tubing dentro del pozo de alivio y sumándole la presión hidrostática del fluido contenido dentro del mismo. Para

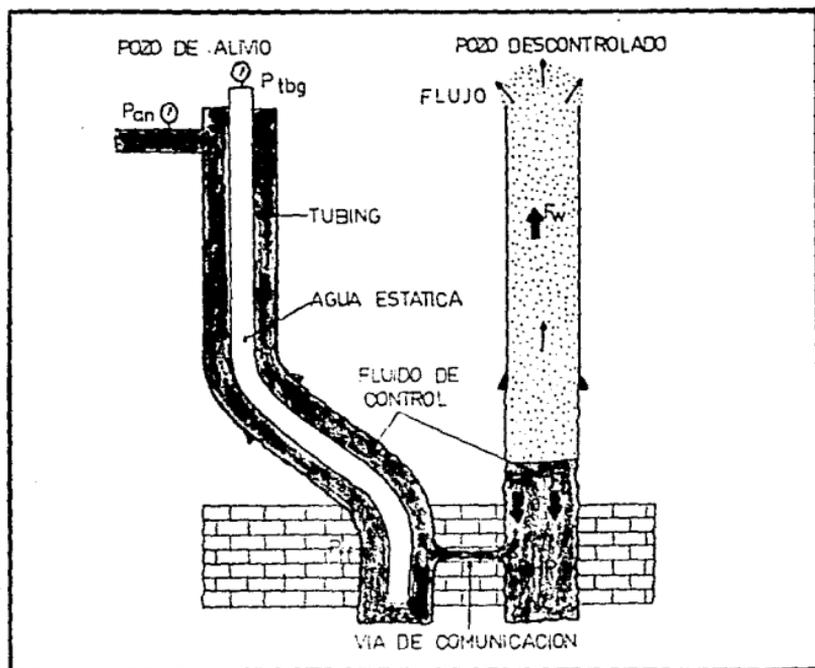


Fig. 4.9 Sistema pozo de alivio-pozo descontrolado

hacer esto, toda la inyección debe ser hacia abajo del espacio anular del pozo de alivio y el tubing debe estar lleno de fluido estático.

Como se mencionó anteriormente, debe evitarse el exceder la presión de fractura de la formación (P_{ff}) ya que de lo contrario no todo el fluido inyectado dentro del pozo de alivio llegará hasta el pozo descontrolado. De este modo, la limitación de la presión de fractura, se impone sobre el pozo de alivio, corriente arriba del canal de comunicación, en lugar del pozo descontrolado.

Si el tubing y el espacio anular del pozo de alivio contienen el mismo fluido, la diferencia de presiones entre ambos, sería la caída de presión por fricción producida hacia abajo del del espacio anular. Cuando el pozo está controlado (una sola fase) la

presión en el tubing representa la caída de presión a través de la vía de comunicación y hasta arriba del pozo descontrolado. Si la circulación es momentáneamente parada (mientras el pozo todavía está fluyendo) la presión en el tubing refleja la BHP del pozo descontrolado.

El procedimiento de control puede monitorearse precisamente con la observación de la presión del tubing, esto es que el gasto del fluido inicial de control pueda incrementarse hasta que la presión estática de la formación sea excedida. El pozo puede estar dinámicamente controlado en este punto. La inyección del fluido intermedio puede iniciarse y el gasto puede reducirse, después de que dicho fluido intermedio entre en el pozo descontrolado; para mantener la presión de fondo del pozo abajo de la presión de fractura, pero arriba de la presión estática de la formación.

4.2.1. Parámetros de diseño

Para diseñar una operación de control dinámico deben predeterminarse muchos parámetros. El primero es la presión estática de la formación en el fondo del pozo. Cuando se inicia la operación y se inyecta el fluido de control, como se explicó, el flujo hacia arriba del pozo descontrolado es multifásico hasta antes de que el pozo sea controlado, ya que una vez que esto se logra, el flujo es en una sola fase (únicamente fluido inyectado). Sin embargo, no se requiere precisar los cálculos hidrodinámicos de una fase y multifásico. La Tabla 4.2 proporciona en forma resumida algunos de los parámetros de diseño necesarios para llevar a cabo un control dinámico. Su deducción completa está incluida en el apéndice D. Estos parámetros pueden ser determinados en el pozo sin el empleo de matemáticas complejas e incluye:

- Densidad del fluido inicial de control.
- Gasto de inyección del fluido inicial de control.
- Tamaño del pozo de alivio.
- Caballos de fuerza hidráulicos (HHP) requeridos.
- Máxima presión de fondo del agujero (BHP) permisible para prevenir que la tubería de perforación sea arrojada.

Tabla 4.2

Resumen de los parámetros de diseño para un control dinámico

1. Determinación de la densidad del fluido inicial de control

$$\rho_f = 12.83 \frac{P_*}{TVD}$$

2. Determinación del gasto de inyección del fluido inicial de control:

$$q_b = \left[\frac{\Delta P_{fb}}{11.41 \rho_f} \left(\frac{d_*^5}{fL} \right)_b \right]^{1/2}$$

3. Tamaño del pozo de alivio requerido:

$$\left(\frac{fL}{d_*^5} \right)_r \leq \left(\frac{fL}{d_*^5} \right)_b k^2 \frac{\Delta P_{fr}}{\Delta P_{fb}}$$

4. Caballos hidráulicos requeridos:

a. $q_r = \frac{q_b}{k}$

b. $HHP = \frac{q_r}{40.81} P_{an}$

5. Máxima presión de fondo de agujero permisible para evitar que la tubería de perforación sea arrojada:

$$P_{BHmax} = \frac{W_* + A_{an} R \Delta P_{hyd}}{A_{dp} + A_{an} R}$$

El propósito del fluido inicial de control es lograr que el pozo deje de fluir al exceder su capacidad natural de flujo. Por lo tanto, el diseño de dicho fluido depende del gasto de flujo del pozo descontrolado, el cual puede ser muy difícil de determinar o estimar. Frecuentemente los datos del yacimiento son inadecuados o fuera de tiempo para hacer definitiva la estimación del gasto del

flujo. Las condiciones del fondo del agujero y su configuración pueden no ser conocidas (condición de la tubería de revestimiento, de la sarta de perforación, etc.). Se puede intentar hacer una estimación por medio de la medición de la velocidad de la corriente del flujo en la boca del pozo, pero no siempre se puede realizar, ya que el pozo puede estar incendiado ó la presencia de gases tóxicos, pueden constituir un ambiente de trabajo inseguro a su alrededor. Otra forma para predecir la capacidad de flujo del pozo sería mediante la aplicación del método de Gilbert, el cual se describe en el inciso 4.3.1.1.

En flujos altos de gas, seco ó húmedo, se puede presentar el fenómeno de levantamiento, el cual consiste en que el gas, que domina el flujo, levanta a la fase líquida hacia afuera del agujero. Por lo que si éste fenómeno se presenta, debe ser considerado dentro del diseño del control dinámico.

4.3. Ejemplo de aplicación

A continuación se presenta el procedimiento y los cálculos realizados para controlar al pozo C-II-2 de la Compañía Mobil, ubicado en el Campo Arun en Indonesia, el cual se descontroló durante su perforación, se incendió, se destruyó el equipo de perforación y ardió durante 89 días con un gasto aproximado de 400 MMPCD. Debido a la alta capacidad de flujo y potencial del pozo, se esperaba sería extremadamente difícil de controlar. Sin embargo, el pozo fue controlado a través de un solo pozo de alivio (C-II-8) mediante la aplicación del método dinámico.

4.3.1. Capacidad de flujo del pozo descontrolado

4.3.1.1. Gasto máximo

El método utilizado para predecir la capacidad de flujo del pozo es atribuido a Gilbert. Básicamente desarrolla dos curvas, una para la relación de comportamiento de afluencia del pozo (IPR), la cual es independiente del equipo instalado dentro del agujero y otra, para el comportamiento de la tubería y del equipo (TEPC), la

cual a su vez, es independiente del pozo mismo. El punto donde ambas curvas se intersectan, define la capacidad de flujo del pozo.

La curva (1) de la figura 4.10 es una curva TEPC para el C-II-2. Esta representa al gasto de flujo contra la presión de fondo del agujero a través del espacio anular existente entre una tubería de revestimiento de \varnothing 5/8" y una tubería de perforación de 5". para una contrapresión en la cabeza del pozo de 100 lb/pg^2 de gas. La curva (2) es una curva IPR obtenida de una prueba de alto gasto del pozo A-12, un pozo cercano al C-II-2, utilizada para determinar el gasto del reventón. Esta curva representa al gasto contra la presión de influjo del fondo del pozo y es independiente del equipo del pozo, tal como la tubería, el cabezal, etc. La intersección de la TEPC (1) y la IPR (2) indican que el pozo C-II-2 fluita a aproximadamente 380 MMPCD, para una contrapresión en la cabeza del pozo de 100 lb/pg^2 de gas.

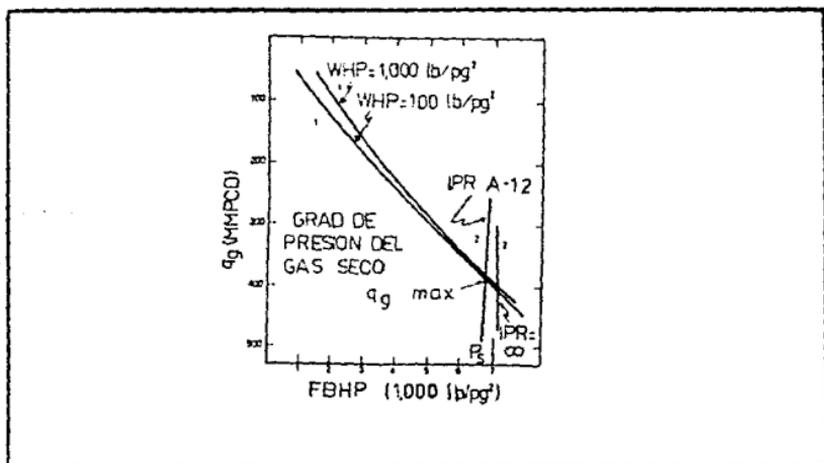


Fig. 4.10 Obtención del gasto máximo del pozo descontrolado.

El pozo producirá a un gasto máximo si alcanza el flujo crítico al final de la descarga restringida de la tubería. La presión en la cabeza del pozo (WHP) deberá ser de al menos dos veces la presión atmosférica ó cercana a 30 lb/pg^2 absolutas. Lo

cual produce que el gasto no pueda variar significativamente si la WHP fuese de 100 (o aún 1.000) lb/pg² de gas, a causa de las caídas de presión por fricción debidas a la aceleración en la parte superior del flujo en el espacio anular.

4.3.1.2. Gasto del descontrol

El pozo C-II-2 probablemente estuvo muy cerca de su máximo gasto mientras fluía y la presión dentro del conjunto de preventores fue cercana a las 1.500 lb/pg² de gas. La mayoría del flujo del C-II-2 provenía de la salida lateral de una cruceta de 4 1/16" de diámetro interior. Asumiendo que la salida lateral se comporta como un orificio o tobera y asumiendo que no existen otras restricciones abajo de la cruceta más que el espacio anular, el gasto a través de la salida y la presión corriente arriba dentro del conjunto de preventores en la salida lateral, podrían ser estimados.

En la figura 4.11 se desarrollaron curvas TEPC para un flujo de gas seco y presiones en la cabeza del pozo de 100, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000 y 5.000 lb/pg² de gas. La intersección de estas curvas (1) con la curva IPR (2) proporcionan el gasto con el que el C-II-2 debe fluir respectivamente para cada contrapresión dada. El gasto obtenido de cada intersección puede entonces graficarse contra la presión en la cabeza del pozo, de la TEPC respectiva, para dar una curva de comportamiento de la tubería, TPC (3). Esta es una curva de comportamiento del pozo. Entonces se grafica una curva de comportamiento de un estrangulador (4) para uno de 4 1/16". Su intersección con la curva de comportamiento de la tubería proporciona el gasto del flujo y la presión en la salida lateral. La curva de comportamiento del estrangulador es una curva de comportamiento del equipo, calculada utilizando el siguiente extracto de Nind:

$$Q = 0.1555 C A P_1 \left[\frac{2g}{GT} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2-k} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1+1-k} \right] \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

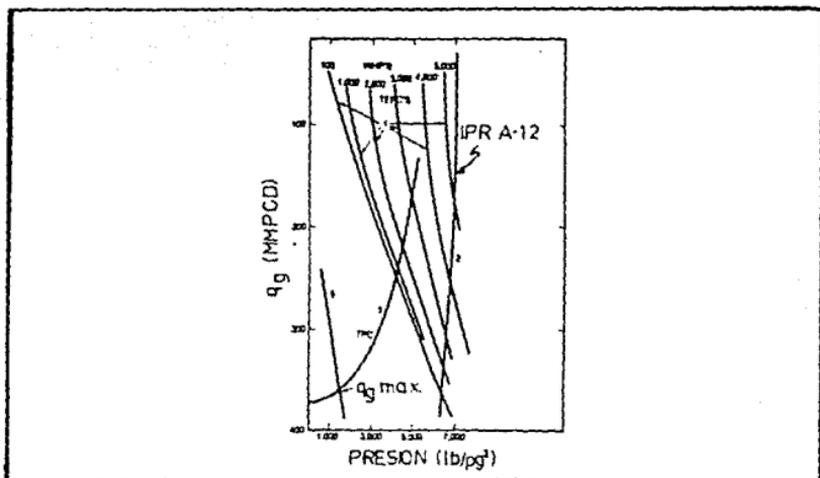


Fig. 4.11 Obtención del gasto del pozo descontrolado

Donde:

- Q = gasto del flujo, MMPCD @ c. s.
- A = Área de la sección transversal del estrangulador, pg^2 .
- C = coeficiente de descarga.
- G = densidad relativa del gas (con relación al aire).
- T = temperatura de entrada, °R.
- g = aceleración debida a la gravedad.
- P₁ = presión corriente arriba.
- P₂ = presión corriente abajo.
- k = relación entre el calor específico del gas a presión constante y su calor específico a volumen constante.

Las presiones P₁ y P₂ se dan en lb/pg^2 abs. Sustituyendo los siguientes valores numéricos promedio:

- C = 0.85
- k = 1.25
- G = 0.60
- T = 520 °R (60 °F)

La ecuación (4.1) se reduce a

$$Q = 0.136 A P_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1.6} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1.8} \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

o

$$Q = 0.136 A P_1 F \left[\frac{P_2}{P_1} \right] \quad (4.3)$$

donde

$$F \left[\frac{P_2}{P_1} \right] = \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1.6} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1.8} \right]$$

Para flujo crítico, $F \left[\frac{P_2}{P_1} \right] = 0.21$

$$Q = 0.136 A P_1 (0.21) \quad (4.4)$$

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} (4.0825)^2 = 12.98 \text{ pg}^2$$

$$Q = 0.370 P_1 \quad (4.5)$$

Corrigiendo por presión y gravedad,

$$Q = \sqrt{\frac{(0.80) 520}{(0.91) 810}} (0.370 P_1) \quad (4.6)$$

$$Q = 0.2704 P_1 \quad (\text{MMPCD}) \quad (4.7)$$

La intersección de la curva de comportamiento del estrangulador (4) con la curva de comportamiento de la tubería (3) proporciona el gasto común (370 MMPCD) y la presión en la cabeza del pozo dentro del conjunto de preventores (1.400 lb/pg² de gas). Como se puede observar, el gasto no es extremadamente sensible a la presión en la cabeza del pozo hasta que ésta es mayor de 1.500 lb/pg² de gas.

4.3.2. Fluido inicial de control

Como se mencionó anteriormente, el propósito del fluido inicial de control es lograr que el pozo descontrolado deje de fluir, al exceder su capacidad natural de flujo.

En la figura 4.12 la línea número 2 es el comportamiento de afluencia (MMPCD contra FBHP) del pozo descontrolado. En este caso, la medición del comportamiento de afluencia del pozo Arun A-12 fue utilizada para representar el comportamiento de afluencia del pozo C-II-2. Las curvas número 1 son curvas de comportamiento de la tubería y del equipo; los números al final de estas curvas son los barriles por minuto (BPM) de fluido inyectado.

La capacidad de flujo del pozo se determina de la intersección de una curva de comportamiento del equipo con la de comportamiento de afluencia. Por ejemplo, el pozo estaría produciendo cerca de 250 MMPCD cuando 40 BPM estuvieran siendo inyectados. Cuando la curva de comportamiento del equipo no logre cruzar la curva de comportamiento de afluencia, el pozo dejará de fluir. De la figura 4.12 se observa que a un gasto de inyección de 80 BPM hacia arriba del espacio anular del pozo descontrolado, éste dejará de fluir.

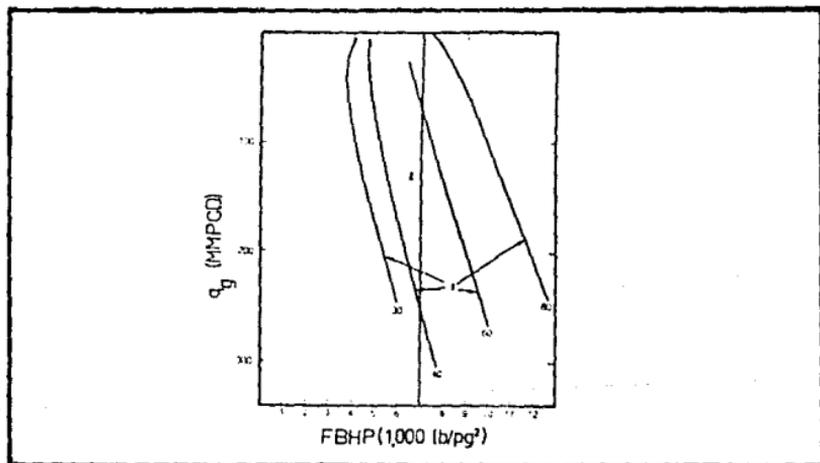


Fig. 4.12

4.3.2.1. Fluido ideal

Existe un fluido ideal inicial para el control dinámico para todos los pozos con una presión estática de formación por encima del gradiente del agua pura. La densidad del fluido debe ser menor que el peso equivalente de fluido requerido para balancear la presión estática de la formación. El fluido ideal es uno que controle al pozo en flujo multifásico a aproximadamente el mismo gasto que se requiere para convertir el pozo en flujo de una sola fase. Si el fluido de control es muy pesado entonces se producirá un abrupto incremento en la presión de fondo del pozo cuando éste deje de fluir. La presión podría incrementarse desde la presión estática hasta la suma de la presión hidrostática más la fricción requerida para controlar al pozo en flujo multifásico. Un ejemplo se muestra en las figuras 4.13 y 4.14.

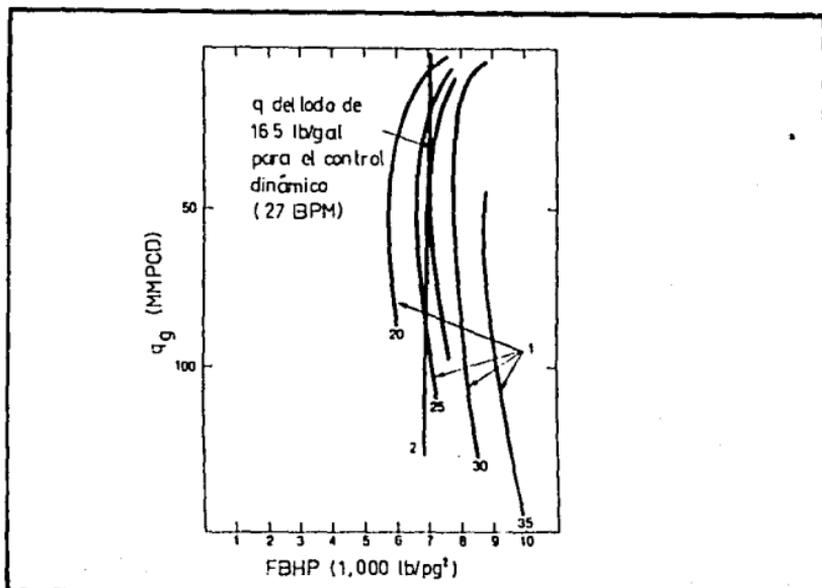


Fig. 4.13

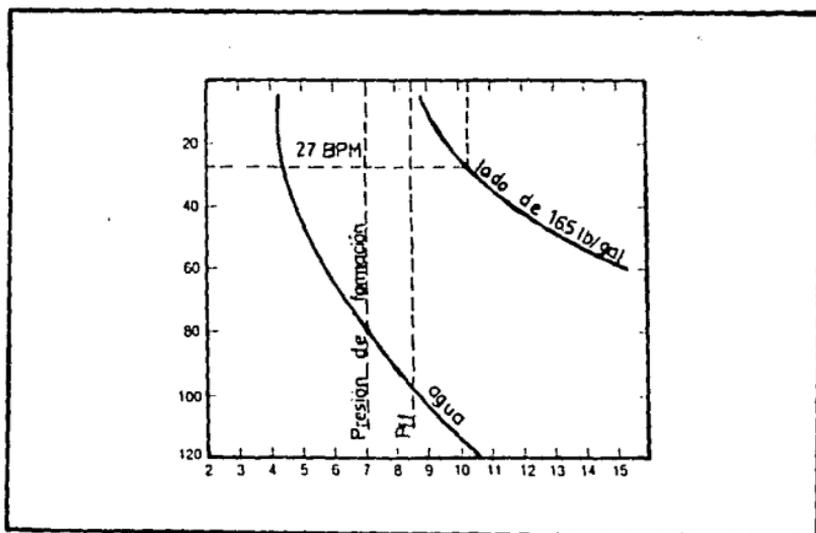


Fig. 4.14

Como se observa en la figura 4.13, un lodo de 16.5 lb/gal controlaría el pozo con un gasto de inyección de 27 BPM. Sin embargo, la presión se incrementaría desde la presión estática de 7.100 lb/pg² de gas al momento del control, hasta cerca de 10.500 lb/pg² de gas cuando el flujo en una sola fase fuera establecido (Fig. 4.14). Esto ocasionaría que el gas fuera removido del agujero rápidamente y el incremento de presión probablemente fracturaría la formación y posiblemente arrojaría la sarta de perforación del agujero descontrolado.

Como se mencionó, un buen fluido de control debe tener la propiedad de que el gasto en una sola fase para controlar la formación sea aproximadamente el mismo que el gasto multifásico para controlarla dinámicamente. En las figuras 4.12 y 4.14 el agua muestra esta capacidad. De la figura 4.12, 80 BPM de agua controlarían dinámicamente al pozo; de la figura 4.14, 85 BPM en flujo de una sola fase ejercerían una presión en el fondo del agujero cercana a 7.100 lb/pg² de gas.

El fluido ideal inicial para el control dinámico puede determinarse encontrando un fluido cuya densidad y propiedades de flujo sean tales que la introducción de una burbuja de gas dentro de la corriente de flujo en una sola fase, fluyendo al gasto requerido para controlar al pozo, incrementen a la componente de la presión de fricción tanto como la burbuja disminuye a la componente hidrostática. El cemento es un material pobre para considerarlo como un fluido de control. Sus propiedades de hidratación son deseables para taponar al pozo, pero podría obstruir la comunicación antes de que éste estuviera bajo control. El procedimiento para determinar la densidad del fluido ideal y el gasto de control es el siguiente:

- A) Determinar la densidad del fluido inicial de control para el pozo descontrolado C-II-2 del Campo Arun. $P_s = 7,100$ lb/pg² de gas, TVD = 9,850 pies. (Ver también el apéndice D-1).

$$\rho_f = 12.83 \frac{P_s}{\text{TVD}}$$

$$\rho_f = 12.83 \frac{7,100}{9,850} = 9.4 \text{ ppg}$$

- B) Determinar el gasto de control para un espacio anular de 8.535 por 5 pulgadas, MD = L = 10,210 pies y e = 0.00065. (Ver también el apéndice D-2).

$$q_b = \left[\frac{\Delta P_{fb}}{11.41 \rho_f} \left(\frac{d_o^5}{fL} \right)_b \right]^{1/2}$$

donde, $\Delta P_{fb} = P_s - \Delta P_{hyd}$

$$\Delta P_{hyd} = \frac{\rho_f}{8.3455} 0.433 \text{ TVD}$$

$$= \frac{9.4}{8.3455} (0.433)(9,850) = 4,708 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{fb} = 7,100 - 4,708 = 2,394 \text{ lb/pg}^2$$

$$f_b = \frac{0.25}{\left[2 \log \frac{dh}{e} + 1.14 \right]^2}$$

$$= \frac{0.25}{\left[2 \log \frac{(8.535 - 5)}{0.00065} + 1.14 \right]^2} = 0.00337$$

$$\langle d_e^5 \rangle_b = (d_o - d_i)^3 (d_o + d_i)^2$$

$$= (8.535 - 5)^3 (8.535 + 5)^2 = 8,093$$

$$q_b = \left[\frac{2,394}{(11.41)(9.4)} \left(\frac{8,093}{(0.00337)(10,210)} \right)^b \right]^{1/2}$$

$$= 72.4 \text{ BPM}$$

El gasto es determinado primeramente para estimar los requerimientos de potencia de la bomba. La presión será monitoreada y utilizada para controlar la operación. El gasto será incrementado hasta que la presión estática de la formación sea excedida.

Una salmuera de 9.4 lb/gal a un gasto de 72 BPM habría sido un fluido inicial ideal para el control del pozo C-II-2, pero se utilizó agua debido a su interés económico y disponibilidad. Sin embargo, si existiera el peligro de que la tubería de perforación fuera arrojada del agujero, entonces se habría utilizado un fluido más pesado, para reducir la presión de fricción. Los siguientes cálculos proporcionan el gasto de control para utilizar agua ($\rho_f = 8.3455 \text{ lb/gal}$) en lugar de la salmuera de 9.4 lb/gal.

$$\Delta P_f = 7.100 - \frac{8.3455}{8.3455} (0.433)(9.650) = 2.922 \text{ lb/pg}^2$$

$$q_b = \left[\frac{2,922}{(11.41)(8.33)} \left(\frac{8,093}{(0.00337)(10,210)} \right)^b \right]^{1/2}$$

$$= 85 \text{ BMP}$$

Si la comunicación del pozo de alivio con el pozo descontrolado estuviera a una profundidad mayor de los 10,210 pies, el gasto de control sería menor, por ejemplo, 80 BPM a 10,900 pies (MD).

4.3.2.2. Gasto para el control dinámico del pozo C-II-2 del Campo Arun

Se seleccionó agua a 85 BPM como fluido inicial (para el control dinámico) y uno de 16.5 lb/gal como fluido final (para el control estático) a pesar de que con un lodo de 14.5 lb/gal habría sido suficiente para lograr el control estático del pozo. Para convertir el agua en el lodo estático requerido de 16.5 lb/gal, éste se bombearía 80 BPM por el espacio anular del pozo C-II-8 para mantener la fricción del agua. El gasto se reduciría una vez que el fluido de 16.5 lb/gal entrara al C-II-2, para evitar el fracturamiento en el C-II-6. Los cálculos iniciales mostraron que esto sería muy difícil de controlar y que si había demasiada caída de presión a través de la comunicación, sería imposible. Por lo tanto, se requirió utilizar un lodo intermedio para permitir la transición del lodo para el control dinámico al lodo para el control estático.

Se consideraron salmueras y lodos de diferentes pesos, pero la densidad óptima del lodo intermedio fue el peso del lodo que había sobre balanceado ligeramente a la formación: el peso que había sido utilizado normalmente para perforar la formación, 14.5 lb/gal. Sin embargo, un lodo de 14.5 lb/gal usualmente tiene propiedades de un fluido que resultará en mucho mayor fricción que la deseable. Por lo tanto, se designó un lodo especial de 14.5 lb/gal para que fuera bombeado. Se utilizó cerca de 1.0 lb/gal de polímero para suspender la barita. La fricción del flujo tuvo que ser calculada utilizando la ley de las fuerzas constantes desarrollada de las mediciones del viscosímetro de multivelocidades Fann V.G. (ver apéndice D-6). Este fluido intermedio podría ser utilizado para desplazar al agua a 85 BPM y entonces reducir el gasto a 30 BPM antes de que el lodo de 16.5 lb/gal (para el control estático) fuera inyectado.

Las relaciones de bombeo para convertir el agua en el lodo intermedio de 14.5 lb/gal y del lodo intermedio de 14.5 lb/gal al

lodo de 18.5 lb/gal para el control estático se presentan en las tablas 4.3 y 4.4, respectivamente. No se consideró el filtrado hacia la formación. Las relaciones de bombeo deben ser desarrolladas para asegurar que la transición puede ser hecha sin fracturar la formación, pero no se utilizan durante la operación de control a menos que la presión leída sobre el tubing se pierda.

4.3.3. Dimensiones del pozo de alivio

El pozo de alivio debe tener una capacidad de flujo adecuada para permitir el control dinámico con el fluido inicial inyectado. Una capacidad de flujo adecuada hacia abajo del espacio anular del pozo de alivio sin flujo a través del tubing permitirá un mejor control de la operación, lo cual es deseable. Si un pozo prácticamente no es suficiente para proporcionar una capacidad adecuada, entonces se requerirá de múltiples pozos de alivio. El procedimiento para determinar las dimensiones del pozo de alivio es el siguiente:

- A) Determinar las dimensiones del pozo de alivio. Datos del pozo de alivio: TVD = 9,560 pies, MD = L = 10,000 pies.
(Ver también el apéndice D-3).

$$P_{an-max} = 7,500 \text{ lb/pg}^2 \text{ de gas}$$

$$P_{if} = 8,500 \text{ lb/pg}^2 \text{ de gas}$$

Fluido inicial de control = agua; $\rho_f = 8.3455 \text{ lb/gal}$

Asumiendo un filtrado del 10% ($k = 0.9$)

Asumiendo una rugosidad de la tubería (e) = 0.00065 pg y turbulencia completa.

Entonces,

$$\left[\frac{fL}{d^5} \right]_r \leq \left[\frac{fL}{d^5} \right]_b k^2 \frac{\Delta P_{fr}}{\Delta P_{fb}}$$

$$f_b = 0.00337 \quad \text{(Calculado en el inciso 4.3.2.1.B.)}$$

$$(d^5)_b = 8,093 \quad \text{(Calculado en el inciso 4.3.2.1.B.)}$$

Tabla 4.3

Relación de bombeo para convertir el agua en el lodo intermedio de 14.5 lb/gal.

| Tiempo después de empezar (min) | Tiempo entre cambios de gasto (min) | Gasto de inyección (BPM) | Presión en el espacio anular del C-II-B (lb/pg ²) | Presión en el tubing del C-II-B (lb/pg ²) |
|------------------------------------|--|-----------------------------|--|--|
| 0 | | 80 | 6,433 | 3,409 |
| 8 | (lodo en el C-II-2) | 80 | 3,135 | 3,409 |
| 9 | 9 | 80 | 4,051 | 4,325 |
| | | 70 | 2,711 | 3,511 |
| 10 1/2 | 1 1/2 | 70 | 3,371 | 4,171 |
| | | 60 | 2,304 | 3,590 |
| 12 1/4 | 1 3/4 | 60 | 3,044 | 4,330 |
| | | 50 | 1,779 | 3,509 |
| 14 1/4 | 2 | 50 | 2,469 | 4,200 |
| | | 40 | 1,533 | 3,661 |
| 16 3/4 | 2 1/2 | 40 | 2,213 | 4,341 |

Reducir el gasto a 20 BPM antes de que el lodo final de 16.5 lb/gal alcance el C-II-2.

Tabla 4.4

Relación de bombeo para convertir el lodo intermedio de 14.5 lb/gal en el lodo final de 16.5 lb/gal.

| Tiempo después de empezar (min) | Tiempo entre cambios de gasto (min) | Gasto de inyección (BPM) | Presión en el espacio anular del C-II-B (lb/pg ²) | Presión en el tubing del C-II-B (lb/pg ²) |
|------------------------------------|--|-----------------------------|--|--|
| 0 | | 30 | 1,362 | 3,827 |
| 21 | (lodo en el C-II-2) | 30 | 1,215 | 3,893 |
| 24 1/4 | 24 1/4 | 30 | 1,571 | 4,248 |
| | | 20 | 338 | 3,742 |
| 34 1/2 | 10 | 20 | 879 | 4,300 |
| | | 15 | 347 | 4,028 |
| 41 1/4 | 6 3/4 | 15 | 587 | 4,268 |
| | | 10 | 273 | 4,164 |
| 51 1/4 | 10 | 10 | 371 | 4,283 |

Reducir el gasto a 5 BPM y evaluar.

$$\left(\frac{fL}{d^5} \right)_b = \frac{(0.00337)(10,210)}{8.093} = 0.004252$$

$$\Delta P_{fr} = P_{an-max} - P_{fl} + \Delta P_{hyd}$$

$$\Delta P_{hyd} = \frac{8.3455}{8.3455} (0.433)(9,580) = 4,139.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{fr} = 7,500 - 8,500 + 4,139.5 = 3,139.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{fb} = P_a - \Delta P_{hyd} = 7,100 - 4,139.5 = 2,960.5 \text{ lb/pg}^2$$

$$\left(\frac{fL}{d^5} \right)_r \leq (0.004252)(0.9)^2 \frac{3,139.5}{2,960.5}$$

$$\left(\frac{fL}{d^5} \right)_r \leq 0.003653$$

Invertiendo ambos miembros de la desigualdad :

$$\left(\frac{d^5}{fL} \right)_r \geq \frac{1}{0.003653}$$

$$\left(\frac{d^5}{f} \right)_r \geq \frac{10,900}{0.003653}$$

$$\left(\frac{d^5}{f} \right)_r \geq 2,983,849$$

Asumiendo que el diámetro del tubing es de 4 1/2" (I.R. de 9 5/8" OD, 8.535" ID). Entonces,

$$f_r = \frac{0.25}{\left[2 \log \frac{(8.535 - 4.5)}{0.00065} + 1.14 \right]^2} = 0.00328$$

$$(d_e^5)_r = (8.535 - 4.5)^3(8.535 + 4.5)^2 = 11.162$$

$$\left[\frac{d_e^5}{f} \right]_{r, 4 \frac{1}{2} \text{ tbg.}} = \frac{11.162}{0.00328} = 3'403.049$$

$$\therefore \left[\frac{d_e^5}{f} \right]_{r, 4 \frac{1}{2} \text{ tbg.}} \geq 2'983.849$$

De este modo, un tubing de 4 1/2" de diámetro ó menor, puede ser utilizado en el pozo de alivio.

4.3.4. Requerimientos de potencia para el bombeo

La potencia hidráulica requerida debe ser adecuada para bombear suficiente fluido para el control dinámico del pozo a la máxima presión permitida en la superficie. Además, se debe de considerar la pérdida o filtrado del fluido hacia la formación (1-k). El procedimiento para determinar la potencia hidráulica requerida es el siguiente:

A) Determinar las potencia hidráulica requerida. (Ver también el apéndice D-4).

$$P_{an-max} = 7,500 \text{ lb/pg}^2$$

$$\text{Filtrado} = 20\% ; k = 0.8$$

$$q_b = 85 \text{ BPM}$$

$$\text{HHP} = \frac{q_r P_{an-max}}{40.81}$$

$$q_r = \frac{q_b}{k} = \frac{85}{0.8} = 106.25 \text{ BPM}$$

$$\text{HHP} = \frac{(106.25)(7,500)}{40.81} = 19,528$$

Si se hubiera utilizado la salmuera de 9.4 lb/gal como fluido inicial de control ($q_b = 72$ BPM) y asumiendo un filtrado del 10%, $k = 0.9$, la potencia requerida sería:

$$\text{HHP} = \frac{(72)(7,500)}{(0.9)(40.81)} = 14,702$$

4.3.5. Máxima presión de fondo del agujero permisible para evitar que la tubería de perforación sea arrojada del agujero descontrolado.

La fricción y el empuje hidráulico ejercen una fuerza sobre la tubería de perforación que tiende a arrojarla del pozo descontrolado. Si esta fuerza es mayor que el peso efectivo de la tubería (en el aire), ésta podría ser arrojada. Si la sarta de perforación hubiera sido arrojada del pozo C-II-2, éste habría requerido de tres pozos de alivio para controlarlo, en lugar de uno.

La diferencia entre la presión de fondo del agujero y la presión hidrostática, es la pérdida total de presión por fricción. Esta diferencia de presión puede ser utilizada para determinar la fuerza de fricción, en vez de calcular las caídas de presión para diferentes gastos de flujo. Como el intento de control está gobernado por la presión en lugar del gasto, la máxima presión de fondo del pozo para prevenir que la tubería sea arrojada puede ser utilizada como un límite superior, si es mayor que la presión estática (P_s) de la formación pero menor que la presión de fractura (P_{fr}) de la misma.

La ecuación para calcular la máxima presión de fondo del pozo permisible para prevenir que la tubería de perforación sea arrojada, está desarrollada para agujeros verticales, ya que para

agujeros desviados el proceso es más complejo y requiere de la ayuda de un programador de computo. La derivación completa de dicha ecuación se presenta en el apéndice D-5.

Profundidad de la T.P. = 10,000 pies

Diámetro de la T.P. = 5"

Diámetro de la T.P. = 9 5/8" OD, 8.535" ID

$W_s = 195,000$ lbs

$$A_{an} = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4} (8.535^2 - 5^2) = 37.58 \text{ pg}^2$$

$$A_{dp} = \frac{\pi}{4} d_i^2 = \frac{\pi}{4} (5)^2 = 19.635 \text{ pg}^2$$

$$R = \frac{1}{2 \ln \left[\frac{d_o}{d_i} \right]} - \frac{d_i^2}{d_o^2 - d_i^2}$$

$$= \frac{1}{2 \ln \left[\frac{8.535}{5} \right]} - \frac{(5)^2}{(8.535)^2 - (5)^2} = 0.4125$$

$$\Delta P_{hyd} = \frac{8.3455}{8.3455} (0.433)(10,000) = 4.330 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{BHmax} = \frac{W_s + A_{an} R \Delta P_{hyd}}{A_{dp} + A_{an} R}$$

$$= \frac{195,000 + (37.58)(0.4125)(4.330)}{19.635 + (37.58)(0.4125)} = 7.447 \text{ lb/pg}^2$$

Si se hubiera utilizado la salmuera de 9.4 lb/gal:

$$\Delta P_{hyd} = \frac{9.4}{8.3455} (0.433)(10,000) = 4.877 \text{ lb/pg}^2$$

$$P_{\text{внmax}} = \frac{105,000 + (37.58)(0.4125)(4.877)}{19.635 + (37.58)(0.4125)} = 7,701 \text{ lb/pg}^2$$

4.4. Procedimiento de una operación de control dinámico

A continuación, se presenta en forma resumida el procedimiento de una operación de control dinámico; desde el establecimiento de la comunicación (a través del pozo de alivio) con el pozo descontrolado, hasta las operaciones de taponamiento (temporal o permanente) después de que el pozo a sido controlado. El mismo procedimiento es aplicable a otros reventones.

- 1) Establecer comunicación mediante agujeros de gusanos (con ácido) o fracturando.
- 2) Valorar la comunicación para determinar si es adecuada para el control dinámico.
- 3) Inyectar el fluido inicial al gasto de control dinámico (agua a 85 BPM) o al gasto que de una presión de fondo del agujero menor que la presión de fractura. Si la presión a la cual la tubería es arrojada, es menor que la presión de fractura de la formación pero mayor que la presión estática de la misma; entonces, la presión de arrojado de la tubería de perforación será la límite.
- 4) Una vez que el control dinámico es realizado, empezar a convertir al lodo de peso intermedio. Inyectar al gasto de control dinámico del fluido inicial (85 BPM) hasta que el lodo intermedio alcance la zapata de la tubería de revestimiento del pozo de alivio y comience a subir por el pozo descontrolado.
- 5) Reducir el gasto tanto como sea necesario, para mantener la presión de fondo del agujero (del pozo de alivio) abajo de la presión de fractura de la formación (8,500 lb/pg² de gas), cuidando de no reducirlo tanto, que la presión de fondo del agujero (del pozo descontrolado) sea menor que la presión estática de la formación (7,100 lb/pg² de gas). Se tomarán algunas decisiones, tales como la de monitorear la presión de fondo del agujero del pozo de alivio, en lugar de la del pozo descontrolado. La caída de presión a través del sistema de

comunicación, posiblemente puede ser estimada de las curvas de comportamiento, desarrolladas durante la evaluación de la comunicación.

- 6) Una vez que el pozo descontrolado está lleno del fluido de peso intermedio, empezara a inyectar (al gasto de control dinámico del fluido intermedio) el fluido final de mayor peso; hasta que el lodo final entre al pozo descontrolado.
- 7) Reducir el gasto tanto como sea necesario, para mantener la presión de fondo del agujero (del pozo de alivio) abajo de la presión de fractura de la formación y la presión de fondo del agujero (del pozo descontrolado) arriba de la presión estática de la misma.
- 8) Una vez que el pozo descontrolado está lleno de lodo pesado, continuar la inyección a un gasto bajo por algunas horas, mientras se observa al pozo.
- 9) Si no existen indicaciones de afluencia de gas, suspender la inyección y continuar observando. El lodo probablemente fluirá lentamente por algunos momentos, debido a la expansión térmica.
- 10) Después de que el pozo está controlado, comenzar las operaciones de taponamiento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El descontrol de un pozo petrolero se debe principalmente a dos causas:

- El error humano, y
- Fallas en el equipo superficial de control

La forma más rápida de recuperar el control del pozo, es mediante la instalación del equipo superficial dañado. Cuando esto no es posible, se requiere de algún otro medio para lograrlo. El método de control dinámico, es una alternativa que ofrece una ventaja muy importante: evita el fracturamiento de la formación productora, debido a que logra el control del pozo, sin exceder la presión de fractura de la formación.

Uno de los aspectos importantes, dentro de la perforación de pozos petroleros, es el prevenir y evitar el descontrol de los mismos, para lo cual se recomienda:

- Capacitar en forma correcta y actualizada, al personal que labora en los equipos de perforación; considerando los avances tecnológicos y la preevaluación del recurso humano.
- Actualizar periódicamente los procedimientos operativos y adecuarlos a las diferentes áreas, de acuerdo a sus características propias, vigilando su total aplicación.
- Seleccionar el equipo de control adecuado, considerando factores, tales como: operatividad, funcionamiento y buen estado.

Al ocurrir el descontrol de un pozo, se requiere de la intervención rápida de personal especializado, con la finalidad de recuperar el control del mismo y lograr el menor daño posible, tanto al yacimiento como al medio ambiente. Al suscitarse el descontrol de un pozo, se recomienda:

- Establecer un plan general de control, considerando las posibles alternativas para lograrlo, así como la disponibilidad de recursos humanos y materiales.
- Utilizar el equipo adecuado, al efectuar las operaciones de control.
- Practicar previamente las maniobras que se van a realizar

La aplicación correcta del método dinámico, permite lograr el control rápido de un "reventón". Lo cual se traduce en un considerable ahorro de tiempo, dinero y recursos.

APENDICES

APENDICE A

REQUERIMIENTOS DE LLENADO EN DIFERENTES GEOMETRIAS Y DENSIDADES
AL EXTRAER LA TUBERIA (LINGADAS)

| T.R. | T.P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|---------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 10 3/4" | 3 1/2" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 5" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

| T.R. | T.P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|--------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 9 5/8" | 3 1/2" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 4 1/2" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 5" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 |

| T.R. | T.P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|--------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 7 5/8" | 2 3/8" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 2 7/8" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 3 1/2" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 |

| T. R. | T. P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|---------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | H. W. | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 10 3/4" | 3 1/2" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 5" | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

| T. R. | T. P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|--------|-------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | H. W. | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 9 5/8" | 5" | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

| T. R. | T. P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|--------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | H. W. | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 7 5/8" | 3 1/2" | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |

| T. R. | T. P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|-------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | H. W. | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 7" | 3 1/2" | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

| T.R. | D.C. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|--------|--------|-----------------------------|------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 10 3/4 | 7 1/4" | 1 | 1 | 1 | 1 | <1 ^M |

| T.R. | D.C. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|--------|--------|-----------------------------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 9 5/8" | 6 1/4" | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | <1 ^M | <1 ^M |
| | 6 1/2" | 1 | 1 | 1 | <1 ^M |

| T.R. | D.C. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|--------|--------|-----------------------------|------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 7 5/8" | 4 3/4" | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5" | 1 | 1 | 1 | 1 | <1 ^M |

| T.R. | D.C. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|------|--------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 7" | 4 3/4" | 1 | <1 ^M |

* En estos arreglos de geometría y densidades se deberá de llenar continuamente.

| T.R. | T.P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 7" | 2 3/8" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 2 7/8" | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | 3 1/2" | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

| T.R. | T.P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|-------------------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 5" 21 lb/pt | 2 3/8" | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| | 2 7/8" | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |

| T.R. | T.P. | ρ (g/cm ³) | | | | | | | | |
|-------------------|--------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1.40 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80 | 1.90 | 2.00 | 2.10 | 2.20 |
| 5" 18 lb/pt | 2 3/8" | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | 2 7/8" | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

DESPLAZAMIENTO DE DISTINTOS DIAMETROS DE TUBERIA Y HERRAMIENTA PARA LA DETERMINACION DEL VOLUMEN NECESARIO PARA LLENAR EL POZO

TUBERIA DE PERFORACION

| <u>DIAMETRO</u> | <u>DESPLAZAMIENTO</u> |
|----------------------|-----------------------|
| 2 3/8" | 1.33 lts/m |
| 2 7/8" | 2.07 lts/m |
| 3 1/2" (13.3 lb/pie) | 2.72 lts/m |
| 3 1/2" (15.5 lb/pie) | 3.12 lts/m |
| 4 1/2" | 3.50 lts/m |
| 5" | 4.05 lts/m |

HERRAMIENTA

| <u>DIAMETRO</u> | <u>DIAMETRO INTERIOR</u> | <u>PESO</u> | <u>DESPLAZAMIENTO</u> |
|-----------------|--------------------------|-------------|-----------------------|
| 4 3/4" | 2 1/4" | 69.7 kg/m | 8.87 lts/m |
| 5" | 2 1/4" | 79.3 kg/m | 10.10 lts/m |
| 6 1/4" | 2 1/4" | 123.6 kg/m | 15.74 lts/m |
| 6 1/2" | 2 13/16" | 136.4 kg/m | 17.37 lts/m |
| 7 1/4" | 2 13/16" | 177.2 kg/m | 22.57 lts/m |
| 8" | 3" | 218.8 kg/m | 27.87 lts/m |
| 9 1/2" | 3" | 322.9 kg/m | 41.13 lts/m |

APENDICE B

- Punto de ebullición inicial: es la temperatura a la cual los hidrocarburos más ligeros del crudo, dejarán la masa de aceite en forma de vapor, a la presión atmosférica a nivel del mar.
- Punto de ebullición final: es la temperatura a la cual los hidrocarburos más pesados del crudo se vaporizan. Como la mayoría de los crudos tienen un punto de ebullición final mayor que su temperatura de ignición, las pruebas del punto de ebullición final tienen que ser obtenidas en el vacío.
- Rango de ebullición: es aquel rango de temperatura durante el cual todas las fracciones de diferentes densidades y puntos de ebullición, son convertidas en vapor o gas. Los aceites crudos de menor punto de inflamación y que contienen fracciones más pesadas y menos volátiles tienen, por consiguiente, los rangos de ebullición más grandes. Los alcoholes, aromáticos y aldehídos únicamente tienen puntos de ebullición, ya que no tienen rangos.
- Temperatura de ignición: es la temperatura más baja a la cual se requiere de un volumen suficiente de calor para encender los vapores de un aceite específico ó las partículas finamente divididas de una sustancia dada, cuando se encuentran formando una mezcla correcta con el aire.
- Punto de ignición: es la temperatura más baja a la cual un aceite arrojará los vapores suficientes para arder superficialmente en forma continua por un mínimo de 5 segundos después de su ignición. En algunos aceites el punto de ignición es de solamente 5 °F por encima del punto de inflamación, mientras que en otros es mucho más alto.
- Punto de inflamación: es la temperatura más baja a la cual un aceite arrojará los vapores suficientes para formar un mezcla

inflamable con el aire, la cual se encenderá a través de su superficie, cuando alcance su temperatura de ignición. El punto de inflamación está determinado bajo condiciones controladas de laboratorio y generalmente está por debajo de la temperatura de ignición del líquido. El término "punto de inflamación alto" es utilizado para describir a un aceite con un punto de inflamación por encima de su temperatura ambiental y/o de almacenamiento; mientras que el término "punto de inflamación bajo" es utilizado para describir a un aceite con un punto de inflamación por debajo de su temperatura ambiental y/o de almacenamiento.

- Rango de explosividad: es el rango que contiene todas las concentraciones de una mezcla formada por un vapor ó gas inflamables y aire (usualmente expresado en porcentaje de volumen de vapor en el aire) en el cual ocurrirá un flamazo ó se producirá la propagación de una flama, si la mezcla es encendida. El porcentaje mínimo para que ésto ocurra, es el del límite de explosividad más bajo. Si una mezcla dentro del rango de explosividad es confinada y encendida, se producirá una explosión. El rango de explosividad de la gasolina, es de 1 a 8 % de vapor y de 99 a 94 % de aire.
- Fracciones ligeras: es aquel grupo de hidrocarburos formado por los de menor punto de ebullición, dentro del rango de ebullición del aceite.
- Fracciones pesadas: es aquel grupo de hidrocarburos formado por los de mayor punto de ebullición, dentro del rango de ebullición del aceite.
- Gravedad específica (SG): es la relación que existe entre los pesos de volúmenes iguales de una sustancia y el agua. Para aplicarlos a los productos del aceite, es una costumbre tomar los pesos de ambos (aceite y agua) a la temperatura de 60 °F.

- Gravedad API: la gravedad API de un aceite es una función matemática de la gravedad específica definida arriba. La relación está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{API} = \frac{141.5}{\text{SG @ } 60 \text{ } ^\circ\text{F}} - 131.5$$

Algunos aceites crudos contienen pocas fracciones ligeras y algunos hidrocarburos de mediano rango de ebullición, ya que principalmente están compuestos por hidrocarburos de baja gravedad API y de alto punto de ebullición. Por lo que, un crudo de baja gravedad API puede tener también un punto de inflamación bajo. Sin embargo, frecuentemente un crudo de muy baja gravedad API tiene un punto de inflamación alto.

- Presión de vapor: es la tendencia de una sustancia a vaporizarse, generalmente se expresa en términos de milímetros de Mercurio o en libras por pulgada cuadrada absolutas. La presión de vapor de un líquido en su punto de ebullición es igual a la presión atmosférica en la escala absoluta. La presión de vapor se calcula en base a un aceite específico a una temperatura de 100 °F.

A veces se piensa que mientras menor sea el punto de inflamación del crudo, mayor será su presión de vapor. Lo cual no necesariamente es cierto. Un crudo con pocos hidrocarburos muy ligeros puede tener un punto de inflamación muy bajo, así como también una presión de vapor baja. La regla se mantiene cierta, sin embargo, no es así en el caso de un crudo de punto de inflamación alto, ya que éste prácticamente no tiene presión de vapor o no es suficiente para producir un vapor por encima del líquido en un estado flamable.

Otra definición de presión de vapor aceptada es que es la libra por pulgada cuadrada ejercida por un gas o vapor (en todas direcciones) dentro de un recipiente cerrado a una

temperatura dada.

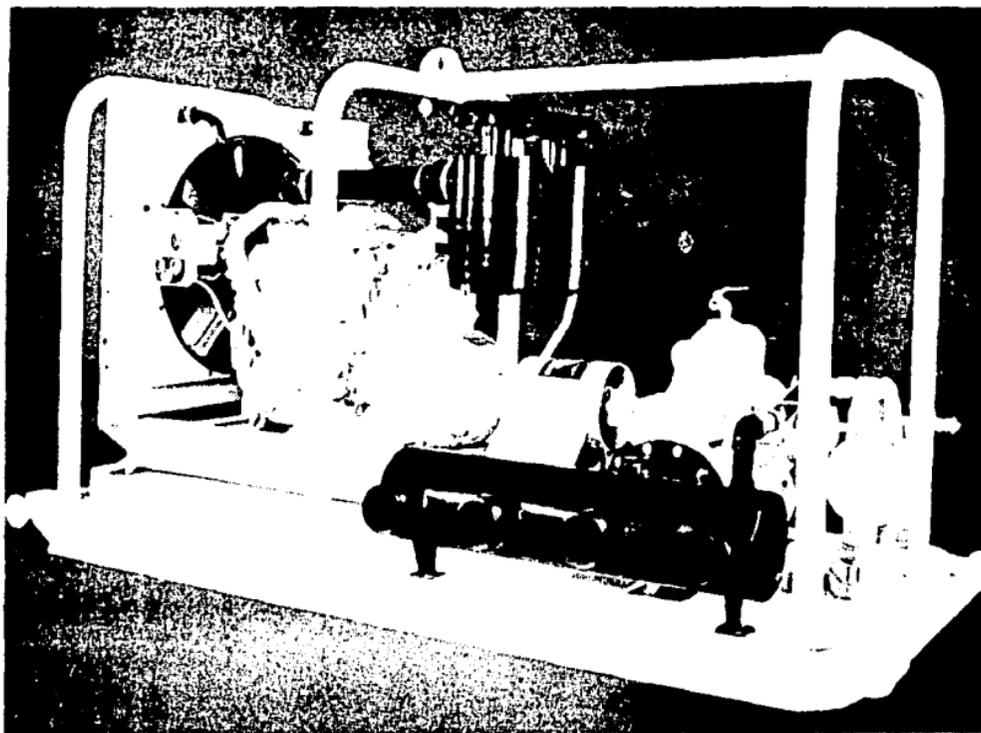
- Vapor inflamable: describe a los hidrocarburos que provienen de la superficie de un líquido inflamable debido a su punto de inflamación bajo o a que han sido arrojados cuando la temperatura del líquido se eleva por encima de su punto de ebullición. El espacio de vapor que contiene a los hidrocarburos, puede o no contener aire u oxígeno. Los vapores de los líquidos inflamables son más pesados que el aire, expresados en términos de densidad de vapor.
- Líquido inflamable: es cualquier líquido con un punto de inflamación por abajo de los 200 °F y una presión de vapor que no exceda las 40 lb/pg². Los líquidos inflamables pueden dividirse en tres clases: Clase 1, formada por líquidos cuyo punto de inflamación es menor o igual a 20 °F; Clase 2, formada por líquidos cuyo punto de inflamación es mayor de 20 °F pero menor de 70 °F; Clase 3, formada por líquidos cuyo punto de inflamación es mayor de 70 °F pero menor de 200 °F.
- Gas inflamable: es la formación de un hidrocarburo molecular (normalmente en suspensión) el cual puede o no ser reducido a líquido por presión, o la disminución de la temperatura. Los gases inflamables pueden o no ser más pesados que el aire expresado en términos de densidad de vapor.
- Temperatura crítica: es la temperatura a la cual, (a presión atmosférica) un material específico es convertido de líquido a gas o vapor.
- Densidad de vapor: es una medida de la densidad relativa o peso (comparado con el aire) de un vapor o un gas sin la presencia del aire. Un gas o vapor con una densidad menor que 1 es más ligero que el aire y se elevara cuando sea liberado. Los vapores o gases con una densidad mayor que 1 descenderán cuando sean liberados. Los vapores más pesados que el aire dentro de un recipiente cerrado pero ventilado purgaran el

aire hacia arriba. De esta manera, los vapores dentro del recipiente, cuando su densidad es mayor que la del aire y su presión de vapor es alta, tienden a purgar el aire hacia arriba. Ellos incluso pueden irse hacia la parte abierta más alta del recipiente en una concentración muy rica para arder.

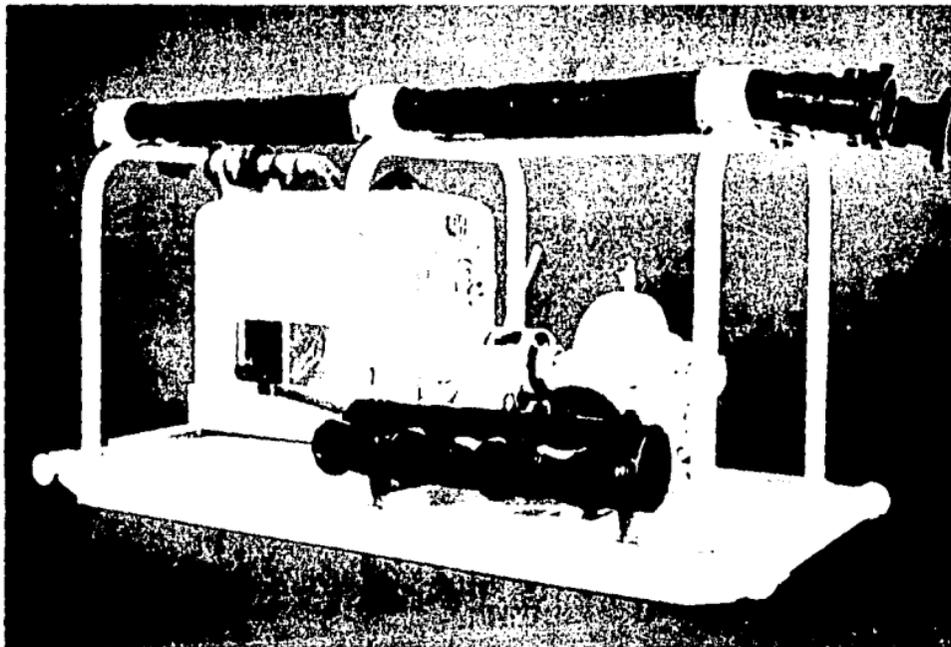
- Rango inflamable o de inflamabilidad: es el rango de un gas o vapor que se sitúa entre la cantidad más pequeña y la más grande de gas o vapor y aire, expresado en porcentaje de volumen de aire, en el cual dicho gas o vapor puede arder.
- Propagación de la flama: es la reproducción de las flamas a través de la mezcla de vapor o gas con aire u oxígeno en el porcentaje de volumen correcto.
- Temperatura de encendido: es la temperatura mínima requerida para empezar una combustión sostenida por sí misma, independientemente del calor o de los elementos que lo producen. Las variables involucradas incluyen la forma y tamaño del espacio donde se produce la ignición, porcentaje de concentración de vapor o gas, mezcla de aire, ritmo y duración del calentamiento, el efecto catalítico u otro efecto de los materiales presentes, tipo de fuente de ignición y su temperatura, así como la concentración de aire-oxígeno. Debido a estas variables, las temperaturas de encendido usualmente son aproximadas.
- Combustión: es una reacción que ocurre cuando una sustancia es combinada con oxígeno a un ritmo suficiente para producir energía luminosa, al igual que calor. Las flamas que se producen por combustión, consisten en gases vaporizados de la sustancia combustible que arden por la reacción al calor.
- Fuego: es un vapor o gas que arde al aire libre o donde el aire puede ser introducido para formar una mezcla incendiaria.
- Explosión: es la ignición de vapor o gas dentro de un lugar

cerrado que provoca un incremento en la presión lo cual podría causar una ruptura violenta de dicho sitio.

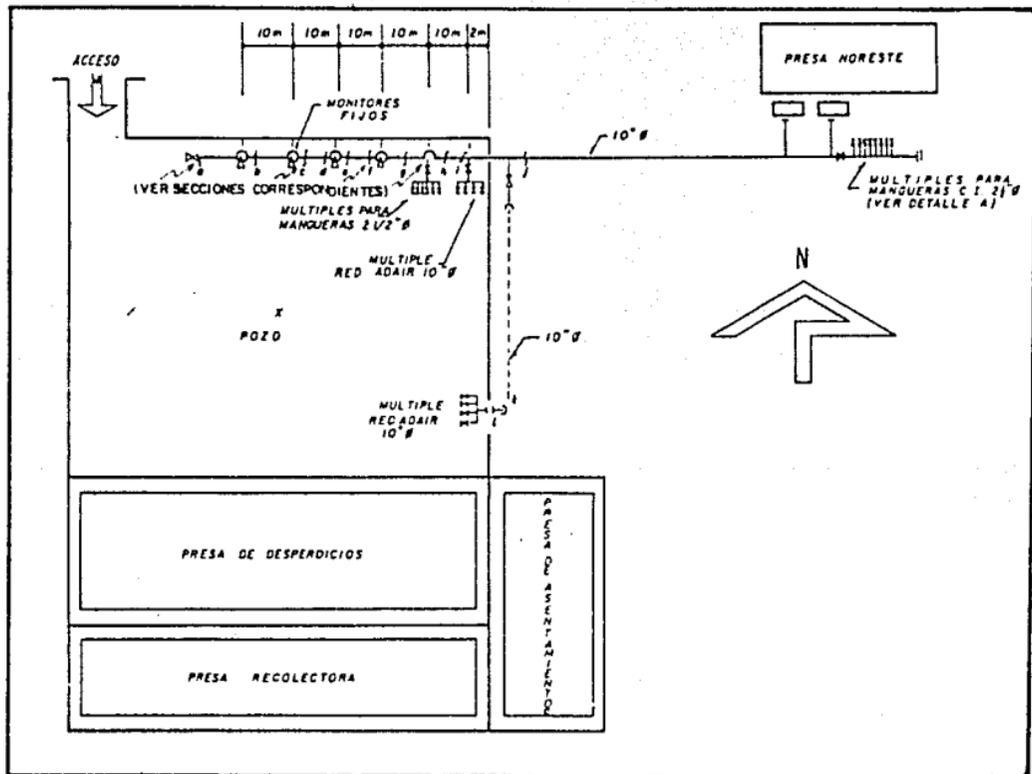
- Detonación: es la propagación de las flamas siguiendo ondas de choque a través de tuberías, vasijas, etc., a velocidades y presiones muy altas. Esto difiere de una explosión normal debido a que las presiones pico, son algunas veces hasta 20 veces mayores. El frente de la detonación se propaga a velocidades supersónicas y ejerce un choque directo mayor que el de una fuerza hidrostática.



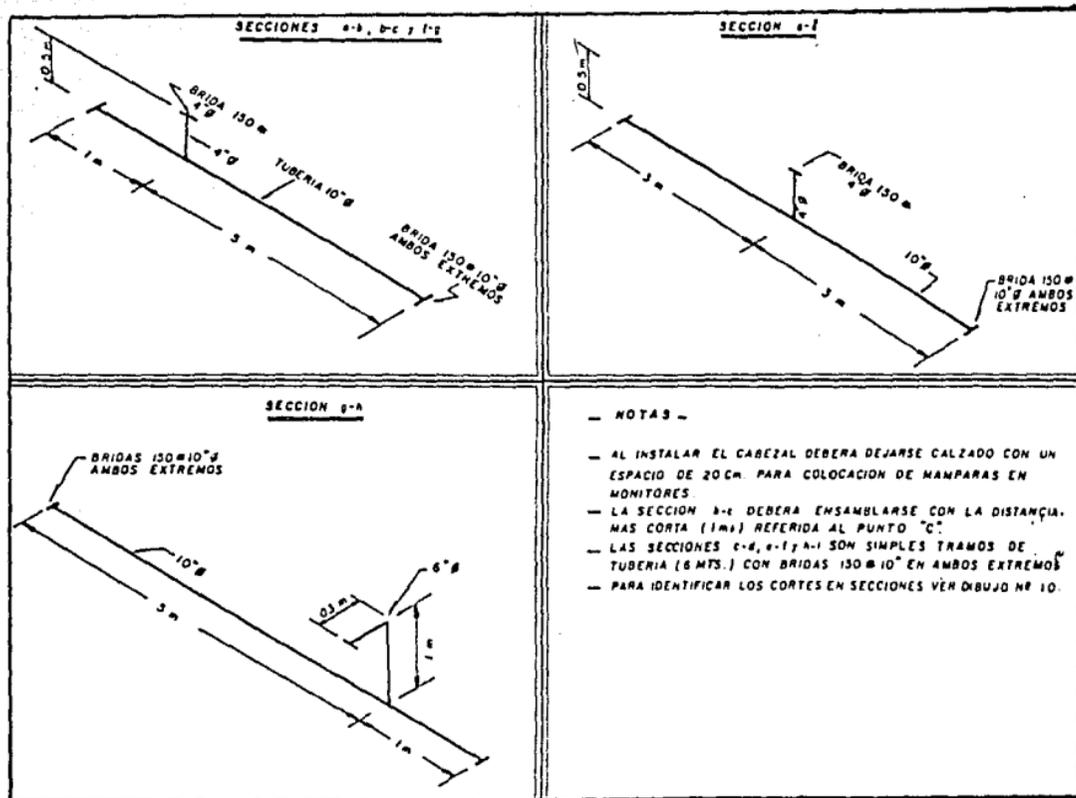
Bomba Wild Well Control Inc. de 5,400 GPM, con múltiple de succión de 4 tomas de 6" de diámetro y descarga de 10" de diámetro.



Bomba Wild Well Control Inc. de 4,000 GPM, con múltiple de succión de 4 tomas de 6" de diámetro y descarga de 10" de diámetro.

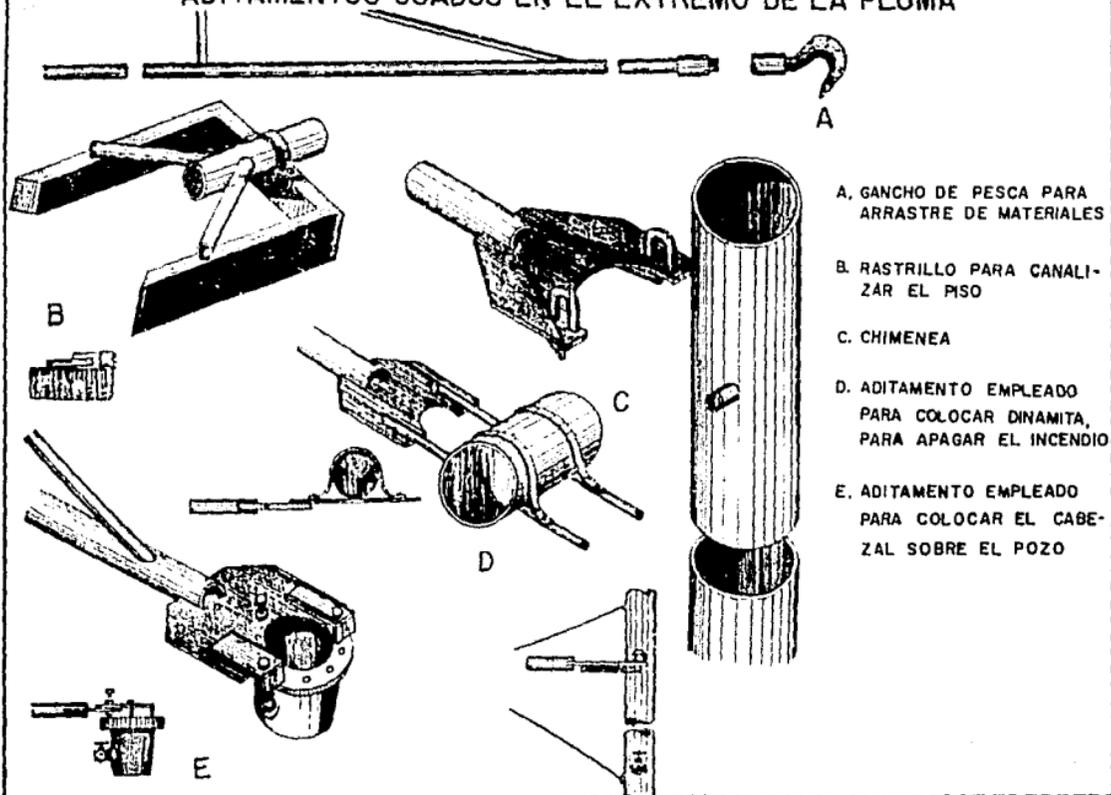


Cabezal de distribución de agua (1)



Secciones del cabezal de distribución de agua (2)

ADITAMENTOS USADOS EN EL EXTREMO DE LA PLUMA



A. GANCHO DE PESCA PARA
ARRASTRE DE MATERIALES

B. RASTRILLO PARA CANALI-
ZAR EL PISO

C. CHIMENEA

D. ADITAMENTO EMPLEADO
PARA COLOCAR DINAMITA,
PARA APAGAR EL INCENDIO

E. ADITAMENTO EMPLEADO
PARA COLOCAR EL CABE-
ZAL SOBRE EL POZO

PESO DE LOS COMPONENTES DE UN EQUIPO DE PERFORACION

El peso total de un equipo de perforación moderno es de aproximadamente 1.340 toneladas, incluyendo sus dos sargas de tubería de perforación de uso normal.

El peso de los componentes es el siguiente:

| CANTIDAD | DESCRIPCION | PESO (TONS.) |
|----------|---|--------------|
| 1 LOTE | TUBERIAS DE PERFORACION (5" Y 3 1/2") | 300 |
| 1 | SUBESTRUCTURA | 140 |
| 1 | MASTIL | 96 |
| 3 | UNIDADES CATERPILLAR D-300 | 87 |
| 1 LOTE | LASTRABARRENAS (9 1/2", 7 1/4" Y 5") | 85 |
| 2 | BOMBAS DE LODO | 68 |
| 3 | PRESAS DE LODO | 64 |
| 6 | TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDOS | 60 |
| 1 LOTE | PIZARRAS PARA MASTIL, MAQUINAS Y BOMBAS | 60 |
| 1 | CASETA CON HERRAMIENTA DE MANO | 57 |
| 1 | CONJUNTO DE PREVENTORES (11" Y 10 3/4") | 50 |
| 1 | MALACATE | 35 |
| 1 LOTE | CARGADORES, MUELLES Y RAMPA | 30 |
| 1 | SISTEMA DE ALUMBRADO | 29 |
| 1 | CASETA SCR | 28 |
| 4 | SILOS | 20 |
| 1 | MOTORES DEL MALACATE | 20 |
| 1 LOTE | RAMPA PARA PRODUCTOS QUIMICOS | 20 |
| 1 | MESA ROTARIA CON MOTOR | 14 |
| 1 | FRENO ELECTROMAGNETICO | 13 |
| 1 | POLEA Y GANCHO | 12 |
| 1 | CARRETE CON CABLE DE 13 3/8" | 11 |
| 1 | CORONA | 7 |
| 1 | SWIVEL Y FLECHA | 6 |
| 1 LOTE | VARIOS | 28 |
| TOTAL | | 1.340 |

RESISTENCIA Y USOS DEL CABLE DE ACERO UTILIZADO EN LAS MANIOBRAS

La utilización de cable de acero, para realizar las distintas maniobras que se efectúan en un pozo descontrolado, es importante. Por lo cual, debe seleccionarse cuidadosamente, considerando su tipo, grado de acero, alma del cable, etc.

Los cables tipo "BOA" 6 x 19, son los que se utilizan con más frecuencia en las maniobras. Sus características principales son:

| DIAMETRO | | PESO APROXIMADO (Kg/m) | RESISTENCIA A LA ROTURA (TONS.) | |
|----------|-------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|
| (mm) | (pg) | | ARADO MEJORADO | ARADO EXTRAMEJORADO |
| 18 | 5/8 | 1.07 | 16.2 | 18.7 |
| 19 | 3/4 | 1.55 | 23.2 | 26.7 |
| 22 | 7/8 | 2.11 | 31.4 | 35.1 |
| 26 | 1 | 2.75 | 40.7 | 46.9 |
| 29 | 1 1/8 | 3.48 | 51.3 | 59.0 |
| 32 | 1 1/4 | 4.30 | 63.0 | 72.5 |
| 35 | 1 3/8 | 5.21 | 75.7 | 87.1 |
| 38 | 1 1/2 | 5.63 | 89.7 | 103.0 |

El cable de acero utilizado para guarnir los polipastos (para deslizar un equipo convencional sin tubería estibada en el mástil) debe ser de 1 1/8". El cable que sirve para guarnir al equipo de perforación con el gancho de la polea viajera, debe ser 1 1/4", para tener un factor de seguridad mayor de 2.

Para deslizar equipos de perforación eléctricos o electrónicos, se debe utilizar cable de acero de 1 3/8", guarnido a diez o doce líneas, dependiendo si tiene tubería estibada en el mástil o no.

El cable de acero también se utiliza para la fabricación de estrobos. Estos, sirven para amarrar las piezas del equipo de perforación, con la finalidad de que puedan ser jaladas y retiradas de la boca del pozo. En el campo, generalmente se fabrican tres tipos de estrobos:

- 1) Trenzado con casquillo de tubo galvanizado
- 2) Trenzado con grapas
- 3) Doblado con grapas

Para fabricar un estrobo trenzado con casquillo de tubo galvanizado, se introducen dos secciones de dicho tubo en el cable al que se van a hacer los ojos (del doble de diámetro que el cable a usar y de una longitud equivalente a 20 veces el diámetro del mismo), se destrenza un extremo del cable en una longitud equivalente a 80 veces su diámetro, separando dos grupos: uno formado por cuatro torones (incluyendo el alma) y otro formado por tres. Se cruzan las puntas de los dos grupos de torones a una distancia aproximada de 20 veces el diámetro del cable, a partir de donde comienza la parte destrenzada, haciendo un nudo y formando el ojo; luego se toma la punta del grupo de tres torones y se trenza sobre el grupo de cuatro, a partir del nudo y hasta llegar a la parte no destrenzada del cable, dejando una cola de aproximadamente 20 veces el diámetro del cable. Ahora, se hace lo mismo con el grupo de cuatro torones: tomando su punta y trenzadola sobre el grupo de tres, a partir del nudo y hasta llegar a la parte no destrenzada del cable, también dejando una cola de 20 veces el diámetro del cable. Ambas puntas se trenzan sobre la parte no destrenzada del cable y se introduce una sección de tubo galvanizado, para qué con un torniquete de banco o una prensa hidráulica, se colapse el tubo, comprimiendo el cable. Una vez terminado un extremo del cable, se hace lo mismo con el otro extremo, formando el estrobo.

Para fabricar un estrobo trenzado con grapas, se sigue el el mismo procedimiento que para fabricar un estrobo trenzado con casquillo de tubo galvanizado, solo que en lugar de las secciones de tubo, se utilizan grapas para asegurar las colas.

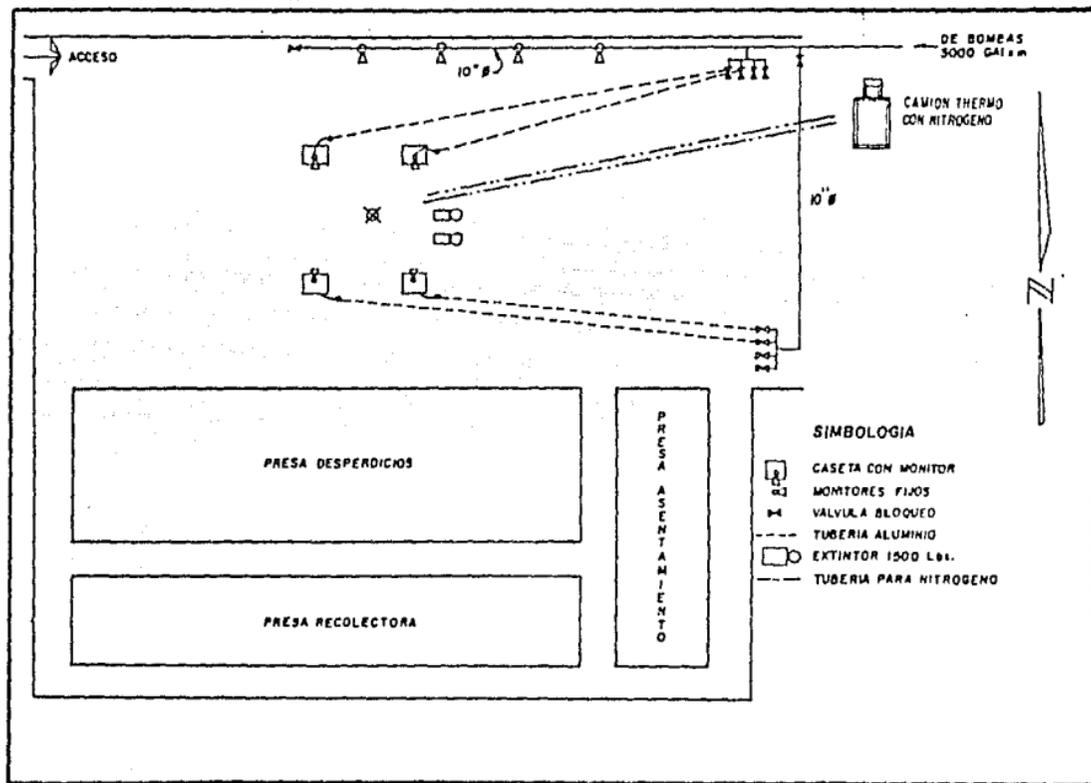
Para hacer los estrobos doblados con grapas, se doblan los extremos del cable en una longitud equivalente a 80 veces el diámetro del cable y se le colocan la cantidad de grapas que se indican en la siguiente tabla:

| DIAMETRO (mm) - (pg) | | No. GRAPAS | DISTANCIA ENTRE GRAPAS (cm) |
|-------------------------|-------|------------|--------------------------------|
| 16 | 5/8 | 3 | 10 |
| 19 | 3/4 | 4 | 11 |
| 22 | 7/8 | 4 | 12 |
| 26 | 1 | 5 | 13 |
| 29 | 1 1/8 | 6 | 14 |
| 32 | 1 1/4 | 6 | 15 |
| 35 | 1 3/8 | 7 | 16 |
| 38 | 1 1/2 | 7 | 17 |

Para recuperar a los componentes que están sujetos a la acción del fuego, se recomienda estrobarlos de partes sólidas, tales como vigas, flechas, etc. El Procedimiento para estrobarlos es el siguiente:

Pasar el ojo del estrobo (1) alrededor de la parte mas sólida de la pieza y fijarlo con un grillete. Pasar el ojo del estrobo (2) fijandolo con otro grillete. Los extremos de ambos estrobos (1 y 2) se aseguran al gancho de un tractor o camión, mediante un tercer estrobo, de la siguiente manera:

- El ojo del estrobo (3), se pasa a través del ojo del estrobo (1) y del gancho del tractor o camión, regresandolo para pasarlo por el ojo del estrobo (2), regresandolo nuevamente al gancho. Este ciclo se repite hasta completar tres vueltas (igual a seis líneas) colocando un grillete en los ojos del estrobo (3).



Distribución del equipo para sofocar el incendio

APENDICE D

1. SELECCION DEL FLUIDO INICIAL DE CONTROL

La densidad del fluido inicial de control puede determinarse, encontrando un fluido tal que al introducirse una burbuja de gas dentro de la corriente de flujo en una sola fase (al gasto requerido para controlar el pozo) incremente la componente de la presión de fricción, tanto como la burbuja reduce a la componente de la presión hidrostática. La densidad de dicho fluido inicial puede determinarse mediante la siguiente condición:

$$\rho_f \leq \frac{12.838 P_o}{TVD} \quad (1)$$

Derivación de la Ecuación (1):

Las pérdidas de presión por fricción, $\Delta P_f = \frac{CfL \rho_i V_i^2}{d_h}$

Donde V_i es la velocidad del fluido, d_h es el diámetro hidráulico y C es una constante. Suponiendo que burbujas de gas entraron a la corriente de flujo. Para un régimen de flujo tipo burbuja el fluido continuo es la fase líquida. Siendo ϕ_g la fracción de volumen de gas del volumen total de fluido, entonces,

$$V = \frac{V_i}{(1 - \phi_g)}$$

$$\rho_f = \rho_l(1 - \phi_g) + \rho_g \phi_g$$

Como

$$P = \Delta P_{hyd} + \Delta P_f$$

Derivando esta ecuación con respecto a la fracción de gas, entonces,

$$\frac{dP}{d\phi_g} = \frac{d\Delta P_{hyd}}{d\phi_g} + \frac{d\Delta P_f}{d\phi_g} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{hyd} &= \frac{0.433}{8.3455} \rho \text{ TVD} \\ &= \frac{0.433}{8.3455} \text{ TVD } [\rho_i (1 - \phi_g) + \rho_g \phi_g]\end{aligned}$$

Entonces,

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta P_{hyd}}{d\phi_g} &= \frac{0.433}{8.3455} \text{ TVD } [-\rho_i + \rho_g] \\ &= -\Delta P_{hyd} + \Delta P_{hyd g} \\ &\approx -\Delta P_{hyd}\end{aligned}\tag{2}$$

$$\Delta P_f = \frac{CfL \rho_i V_i^2}{d_h} = \frac{CfL \rho_i V_i^2}{d_h (1 - \phi_g)^2}$$

$$\frac{d\Delta P_f}{d\phi_g} = \frac{2CfL \rho_i V_i^2}{d_h (1 - \phi_g)^3} = \Delta P_{fi} \frac{2}{(1 - \phi_g)^3}\tag{3}$$

Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en (1)

$$\frac{dP}{d\phi_g} = 2\Delta P_{fi} \frac{1}{(1 - \phi_g)^3} - \Delta P_{hyd}$$

La presión debe incrementarse con la introducción de las burbujas de gas, por lo tanto, debe ocurrir lo siguiente:

$$\frac{dP}{d\phi_g} \geq 0\tag{4}$$

Como ΔP_{fi} y ΔP_{hyd} siempre son positivas y que

$$\frac{1}{(1 - \phi_g)^3} \geq 1$$

Entonces la condición,

$$2\Delta P_{fi} \geq \Delta P_{hyd}\tag{5}$$

asegurará la condición (4)

Como $P_e = \Delta P_{hyd} + \Delta P_{ft}$

$$\circ \Delta P_{ft} = P_e - \Delta P_{hyd}$$

Sustituyendo en (5)

$$2(P_e - \Delta P_{hyd}) \geq \Delta P_{hyd}$$

$$\circ 2P_e \geq 3\Delta P_{hyd}$$

$$P_e \geq 1.5\Delta P_{hyd}$$

$$\text{pero } \Delta P_{hyd} = \frac{0.433}{8.3455} \rho_f \text{ TVD}$$

$$P_e \geq \frac{(1.5)(0.433)}{8.3455} \rho_f \text{ TVD}$$

o,

$$\rho_f \geq \frac{12.836 P_e}{\text{TVD}}$$

2. ESTIMACION DEL GASTO DE INYECCION NECESARIO

$$\Delta P_f = \frac{11.41 fL \rho q^2}{d_w^5}$$

Dentro del pozo descontrolado, deberá ser,

$$\Delta P_{fb} = P_e - \Delta P_{hyd}$$

Como la presión de fondo del pozo descontrolado es P_e .

$$\text{Entonces } P_e - \Delta P_{hyd} = 11.41 \left[\frac{fL}{d_w^5} \right] \rho_f q_b^2$$

$$\circ q_b^2 = \frac{(P_e - \Delta P_{hyd})}{11.41 \rho_f} \left[\frac{d_w^5}{fL} \right]_b$$

$$q_b = \left[\frac{(P_e - \Delta P_{hyd})}{11.41 \rho_f} \left[\frac{d_w^5}{fL} \right] \right]^{1/2}$$

$$\text{Si } k = \frac{q_b}{q_r}$$

El gasto de inyección requerido en el pozo de alivio es:

$$q_r = \frac{1}{k} \left[\frac{(P_a - \Delta P_{hyd})}{11.41 \rho_f} \left(\frac{d_e^5}{fL} \right)^b \right]^{1/2}$$

3. DIMENSIONES DEL POZO DE ALIVIO

En esta sección se deriva una técnica para determinar: las dimensiones que debe tener el pozo de alivio ó el número de éstos que se requieren para facilitar el control dinámico de un reventón, considerando un sistema de comunicación "pobre" y sin exceder las limitaciones de presión del equipo superficial.

Examinando la ecuación de pérdidas por fricción

$$\begin{aligned} \Delta P_f &= \frac{c f L \rho_f q^2}{d_e^5} \\ &= c \left(\frac{fL}{d_e^5} \right) \rho_f q^2 \end{aligned}$$

Suponiendo turbulencia completa, o

$$f = \frac{0.25}{\left[2 \log \frac{dh}{e} + 1.14 \right]^2}$$

Entonces el término $\left(\frac{fL}{d_e^5} \right)$ es característico de una tubería de revestimiento que no depende de las propiedades del fluido. Este término es llamado "resistencia al flujo". La resistencia al flujo de un pozo formado por N secciones múltiples (en serie) es la suma de la resistencia al flujo de cada sección.

$$\left(\frac{fL}{d_e^5} \right)_{total} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{fL}{d_e^5} \right)_i \quad (1)$$

Para un pozo con N resistencias al flujo paralelas, la resistencia al flujo equivalente está dada por

$$\left(\frac{fL}{d_e^5} \right)_{\text{equiv}} = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^5}{fL} \right)^{1/2} \right]^2} \quad (2)$$

Considerando el sistema pozo descontrolado / canal de comunicación / pozo de alivio. Suponiendo que la resistencia al flujo del pozo

descontrolado es $\left[\frac{fL}{d_e^5} \right]_b$, entonces la cuestión es determinar la resistencia al flujo del pozo de alivio $\left[\frac{fL}{d_e^5} \right]_r$ y el gasto

necesario para controlar dinámicamente el pozo, con el fluido inicial de control y la correspondiente potencia hidráulica requerida. Suponiendo que la máxima presión de operación del equipo superficial (P_{an-max}), la presión de fractura de la formación (P_{ff}) y la presión estática de la misma (P_s) son conocidas.

En un control dinámico, la presión de fondo del agujero (del pozo descontrolado) debe mantenerse arriba de la presión estática del yacimiento, mientras que la presión de fondo del agujero (del pozo de alivio) debe mantenerse abajo de la presión de fractura de la formación. Por lo tanto, la máxima caída de presión permisible a través del canal de comunicación que logra el control dinámico es $P_{ff} - P_s$. Cuando se inyecta un solo fluido a través del pozo de alivio y sale por el pozo descontrolado, con una presión en la cabeza de 0 lb/pg^2 de gas, la presión de inyección del pozo de alivio es equivalente a las pérdidas de presión por fricción.

$$P_{an} = \Delta P_{fb} + \Delta P_{fr} + \Delta P_{fc}$$

Suponiendo que la comunicación lograda es pésima, la presión de fondo del agujero del pozo descontrolado y del pozo de alivio, se consideran iguales a P_s y P_{ff} , respectivamente.

Entonces

$$\Delta P_{fb} = P_a - \Delta P_{hyd}$$

y

$$\Delta P_{fr} = P_{an} - P_{ff} + \Delta P_{hyd}$$

Entonces la máxima caída de presión permisible es

$$\Delta P_{fr_{max}} = P_{an-max} - P_{ff} + \Delta P_{hyd}$$

El pozo de alivio debe ser diseñado tal que

$$\Delta P_{fr} \leq \Delta P_{fr_{max}}$$

$$\frac{\Delta P_{fr}}{\Delta P_{fb}} \leq \frac{\Delta P_{fr_{max}}}{\Delta P_{fb}}$$

o,

$$\frac{\Delta P_{fr}}{\Delta P_{fb}} \leq \frac{P_{an-max} - P_{ff} + \Delta P_{hyd}}{P_a - \Delta P_{hyd}} \quad (3)$$

Como
$$\Delta P_f = \frac{11.41 fL \rho_f q^2}{d_e^5}$$

entonces
$$\Delta P_{fr} = 11.41 \left[\frac{fL}{d_e^5} \right]_r \rho_f q_r^2$$

Entonces (3) se convierte en

$$\frac{\left[\frac{fL}{d_e^5} \right]_r q_r^2}{\left[\frac{fL}{d_e^5} \right]_b q_b^2} \leq \frac{P_{an-max} - P_{ff} + \Delta P_{hyd}}{P_a - P_{hyd}}$$

o

$$\frac{\left[\frac{fL}{d_e^5} \right]_r q_r^2}{\left[\frac{fL}{d_e^5} \right]_b q_b^2} \leq k^2 \left[\frac{P_{an-max} - P_{ff} + \Delta P_{hyd}}{P_a - P_{hyd}} \right] \quad (4)$$

Donde $k = \frac{q_b}{q_r}$ = fracción del flujo que está entrando al pozo descontrolado y $1-k$ = filtrado, en fracción de q_r .

La ecuación (4) es la ecuación básica para diseñar el pozo de alivio. No se requieren cálculos precisos de los gastos. Los errores en las suposiciones del factor de rugosidad, propiedades de los fluidos, etc., se desprecian. Si un solo pozo de alivio no puede ser terminado con un diámetro equivalente (d_e) lo suficiente grande, entonces se requerirá de múltiples pozos de alivio. La ecuación (2) puede utilizarse para predecir el d_e efectivo para diferentes tamaños de pozos.

4. ESTIMACION DE LA POTENCIA HIDRAULICA REQUERIDA

Suponiendo que la presión de inyección en la cabeza del pozo de alivio es P_{an-max} entonces

$$\begin{aligned} HHP &= \frac{42 q_r P_{an-max}}{1714} \\ &= \frac{q_r P_{an-max}}{40.81} \end{aligned}$$

5. DERIVACION DE LA MAXIMA PRESION DE FONDO DEL AGUJERO PERMISIBLE PARA PREVENIR QUE LA SARTA DE PERFORACION SEA ARROJADA DEL POZO

Esta sección únicamente considera el arrojado de agujeros verticales. Una fuerza tendiente a arrojar la sarta de perforación, está compuesta por la fricción de arrastre y la fuerza hidráulica que actúa sobre las diferentes secciones transversales de la sarta. La fuerza hidráulica, algunas veces considerada como dos fuerzas (llamadas de flotación y de arrastre) es manejada, correctamente, como una fuerza resultante de la acción de la presión hidráulica sobre las secciones transversales de la sarta de perforación.

$$\text{Fuerza Hidráulica (FH)} = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) P_{FH} \quad (1)$$

Donde,

d_i = diámetro externo de la tubería de perforación

d_o = diámetro interno de la tubería de revestimiento o del agujero descubierto

La fricción de arrastre total puede calcularse determinando la caída de presión por fricción (ΔP_f) y aplicando este esfuerzo a la sección transversal del flujo (A_{an});

$$\text{Arrastre total} = \Delta P_f A_{an} \quad (2)$$

Esta fricción de arrastre total se aplica tanto a la superficie interior de la tubería de revestimiento como a la superficie exterior de la sarta de perforación. La relación (R) de la fricción de arrastre total que se aplica a la parte interna de la sarta, está determinada por la relación de los esfuerzos de corte;

$$\text{Arrastre sobre la sarta de perf. (Fds)} = R \Delta P_f \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{2 \ln \left[\frac{d_o}{d_i} \right]} - \frac{d_i^2}{(d_o^2 - d_i^2)} \quad (4)$$

El peso de la sarta de perforación (W_s) se opone a la fuerza de eyección, la cual, si es mayor que el peso de la tubería, la arrojará. Se utiliza el peso de la sarta en el aire (vacío) W_s , ya que la flotación está incluida en la fuerza hidráulica. Si la barrena está tapada y la tubería de perforación llena de lodo, se debe incluir el peso total de ambos (tubería y lodo) dentro del peso de la sarta de perforación. Si la barrena está tapada y la tubería vacía, únicamente se considera el peso del acero. Si la barrena no está tapada y el flujo asciende por la parte interna de la sarta de perforación, así como por su parte externa, también se debe considerar el arrastre sobre la parte interna.

$$\frac{\pi}{4} d_i^2 P_{MH} + \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) R \Delta P_f \leq W_s \quad (5)$$

ΔP_f puede calcularse de diferentes ecuaciones de flujo, pero ya que se está monitoreando y controlando la presión de fondo del agujero (P_{WH}) se pueden eliminar muchas de las inexactitudes potenciales de los cálculos de fricción, determinando ΔP_f como sigue:

$$\Delta P_f = P_{WH} - \Delta P_{hyd} \quad (6)$$

$$\frac{\pi}{4} d_1^2 P_{WH} + \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_1^2) R (P_{WH} - \Delta P_{hyd}) \leq W_s$$

$$P_{WH} \left[\frac{\pi}{4} d_1^2 + \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_1^2) R \right] \leq W_s + \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_1^2) R \Delta P_{hyd}$$

$$P_{WH} = \frac{W_s + \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_1^2) R \Delta P_{hyd}}{\frac{\pi}{4} d_1^2 + \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_1^2) R} \quad (7)$$

Donde

$$\Delta P_{hyd} = \frac{0.433}{8.3455} \rho_f TVD = \frac{\rho_f TVD}{19.27} \quad (8)$$

$$P_{WH} \leq \frac{W_s + A_{an} R \Delta P_{hyd}}{A_{dp} + A_{an} R} \quad (9)$$

B. PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LAS CAIDAS DE PRESION POR FRICCIÓN UTILIZANDO EL MODELO DE LA LEY DE FUERZAS

A. Lista de ecuaciones utilizadas para calcular ΔP_f

1. Flujo en la tubería

$$N_{Re} = \frac{1.86 (d_h / 12)^n V^{2-n} \rho_f}{8^n K_p}$$

$$f = \frac{16}{N_{Re}} \quad \text{en flujo laminar}$$

$$\Delta P_f = \frac{f L \rho_f V^2}{25.8 d}$$

Donde,

N_R = Numero de Reynolds para flujo en tubería

n = Índice de comportamiento de flujo

K_p = Índice de consistencia, flujo en tubería, $\text{lb}(\text{seg}^N)/\text{pie}^2$

2. Flujo en el espacio anular

$$N_{Ra} = \frac{2.70 (d_h/12)^n v^{2-n} \rho f}{12^n K_a}$$

$$f = \frac{24}{N_{Ra}} \quad \text{en flujo laminar}$$

$$\Delta P_f = \frac{f L \rho f v^2}{25.8 d_h}$$

Donde,

N_{Ra} = Numero de Reynolds, flujo en el espacio anular

K_a = Índice de consistencia equivalente, flujo anular

3. Estimación de n , K_a y K_p de las lecturas a 300 y 600 RPM del viscosímetro estándar Fann V-G

El valor de n se calcula mediante la gráfica D-1, o bien, con la siguiente ecuación:

$$n = 3.32 \log (600 / 300)$$

Los valores de K_a y K_p se calculan a partir del valor del índice de consistencia equivalente del viscosímetro rotacional (K_v), mediante la gráfica D-1. El valor de K_v se obtiene de la siguiente ecuación:

$$K_v = \frac{(0.01066)(6300)}{511^n}$$

4. Para estimar el factor de fricción (f), se calcula N_{Ra} y entonces, de la gráfica D-2, se estima el valor de f .

B. Ejemplo para calcular las pérdidas de presión por fricción del lodo intermedio de 14.5 lb/gal a través del espacio anular de 8.535" por 5".

Lecturas del viscosímetro Fann V-G @ 140 °F :

$$\theta 300 = 37.5$$

$$\theta 600 = 53$$

$$n = 3.32 \log \frac{53}{37.5}$$

$$= 0.5$$

$$K_v = \frac{(0.01066)(\theta 300)}{511^n}$$

$$= 0.01768$$

De la gráfica D-1, para $n = 0.5$

$$\frac{K_v}{K_p} = 0.9235 \quad \frac{K_p}{K_a} = 0.068$$

Por lo tanto,

$$K_p = 0.01914 \quad \text{y} \quad K_a = 0.01978$$

Suponiendo $L = 10,210$ pies y $q = 50$ BPM

$$N_{sa} = \frac{2.79 (dh / 12)^{0.5} v^{1.5} \rho}{12^{0.5} K_a}$$

$$v = \frac{17.16 q}{d_o^2 - d_i^2} = \frac{(17.16)(50)}{(8.535)^2 - (5)^2} = 17.93 \text{ pies/seg}$$

$$N_{sa} = \frac{(2.79) [(8.535 - 5) / 12]^{0.5} (17.93)^{1.5} (14.5)}{12^{0.5} (0.01978)}$$

$$= 24,329$$

De la gráfica D-2, para $N_{Re} = 24,392$ y $n = 0.5$

$$f \cong 0.0038$$

$$\begin{aligned}\Delta Pr &= \frac{fL \rho f v^2}{25.8 d_h} \\ &= \frac{(0.0038)(10,210)(14.5)(17.93)^2}{25.8 (8.535 - 5)} \\ &= 1,983 \text{ lb/pg}^2\end{aligned}$$

C. Cálculo de las pérdidas de presión por fricción del lodo de 16.5 lb/gal a través del espacio anular de 8 5/8" por 5".

Lecturas del viscosímetro Fann V-G :

$$\theta_{300} = 52$$

$$\theta_{600} = 84$$

$$n = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} = 3.32 \log \frac{84}{52} = 0.69$$

$$K_v = \frac{(0.01066) \theta_{300}}{511^n} = 0.0075$$

De la gráfica D-1, para $n = 0.69$

$$\frac{K_v}{K_p} = 0.9485 \quad \frac{K_p}{K_a} = 0.978$$

Por lo tanto,

$$K_p = 0.0079 \quad \text{y} \quad K_a = 0.0081$$

Suponiendo $L = 10,210$ pies y $q = 10$ BPM

$$V = \frac{(17.16)(10)}{(8.535)^2 - (5)^2} = 3.59 \text{ pies/seg}$$

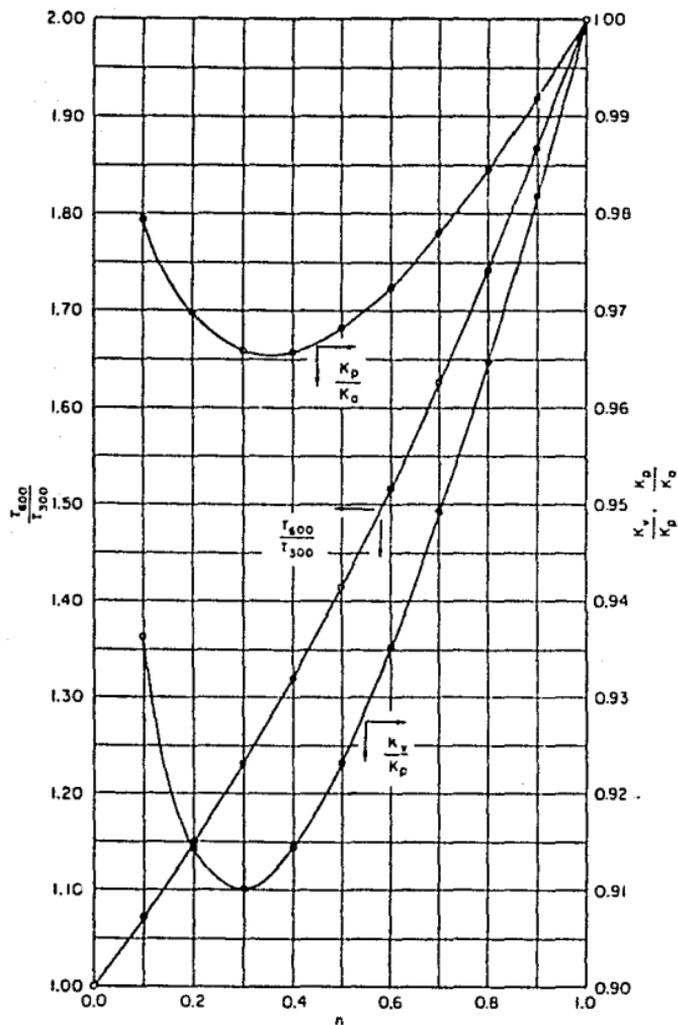
$$N_{Re} = \frac{(2.78)(8.535 - 5) / 12)^{0.45} (3.59)^{(2-0.45)} (16.5)}{(12)^{0.45} (0.0081)}$$

$$= 2,349$$

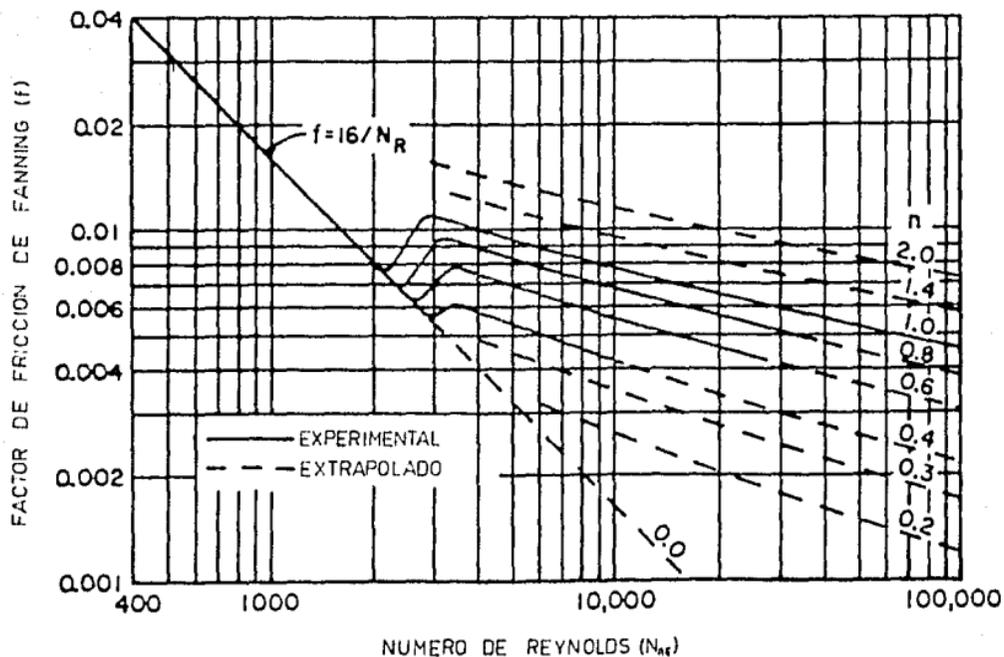
$$\therefore f = \frac{24}{N_{Re}} = 0.01$$

$$\Delta P_f = \frac{f L \rho_f V^2}{25.8 d_h} = \frac{(0.01)(10,210)(16.5)(3.59)^2}{(25.8)(8.535 - 5)}$$

$$= 238 \text{ lb/pg}^2$$



D-1 Diagrama de correlación para tubera, sección anular y datos del viscosímetro rotacional.



D-2 Factores de fricción para fluidos no-Newtonianos

NOMENCLATURA

| Símbolo | Significado | Unidades |
|------------------|---|-----------|
| A_{an} | Area del espacio anular | pg^2 |
| A_{dp} | Area del diámetro exterior de la sarta de perforación | pg^2 |
| D | Profundidad vertical verdadera (TVD) | pies |
| d_e | Diámetro equivalente | pg |
| d_h | Diámetro hidráulico | pg |
| f | Factor de fricción de Fanning | |
| ϕ_g | Fracción de gas | |
| h | Espesor neto de la formación | pies |
| k | Permeabilidad de la formación | Darcys |
| $1-k$ | Fracción de filtrado ($k = q_b/q_r$) | |
| L | Profundidad medida (MD) | pies |
| μ | Viscosidad del fluido | cp |
| P_{an} | Presión de inyección en el espacio anular del pozo de alivio | lb/pg^2 |
| P_{BH} | Presión de fondo del agujero (BHP) | lb/pg^2 |
| P_{ff} | Presión de fractura de la formación | lb/pg^2 |
| P_{hyd} | Presión hidrostática ejercida por el lodo inicial | lb/pg^2 |
| P_e | Presión estática de la formación | lb/pg^2 |
| P_{tbg} | Presión en el tubing del pozo de alivio | lb/pg^2 |
| P_{WH} | Presión en la cabeza del pozo (WHP) | lb/pg^2 |
| ΔP | Pérdidas de presión | lb/pg^2 |
| ΔP_f | Pérdidas de presión por fricción | lb/pg^2 |
| ΔP_{fb} | Pérdidas de presión por fricción en el pozo descontrolado ($P_e - \Delta P_{hyd}$) | lb/pg^2 |
| ΔP_{fc} | Pérdidas de presión por fricción en el canal de comunicación entre los pozos | lb/pg^2 |
| ΔP_{fr} | Pérdidas de presión por fricción en el pozo de alivio [$P_{an} - (P_{ff} - P_{hyd})$] | lb/pg^2 |
| ΔP_{hyd} | Componente de la BHP debida al peso hidrostático del fluido | lb/pg^2 |

| Símbolo | Significado | Unidades |
|----------|---|----------|
| R | Relación de fricción por arrastre sobre la sarta de perforación y la fricción total | |
| r_e | Radio de drene del pozo | pies |
| r_w | Radio del pozo | pies |
| ρ_1 | Densidad inicial del lodo | lb/gal |
| ρ_2 | Densidad de salida del lodo | lb/gal |
| ρ_f | densidad del fluido | lb/gal |
| q | Gasto | BPM |
| q_b | Gasto de control del flujo del pozo descontrolado | BPM |
| q_r | Gasto de inyección en el pozo de alivio | BPM |
| W_s | Peso de la sarta de perforación en el aire | lbs |

SUBINDICES

| | |
|---|-----------------------|
| b | Pozo descontrolado |
| c | Canal de comunicación |
| f | Fluido |
| r | Pozo de alivio |
| g | Gas |

BIBLIOGRAFIA

- Neal Adams, Well Control Problems and solutions, Prentice and Records Enterprise, Inc., Petroleum Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1980.
- Héctor E. Palma y Angel Montero, Tesis Profesional: Control de Brotes en Equipo de Perforación Flotantes, IPN, México, D.F., 1985.
- Gerencia de Perforación, Procedimiento y Normas Operativas para la prevención, Detección y Control de Brotes, PEMEX, México, D.F., 1990.
- Jose M. Gutiérrez, Control de Brotes en perforación: Fundamentos de Control de Brotes I, IMP, México, D.F., 1990.
- Luis González, Tesis Profesional: Descontrol y Control de Pozos Petroleros en el Area de Cd. Pemex, Tabasco, UNAM, México, D.F., 1989.
- Moore & Abel, Inc., Advanced Well Control.
- Joe Bowden's Wild Well Control, Inc., Pemex Well Control Team.
- Benito Sastré, Apuntes personales sobre el Control de un Pozo Mediante la Instalación del Equipo Superficial de Control.
- Larry H. Flak and W. C. Goins, Jr., New Relief Well Technology is Improving Blowout Control, World Oil, Diciembre de 1983.

- E. M. Blount and E. Soelimah, Dynamic Kill:
Controlling Wild Wells a New Way,
World Oil, Octobre de 1981.