

29.2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



PROYECTO DE UN POZO ECUELA PARA LA GENERACION Y EL CONTROL DE BROTES

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
JUAN ELISEO ALVAREZ ORTIZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

Página N°

INTRODUCCION	
I CONCEPTOS GENERALES	2
I.1 Presión	2
I.2 Presión Hidrostática	2
I.3 Gradiente de Presión Hidrostática	2
I.4 Presión de Formación	2
I.5 Presión Normal	2
I.6 Presión Anormal	2
I.7 Pérdida de Circulación	2
I.8 Densidad Equivalente	3
I.9 Brote	3
I.10 Reventón	3
II DISEÑO DEL POZO ESCUELA	4
III DESCRIPCIÓN DE COMO SE REPRODUCIRAN EN EL POZO ESCUELA LAS CON- DICIONES PRESENTES DURANTE EL DESARROLLO DE UN BROTE	16
III.1 Entrada a una formación sobrepresionada al estar per- forando	16
III.2 Peso insuficiente del fluido de perforación	21
III.3 Pérdida de Circulación - Fractura de la Zapata	23
III.3.1 Pérdida de circulación por manejo de fluidos pesados	26
III.3.2 Pérdida de circulación durante la introducción de tuberías	28
III.3.3 Pérdida de circulación por manejo inadecuado en un brote	30
III.4 Falta de llenado del pozo al estar sacando tuberías	35
III.5 Efecto de succión al sacar rápidamente la sarta de per- foración	35
IV EQUIPO PARA GENERAR BROTES	39
IV.1 Características del conjunto vaporizador-bomba criogénica.	45
IV.2 Capacidad del tanque de almacenamiento de nitrógeno li- quido	46

	Página N°
IV.3 Tubercia de Inyección	47
IV.4 Válvula de Contrapresión	48
IV.4.1 Principios de Operación	50
IV.4.2 Especificaciones de la Válvula de Inyección	53
IV.5 Condiciones de Presión en el Sistema de Inyección de Nitrógeno Antes, Durante y Después de la Generación de un Brote	53
IV.5.1 Condiciones Iniciales Antes de Generar un Brote	53
IV.5.2 Condiciones Durante la Generación de un Brote	53
IV.5.3 Condiciones de Presión Durante y Después del Control del Brote	55
IV.6 Sistema de Registro de la Presión de Fondo	56
V EQUIPO SUPERFICIAL DE CONTROL DEL POZO MODELO	63
V.1 Conjunto de Preventores	63
V.2 Línea de Matar y Estrangular	66
V.3 Línea de Llenar	66
V.4 Múltiple de Estrangulación	66
V.5 Cabezal del Pozo y Carrete de Inyección y Registro	69
V.6 Cabezal del Pozo	69
V.7 Colgador del Aparejo de Trabajo	73
V.8 Carrete de Inyección y Registro	73
VI DISTRIBUCION SUPERFICIAL DEL POZO ESCUELA	86
VI.1 Tanque de Viajes del Pozo Escuela	86
VII CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFIA	94
APENDICE A	97
APENDICE B	103
APENDICE C	105

INTRODUCCION

Con el incremento en la demanda de hidrocarburos a nivel mundial, es necesario incrementar la exploración de nuevos yacimientos, encontrándose éstos a mayores profundidades con respecto a los existentes, y con ello la posibilidad de riesgo en el descontrol de los pozos.

La industria petrolera ha planteado la necesidad de capacitar a su personal en la detección y control de brotes, lo que a la larga le redituara beneficios en el aspecto económico y de seguridad.

Para cubrir la necesidad anterior, se requiere la construcción de un pozo escuela, donde se llevará a cabo la simulación de los brotes en forma artificial, sin representar el riesgo de un verdadero.

La construcción del pozo escuela requiere del diseño y construcción de partes especiales para la integración de los principales elementos del pozo.

Detallando características y forma de operar dichos elementos. Y así el objetivo de capacitar al personal involucrado en las operaciones ya referidas, reducirán la posibilidad de problemas futuros de riesgos incalculables.

CAPITULO I

CONCEPTOS GENERALES

Antes de intentar realizar cualquier operacion de control de pozos, es conveniente revisar algunos conceptos de presiones estáticas. En este capítulo se darán los conceptos más importantes de las presiones estáticas.

PRESTION: Es una fuerza aplicada por unidad de área. Las unidades más comunes son: kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) y libras por pulgada cuadrada (lb/pg^2), (psi)

PRESTION HIDROSTATICA: Es la presión ejercida por el peso de una columna de fluido, siendo una consecuencia de la altura y de la densidad del fluido sus unidades (Kg/cm^2) y (lb/pg^2).

GRADIENTE DE PRESTION HIDROSTATICA: Es la variación de la presión generada por una columna de fluido por cada unidad de profundidad vertical. Las unidades más comunes son: kilogramo por centímetro cuadrado por metro ($\text{Kg}/\text{cm}^2/\text{m}$) y libras por pulgada cuadrada por pie ($\text{lb}/\text{pg}^2/\text{pie}$).

PRESTION DE FORMACION: Es la presión a que se encuentran sometidos los fluidos que están en los espacios porosos de las rocas.

PRESTION NORMAL: Es la presión ejercida por una columna de agua cuya densidad promedio es $1.07 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y una salinidad de 80000 ppm para áreas costeras y de $1.02 \text{ gr}/\text{cm}^3$ para áreas continentales.

PRESTION ANORMAL: Es toda presión diferente a la normal.

PERDIDA DE CIRCULACION: Es la pérdida de fluido hacia la formación.

DENSIDAD EQUIVALENTE: Es la densidad que se requiere para crear una presión hidrostática igual a la presión total.

BROTE: Es la invasión de fluidos extraños de la formación hacia el interior del pozo, en una forma controlada.

REVENTON: Es el flujo incontrolado de los fluidos de la formación hacia afuera del pozo, o sea, es un brote sin control.

CAPITULO II

DISEÑO DEL POZO ESCUELA

En el mundo actual, los energéticos juegan un papel muy importante para el desarrollo económico. Esto ha originado que los hidrocarburos sean buscados a mayores profundidades, hecho que ha provocado de alguna manera avances, hasta cierto punto acelerados, en el desarrollo de tecnología para la perforación de pozos.

La perforación es una operación que representa muchos riesgos que pueden ser calificados de alta peligrosidad; dentro de ellos, la ocurrencia de brotes y reventones son los que mayores consecuencias traen consigo; prueba de ello, son algunos ocurridos en México tales como IXTOC I, GIRALDAS 22 y XICALANGO 1-B, NISPERO 90.

De los estudios elaborados, se encontró que la incidencia mas frecuente de errores durante las operaciones de control de brotes son las siguientes:

No detectar a tiempo la presencia de un brote.

Cerrar una válvula equivocada.

No cerrar una válvula.

Intentar cortar los lastrabarreras con los arietes de corte para tubería.

Cerrar el preventor para tubería alrededor de los lastrabarreras.

Sacar tubería con el pozo fluyendo.

Intentar matar el pozo con la tubería lejos del fondo.

Operar inadecuadamente los preventores.

Por esto, es necesario que el personal en estas labores reciba un entrenamien-

to, para capacitarlo tanto en la detección como en el control de brotes o reventones y de esta manera poder reducir la incidencia de estos percances.

Precisamente, el objetivo del presente trabajo está enfocado al diseño de un pozo escuela, que reproduzca en su totalidad las condiciones reales de operación que se tienen en un pozo durante el control de un brote con el fin de entrenar al personal que labora en los equipos de perforación o de reparación de pozos.

Estas condiciones fueron las siguientes:

1. Reproducir la entrada de un fluido invasor hacia el pozo lo cual simula una formación cuya presión es mayor a la ejercida por la columna hidrostática del pozo.
2. Permitir el manejo de tuberías de perforación dentro del pozo.
3. Reproducir pérdidas de circulación.
4. Simular un pozo con tubería cementada, agujero descubierto y poder reproducir la fractura de la zapata.
5. Permitir la aplicación de cualquiera de las técnicas existentes para el control de un brote.
6. Emplear el equipo convencional de control y medición como el utilizado en los equipos de perforación y reparación de pozos.
7. Manejar fluidos no corrosivos y con una densidad máxima de 1.4 gr/cm^3 , 11.67 (lb/gal).
8. No representar durante la ocurrencia del brote artificial, el peligro real de un brote verdadero.
9. Obtener en todo momento un registro continuo de la presión de fondo.

Con objeto de tener las ideas básicas para el diseño del pozo, se recopiló y estudió la información disponible acerca de pozos escuela ya existentes en diferentes partes del mundo tales como Estados Unidos, Italia y Holanda.

La idea principal que se trató de establecer fue el diseño de la parte medular del pozo la cual consistió en:

- a) La forma en que se simularía el brote y la ruptura de la formación.
- b) La distribución de tuberías para lograr el objetivo del inciso (a).

Para realizar la construcción del pozo escuela se plantearon 2 alternativas:

1. La utilización de un pozo taponado ya sea por improductivo o bien por un accidente mecánico, de estos se analizaron los pozos Villahermosa-3A, Villahermosa-3, Tabasco-1 y Tierra Amarilla-1.
2. La perforación de un pozo expreso para el pozo escuela.

De las dos alternativas posibles, la primera era la que presentaba un menor gasto económico por esto fue la que se analizó en primer lugar. De los resultados que se obtuvieron del estudio de esta alternativa se encontró que las tuberías de revestimiento presentaban un desgaste de paredes por efecto de la rotación de la T.P. y por lo tanto no ofrecían las condiciones de seguridad requeridas para trabajar con presiones, razón por la cual se desechó esta posibilidad quedando como única solución realizar la segunda alternativa.

Para llevar a cabo la construcción del pozo, se elaboraron varios diseños posibles, cada uno de ellos fue analizado detenidamente señalando sus ventajas y desventajas. Así fue como a partir de dicho análisis se configuró el diseño definitivo, que a continuación se describe. Fig.1.

a) Un aparejo de trabajo constituido por:

- a.1) Una tubería de revestimiento (para simular, valga la redundancia, la

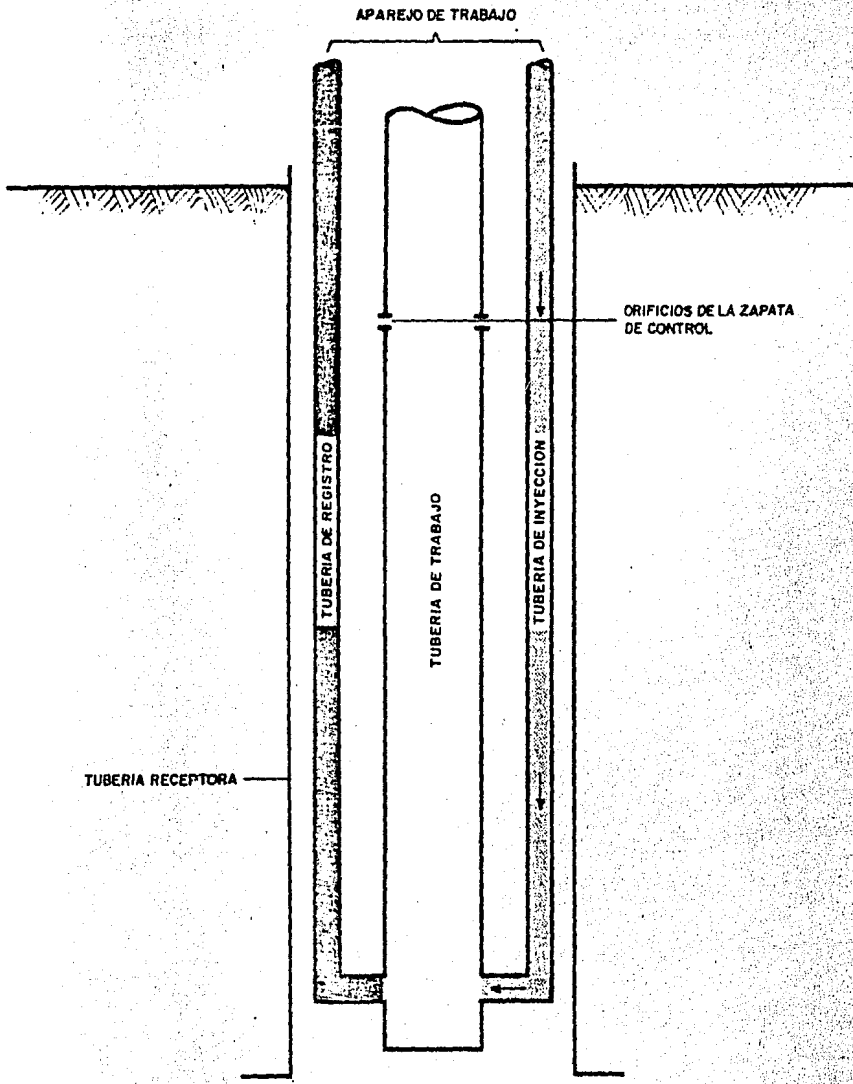


FIG. I ESQUEMA GENERAL DEL POZO ESCUELA PARA CONTROL DE BROTES

tubería de revestimiento y el agujero descubierto del pozo, o sea el interior del pozo) que se denominó por comodidad, tubería de trabajo.

- a. 2) Una tubería de producción (denominada tubería de inyección, conectada en el extremo inferior de la tubería de trabajo, para permitir la inyección de gas nitrógeno) y simular el flujo de gas de una forma ción hacia el pozo.
 - a. 3) Una tubería de producción (denominada tubería de registro) también conectada al extremo inferior de la tubería de trabajo, para permitir el paso de un registrador continuo de la presión de fondo del pozo.
 - a. 4) Unos orificios a cierta profundidad en la periferia de la tubería de trabajo, para simular la zapata del pozo escuela y que reciben el nombre de zapata de control.
- b) Una tubería de revestimiento con capacidad para albergar el aparejo de trabajo y utilizar el espacio anular entre ambos para simular la ruptura de la zapata y la pérdida de circulación en el pozo. A esta tubería se le denominó tubería receptora. Ver Tabla 1.

Es preciso mencionar que para poder operar y colgar el aparejo de trabajo, se requiere de la construcción de un cabezal especial, que se adapte a la configuración del pozo escuela.

Posteriormente se procedió a un segundo análisis de la construcción y operación de los elementos que integran el pozo escuela, para lo cual se consideraron las siguientes condiciones:

1. Posibles presiones máximas generadas en el sistema durante el desarrollo y control de un brote (Ver Anexo A).
2. Caídas de presión por circulación de fluidos en el sistema. (Ver Anexo B).
3. Capacidad de los espacios anulares para simular las pérdidas de circulación. (Ver Anexo C)

	DIAMETRO (Pg.)	PROFUNDIDAD (m.)	
TUBERIA RECEPTORA	16*	1530	
TUBERIA DE TRABAJO	7 5/8**	1500	APAREJO DE TRABAJO
TUBERIA DE INYECCION	2 3/8	1500	
TUBERIA DE REGISTRO	2 3/8	1500	
TUBERIA DE PERFORACION	3 1/2		SARTA DE PERFORACION
LASTRABARRENAS	5 X 2 1/2		
BARRENA	6 1/2		

* T.N. NO API DE 109 lb/pie, N-80
 ** EXT./LINE.

TABLA I. ARREGLO DE TUBERIAS DEL POZO ESCUELA

4. Profundidad necesaria para reproducir adecuadamente el desarrollo y control de un brote.
5. Capacidad de manejo de tubería y herramienta en la tubería de trabajo.
6. Facilidad en la reparación y el mantenimiento del sistema.
7. Tuberías disponibles en el mercado nacional.

Como resultado del análisis y los elementos que integran el proyecto del pozo escuela, así como las operaciones de los mismos se realizó el diseño definitivo del pozo, como se muestra en la Fig. 2 y 2'; y sus características más relevantes son:

1. El aparejo de trabajo es totalmente recuperable.
2. La profundidad total de trabajo es de 1 500m.
3. Tiene una resistencia superior a las condiciones de máxima presión.
4. Permite el manejo de una sarta completa con tubería de perforación de 3½ pulg. y lastrabarrenas de 5 pulg.
5. Las caldas de presión por circulación a un gasto reducido, son las adecuadas para el control de un brote.

Las especificaciones de las tuberías que conforman el diseño y que se calcularon en base a las condiciones de máxima presión a que serán sometidas, se muestran en la tabla 2.

Después de haber definido el arreglo y las características de las tuberías que conformarían el aparejo de trabajo del pozo escuela, se empezó a trabajar sobre la manera en como se unirían las tuberías de inyección y registro con la tubería de trabajo, para ello se tomó en consideración el caso en el cual coincidieran en un mismo plano todos los coples de las tres tuberías y así da

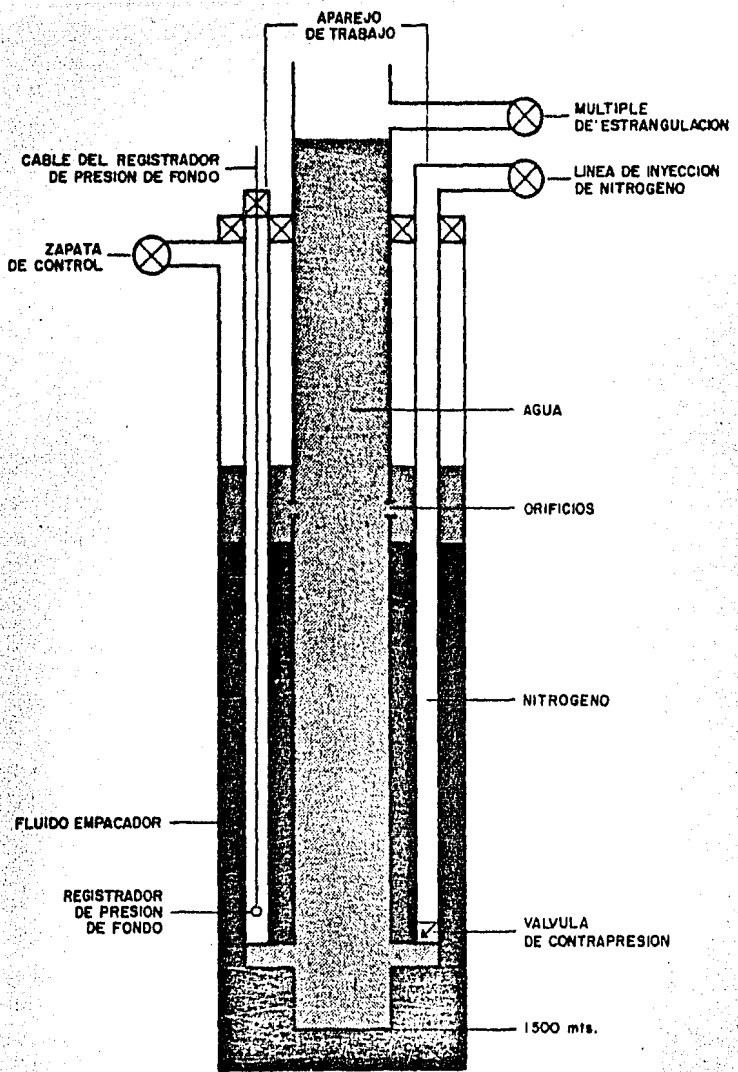


FIG.2 POZO ESCUELA

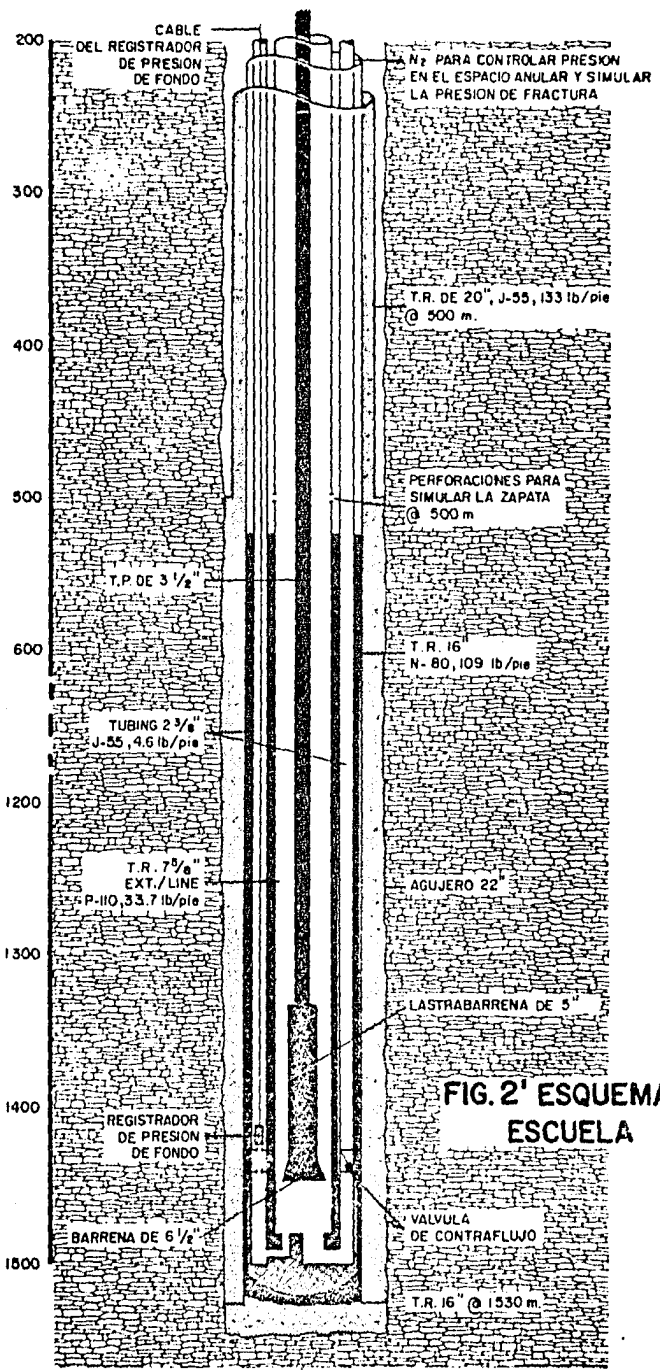


FIG. 2' ESQUEMA DEL POZO ESCUELA

DIAM. DE LA TUBERIA (pg)	CLASIFICACION	GRADO	PESO (Kg./m.) lb/pls	DI (pg.)	DRIFT (pg.)	Dc (pg.)	PROFUNDIDAD (m)	R. AL COLAPSO (Kg./cm. ²) (lb/pg ²)	R. A LA P. INT. (Kg./cm. ²) (lb/pg ²)
30	T.R. CONDUCTORA						50		
20	T.R. INTERMEDIA	J-55	198.1 133	18.730	18.542	21.00	500	105 1500	215 3060
16	T.R. RECEPTORA	N-80	162.3 109	14.688	14.500	17.00	1530	217 3080	404 5740
7 5/8	T.R. DE TRABAJO	P-110	50.2 33.7	6.765	6.640	8.5 ** 8.010 *	1500	553 7850	765 10860
2 3/8	T.P. DE INYECCION	J-55	6.85 4.6	1.995	1.901	2.875	1500	570 8100	542 7700
2 3/8	T.P. DE REGISTRO	J-55	6.85 4.6	1.995	1.901	2.875	1500	570 8100	542 7700
3 1/2	TUBERIA DE PERFORACION	E	14.15 9.5	2.992		5-1F		707 10040	670 9520
5	LASTRABARRENAS		74.5 50	2.5		5			

DI - DIAMETRO INTERIOR
Dc - DIAMETRO DEL COPLÉ O JUNTA

* EXTREME LINE
** COPLÉ NORMAL

TABLA 2. ESPECIFICACIONES Y CAPACIDADES DE LAS TUBERIAS DEL POZO ESCUELA

rlan el máximo diámetro para comparar el diámetro interior de la tubería de 16 pulg. Para esto, se pensó en una "zapata" de unión en la que se pudieran roscar tanto las tuberías de trabajo como las de inyección y registro, para hacer factible la intercomunicación de estas tuberías, y así poder lograr la inyección de nitrógeno y el registro continuo de la presión de fondo.

Se tomó en consideración lo descrito en cuanto a los coples de las tuberías en un mismo plano, se tomó como base para el cálculo del diámetro mínimo necesario de la zapata de unión para asegurar los espesores necesarios para ma-
quinar las roscas de conexión de cada una de las tuberías. El diámetro de la zapata de unión es de 14 pulg. por tanto, puede pasar por el interior de la tubería receptora que tiene un drift de 14.5 pulg. y un diámetro interior de 14.688 pulg. En la figura 3 y 3-A se puede ver un corte de planta y longitudi-
nal de esta zapata en el interior de la tubería receptora.

La rosca maquinada en la zapata de unión, para lograr la conexión entre ésta y la tubería de trabajo, soportará el peso de las tuberías de inyección y registro, que es de aproximadamente 20.5 ton. (45264 libras, sin considerar efectos de flotación), equivalente a 410m de tubería de trabajo de 7 5/8 pulg.

La zapata de unión se fabricará con acero AISI-8630, cuya resistencia promedio a la tensión es de 120 000 lb/pulg², que es mayor a la resistencia de la tubería de trabajo P-110, que es de 110 000 lb/pg². Las roscas se maquinarán respetando las normas API, de tal manera que la conexión del aparato de trabajo será totalmente segura, si se toma en cuenta que la junta de la tubería de trabajo P-110 de 7 5/8 pulg. resiste una tensión máxima de 454 toneladas - - - (1 000 000 lb) y sólo estará soportando una carga de 20.5 ton. * como se señala anteriormente.

* Esta carga sólo será soportada por la conexión mientras se mete el aparato dentro de la tubería receptora. Una vez colgado el aparato en su cabezal, esta carga desaparecerá.

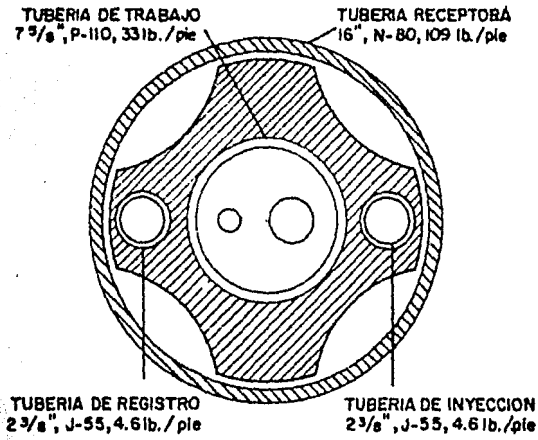


FIG. 3 CORTE EN PLANTA DE LA ZAPATA
DE UNION
(DISEÑO INICIAL)

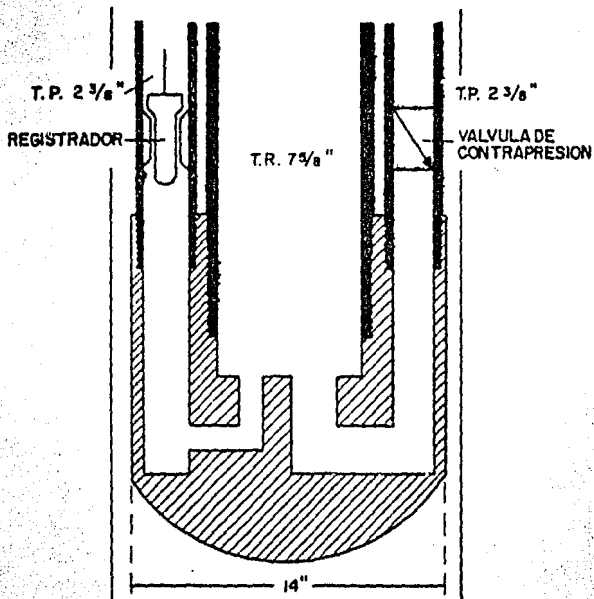


FIG. 3-A DETALLE DE LA ZAPATA DE UNION
(DISEÑO INICIAL)

CAPITULO III

DESCRIPCION DE COMO SE REPRODUCIRAN EN EL POZO ESCUELA LAS CONDICIONES PRESENTES DURANTE EL DESARROLLO DE UN BROTE

El arreglo de las tuberías en el pozo escuela (figura 2), está diseñado para reproducir las condiciones que se presentan antes, durante y después de la -
ocurrencia de un brote.

Las causas que se presentan antes de la ocurrencia de un brote son las siguientes:

1. Entrada a una formación sobrepresionada al estar perforando.
2. Peso insuficiente del fluido de perforación.
3. Pérdida de circulación.
4. Falta de llenado del pozo al estar sacando tubería.
5. Efecto de succión al sacar rápidamente la tubería de perforación.

La reproducción de estas condiciones se logrará mediante la combinación de -
las diferentes funciones de los elementos que constituyen la parte medular
del diseño (figura 4), a continuación se describe el procedimiento general
de como se reproducirán dichas condiciones.

1. Entrada a una formación sobrepresionada al estar perforando. Se reproducirá
a través de la tubería de inyección de nitrógeno, que al estar conectada al
extremo inferior con la zapata y junto con la tubería de trabajo, permitirá
simular la presencia de una formación permeable que contiene gas a una pre-

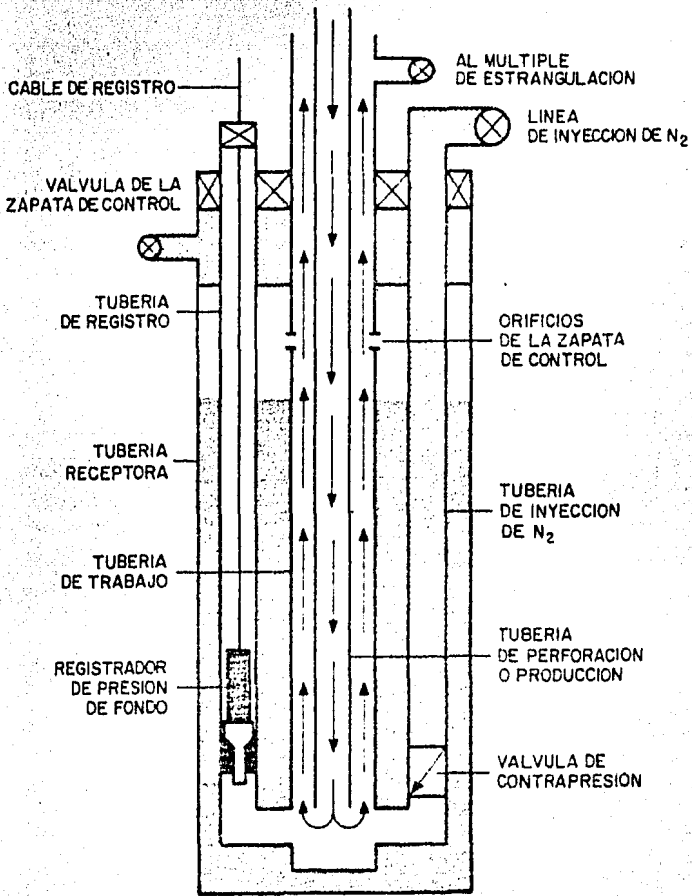


FIG. 4 PRINCIPALES ELEMENTOS DEL POZO ESCUELA

sión mayor a la ejercida por la columna de fluido de perforación.

Luego, la "presión de formación" será directamente proporcional a la presión con que se haga fluir el nitrógeno al interior del pozo a través de la tubería de inyección. De esta manera, la "presión de formación" en el pozo escue la podrá ser controlada desde la superficie, así como el volumen de gas que entra al pozo en un intervalo de tiempo dado.

La secuencia de la Fig. 5, muestra el desarrollo de un brote provocado artificialmente. En el diagrama A se muestra al pozo en condiciones normales, es decir, circulando con la sarta de perforación en el fondo. Las válvulas superficiales de la línea de inyección de nitrógeno, de la zapata de control de la línea que va al múltiple de estrangulación se mantienen cerradas. Fig. 5B. Para simular la entrada a una formación sobrepresionada la válvula superficial de la línea de inyección de nitrógeno, incrementa la presión hasta alcanzar una presión mayor a la del fondo. De tal manera que, cuando la presión de formación es mayor a la hidrostática, la válvula de contrapresión abre, estableciéndose el flujo de gas lo cual da origen a la ocurrencia del brote. El flujo de nitrógeno se mantiene hasta que se cierran los preventores. Fig. 5C y la válvula de contrapresión cierra y se corta el flujo, al igualarse la presión hidrostática con la de inyección del nitrógeno o sea, se igualan la presión en el fondo del pozo con la presión de formación.

Los diagramas D, E y F de la Fig. 5, muestran la circulación de un brote de gas hasta la superficie en la cual se mantiene la presión de fondo constante y se permite la expansión del gas. Luego, los diagramas G, H, I, J y K muestran la operación final con el lodo de control para "matar" el pozo.

Durante las operaciones de control del brote, la válvula superficial de la línea de inyección de nitrógeno, se mantendrá abierta para que el flujo de gas hacia el interior del pozo quede únicamente controlado, por la diferencial de presión en la válvula de la tubería de inyección. De tal manera que, si la presión en el fondo del pozo durante el control, llega a ser menor a la presión en la línea de inyección, dicha válvula abrirá y permitirá el paso de más gas al interior del pozo, reproduciéndose así el comportamiento de una forma-

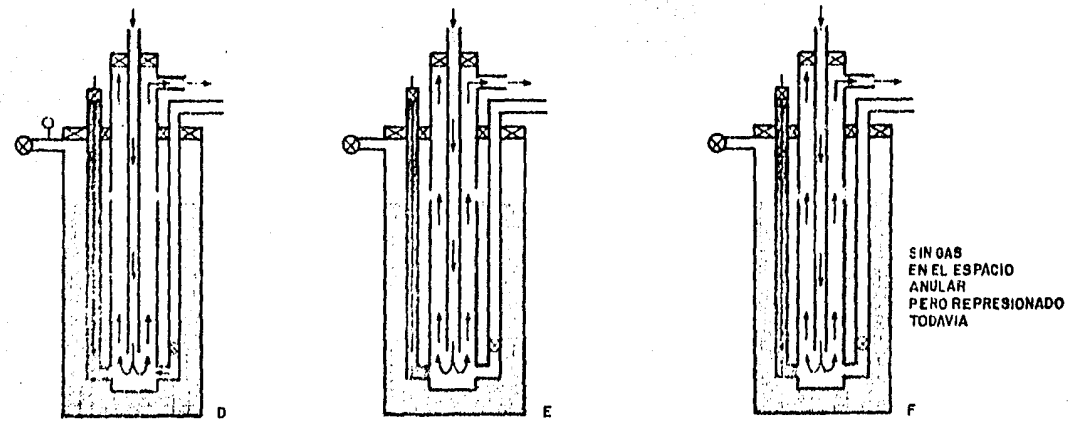
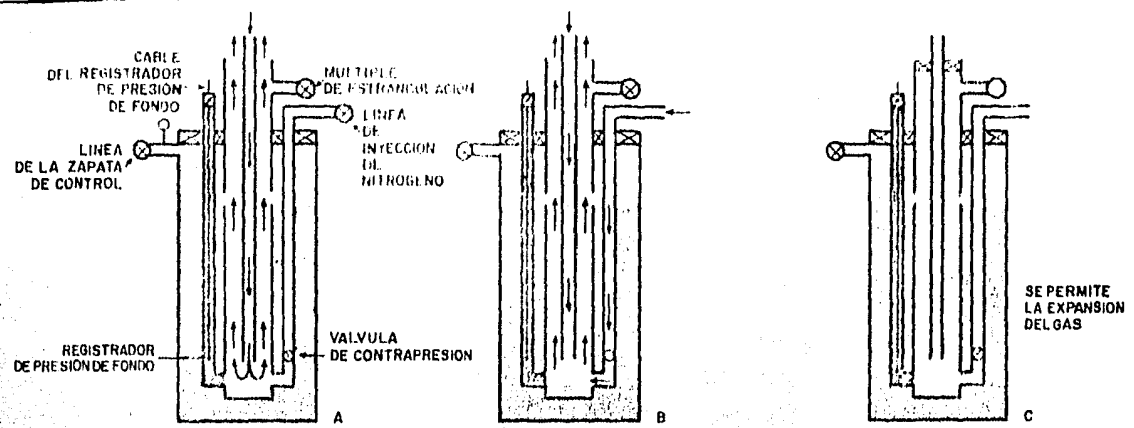


FIG. 5 DESARROLLO Y CONTROL DE UN BROTE

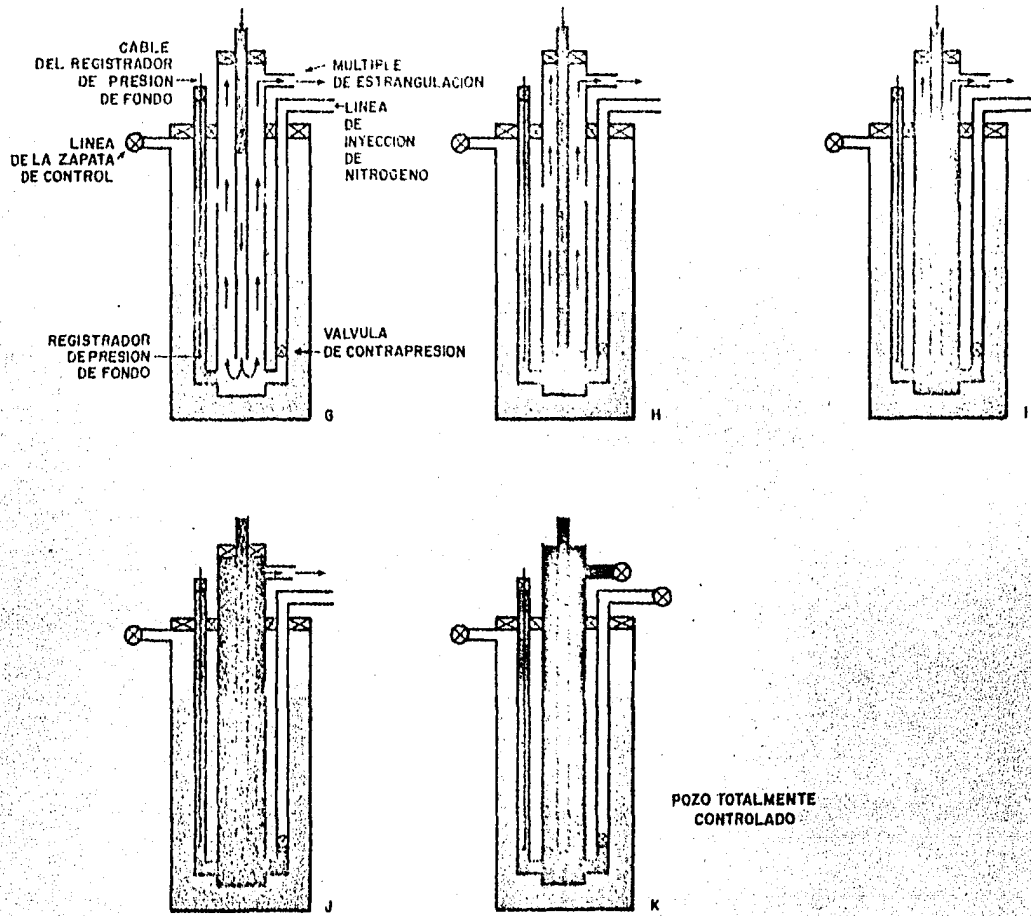


FIG. 5 CONTINUACION

ción.

En la secuencia de la Fig. 5, se supone que la presión de fondo después del brote se mantiene constante y mayor a la presión de formación, por lo que no hay una entrada de gas posterior al brote inicial y también, que durante el control nunca se alcanza una presión igual o mayor a la de fractura, por lo que la válvula de la línea de la zapata de control permanece cerrada.

Por otra parte, el registrador que se ilustra dentro de la llamada tubería de registro en todos los diagramas de la Fig. 5 envía una señal continua de la presión en el fondo del pozo, lo cual permite evaluar el comportamiento de la presión en el sistema, de acuerdo al manejo de los estranguladores en la superficie o al movimiento de la sarta de perforación.

2. Peso insuficiente del fluido de perforación. Se presenta cuando en el pozo se manejan fluidos cuyo gradiente de presión es menor al gradiente de presión de la formación expuesta.

En el pozo escuela, esta condición se reproducirá en la Fig. 6. El sistema está en equilibrio. La presión hidrostática es igual o ligeramente mayor a la presión de nitrógeno frente a la válvula de contrapresión, por lo que esta se mantiene cerrada. Con esto se simula la condición en la que el gradiente de presión del fluido es igual o ligeramente mayor al gradiente de presión de la formación. Fig. 6 B. Por alguna razón, se bombea fluido cuyo peso es menor al del fluido que originalmente llenaba el pozo. La válvula de contrapresión permanece cerrada. No hay flujo de gas. Fig. 6 C. El fluido de menor peso empieza a circular hacia el espacio anular y la presión hidrostática en el fondo del pozo disminuye paulatinamente.

El gradiente de presión de los fluidos que están en el espacio anular, se hace menor, al gradiente de presión de formación, por lo tanto, la presión en el fondo del pozo es menor a la presión del nitrógeno en la tubería de inyección y la válvula de contrapresión abre, Fig. 6D.

Se establece flujo de gas hacia el pozo iniciándose así el brote, Fig. 6 E. El gas en el fondo del pozo y la pérdida de fluidos en la superficie por empuje del brote, hacen que disminuya aún más la presión de fondo.

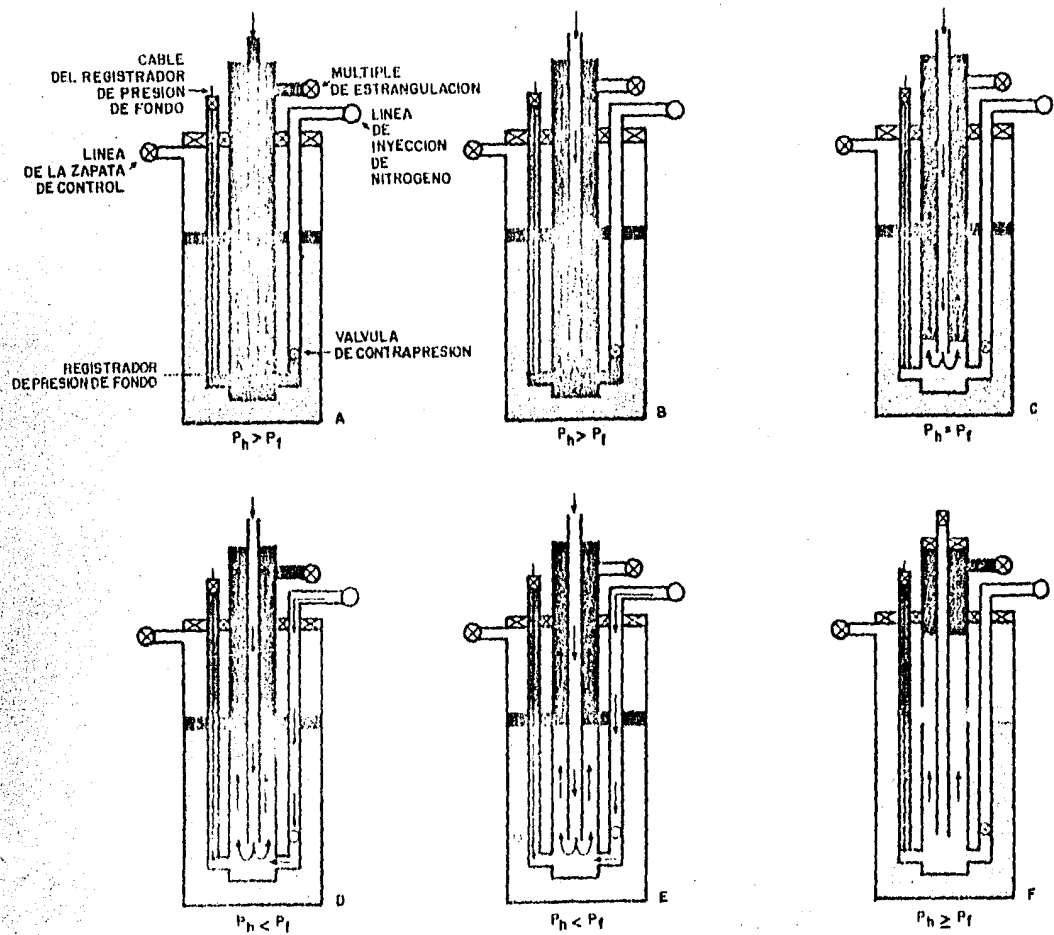


FIG. 6 BROTE PROVOCADO POR FALTA DE PESO DEL FLUIDO DE PERFORACION

La válvula de contrapresión continúa abierta. La diferencial de presión se incrementa y el flujo de gas aumenta, Fig. 6F. El pozo se cierra y la presión de fondo se iguala con la presión de inyección de nitrógeno, igual a la presión de formación la válvula de contrapresión cierra y suspende la entrada de gas. El gas que entró en el espacio anular tiende a viajar a la superficie por segregación gravitacional y a incrementar la presión de fondo. De esta manera, se tiene ya un brote, provocado por falta de peso del fluido de perforación.

3. Pérdida de circulación - fractura de la zapata.

Los brotes o reventones que tienen como antecedente una pérdida de circulación, son comunes. Para poder reproducir en el pozo escuela una condición de pérdida de circulación, se utilizará el espacio anular entre la tubería receptora y el aparejo de trabajo, y 4 orificios de 1 pulgada de diámetro en la tubería de trabajo a 500 metros de profundidad, los orificios permitirán simular la zapata del pozo, que generalmente es la zona más débil en cuanto a presión de fractura. La Fig. 7 muestra la analogía entre la zapata de un pozo verdadero y la zapata del pozo escuela.

Los orificios en la tubería comunican con el espacio anular que hay entre la tubería receptora y el aparejo de trabajo, el cual se mantendrá lleno hasta por debajo de los orificios (990 m aprox) con un fluido empacador altamente viscoso, no corrosivo, estable y con una densidad de 1.4 gr/cc. Por encima del fluido empacador y frente a los orificios se mantendrá en el espacio anular un bache de agua de aproximadamente 20m de longitud y una cámara de nitrógeno de 490 m, como se puede ver en la Fig. 8.

El sistema de la zapata de control funciona de la siguiente manera:

Cuando se esté circulando normalmente a través de la tubería de perforación y el espacio anular entre esta última y la tubería de trabajo, la válvula de la línea de la zapata de control se mantendrá cerrada, no habrá flujo hacia el espacio anular de la tubería receptora, el cual estará represionado y lleno con nitrógeno en su parte superior como se muestra en la Fig. 8.

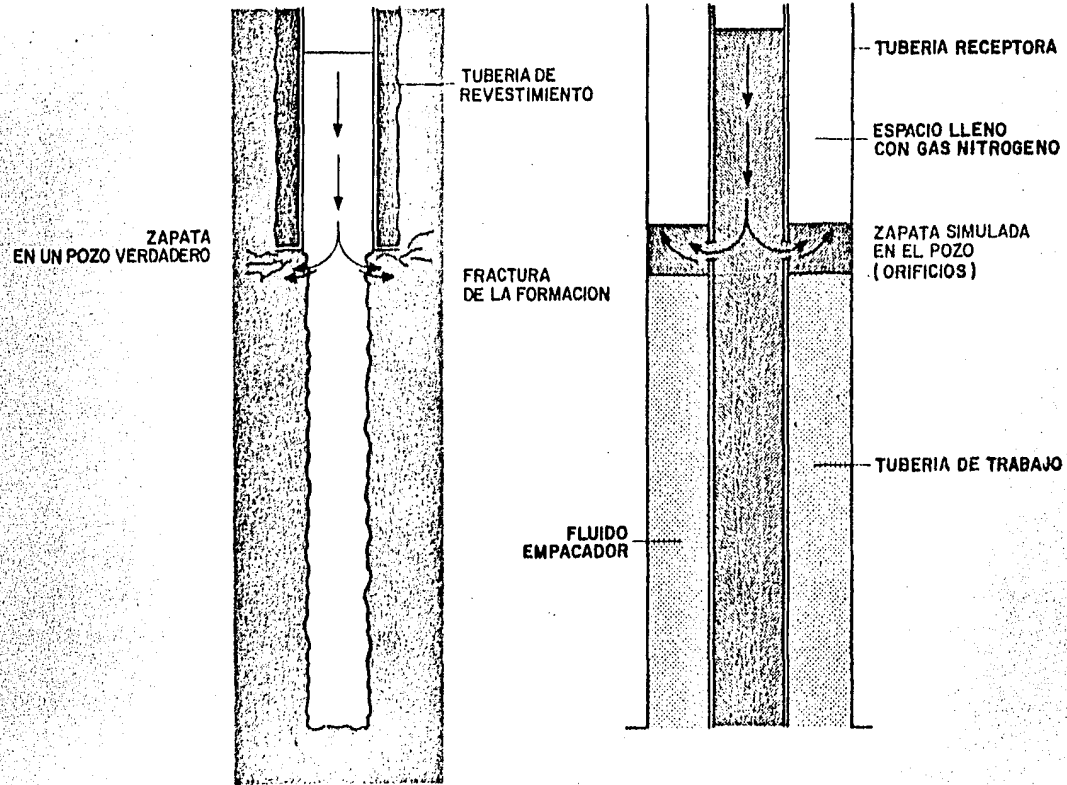


FIG. 7 ANALOGIA ENTRE LA ZAPATA DE UN POZO REAL Y LA DEL POZO ESCUELA

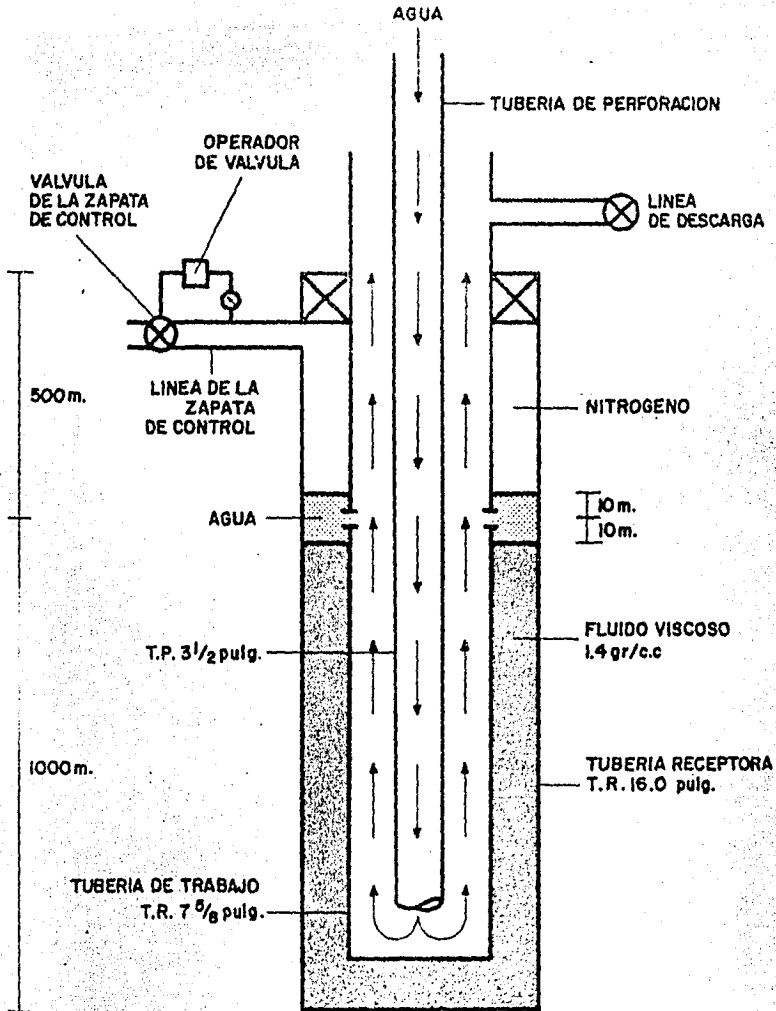


FIG. 8 POZO CIRCULANDO NORMALMENTE
 EN ESTA FIGURA SE OMITEN LAS TUBERIAS DE INYECCION
 Y REGISTRO PARA MAYOR OBJETIVIDAD

La presión en el espacio anular de la tubería receptora, dependerá de la presión en el interior de la tubería de trabajo al nivel de los orificios de la zapata de control, de tal manera que si el pozo se encontrara lleno con agua dulce (1gr/cc), la presión que registraría el manómetro colocado en la línea de la zapata de control sería aproximadamente igual a la presión hidrostática en los orificios, es decir, de 50 Kg/cm^2 (710 lb/pg^2). Considerando que el estrangulador de la zapata de control es operado dependiendo de la presión registrada en el manómetro de la línea correspondiente, se podrá seleccionar una presión de operación que represente la presión de fractura de una formación a la altura de la zapata.

Las pérdidas de circulación que anteceden a un brote, se pueden clasificar en:

- 3.1 Pérdidas de circulación debidas al manejo de fluidos pesados.
- 3.2 Pérdidas de circulación durante la introducción de tuberías.
- 3.3. Pérdidas de circulación por manejo inadecuado de un brote (en formaciones naturalmente fracturadas.)

Por otro lado, las pérdidas de circulación posteriores a un brote, se pueden deber al manejo inadecuado de éste o al uso de fluidos muy pesados durante las operaciones para controlar el pozo.

3.1 Pérdidas de circulación por manejo de fluidos pesados.

La Fig. 9 muestra la secuencia, al ocurrir en el pozo escuela, un brote causado por una pérdida de circulación originada por el manejo de fluidos pesados de la siguiente manera:

Para tratar de evitar derrumbes del agujero, se decide incrementar el peso del fluido de perforación sin tomar en cuenta el gradiente de presión de fractura de la zapata. Se inicia la circulación de fluido pesado. (En realidad, el peso del lodo se incrementa paulatinamente). La presión hidrostática es mayor que la presión de formación, por lo tanto, la válvula de contrapresión se encuentra cerrada. Figura 9 B. El fluido pesado al-

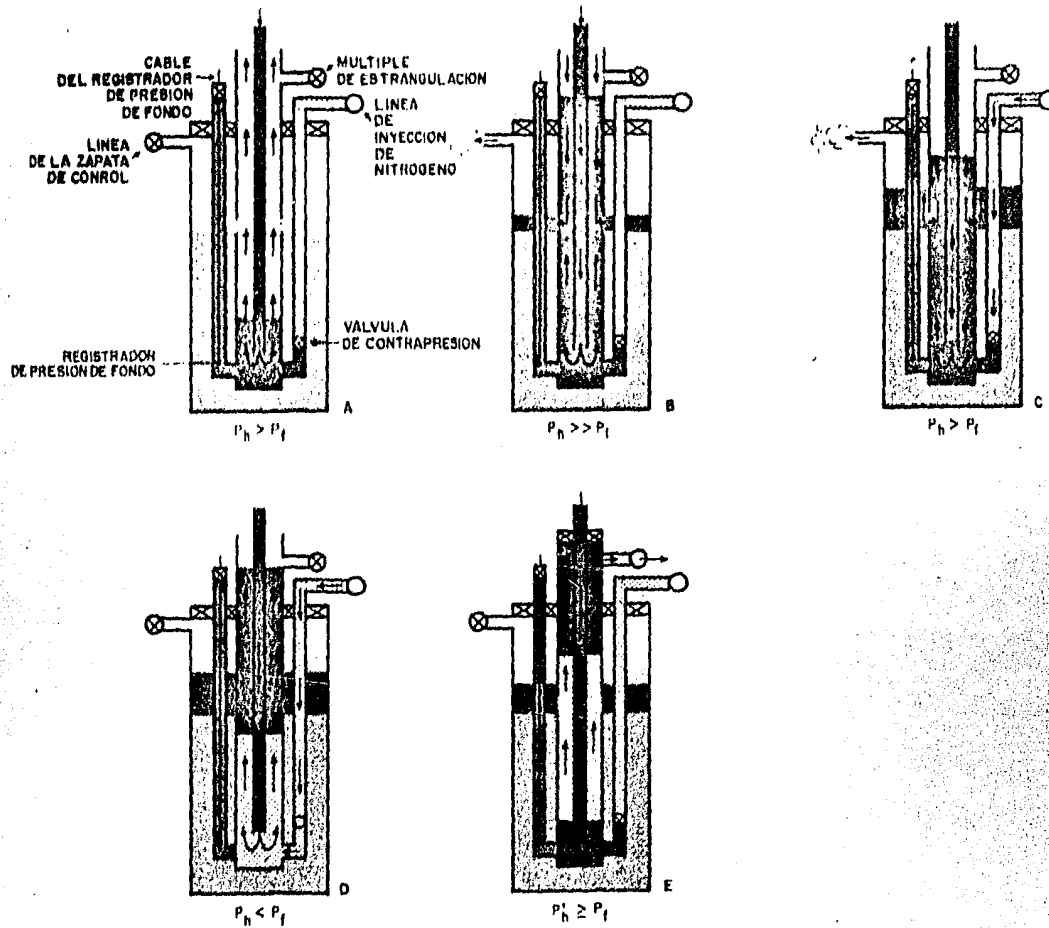


FIG. 9 FRACTURA DE LA ZAPATA POR MANEJO DE UN FLUIDO PESADO

canza en el espacio anular un nivel tal, que la presión hidrostática en la zapata (orificios de la tubería de trabajo) es igual o mayor a la presión de fractura. Entonces, el estrangulador de la línea de la zapata de control se abre permitiendo el flujo a través de los orificios de la zapata simulada y la pérdida de circulación se inicia. Los fluidos del interior del pozo empiezan a llenar el espacio anular de la tubería receptora abatiéndose en este caso el nivel del lodo y la presión hidrostática en el fondo. Fig. 9 C. La pérdida de fluidos continúa y la columna hidrostática en el pozo disminuye hasta que su presión es menor a la presión de fractura en la zapata, o bien cuando es menor a la presión de formación. Figura 9 D. En este caso, la columna de lodo disminuye hasta que su presión hidrostática es menor a la presión de formación. Al llegar a este punto, la diferencial de presión acciona la válvula de contrapresión y permite el paso de gas al pozo, provocando un brote en presencia de una pérdida de fluidos. Figura 9 E. Entonces, el control del pozo deberá hacerse tomando en cuenta como antecedente la fractura de la zapata y la pérdida de fluidos.

3.2 Pérdida de circulación durante la introducción de tuberías.

Al introducir la tubería de perforación al pozo, se generan presiones de fondo mayores a la hidrostática, debido al empuje o pistoneo que sufre el fluido de perforación por el movimiento descendente de la sarta. Este efecto se acentúa con la velocidad de introducción de la sarta, la viscosidad de fluido y el diámetro de la herramienta.

Cuando las presiones generadas durante la introducción de la sarta rebasan la presión de fractura de las formaciones expuestas, se originan pérdidas de fluidos a través de las formaciones fracturadas, lo cual puede provocar la ocurrencia de un brote al disminuir, la presión hidrostática en el fondo. Este efecto se reproducirá en el pozo escuela tal y como se muestra en la secuencia de la Fig. 10, donde se puede ver lo siguiente:

Fig. 10 A.- El pozo está lleno con un fluido cuyo gradiente de presión hidrostática es igual o ligeramente mayor al gradiente de presión de formación. El estrangulador de la línea de la zapata de control está cerrado.

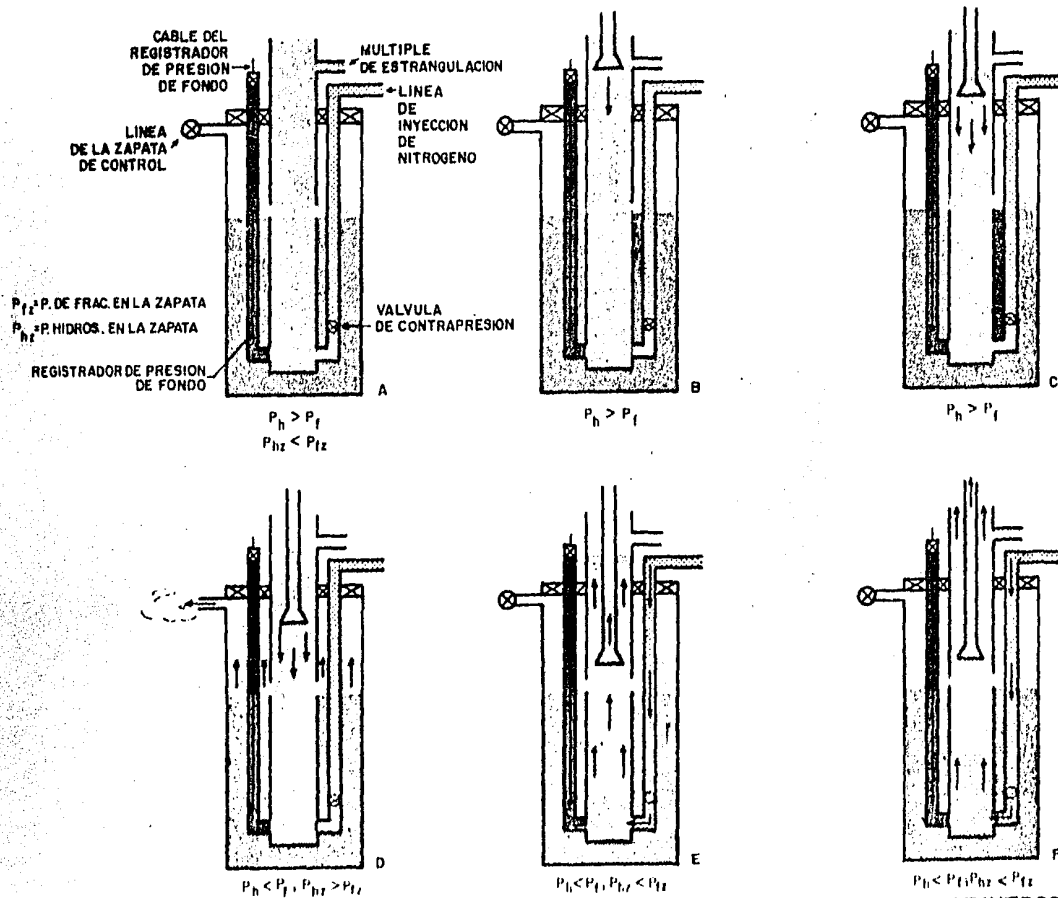


FIG. 10 OCURRENCIA DE UN BROTE AL FRACTURAR LA ZAPATA POR EFECTO DE INTRODUCCION DE LA SARTA A UNA VELOCIDAD EXCESIVA

El gradiente de presión de fractura es mayor al gradiente de presión hidrostática del fluido, Fig. 10 B. Se inicia la introducción de la sarta de perforación a una velocidad excesiva y la presión se incrementa proporcionalmente en todo el pozo, Fig. 10 C. La sarta continúa metiéndose rápidamente y la presión en el sistema continúa incrementándose. Fig. 10 D. La presión generada por la introducción de la sarta, rebasa la presión de fractura y el estrangulador de la zapata de control se abre y origina la pérdida de fluidos, alojándose en el interior del espacio anular de la tubería receptora. El nivel del fluido en el pozo (tubería de trabajo) baja rápidamente reduciendo la presión de fondo. Fig. 10 E. La presión de fondo disminuye hasta que sea igual o menor a la presión de formación, entonces la diferencial de presión acciona frente a la válvula de contrapresión originándose el flujo del nitrógeno hacia el pozo e iniciándose el brote. Fig. 10 F. El fenómeno continúa.

3.3 Pérdida de circulación por manejo inadecuado de un brote.

Esta pérdida tiene lugar después de la ocurrencia de un brote y se debe al incremento de la presión en el sistema como consecuencia de un control inadecuado de la expansión del gas que entró al pozo.

La figura 11 muestra una pérdida de circulación originada por el cierre total y permanente del pozo después de la ocurrencia de un brote, lo cual representa no sólo un control inadecuado del mismo, sino una ausencia total de control sobre el gas que entra al pozo.

Fig. 11 A. Se circula normalmente en el pozo y la presión de fondo es mayor a la presión frente a la válvula de contrapresión por lo que se encuentra cerrada, así como el estrangulador de la zapata de control.

Fig. 11 B.- Por alguna razón, la presión en la tubería de inyección se hace mayor a la presión de fondo y la válvula de contrapresión abre y permite el paso de gas. Fig. 11 C. El pozo se cierra totalmente y el gas viaja hacia la superficie manteniéndose su presión y volumen constantes, de tal manera que la presión en el sistema se incrementa paulatinamente y la

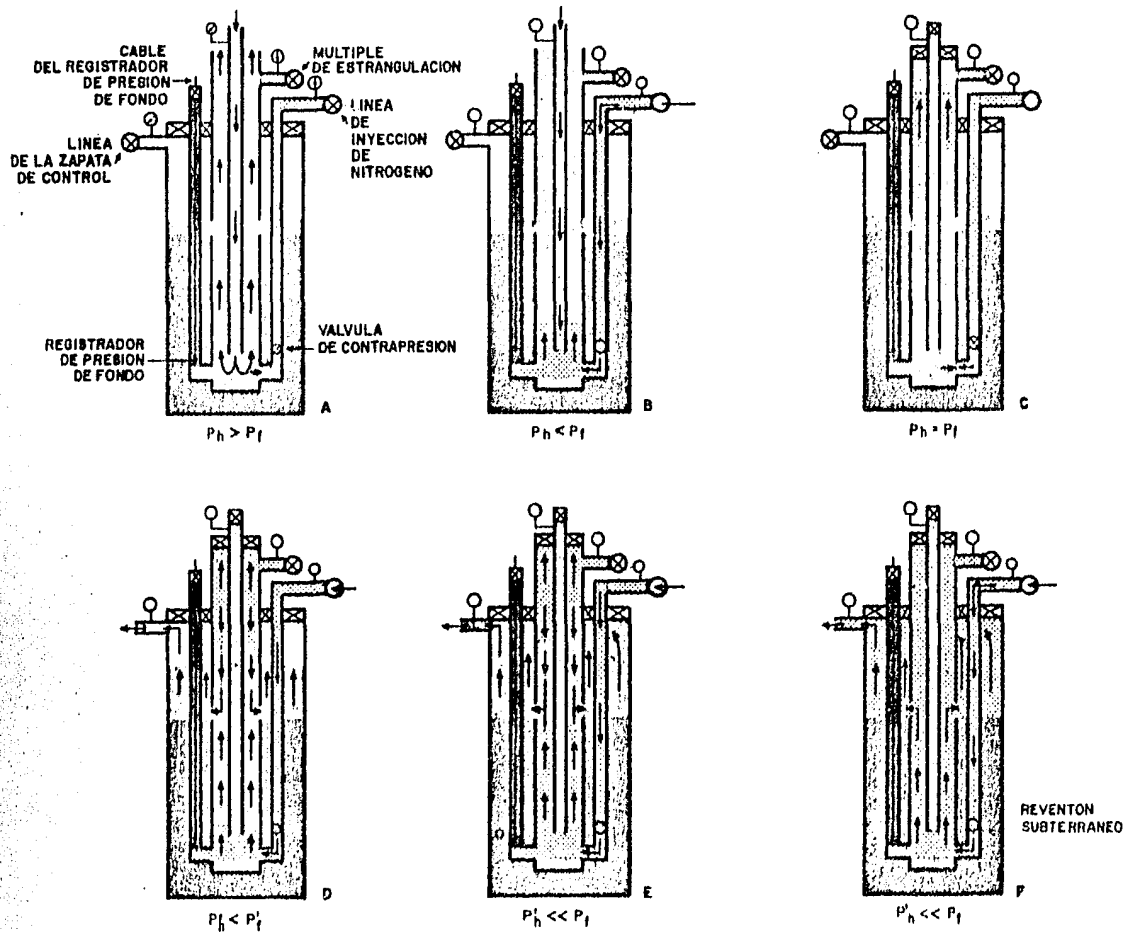


FIG. 11 PERDIDA DE CIRCULACION DURANTE LA OCURRENCIA DE UN BROTE

presión en los orificios de la zapata de control aumenta. Fig. 11 D. La presión frente a los orificios de la zapata simulada, rebasa la presión de fractura determinada, por lo que se abre la válvula de la línea de la zapata de control que permite la pérdida de fluido; más la expansión del gas dentro del pozo, la reducción de la presión de fondo y en consecuencia la entrada de más gas al interior del pozo. Fig. 11 E. El pozo continúa cerrado; la pérdida y la entrada de gas se mantienen. Fig. 11 F. El pozo se vacía completamente y se presenta una situación de brote subterráneo en el que el gas de la formación fluye hacia la zona de pérdida.

Un ejemplo numérico de la operación de la zapata de control puede ser el siguiente:

Habiéndose determinado que la presión de fractura, al nivel de los orificios de la zapata de control es de 65 kg/cm^2 (923 lb/pulg^2) y que equivale a una columna de fluido de 500 m de altura y 1.3 gr/cc de densidad, se tiene que mientras que se circule en el pozo un fluido cuya densidad sea menor a 1.3 gr/cc y/o se mantenga la presión frente a los orificios, menor a 65 kg/cm^2 , el estrangulador se mantendrá totalmente cerrado. Luego, si por alguna razón [como puede ser el incremento de la densidad del fluido que se circula, el manejo inadecuado de un brote o la introducción rápida de tubería], la presión a la altura de la zapata de control y por ende en la línea correspondiente, iguala o rebasa a la presión de fractura fijada en 65 kg/cm^2 , el estrangulador se abrirá totalmente y provocará la pérdida de circulación y/o el abatimiento del nivel de la columna de fluido en el pozo, al permitir el paso del fluido del interior de la tubería de trabajo, al espacio anular de la tubería receptora por efecto del desbalance del sistema. Esta pérdida de circulación o abatimiento de la columna del fluido, se mantendrá hasta que el sistema vuelva a equilibrarse.

La relación de capacidades del espacio anular entre la tubería receptora y la tubería de trabajo determinan el volumen máximo de fluido que se puede perder, así como el máximo abatimiento del nivel del fluido y la reducción de la presión hidrostática en el fondo del pozo. La velocidad con la que se pierde el fluido será controlada mediante el estrangulador de la línea de la zapata de

control,

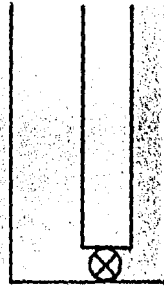
El volumen máximo de fluido que se perderá en el pozo escuela es de aproximadamente 9 m^3 (56.6 barriles) y el abatimiento máximo del nivel en condiciones estáticas será de 379 m por debajo de la línea de descarga, de tal manera que si el pozo se encontrara lleno con agua, la reducción de la presión hidrostática sería de aproximadamente 40 kg/cm^2 (568 lb/pg^2) en el fondo.

El gasto a través de los orificios de la zapata de control variarán en función del orificio del estrangulador y de la caída de presión originada por la diferencia de altura del nivel del fluido en los espacios anulares de la tubería de trabajo y la tubería receptora. Por tanto, la velocidad de abatimiento del nivel del fluido dentro de la tubería de trabajo, variará también en la misma proporción.

El tiempo promedio que transcurre desde que se inicia la pérdida hasta que cesa por completo, es de 2 minutos aproximadamente. (Ver apéndice C) Este tiempo se calculó considerando que el peso de la columna de aire en el espacio anular y las caídas de presión por fricción son despreciables, que la pérdida se origina estando el pozo en condiciones estáticas, y que el orificio máximo del estrangulador es de 2 pulgadas.

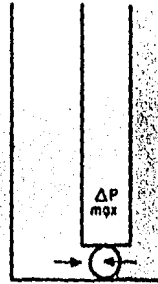
En resumen, el comportamiento del sistema de pérdida de fluidos en el pozo escuela, será análogo al comportamiento del fluido en un tubo en U como el que se muestra en la figura 12.

Ahora bien, si la pérdida de fluido por "fractura de la zapata" sucede mientras se está circulando, se originará una pérdida de circulación y mientras ésta sea mayor que el gasto de circulación, se tendrá también un abatimiento del nivel del fluido.



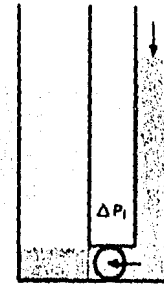
$$\Delta P = 0$$

CONDICION INICIAL :
NO HAY DIFERENCIA DE PRESION
NO HAY PERDIDA
VALVULA CERRADA



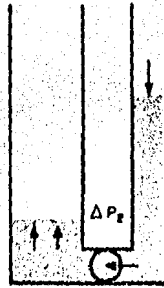
$$\Delta P_{max}$$

SE VA A : INICIAR LA PERDIDA
DIFERENCIA DE PRESION MAXIMA
VALVULA ABIERTA



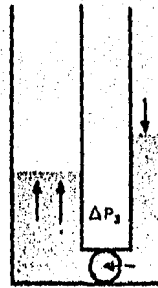
$$\Delta P_1 < \Delta P_{max}$$

SE INICIA LA PERDIDA
DIFERENCIA DE PRESION MAXIMA
GASTO MAXIMO
VALVULA ABIERTA



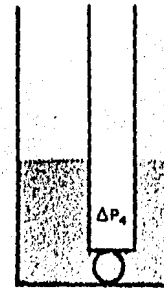
$$\Delta P_2 < \Delta P_1$$

LA PERDIDA CONTINUA
LA DIFERENCIA DE PRESION DISMINUYE
EL GASTO DISMINUYE
VALVULA ABIERTA



$$\Delta P_3 < \Delta P_2$$

LA PERDIDA CONTINUA
LA DIFERENCIA DE PRESION SIGUE DISMINUYENDO
EL GASTO SE SIGUE REDUCIENDO
VALVULA ABIERTA



$$P_1 = P_2, \Delta P_4 = 0$$

CESA LA PERDIDA
NO HAY CAIDA DE PRESION
GASTO CERO
VALVULA ABIERTA

FIG. 12 PERDIDA DE FLUIDOS EN EL POZO ESCUELA
ANALOGIA CON UN TUBO EN "U"

4. Falta de llenado del pozo al estar sacando tuberías,

La forma en que esto se logrará, reproduce fielmente lo que sucede en un pozo. La secuencia de la Fig. 13 muestra detalladamente el comportamiento del pozo escuela en este caso.

Fig. 13 A. El pozo está estático. Se va a cambiar barrena. La presión hidrostática es ligeramente mayor a la presión de la formación expuesta. Análogamente, la presión en el fondo del pozo escuela es mayor a la presión del nitrógeno frente a la válvula de contrapresión, por lo que ésta se encuentra cerrada y no hay flujo de gas. Fig. 13 B. Se empieza a sacar tubería sin cuidar el llenado del pozo. Al sacar la tubería sin sustituir el volumen de acero, por su equivalente en fluido de perforación, el nivel del pozo se abate y la presión hidrostática en el fondo disminuye. Fig. 13 C. Se continúa sacando tuberías sin llenar el pozo, el nivel de fluido sigue disminuyendo, así como la presión de fondo. Sin embargo, frente a la válvula de contrapresión la presión del nitrógeno continúa siendo menor a la hidrostática y permanecerá cerrada. Fig. 13 D. Al seguir sacando tubería sin llenar el pozo, el fluido llega a un nivel tal que la presión hidrostática en el fondo, es menor a la del nitrógeno frente a la válvula de contrapresión. Entonces, la diferencial de presión permite que la válvula de contrapresión abra y se inicie el brote por el flujo de gas al interior del pozo. Fig. 13 E. Continúa el flujo de gas, se sigue sacando tubería. Fig. 13 F. El brote se manifiesta en la superficie, con la tubería lejos del fondo del pozo.

Hay que mencionar, que los brotes ocasionados por este motivo, han disminuido gracias a que se ha popularizado el uso del tanque de viajes. El pozo escuela contará con uno de ellos para que el personal aprenda a utilizarlo adecuadamente.

5. Efecto de succión al sacar rápidamente la sarta de perforación.

Esta causa se debe a la reducción brusca de la presión en el fondo del pozo. Este efecto es muy marcado cuando se manejan sartas empacadas.

En el pozo escuela esto también se reproducirá fielmente como lo muestra la

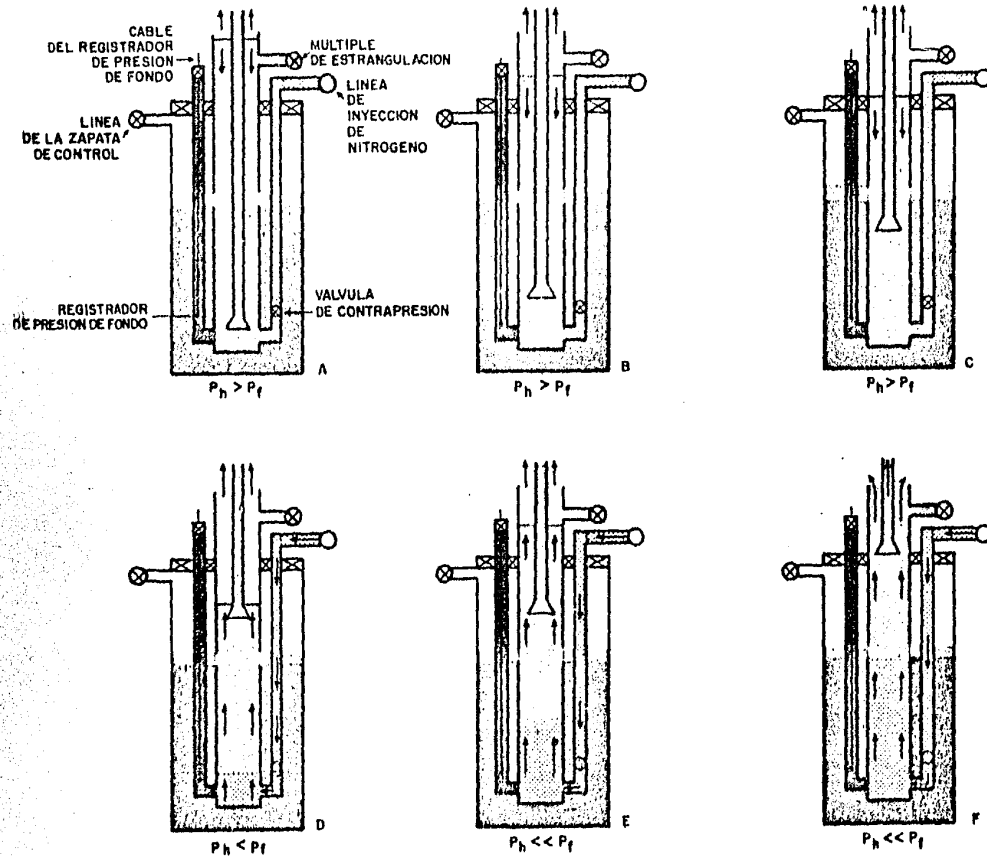


FIG. 13 BROTE POR FALTA DE LLENADO DEL POZO

secuencia de la Fig. 14.

Fig. 14 A. Se tiene una sarta empacada en el fondo del pozo en condiciones estáticas y se va a cambiar barrena o a realizar un viaje a la zapata. La presión de fondo ejercida por la columna hidrostática es ligeramente mayor a la presión del nitrógeno frente a la válvula de contrapresión, por lo que se mantiene cerrada por efecto de la diferencial de presión. Esto simula que la presión hidrostática es mayor que la presión de formación.

Fig. 14 B. Se levanta la sarta del fondo rápidamente y por efecto de arrastre viscoso, se produce una succión que hace que la presión de fondo disminuya bruscamente hasta ser menor que la presión del nitrógeno en la válvula de contrapresión y ésta abre permitiendo la entrada de gas.

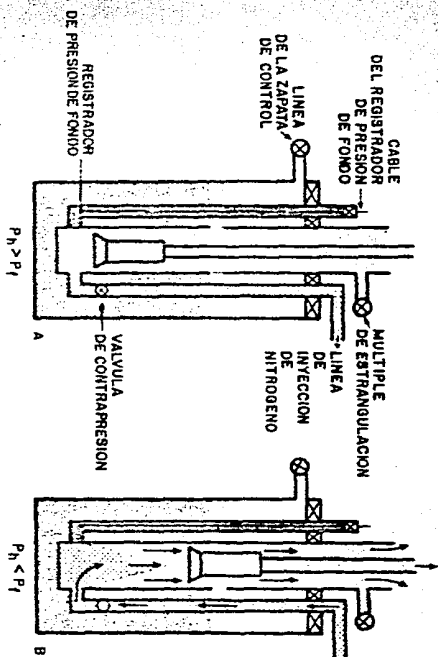


FIG. 14 CONDICION DE BROTE POR EXTRACCION RAPIDA DE LA TUBERIA

CAPITULO IV

EQUIPO PARA GENERAR BROTES

El manejar un brote de gas en los pozos petroleros es un problema muy difícil y de alto riesgo por lo cual, para llevar a cabo la simulación en el pozo escuela se eligieron el aire y el nitrógeno los cuales tienen un comportamiento similar al de un gas verdadero. Para seleccionar al más indicado, se efectuó el análisis comparativo de algunas características relevantes:

El aire.- En su mezcla existen elementos que en combinación con el oxígeno y al manejarse a presiones altas se comporta como un combustible explosivo y altamente peligroso.

El Nitrógeno.- Es un gas inerte y relativamente insoluble en el agua, no reacciona con los metales, siendo mínimo el riesgo por no ser un elemento explosivo.

En estado líquido por la temperatura tan baja a que se encuentra vuelve quebradizos algunos materiales como hule, plástico, aleaciones de los aceros.

Lo anterior se evita utilizando materiales que resistan temperaturas bajas como son el acero inoxidable, el cobre, el bronce, el aluminio o el acero monel.

Como resultado de lo mencionado, obviamente por sus condiciones en general de facilidad y seguridad en su manejo se seleccionó el nitrógeno para generar los brotes en el pozo escuela.

Definido el elemento gaseoso de inyección al pozo, se continuó la investigación para definir el sistema más apropiado en la inyección del nitrógeno. Como se puede observar en la Fig. 15 los principales elementos que lo constituyen son: Un tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido, un conjunto vapo-

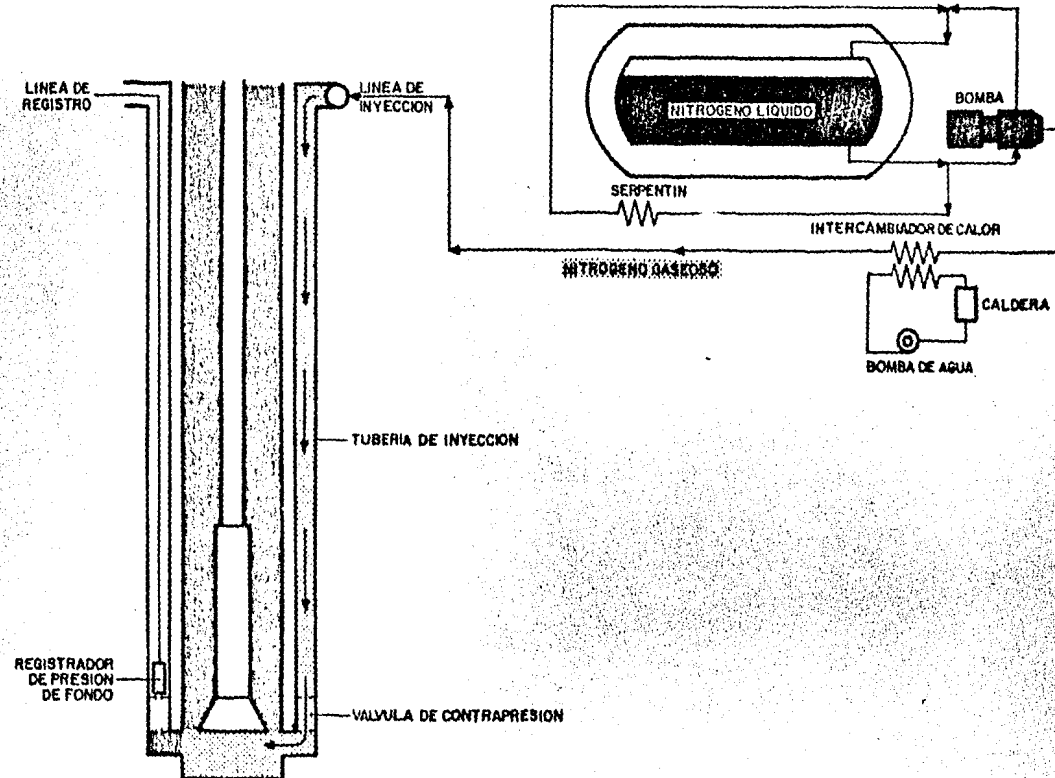


FIG. 15
DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA DE INYECCION DE NITROGENO

rizador-bomba criogénica, una tubería de inyección y una válvula de contrapresión.

Para determinar la capacidad del sistema, se tomó como fundamento el consumo promedio de nitrógeno, el cual está en función de la magnitud de los brotes artificiales, así como la periodicidad en que se llevarían a cabo.

La magnitud del brote la determina tanto la presión como el volumen de fluidos que entran al pozo. Donde la presión depende de la presión de la formación - fluyente, y el volumen lo define el gasto con que fluyen los fluidos durante - el tiempo que transcurre desde el inicio del brote hasta que cesa la entrada de fluidos debido al cierre del pozo o su estrangulación e igualando las presiones de fondo.

En el desarrollo del brote, el gasto de fluidos invasores dependerá de la diferencia de presión de la formación y de la presión hidrostática del pozo. Considerando la presión de formación constante, el gasto se incrementa conforme la presión hidrostática disminuye debido al desplazamiento del fluido original por los fluidos invasores haciéndose el gasto constante hasta que son - desplazados totalmente los fluidos originales. Definidas las variables del brote como la magnitud y el tiempo de flujo de la formación es aproximada al tiempo que utiliza la cuadrilla en detectar el brote y proceder a operar el equipo superficial adecuadamente. Para establecer la analogía con el pozo es cuela y un verdadero, se fijó la presión de inyección en un valor máximo de - 210 kg/cm^2 (3000 lb/pg^2), con base a que la densidad máxima de 1.4 gr/cc del fluido que se empleará para el control de un brote a 1500 m de profundidad.

El tiempo promedio de inyección efectiva de nitrógeno, durante la ocurrencia de un brote y su control, se estimó en 6 minutos, considerando que ese es el tiempo promedio de respuesta de una cuadrilla sin adiestramiento especial para detectar un brote, y efectuar las maniobras necesarias para cerrar el pozo con el equipo superficial de control. Además, el tiempo máximo de inyección se fijó en 10 minutos considerando que éste es el tiempo que tarda el pozo en vaciarse después de iniciado el brote.

Para determinar el volumen de nitrógeno que fluiría al pozo en el tiempo promedio de inyección efectiva, fue necesario simular matemáticamente el desarrollo del brote, ya que la variación del gasto de inyección de nitrógeno con respecto al tiempo, no permitió el uso de una relación sencilla.

Se consideró que durante la ocurrencia de un brote de gas, los fluidos que se encuentran en el pozo son desplazados mediante un flujo tipo bache por esto, en la simulación matemática del brote se tuvo que establecer un comportamiento análogo al de la inyección de gas en un sistema de bombeo neumático intermitente, por lo que se utilizaron las ecuaciones empíricas correspondientes con las modificaciones necesarias.

Para facilitar la simulación del brote se consideraron constantes los siguientes parámetros:

- 1) La presión de inyección de nitrógeno (para mantener la condición de que la presión de formación sea constante durante la ocurrencia, el desarrollo y el control de un brote).
- 2) El factor de fricción.
- 3) El factor de compresibilidad del gas ($z = 1$).
- 4) La velocidad de penetración del gas en el líquido.
- 5) La temperatura media del pozo.
- 6) El gradiente de presión del fluido que está presente en el pozo antes de ocurrir el brote.

Además, se consideró que durante la ocurrencia y el desarrollo del brote no había aportación de líquidos al sistema o dicho de otra manera, que antes y durante el desarrollo del brote, la bomba de lodo estaría parada y no habría circulación de fluidos a través del sistema.

Mediante la simulación del desarrollo del brote, se pudo establecer en forma aproximada, el comportamiento del gasto de gas a través del orificio de la válvula de contrapresión. En la Fig. 16 se observa claramente la variación del gasto de gas con respecto al tiempo para presiones de inyección de 210 kg/cm^2 (3000 lb/pulg^2) y 176 kg/cm^2 (2500 lb/pg^2) y orificios de $1/2, 1/4$ y $1/8$ de pulgada. En la figura se muestra que el gasto inicial es mayor a cero y que se incrementa hasta el momento de establecer una diferencial de presión constante y el gas fluye a la superficie; el extremo final de la curva indica el momento en el que el pozo se vacía completamente y el gasto es constante.

La Fig. 16 muestra también, que el gasto de gas a través de un orificio de $1/2$ pulgada para presiones de inyección de 210 y 176 kg/cm^2 varía de 145 a $168 \text{ pies}^3/\text{seg.}$ a c.e. y de 89 a $139 \text{ pies}^3/\text{seg}$ a c.e. respectivamente, lo que representa un gasto excesivo promedio de 12 millones de pies cúbicos de gas por día medidos a condiciones estándar, que se ve reflejado en el tiempo de vaciado que es de sólo 4 minutos.

El gasto a través del orificio de $1/4$ de pulgada se reduce significativamente para las mismas condiciones de presión a un promedio de 3 millones de pies cúbicos de gas por día, medidos a condiciones estándar ($35 \text{ pies}^3/\text{seg}$) y el tiempo total para vaciar el pozo se incrementa a aproximadamente 8 minutos.

Para el orificio de $1/8$ de pulgada el gasto promedio es de sólo 800 mil pies cúbicos de gas por día a condiciones estándar ($9.3 \text{ pies}^3/\text{seg}$) y el tiempo de vaciado del pozo es de 11.5 minutos.

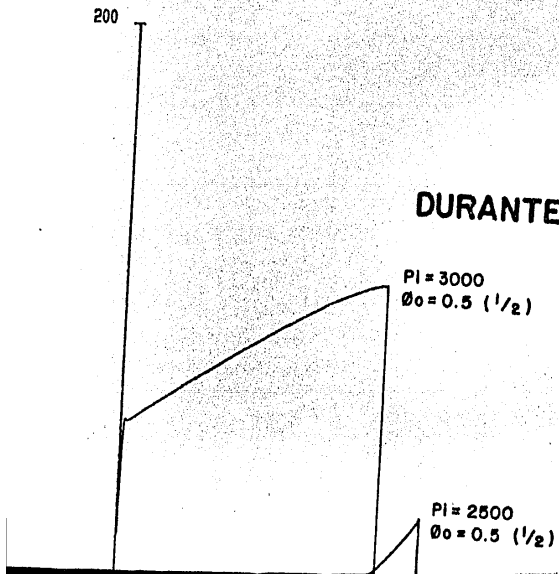
Cabe hacer notar que los tiempos reales de vaciado del pozo serán mayores a los calculados y el gasto inicial será menor al calculado, debido a que en la simulación se supone que la presión de inyección deseada se alcanza instantáneamente y que la válvula de contrapresión está calibrada para abrir a dicha presión, cuando en realidad la presión de inyección deseada se alcanzará después de cierto intervalo de tiempo y la válvula abrirá en cuanto la presión de inyección sea ligeramente mayor a la presión hidrostática en el fondo del pozo.

200

FIG. 16
VARIACION DEL GASTO
DE INYECCION DEL NITROGENO
CON RESPECTO AL TIEMPO,
DURANTE EL DESARROLLO DE UN BROTE

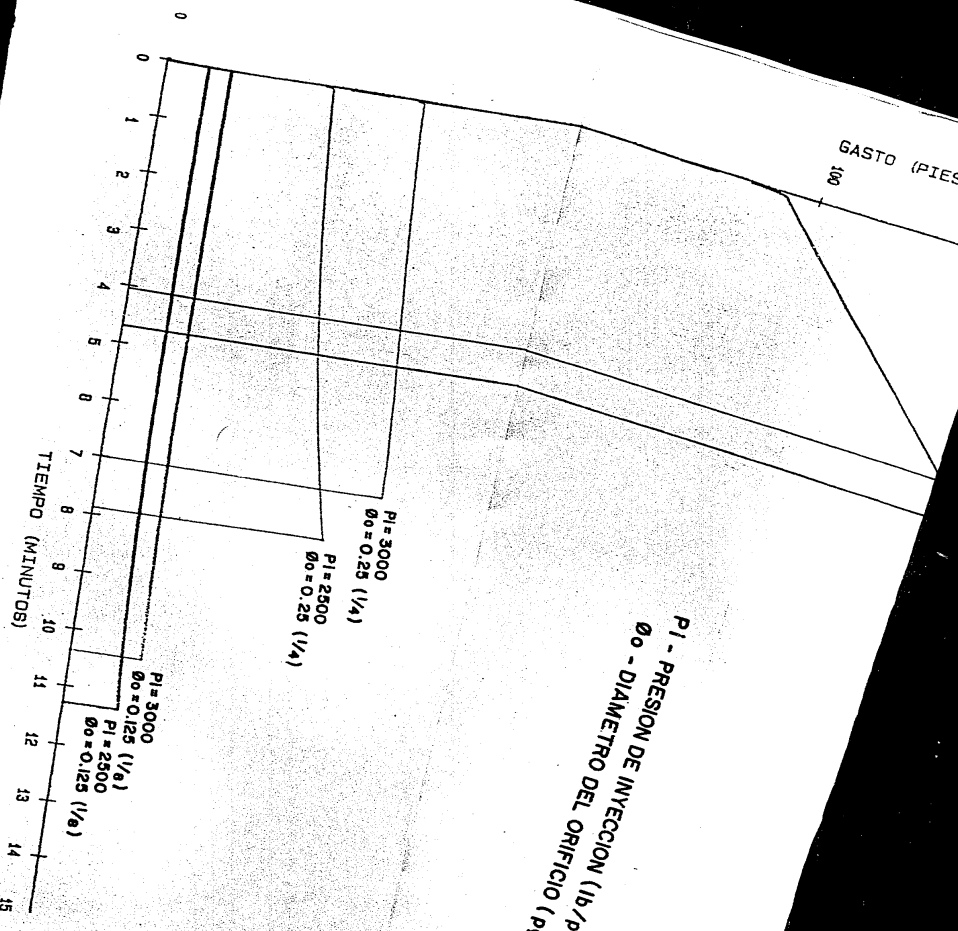
$P_i = 3000$
 $\theta_0 = 0.5 (1/2)$

$P_i = 2500$
 $\theta_0 = 0.5 (1/2)$



GASTO (PIES³/SEG)

100



P1 - PRESION DE INYECCION (lb./pg²)
Ø - DIAMETRO DEL ORIFICIO (pg.)

GASTO (PIES³/SEG)

100

0

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

TIEMPO (MINUTOS)

PI - PRESION DE INYECCION (lb/pg²)

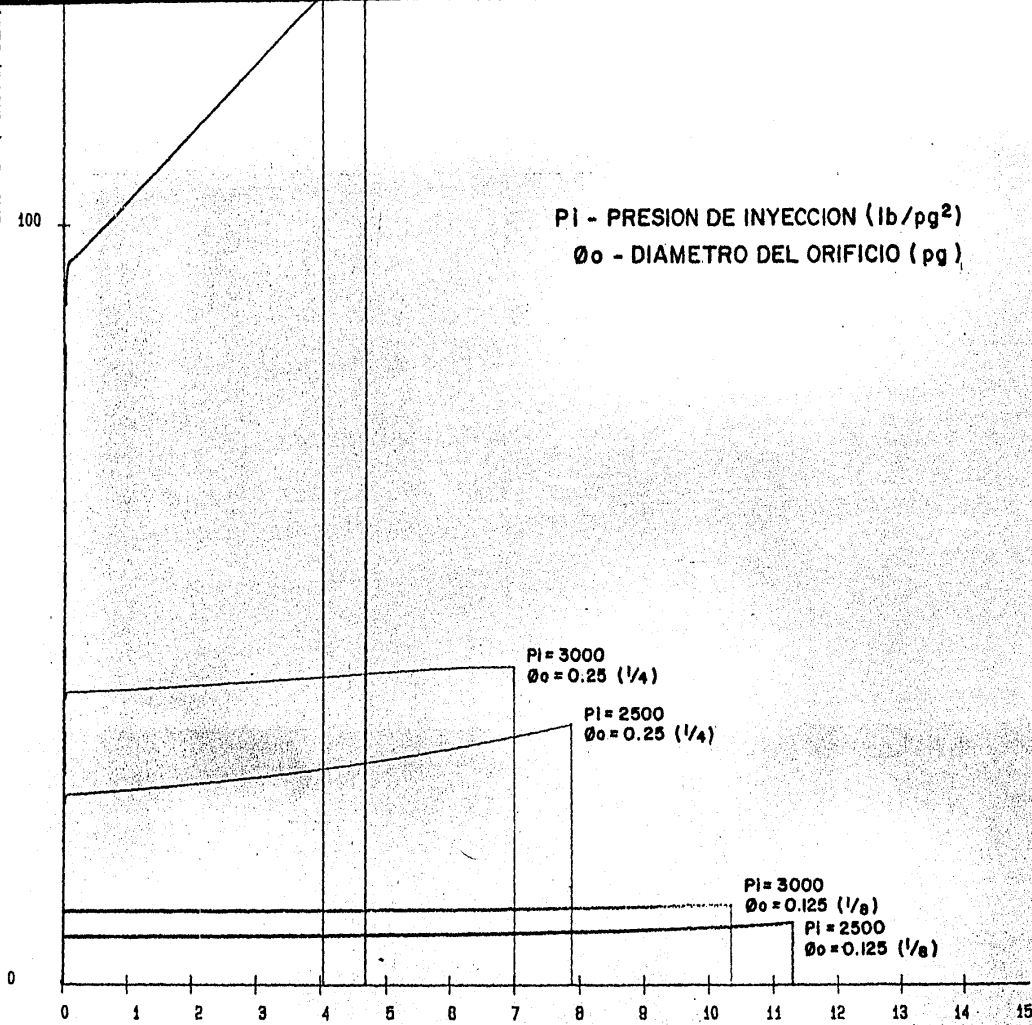
Øo - DIAMETRO DEL ORIFICIO (pg)

PI = 3000
Øo = 0.25 (1/4)

PI = 2500
Øo = 0.25 (1/4)

PI = 3000
Øo = 0.125 (1/8)

PI = 2500
Øo = 0.125 (1/8)



Además el tiempo de vaciado del pozo está significativamente influenciado por la velocidad de penetración del gas en el líquido. A menores velocidades de penetración el tiempo de vaciado del pozo se incrementa y viceversa.

Con los resultados obtenidos de la simulación, se eligió el orificio de 1/4 de pulgada para definir la capacidad del sistema de inyección de nitrógeno.

Características del Conjunto Vaporizador-Bomba Criogénica,

Considerando que el gasto máximo de gas que pasará por la válvula de contrapresión a través del orificio de 1/4 de pulgada será de 42 pies³/seg. (a c.e.) (151,200 pies³/hora) el conjunto vaporizador-bomba criogénica deberá tener capacidad para manejar un gasto por lo menos 200,000 pies³ de gas por hora medidos a condiciones estándar a una presión de inyección de 210 kg/cm² (3000 lb/pg²).

El conjunto vaporizador-bomba criogénica para el pozo escuela es un conjunto compacto que puede manejar hasta 228,000 pies³ de gas por hora medidos a condiciones estándar (63 pies³/seg) a una presión de 350 kg/cm² (5000 lb/pg²), cuenta con un motor diesel de 8 cilindros, dos bombas recíprocantes de 3 cilindros con controles hidrostáticos de velocidad, una bomba centrífuga con control hidráulico de velocidad y un vaporizador.

Las especificaciones del conjunto son las siguientes:

Presión máxima de trabajo: 700 kg/cm² (10,000 lb/pg²).

Presión de prueba: 1060 kg/cm² (15,000 lb/pg²).

Gasto mínimo a P máx.: 5.55 pies³ std/seg (20,000 pies³/h).

Gasto máximo a P máx.: 50 pies³ std/seg (180,000 pies³/h).

Temperatura de descarga: T ambiente (°C) + 10°C.

Dimensiones: Largo = 4.6 m (15 pies)

Altura = 2.44 m (8 pies)

Anchura = 2.54 m (8 pies, 4 pulgadas)

Capacidad del Tanque de Almacenamiento de Nitrógeno Líquido.

La capacidad del tanque de almacenamiento, es determinada en base al consumo promedio mensual de gas.

Este consumo de gas (K) se determinó de la siguiente manera:

$$K = 30 \times VP \times NP$$

en donde:

K^* = consumo promedio mensual de gas (m^3 /mes)

VP^* = consumo promedio de gas por prueba (m^3 /prueba)

NP = número de pruebas por día

El consumo promedio de gas por prueba se estimó en $280 m^3$ (9881 pies³) mediante la simulación matemática del brote en función el tiempo promedio de inyección efectiva (6 minutos), y a una presión media de inyección de 780 kg/cm² (2560 lb/pg²).

Suponiendo que las pruebas o prácticas de detección y control de brotes sólo se llevarán a cabo durante el día, se podrán realizar 3 prácticas diarias con intervalos de 3.5 horas para dar oportunidad de analizar los errores o aciertos cometidos durante cada prueba y de preparar el pozo para la siguiente práctica. De esta manera el promedio mensual de gas sería:

$$K = 30 \times 280 \times 3 = 25,200 m^3/\text{mes}$$

Lo cual determinó la capacidad del tanque más apropiado con base en la autonomía de trabajo deseado, a la capacidad de los tanques comerciales y de la capacidad de abastecimiento. De esta manera, el tanque que se propone para el pozo modelo es un tanque industrial con capacidad para $17,355 m^3$ (3000 galones) de nitrógeno líquido y un equivalente gaseoso de $7906 m^3$ (279,300 pies³)

* Consumo de gas medido a condiciones estándar.

que permitirá una autonomía de trabajo de 7,5 días considerando que sólo el 80% del volumen total del tanque puede utilizarse.

$$\text{Volumen total de gas} = 7906 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen utilizable de gas} = 7906 \times 0,8 = 6324,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Autonomía del tanque} = \frac{\text{Volumen utilizable de gas}}{\text{Consumo promedio de gas por día}} \text{ (días)}$$

$$= \frac{6324,8 \text{ m}^3}{280 \text{ m}^3 / (\text{prueba} \times 3 \text{ pruebas/días})}$$

7.5 días

Esto implicaría que el tanque fuera llenado cada semana con aproximadamente 9 m^3 de nitrógeno líquido.

Las dimensiones del tanque propuesto son las siguientes:

$$\text{Altura} = 4.9 \text{ m (16 pies)}$$

$$\text{Diámetro} = 2.44 \text{ m (8 pies)}$$

$$\text{Peso: Lleno} = 16.24 \text{ toneladas (35,800 lb)}$$

$$\text{Vacio} = 7.04 \text{ toneladas (15,500 lb)}$$

Tubería de Inyección

La tubería de inyección de nitrógeno, es paralela a la tubería de trabajo del pozo y está conectada al fondo a través de la zapata de unión. Las especificaciones de la tubería son las siguientes:

Tubería de producción de $2 \frac{3}{8}$ "

Gradq: J-55.

Peso: 4.6 lb/pie (6.85 kg/m)

Diámetro exterior: 2.375 pg (60.325 mm)

Diámetro interior: 1.995 pg (50.673 mm)

Drift: 1.901 pg (48.285 mm)

Diámetro del coplé (upset): 2.875 pg (73.025 mm)

Tipo de Rosca: Acme c/reb.

Resistencia al colapso: 570 kg/cm² (8700 lb/pg²)

Resistencia a la presión interna: 542 kg/cm² (7700 lb/pg²)

Sus dimensiones, permiten que la tubería pueda correrse conjuntamente con el resto del aparejo de trabajo y que las caldas de presión sean despreciables. Por otro lado, su resistencia, hace que los factores de seguridad al colapso y a la presión interna sean de aproximadamente 1.5 y 2.5 respectivamente (ver Fig. 2 A del Apéndice A)

Esta tubería albergará en su interior a aproximadamente 1495 metros de gas, desde la superficie hasta la válvula de contrapresión y ésta regulará la inyección de nitrógeno.

Válvula de Contrapresión.

En el sistema de inyección de nitrógeno, la válvula de contrapresión es el elemento que controla la entrada de gas al interior del pozo. Esta válvula que va instalada en un niple de asiento colocado entre los dos primeros tubos de la línea de inyección de N₂ (ver Fig. 17) es el tipo recuperable y está específicamente diseñada para trabajar en pozos inyectoros; su diseño permite la apertura o cierre automático de la misma dependiendo de las condiciones de presión a las que esté sujeta.

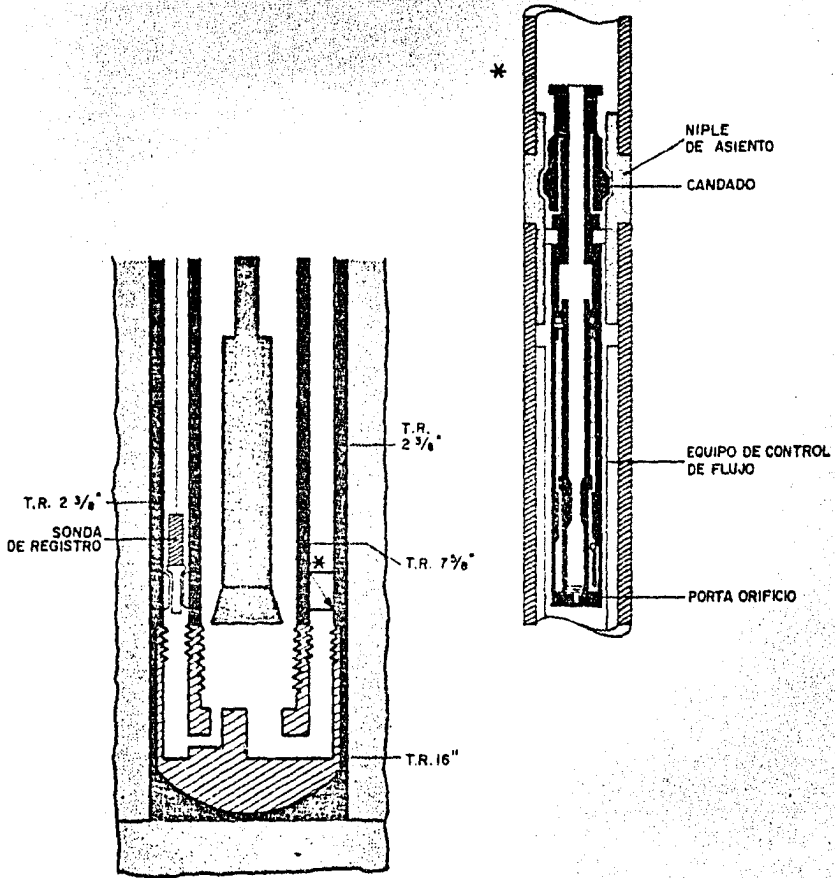


FIG. 17 UBICACION Y DETALLE DE LA VALVULA DE CONTROL DE INYECCION DE NITROGENO

Principios de Operación, La válvula que en términos generales está constituida por un resorte, una camisa deslizante y una charnela (ver Fig. 17'-1), permanece cerrada mientras que no existe una diferencial de presión que establezca un flujo de gas a través de ella. Cuando la presión (P_i) arriba de la válvula es mayor a la presión (P_f) ejercida en su parte inferior, es decir, cuando la presión de "formación" es mayor a la presión de fondo del pozo, se establece una diferencial de presión que genera una fuerza que hace girar la charnela y empuja hacia abajo la camisa deslizante para asegurar la apertura completa de la válvula y el flujo de gas hacia el interior del pozo, como se puede ver en la Fig. 17'-2.

Mientras se mantenga esa diferencial de presión habrá flujo de gas y la válvula permanecerá abierta, pero cuando por alguna razón se suspenda la inyección de gas o la presión de fondo (P_f) sea mayor o igual a la presión de formación o inyección (P_i), cesará la fuerza que mantiene abierta la válvula y el resorte de la misma empujará la camisa deslizante hacia arriba permitiendo que la charnela gire y evite el paso de fluidos en sentido contrario como se muestra en la Fig. 17'-3. Se puede concluir entonces que el cierre y la apertura de la válvula estarán totalmente controlados por la diferencial de presión que se establezca.

La válvula de contrapresión, servirá también para controlar el gasto de gas, ya que en su parte inferior cuenta con un portaorificio en donde se podrán colocar orificios de diferentes diámetros desde 1/2 pg hasta 1/16 pg para restringir el flujo y lograr que el volumen de gas que entra al pozo sea mayor o menor según la práctica que se quiera realizar.

La posibilidad de poder recuperar e instalar la válvula en cualquier momento permitirá que el cambio de orificio se lleve a cabo en la superficie sin ningún problema y que se le pueda dar un mantenimiento adecuado a la válvula.

Como se puede ver en la Fig. 18 el conjunto integral de la válvula de contrapresión e inyección está formado por seis secciones; de abajo hacia arriba:

- 1) sección de portaorificios y charnela;
- 2) sección de la camisa deslizante;
- 3) sección igualadora de presión;
- 4) sección de sellos;
- 5) sección de candados;

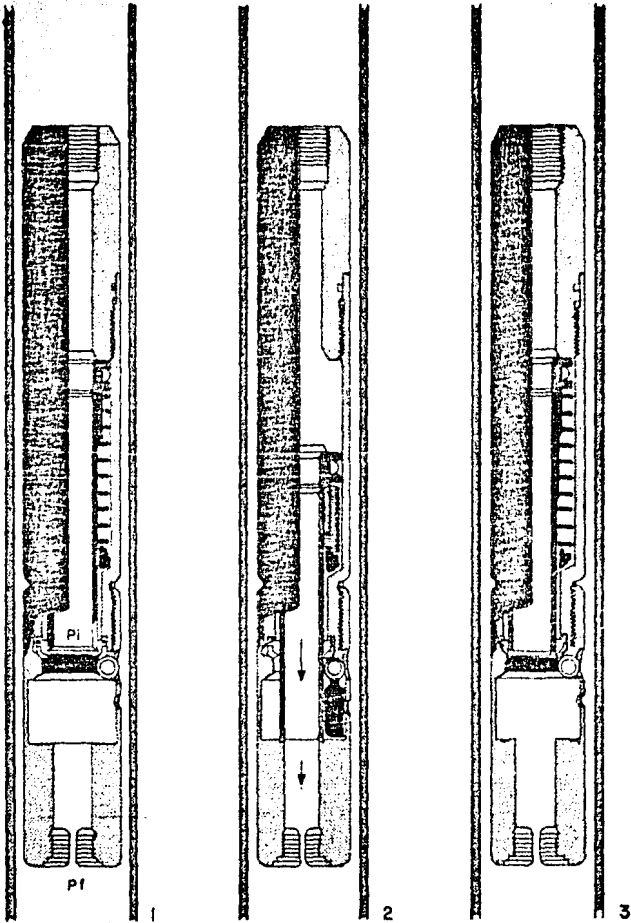
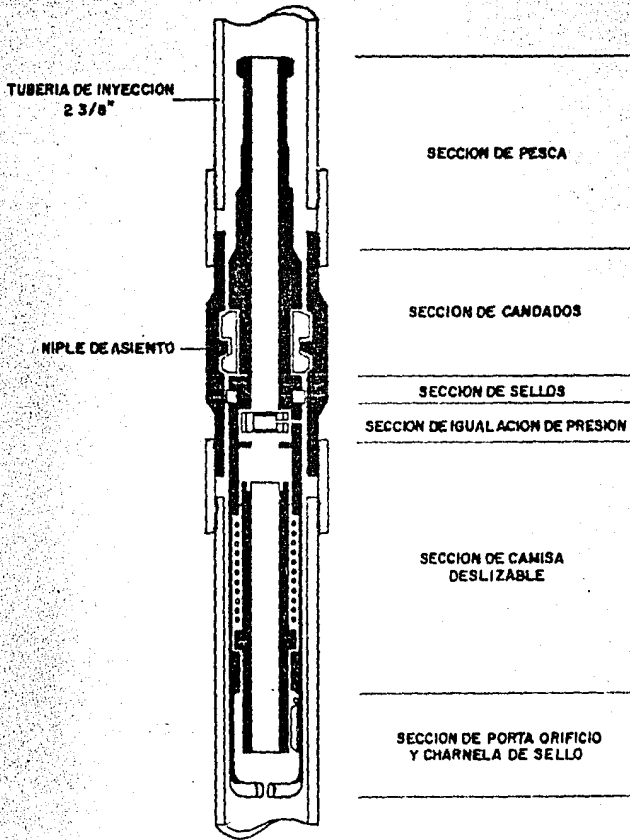


FIG. 17¹ VALVULA DE CONTRA PRESION DEL SISTEMA DE INYECCION DE NITROGENO



**FIG. 18 CONJUNTO INTEGRAL DE LA VALVULA
DE INYECCION DE NITROGENO**

y 6) sección de pesca o pescante.

Especificaciones de la Válvula de Inyección.

Longitud total.....0.3822 m (15.046 pg)

Diámetro exterior.....0.047 m (1.848 pg)

Diámetro interior.....0.019 m (0.750 pg)

Deformación del resorte.....0.179 kg/cm (1 lb/pg)

Area de flujo.....2.845 cm² (0.441 pg²)

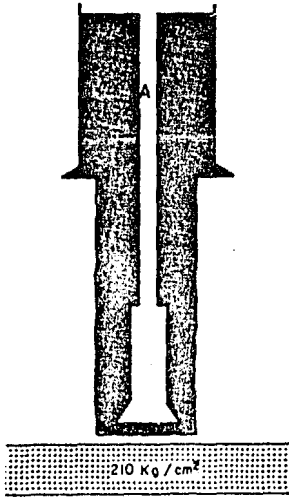
CONDICIONES DE PRESION EN EL SISTEMA DE INYECCION DE NITROGENO, ANTES, DURANTE Y DESPUES DE LA GENERACION DE UN BROTE.

a) CONDICIONES INICIALES ANTES DE GENERAR UN BROTE.

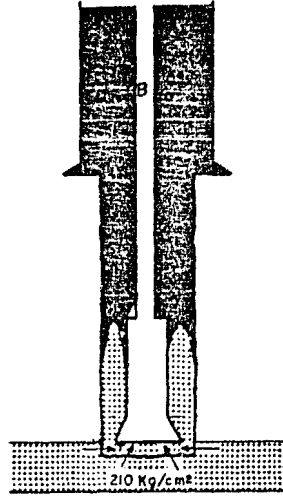
Antes de generar un brote, el pozo estará lleno con agua, la línea de inyección represionada, y la válvula de contrapresión cerrada por la presión (Pav) debajo de la válvula será de aproximadamente 150 kg/cm² (2130 lb/pg²) para mantenerla cerrada, la presión en la línea de inyección deberá ser menor a 150 kg/cm². En la Fig. 19 A se ilustran las condiciones iniciales de presión de la línea de inyección: 140 kg/cm² (2000 lb/pg²) arriba de la válvula y 120 kg/cm² (1700 lb/pulg²) en la superficie.

b) CONDICIONES DURANTE LA GENERACION DE UN BROTE.

Para reproducir en el pozo la ocurrencia de un brote proveniente de una formación, cuya presión es de 210 kg/cm² (3000 lb/pulg²) y que se encuentra a 1500 m de profundidad, la presión superficial en la línea de inyección de nitrógeno, deberá incrementarse de 120 kg/cm² (1700 lb/pulg²) a 183 kg/cm² (2600 lb/pulg²) y mantenerse invariable durante la ocurrencia del brote y su control, con la finalidad de que la presión en el fondo del pozo, permanezca



CONDICIONES NORMALES,
VALVULA DE CONTRAPRESION CERRADA



CONDICIONES NORMALES,
VALVULA DE CONTRAPRESION ABIERTA

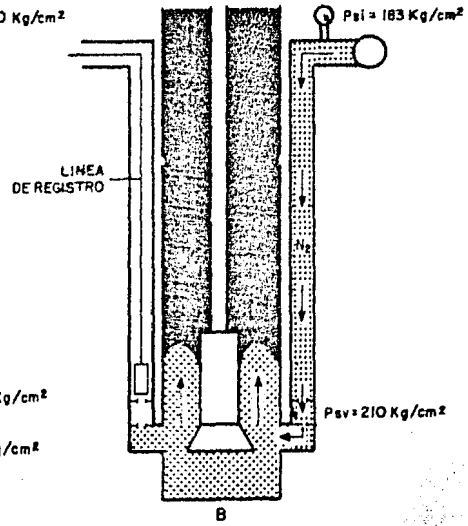
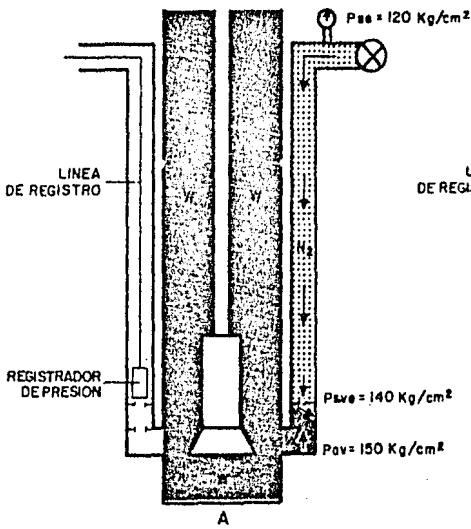


FIG. 19 PRESIONES MINIMAS Y MAXIMAS EN LA LINEA
DE INYECCION DE NITROGENO

constante e igual a 210 kg/cm^2 (ver Fig. 19-8)

Debido a las características de la válvula de contrapresión y a las condiciones iniciales del pozo, el brote se inicia antes de alcanzar la presión máxima de 210 kg/cm^2 ; la válvula abre y permite el flujo de gas en cuanto la presión en la línea de inyección supera a la contrapresión (presión hidrostática en la tubería de trabajo + presión equivalente del resorte de la válvula) que la mantiene cerrada y que es de aproximadamente 151 kg/cm^2 (2147 lb/pulg^2) por lo que es muy importante que la presión máxima en la superficie se alcance en el menor tiempo posible.

El equipo de inyección para el pozo tiene capacidad para incrementar la presión superficial de 120 kg/cm^2 (1700 lb/pulg^2) a 183 kg/cm^2 (2600 lb/pulg^2) en aproximadamente un minuto.

c) CONDICIONES DE PRESION DURANTE Y DESPUES DEL CONTROL DEL BROTE.

Durante y después de las operaciones de cierre del pozo y control del brote, la presión superficial en la línea de inyección de nitrógeno deberá mantenerse en 183 kg/cm^2 , para que cualquier disminución en la presión hidrostática en el fondo induzca nuevamente el flujo de gas hacia el pozo.

Para mantener constante la presión en la línea de inyección, el gasto del nitrógeno debe variar o hacerse cero según sea el caso. Por ejemplo, si al ocurrir un brote, el pozo se cierra totalmente, la inyección de nitrógeno deberá suspenderse por completo para evitar el incremento de la presión en la línea de inyección. Ahora bien, si por alguna razón, al estar controlando el brote la presión en el fondo se hace menor a la presión en la línea de inyección, el gas fluirá por expansión hacia el pozo y la presión en la línea tenderá a disminuir, por lo que para mantener constante la presión en la línea, deberá reanudarse la inyección de nitrógeno en la superficie.

SISTEMA DE REGISTRO DE LA PRESION DE FONDO.

La presión en el interior de un pozo, es sin lugar a duda, el parámetro más importante en la ocurrencia de un brote y su control. Esta presión, conocida como presión de fondo es la que permite o evita el flujo de los fluidos - de las formaciones expuestas hacia el interior del pozo o viceversa. Esto se logra manteniendo la presión del fondo igual o ligeramente mayor a la presión de las formaciones expuestas, se anula la posibilidad de tener una pérdida de fluidos por fracturamiento de las formaciones o en caso de tener un brote, se logra que los fluidos que entraron al pozo, sean circulados hasta la superficie y desalojados sin que haya una entrada adicional de fluidos o una pérdida por fracturamiento a un gasto reducido, variando las presiones mediante el uso de estranguladores.

Otra causa de las variaciones de la presión de fondo se debe al movimiento vertical de tubería o herramienta en el interior del pozo que hacen variar de manera muy significativa dicha presión. Cuando se saca tubería del pozo, la presión de fondo disminuye por efecto de succión y aumenta por efecto de empuje cuando la tubería se introduce. La magnitud de estas presiones que dependen entre otras cosas de las propiedades del fluido que llena el pozo, de la geometría del agujero y de la velocidad de movimiento de las tuberías. En la Fig. 20 se muestra un gráfico de la variación de la presión de fondo cuando se está metiendo tubería al pozo.

Dado que la presión de fondo es importante durante la ocurrencia, desarrollo y control de un brote, se llevará a cabo en el diseño del pozo escuela un sistema que permitiera medir directa y continuamente dicha presión, para poder evaluar con exactitud su comportamiento antes, durante y después de la ocurrencia y control de un brote artificial.

La medición directa de la presión de fondo permite que los modelos matemáticos utilizados para simular la ocurrencia de un brote sean probados y ajustados, con exactitud los efectos del estrangulamiento del flujo en la superficie así como el movimiento de las tuberías dentro del pozo, la presencia de

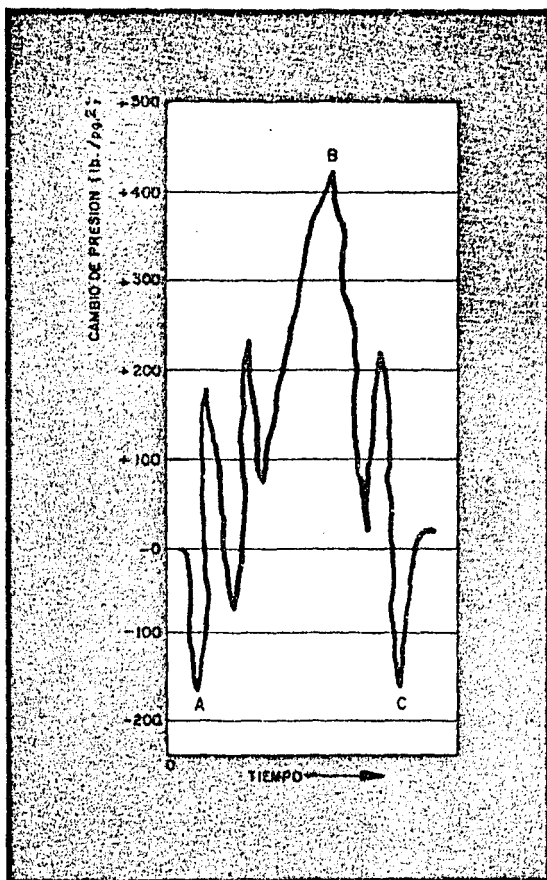


FIG. 20 VARIACION DE LA PRESION DEL FONDO
AL INTRODUCIR TUBERIA

un sistema de medición servirá para simular la fractura de las formaciones expuestas así como para medir directamente la densidad equivalente de circulación y otros parámetros. Además evaluar a los alumnos en el entrenamiento de detección y control de un brote.

El sistema para registrar en forma continua la presión de fondo del pozo, cuenta con un registrador electrónico de presión y temperatura que se instala en el fondo del pozo, y envía continuamente a la superficie las señales correspondientes.

Los elementos que constituyen el sistema de registro se enumeran a continuación y se pueden apreciar en los diagramas de las figuras 21 y 22

- 1) Tubería de registro.
- 2) Niple de asiento.
- 3) Mandril
- 4) Sonda de registro.
- 5) Cable de registro.
- 6) Colgador del cable de registro.
- 7) Conexión superficial.
- 8) Convertidor de señales

La tubería de registro cuyas características son iguales a la tubería de producción de la línea de inyección constituyen el medio a través del cual, se podrá recuperar y reinstalar la sonda de registro sin necesidad de mover el aparejo de trabajo.

El niple de asiento irá instalado en el primer tramo de la tubería de regis-

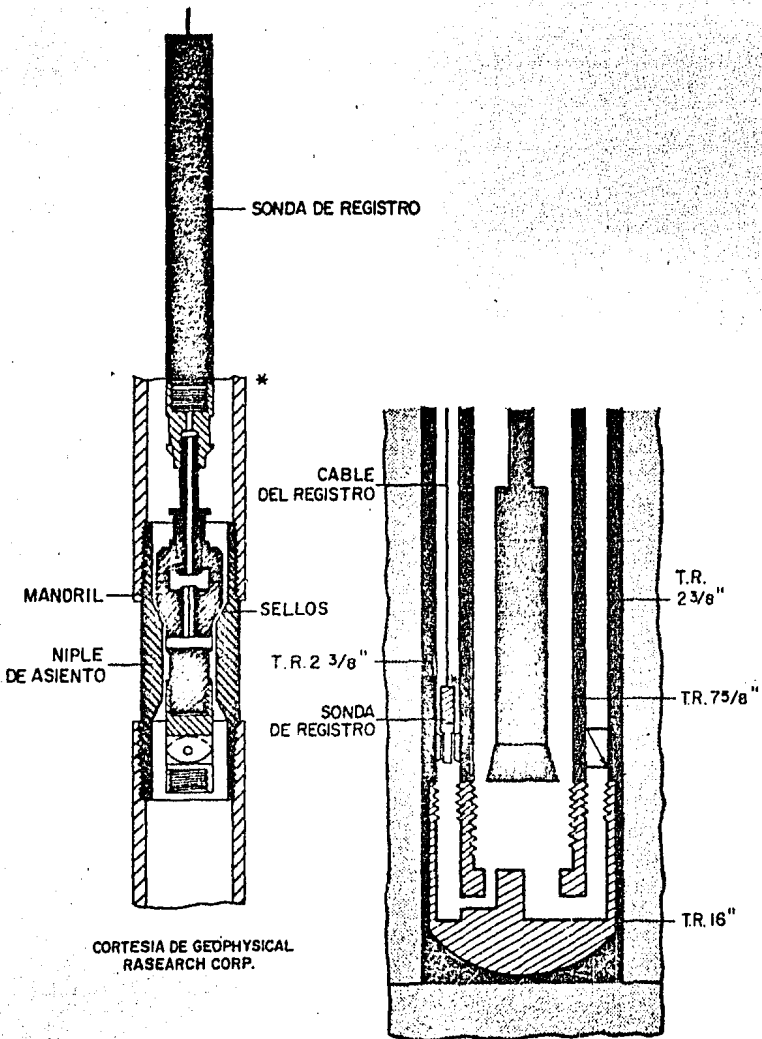


FIG. 21 UBICACION Y DETALLE DEL REGISTRADOR DE PRESION DE FONDO

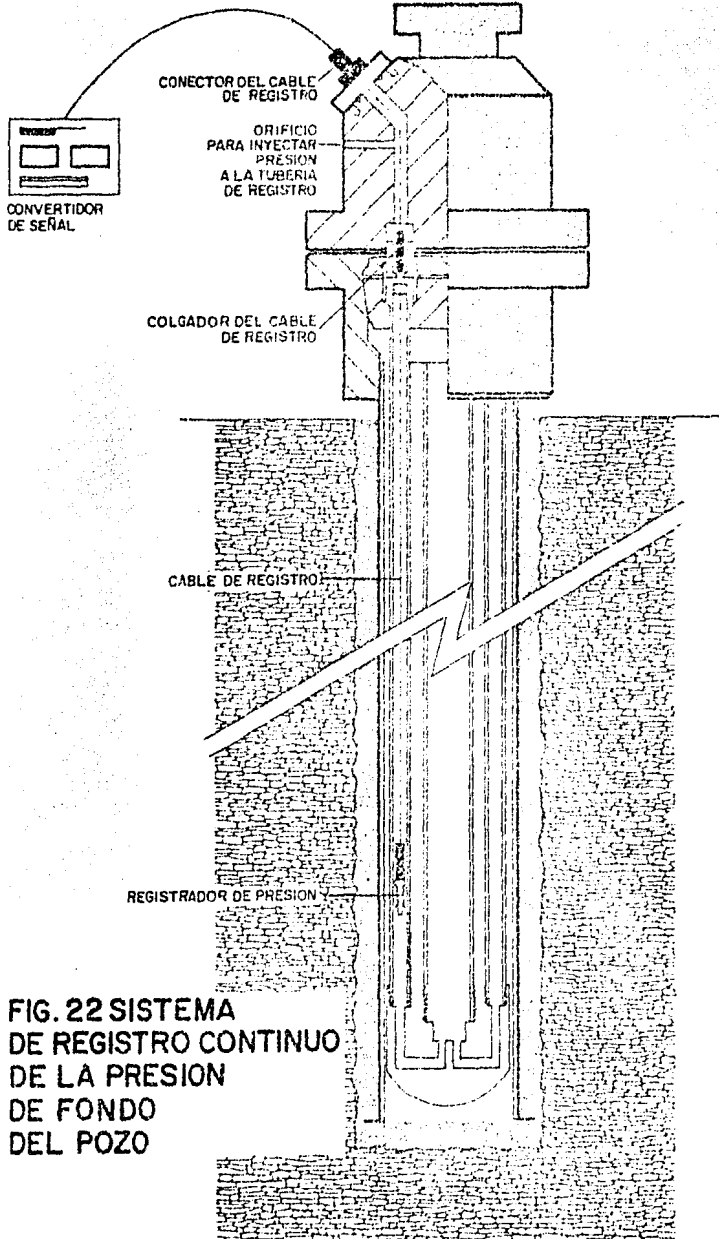


FIG. 22 SISTEMA DE REGISTRO CONTINUO DE LA PRESION DE FONDO DEL POZO

tro que tiene como función asegurar la posición de la sonda de registro cerca del fondo del pozo,

El mandril, como se puede ver en la figura 21 va roscado a la sonda de registro; y se acopla en el niple de asiento para fijar la posición del registrador para lograr la sujeción es necesario aplicar presión, represionado con un fluido en la línea para mantenerlo sobre su niple de asiento, y así crear el sello con una presión mayor a la que se encuentra en la tubería de trabajo, logrando aislar la presión de fondo de la presión hidrostática del fluido contenido en la tubería de registro, con el fin de que la sonda registre únicamente las presiones generadas por cualquier operación en el fondo del pozo de los fluidos contenidos en la tubería de trabajo.

La sonda de registro que medirá la presión de fondo es, en términos generales, un registrador electrónico que cuenta con dos osciladores de alta frecuencia que responden a las variaciones de presión y temperatura con un transductor de presión constituido por: un diafragma metálico que se mueve bajo la influencia de la presión y por un compensador de temperatura que minimiza el efecto de los cambios de temperatura. Las especificaciones de la sonda se presentan en la tabla 3.

El registrador estará conectado con un cable eléctrico de registro que tendrá dos funciones: la primera de ellas será transmitir energía a la sonda de registro y llevar las señales de presión y temperatura a la superficie y la segunda, es recuperar todo el conjunto de medición con el fin de repararlo o darle mantenimiento, sin tener que mover el aparejo de trabajo.

Es un cable común de registro de un solo conductor. Las especificaciones del cable se muestran en la Tabla 4.

Además los dos elementos con el colgador del cable de registro y el conector superficial cuyas funciones son, la del primero de ellos el soportar el peso del cable que irá colocando justo en el cabezal del pozo; el segundo es el enlace entre la sonda de registro y los controles de la superficie (panel de control de la sonda y convertidor de señales) ubicado en la parte superior del carrete de inyección y registro figura 22.

T A B L A 3.- ESPECIFICACIONES DEL REGISTRADOR DE PRESION.

Presión máxima de trabajo.....	350 kg/cm ² (5000 lb/pg ²)
Temperatura máxima de trabajo.....	150°C (300°F)
Precisión.....	±0.317 kg/cm ² (±4.5 lb/pg ²)
Requerimientos de energía.....	10 Ma a 12 volts
Dimensiones: Diámetro.....	31.75 mm (1.25 pg)
Longitud.....	330.2 mm (13 pg)
Peso.....	0.9 kg (2 lb)

T A B L A 4.- ESPECIFICACIONES DEL CABLE DE REGISTRO.

Diámetro.....	5.56 mm (7/32 pg)
Peso.....	138 kg/km (93 lb/1000 pies)
Rango de temperatura.....	-68° a 200°C (-90° a 390°F)
Resistencia.....	2320 kg (5120 lb)
Mínimo radio de curvatura.....	152.4 mm (6 pg)
Rango de voltaje.....	1000 volts rms.

CAPITULO V

EQUIPO SUPERFICIAL DE CONTROL DEL POZO MODELO

En la selección del arreglo y especificaciones del conjunto de preventores, de las líneas de control y del múltiple de estrangulación, así como para diseñar el cabezal y el carrete de inyección que en conjunto constituyen el equipo superficial de control del pozo, se tomaron en consideración los siguientes puntos:

- a) Diámetro de la tubería receptora, el arreglo y diámetros de las tuberías que conforman el aparejo de trabajo del pozo.
- b) Presiones máximas que serán generadas en el sistema.
- c) Tipo y número de prácticas que se realizarán en el pozo.
- d) Arreglos de preventores recomendados por la API, así como los arreglos utilizados en México al perforar zonas con problemas de alta presión. Esto con el fin de que el personal sea adiestrado con un equipo igual al que trabaja en el campo.
- e) Recomendaciones de la norma API-RP53A sobre el equipo para prevención de brotes.

CONJUNTO DE PREVENTORES,

El arreglo del conjunto de preventores para el pozo escuela permite realizar prácticas en las que se presenten problemas especiales durante la ocurrencia o control de un brote, que tengan que ser solucionados con el intercambio o la reparación de los elementos del conjunto de preventores.

El arreglo se muestra en la Fig. 23 y se describe a continuación de abajo hacia arriba con la terminología propia del personal operativo.

- I. Preventor sencillo de arietes de 7 1/16"-5000, doble brida.
- II. Carrete de perforación de doble brida, de 7 1/16"-5000 y dos salidas late-

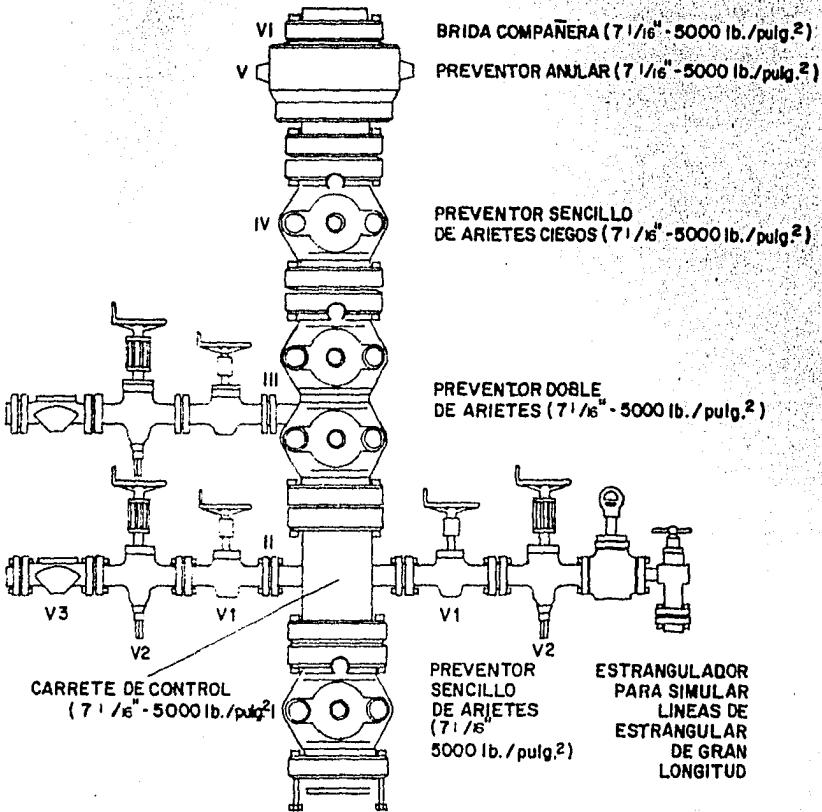


FIG. 23 CONJUNTO DE PREVENTORES DEL POZO ESCUELA

rales de 3" con bridas de 3 1/8"-5000, la salida lateral derecha a la que se conectará la línea de estrangular está dotada con dos válvulas de 3 1/8"-5000. La primera de ellas de izquierda a derecha (válvula V1) es una válvula de compuerta de paso completo y doble brida, la otra (válvula V2) es una válvula también de compuerta y doble brida pero con operador hidráulico a control remoto. La salida lateral izquierda a la que se conectará la línea de matar cuenta con tres válvulas de 3 1/8"-5000. Las dos primeras válvulas de derecha a izquierda son iguales a las válvulas V1 y V2 de la salida lateral derecha y la válvula del extremo izquierdo es una válvula de contrapresión (check) de doble brida, cuya función es permitir el paso de fluidos hacia el pozo y evitar el flujo en sentido contrario.

III Preventor doble de arietes, doble brida de 7 1/16"-5000 con dos salidas laterales de 3" y bridas de 3 1/8"-5000 para instalar un juego de válvulas igual al de la salida lateral izquierda del carrito de perforación.

IV Preventor sencillo de arietes ciegos, doble brida, de 7 1/16"-5000.

V Preventor anular de 7 1/16"-5000 con brida inferior y espárragos roscados en la parte superior, ambos extremos con ranuras para recibir anillos metálicos.

VI Brida compañera de 7 1/16"-5000 con adaptación en su parte superior para soldar tubería de 7 5/8".

Algunas de las operaciones a realizar con el arreglo antes descrito:

- 1) Reciprocación la tubería.
- 2) Meter tubería a presión hasta el fondo del pozo.
- 3) Si hay fugas en las conexiones arriba de la rotaria, la T.P. se podrá suspender en los arietes inferiores del preventor doble y cerrar el ciego para circular.

- 4) Cerrar los arietes inferiores para reparar fugas en el carrete de perforación o en cualquiera de los preventores superiores,
- 5) Cerrando los arietes ciegos se puede usar la línea de estrangular.

LINEA DE MATAR Y ESTRANGULAR

Las líneas de matar y estrangular son líneas de 3"-5000 en las que se evitarán al máximo el uso de conexiones roscadas y los cambios bruscos de dirección. Como una alternativa se propone que en vez de tubería de acero se utilice manguera para alta presión.

LINEA DE LLENAR

La línea de llenar será en realidad (como se aprecia en la Fig. 24) una doble línea de 3" para baja presión que se conectará al nipple campana de 7 5/8" por debajo de la línea de descarga. La función de esta doble línea (que se explica con más detalle en la parte correspondiente al tanque de viajes) será llenar el pozo o el tanque de viajes. Este sistema evitará utilizar la línea de matar como línea de llenado del tanque.

MÚLTIPLE DE ESTRANGULACION

La Fig. 25 muestra un diagrama del múltiple de estrangulación. Es un múltiple de 3"-5000 que cuenta con dos estranguladores variables normales (C y D) con orificio máximo de 2" y con un estrangulador variable de control hidráulico (E) que podrá ser operado a control remoto desde dos consolas, una localizada en el piso de trabajo y otra cerca del múltiple de estrangulación. El múltiple cuenta también con un manómetro hidráulico (corte A-A') que registrará y transmitirá la presión anular hasta las consolas de control. Las descargas de los estranguladores conducen a una cámara de amortiguación con tapones de choque y 3 salidas, dos hacia la atmósfera y una hacia el separador de gas.

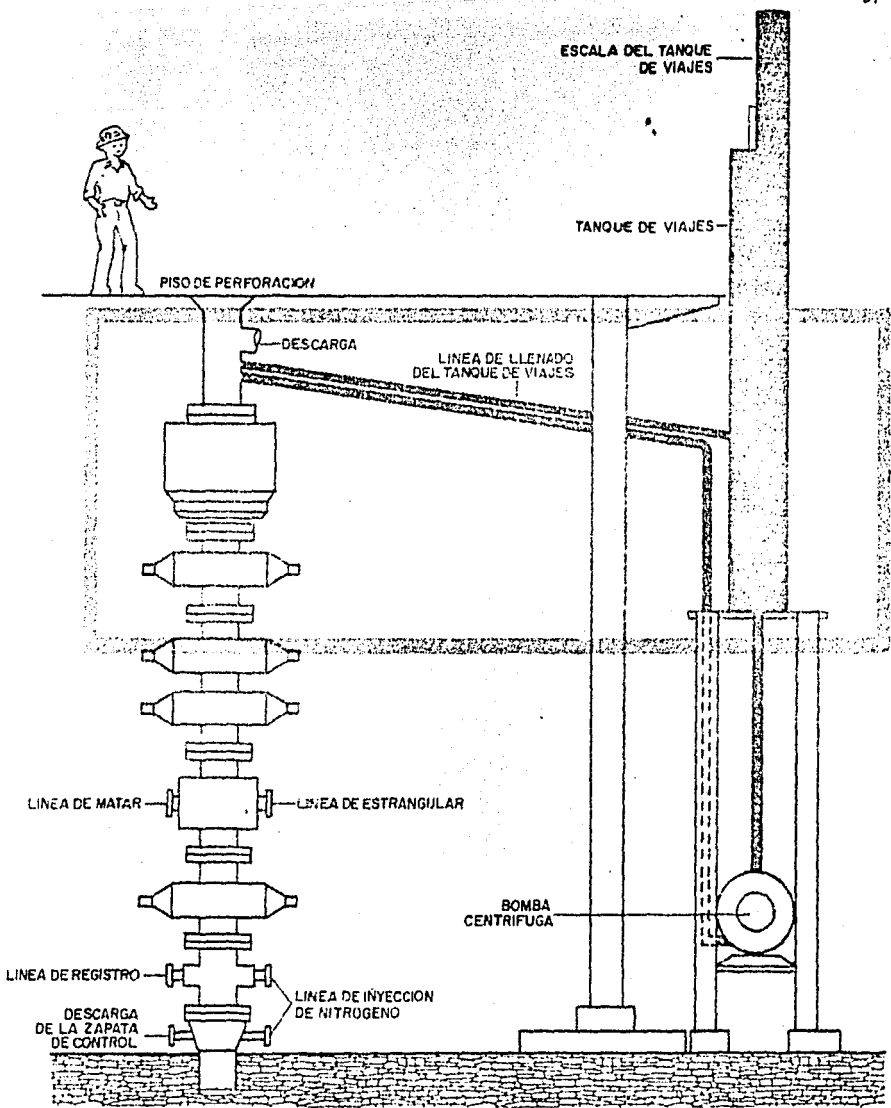


FIG. 24 LINEA DE LLENAR EL POZO

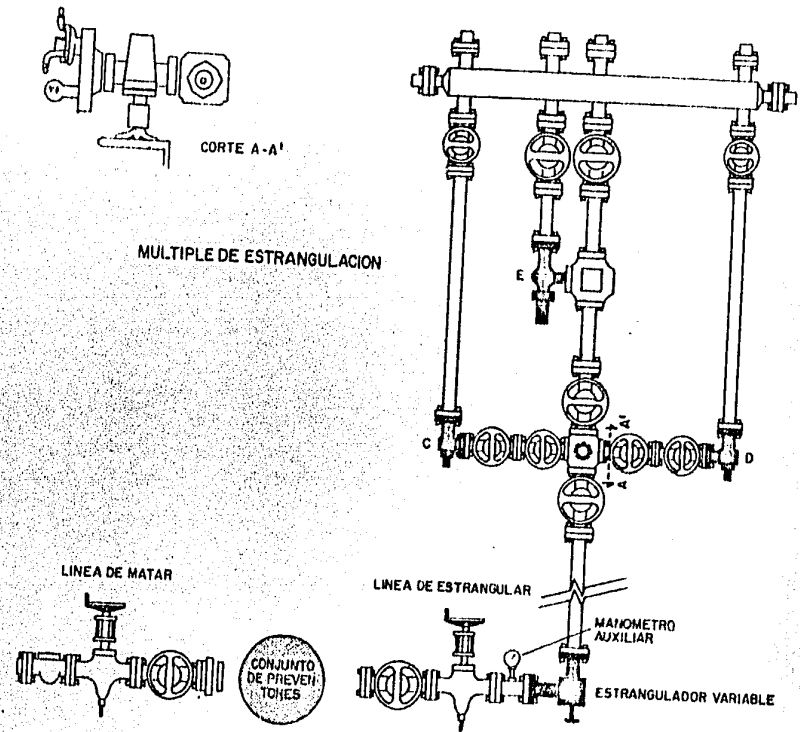


FIG. 25 MÚLTIPLE DE ESTRANGULACION DEL POZO ESCUELA

CABEZAL DEL POZO Y CARRETE DE INYECCION Y REGISTRO,

Debido a la configuración del pozo, el cabezal de la tubería receptora y el carrete de inyección y registro constituyen la parte más importante del equipo superficial (ver Fíg. 26).

CABEZAL DEL POZO

En el cabezal del pozo o cabezal de la tubería receptora se colgará el aparato de trabajo y se sentará el carrete de inyección y registro. Este cabezal de diseño especial de 21 1/4"-5000 tendrá en su parte inferior rosca butress hembra de 16" para roscar la tubería receptora, además contará con dos salidas laterales de 2 1/16"-5000.

Como se puede apreciar en la Fig. 27, las salidas laterales del cabezal se conectarán las líneas de la zapata de control, a través de las cuales se podrán regular las condiciones del espacio anular de la tubería receptora para reproducir la fractura en la zapata. La salida lateral izquierda será la -descarga por donde fluyan al exterior los fluidos producto de una pérdida de circulación o de un brote, de hecho será el elemento de control de la zapata. Esta salida deberá contar de derecha a izquierda (ver Fig. 28) con una válvula de compuerta de paso completo, doble brida de 2 1/16"-5000, una "T" integral de 2 1/16" x 2 1/16" x 3 1/8" en donde se instalará un manómetro hidráulico, un estrangulador automático de perforación de 3"-5000 con orificio máximo de 2" y bridas de 3 1/8"-5000, una brida adaptadora y una válvula de compuerta de paso completo, con operador hidráulico y doble brida de 2 1/16"-5000. La primera válvula de compuerta permanecerá siempre abierta y sólo se cerrará para reparar cualquiera de los elementos que le siguen, sin necesidad de descargar el pozo; el manómetro hidráulico enviará la señal de presión en la zapata al cuarto de instrumentos; el estrangulador automático regulará el paso de fluidos a través de la descarga y permitirá establecer la "magnitud" de la fractura y la válvula de compuerta con operador hidráulico será la que controle la ocurrencia de la fractura en la zapata. Por otro lado, tanto el estrangulador como la válvula con operador hidráulico serán operados a control remoto por el instructor desde el cuarto de instrumentos. La salida lateral dere

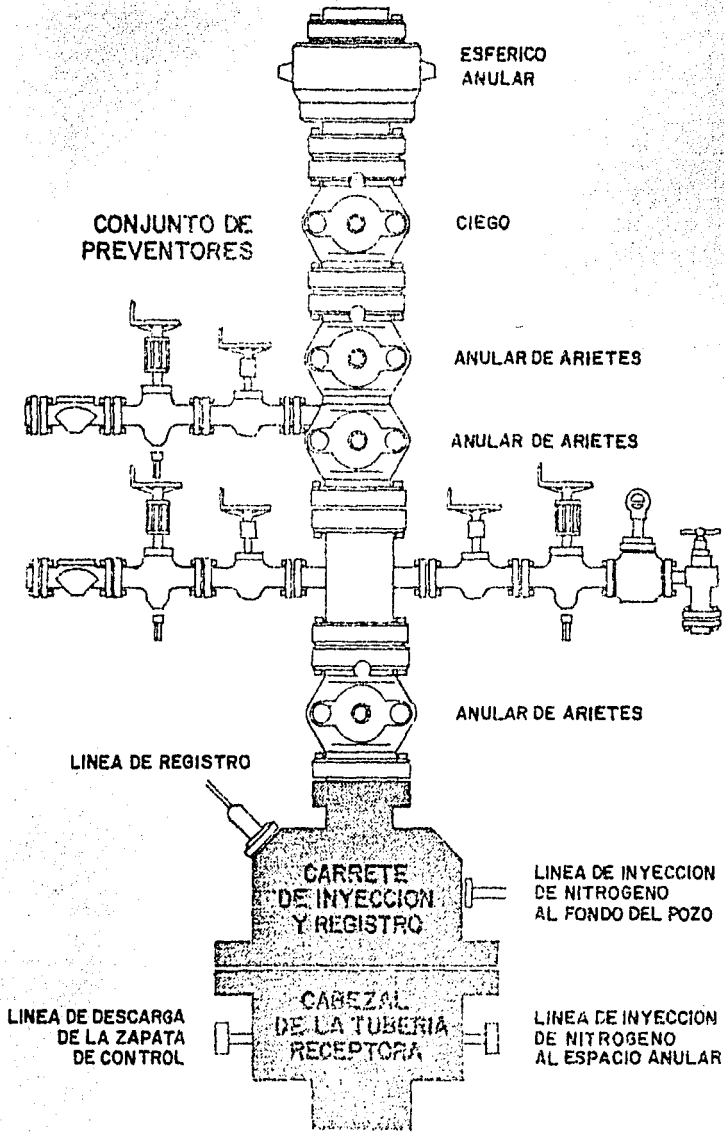


FIG. 26 EQUIPO SUPERFICIAL DE CONTROL DEL POZO

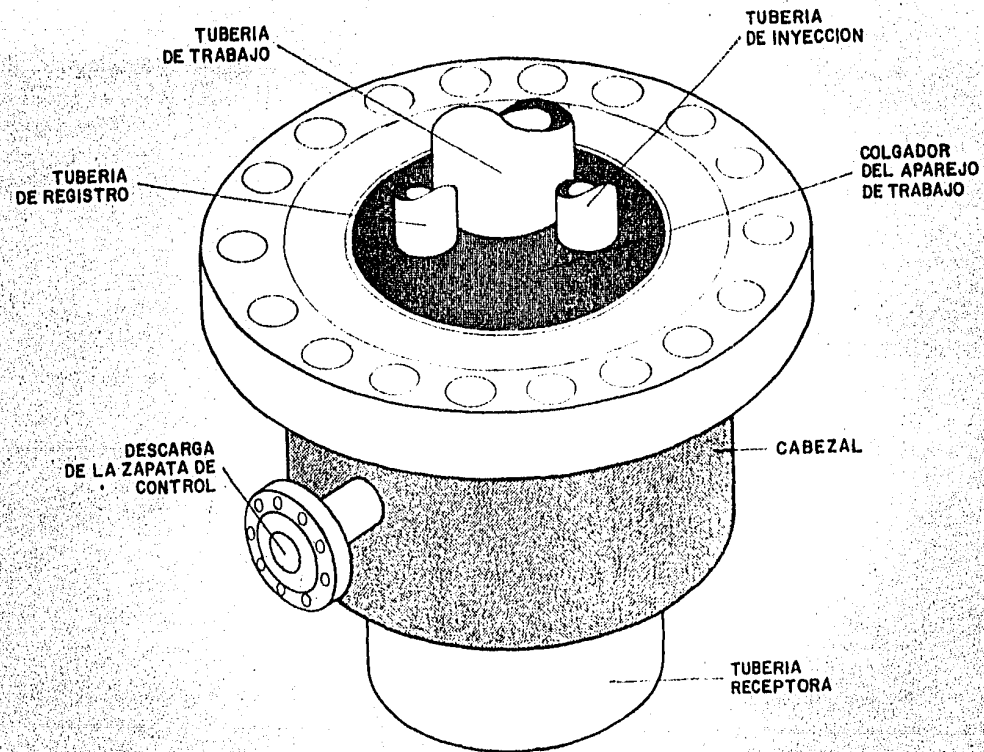


FIG. 27 CABEZAL DEL POZO

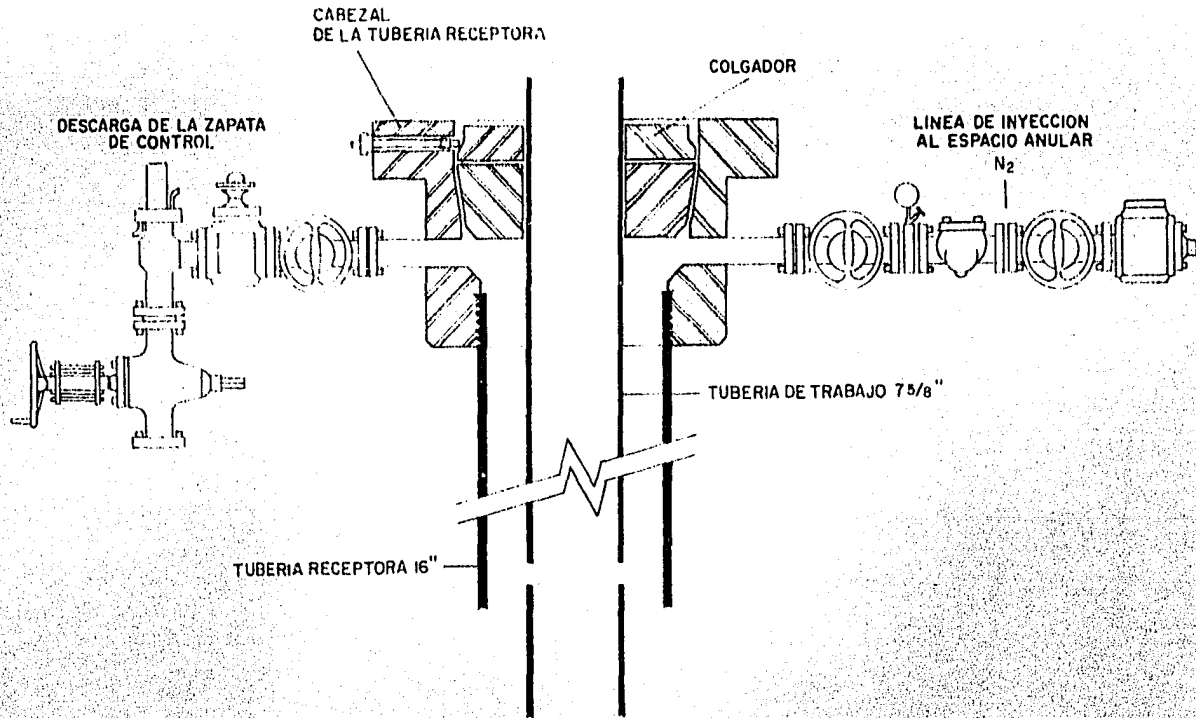


FIG. 28 LINEAS DE LA ZAPATA DE CONTROL

cha será la conexión de la línea de inyección de nitrógeno, por donde se controlará el nivel de los fluidos en el espacio anular antes o después del control de un brote. Esta línea que de hecho es una ramificación de la línea principal de inyección de nitrógeno, deberá contar de izquierda a derecha, como se muestra en la Fig. 28, con una válvula de compuerta de paso completo, un manómetro, una válvula de contrapresión, otra válvula de compuerta y una "T" integral todo con bridas de 2 1/16"-5000.

COLGADOR DEL APAREJO DE TRABAJO.

La forma en que se colocará el aparejo de trabajo en el cabezal del pozo de la tubería receptora, sin modificar o alterar la capacidad del pozo y reproducir las condiciones reales del brote, fue necesario modificar a un arreglo especial de las tuberías del aparejo de trabajo y de utilizar un cabezal de mayor diámetro. Las tuberías del aparejo de trabajo, se sacaron de centro tal y como se ilustra en la Fig. 29, donde se puede ver que la tubería de trabajo está descentrada 3 pulgadas del cabezal de la tubería receptora y las tuberías de registro e inyección están cargadas hacia un extremo del cabezal, con el fin de tener un espacio adecuado para colocar el colgador del aparejo.

La modificación del arreglo de las tuberías del aparejo hizo necesario que la zapata de unión fuera rediseñada, quedando tal y como se muestra en la Fig. 30. Al tener el colgador y la zapata de unión de la misma distribución de las tuberías del aparejo quedarán totalmente "verticales" y se podrán bajar flejadas al pozo sin ningún problema como se muestra en la Fig. 31. Aquí hay que hacer notar que para lograr que las tuberías se vayan separando hasta lograr el espaciamiento necesario para ser colgadas, los últimos cinco o seis tramos no deberán flejarse.

CARRETE DE INYECCION Y REGISTRO.

Este carrete que va instalado sobre el cabezal de la tubería receptora (ver la Fig. 32), tiene un diseño especial y su función es proporcionar la conexión entre las líneas superficiales de registro e inyección de nitrógeno y las tuberías correspondientes del aparejo de trabajo, además de ser la base en donde se senta

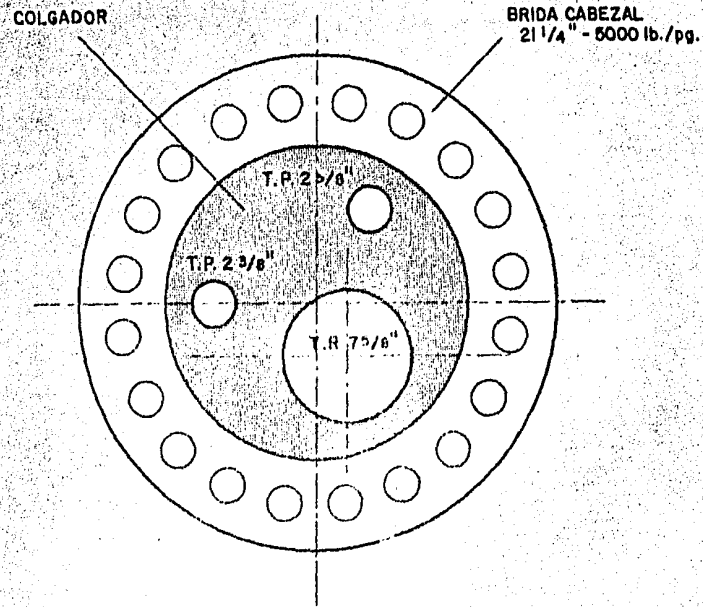
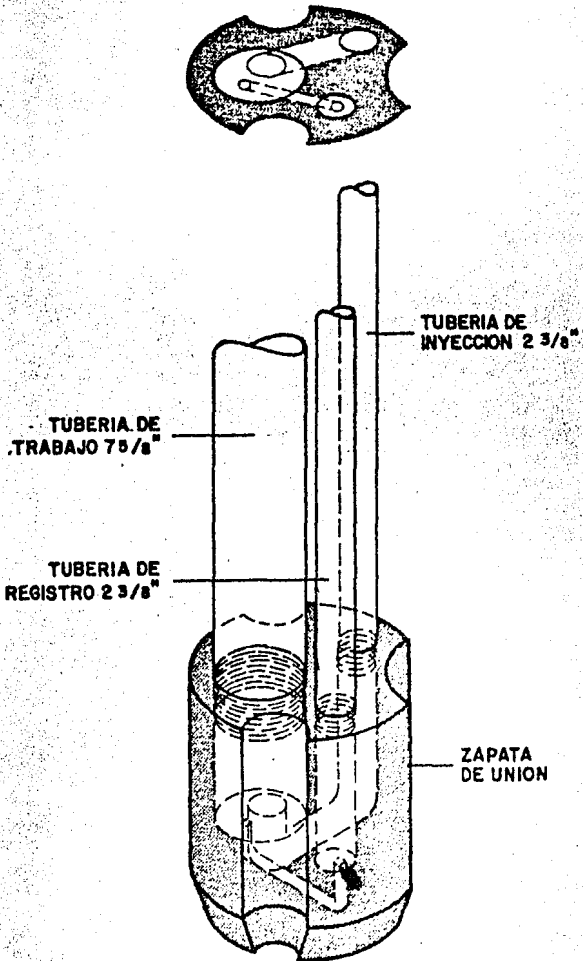
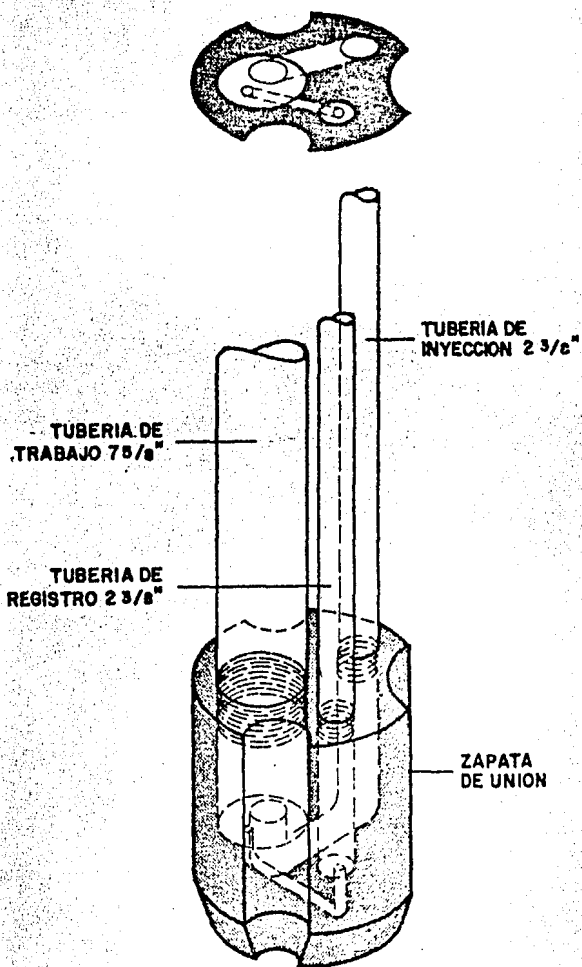


FIG. 29 CORTE EN PLANTA DEL CABEZAL DEL POZO ESCUELA



**FIG.30 DETALLE DE LA ZAPATA DE UNION
DEL APAREJO DE TRABAJO**



**FIG.30 DETALLE DE LA ZAPATA DE UNION
DEL APAREJO DE TRABAJO**

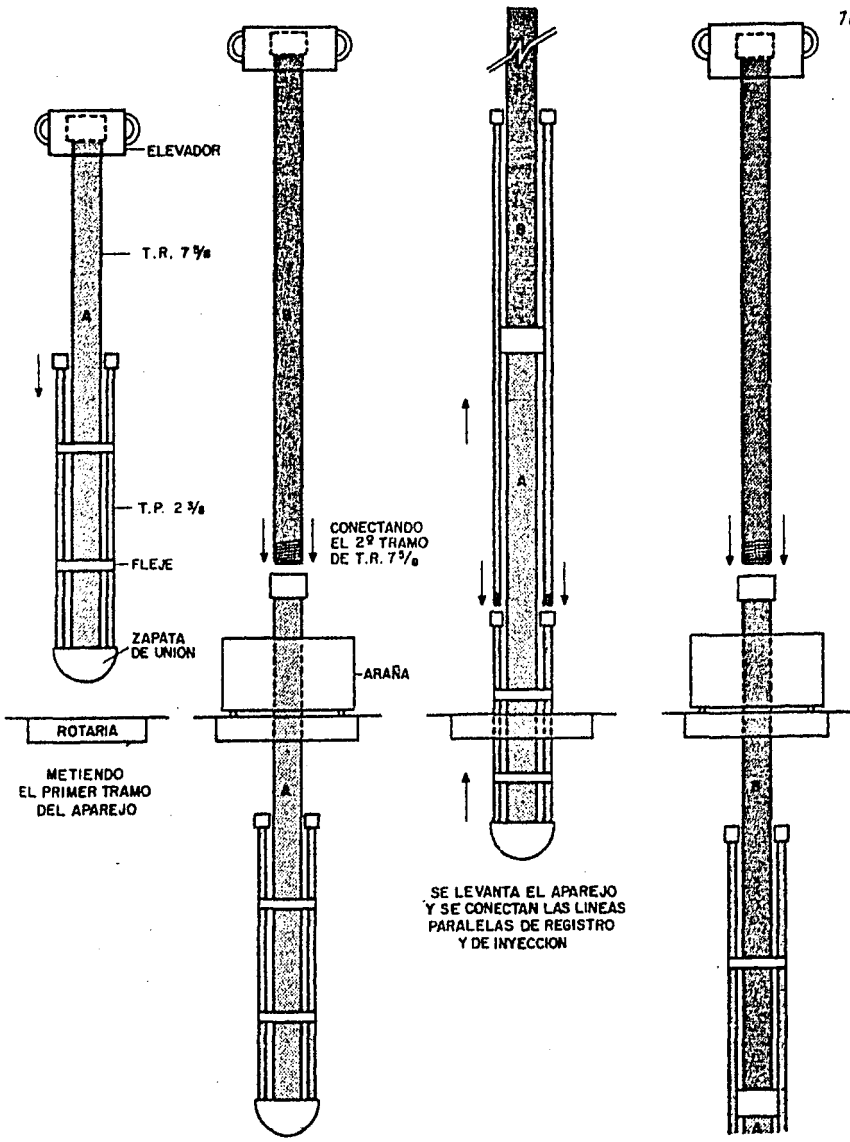


FIG. 31.
PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA CORRER EL APAREJO
DE TRABAJO DEL POZO ESCUELA

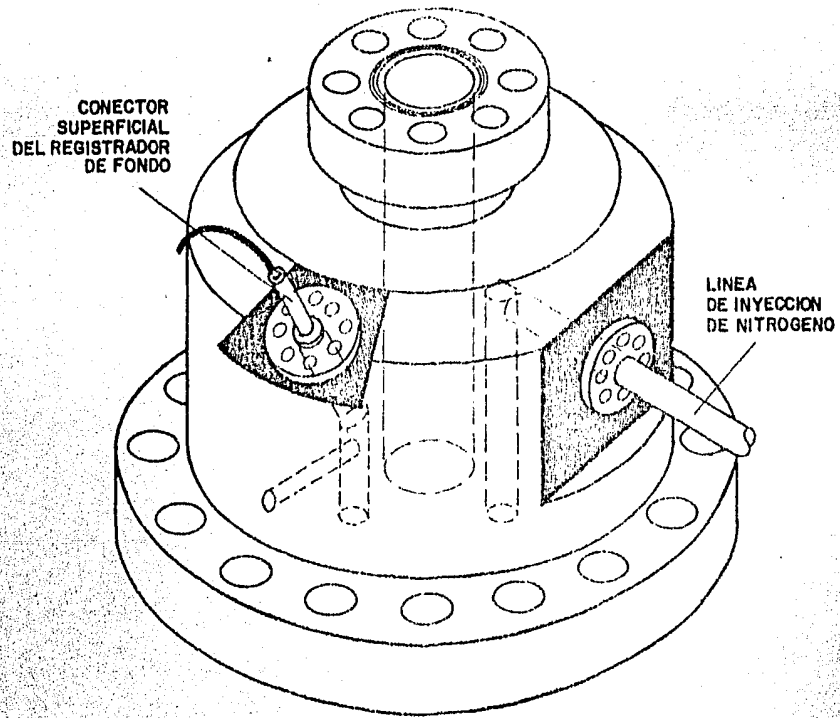


FIG. 32
CARRETE DE INYECCION Y REGISTRO

rá el conjunto de preventores (ver Fig. 33),

Debido al descentramiento de la tubería de trabajo, la brida superior del carrete está descentrada con respecto a la brida inferior, para lograr que el eje del conjunto de preventores, coincida con el eje de la tubería de trabajo. Es importante mencionar que la carga sobre el cabezal no sea uniforme, el peso de los preventores y su posición no representará ningún problema de esfuerzos adicionales que puedan afectar la capacidad y seguridad del conjunto cabezal-carrete-preventores. En la Fig. 34 se pueden observar un corte de planta y un corte vertical del conjunto cabezal-carrete.

La Fig. 35 muestra un corte vertical de la sección de inyección del carrete, en donde se puede observar la manera en que se logrará la conexión de la línea superficial de inyección de nitrógeno con la tubería correspondiente del aparejo de trabajo y la Fig. 36 muestra el corte vertical de la sección de registro donde se aprecia el conector superficial, el orificio de 1" a través del cual se inyectará presión a la tubería de registro para mantener en posición a la sonda y lograr un sello perfecto entre el mandril y el niple de asiento.

Debido a que sobre el carrete de inyección y registro se sentará el conjunto de preventores, éste funcionará también como un carrete adaptador. En la parte superior, tiene brida de 7 1/16"-5000 y en la parte inferior brida de 2 1/4"-5000. Un corte en planta del carrete se muestra en la Fig. 37, donde también se incluye la posición de las tuberías del aparejo de trabajo.

El conjunto cabezal-carrete, permitirá que la inyección de nitrógeno pueda ser selectiva, ya sea a través de la tubería de inyección para generar un brote a 1500 m de profundidad o a través del espacio anular para controlar el nivel del fluido o para inyectar nitrógeno por los orificios de la tubería de trabajo a 500 m de profundidad. El múltiple superficial de inyección se muestra en la Fig. 38.

Un diagrama completo del equipo superficial de control del pozo escuela se muestra en la Fig. 39. En él se incluye el arreglo del múltiple de la tubería ver-

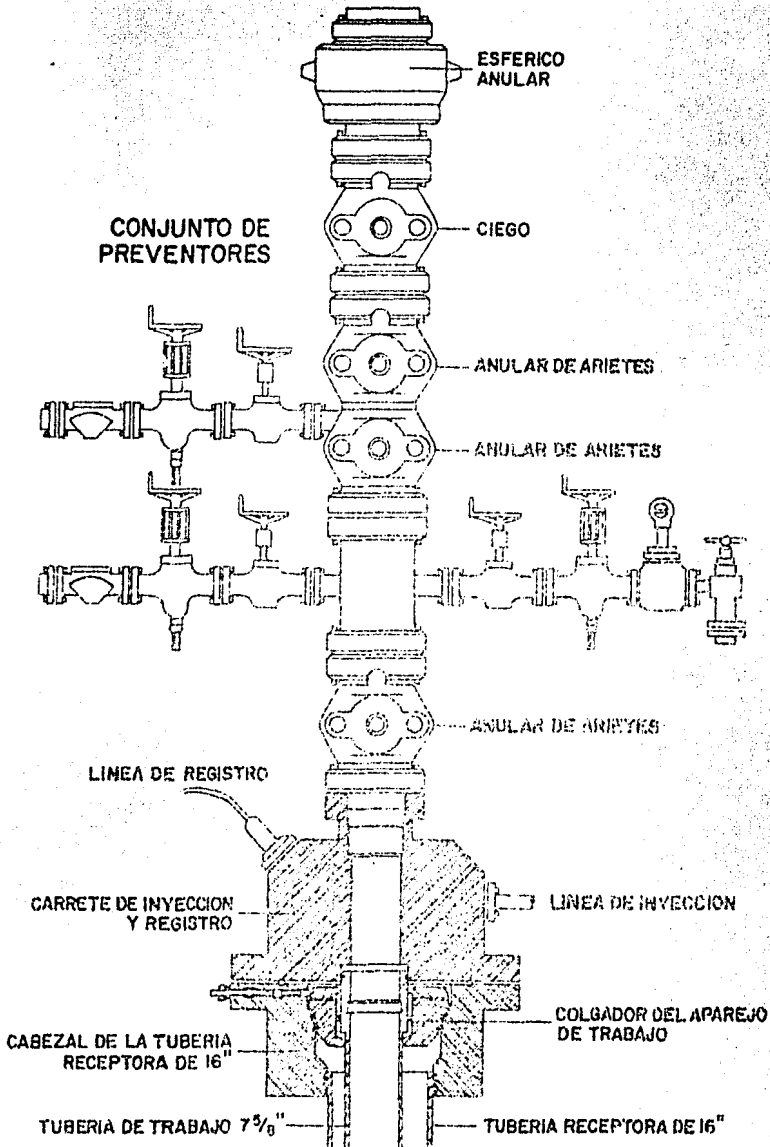


FIG. 33 CONJUNTO DE PREVENTORES, CARRETE Y CABEZAL

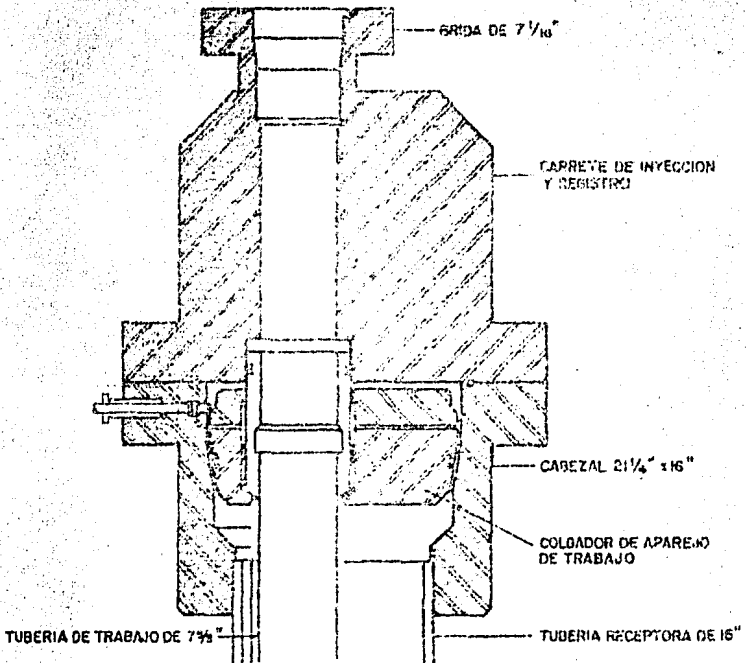
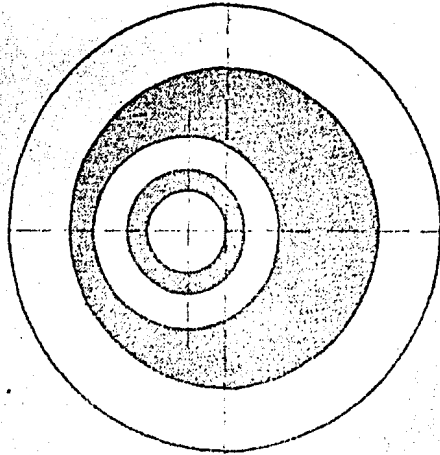


FIG. 34 VISTA DE PLANTA Y CORTE VERTICAL DEL CONJUNTO CABEZAL-CARRETE

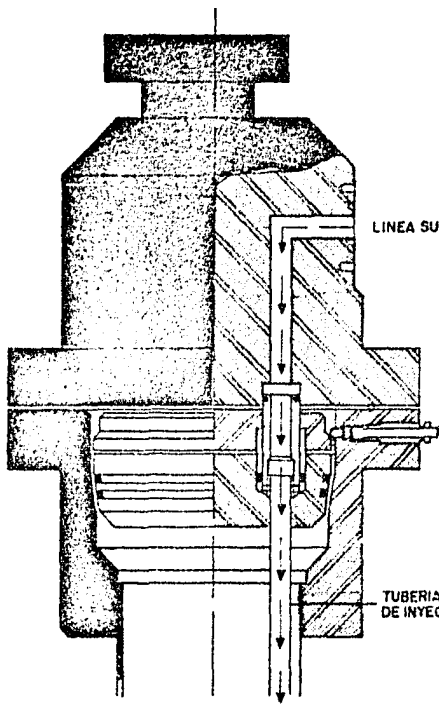


FIG. 35
CORTE VERTICAL
DE LA SECCION DE
INYECCION DE
NITROGENO

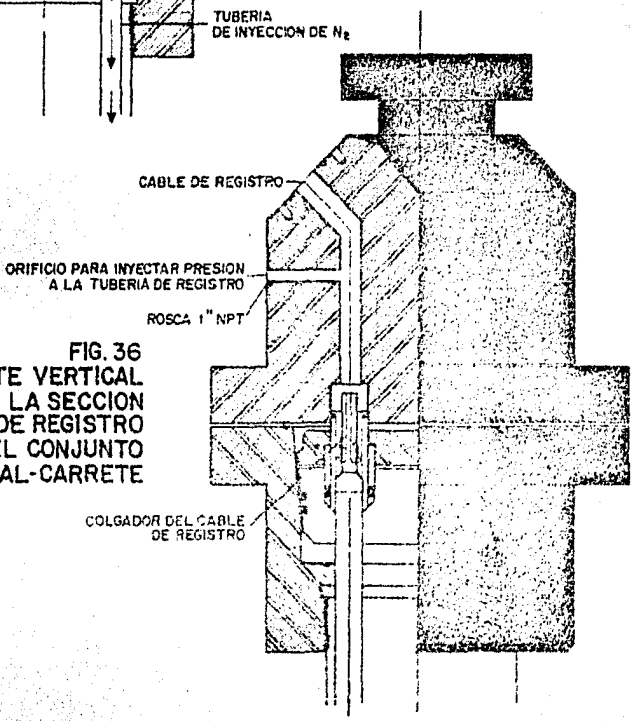


FIG. 36
CORTE VERTICAL
DE LA SECCION
DE REGISTRO
DEL CONJUNTO
CABEZAL-CARRETE

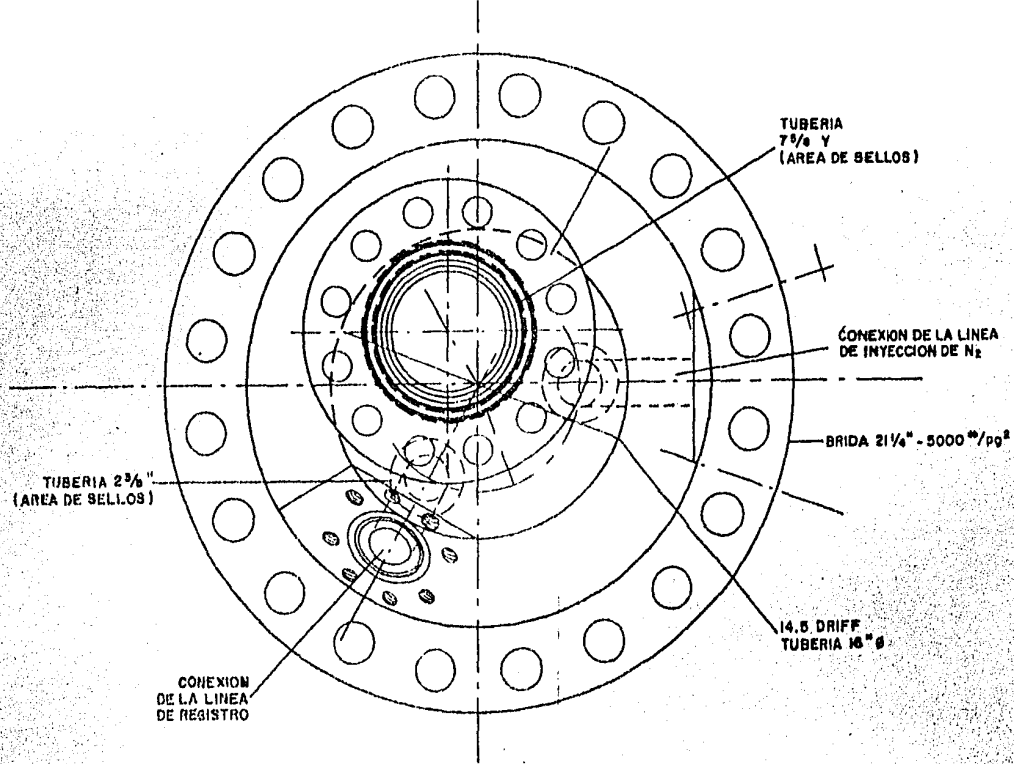


FIG. 37 PLANTA DEL CARRETE DE INYECCION Y REGISTRO

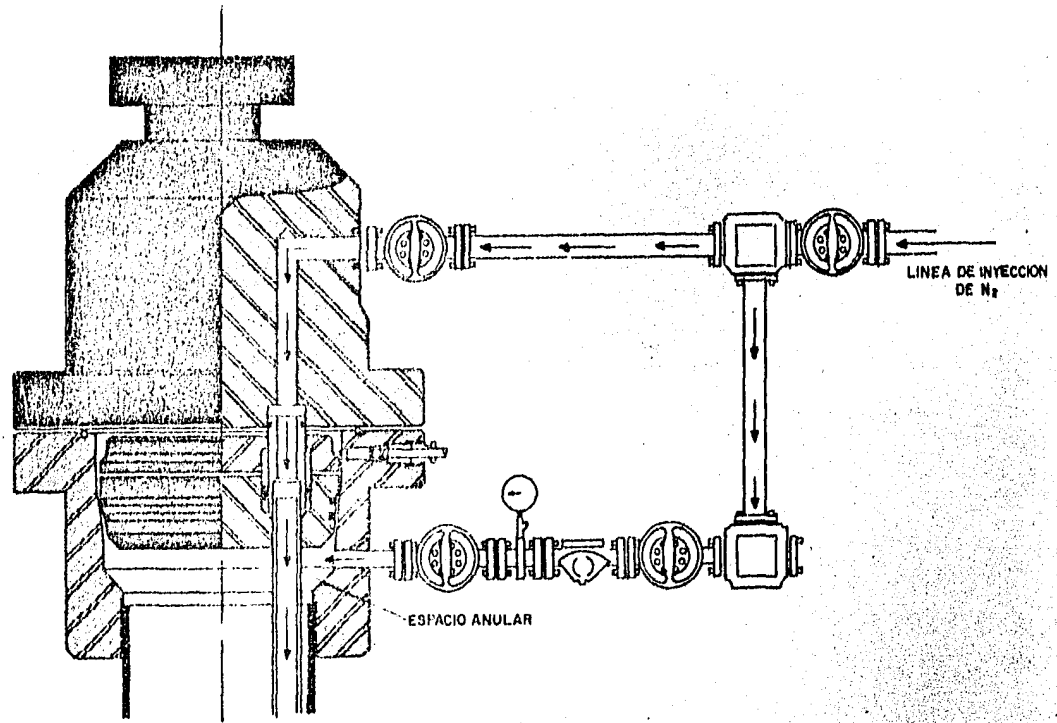


FIG. 38 MULTIPLE DE INYECCION DE NITROGENO

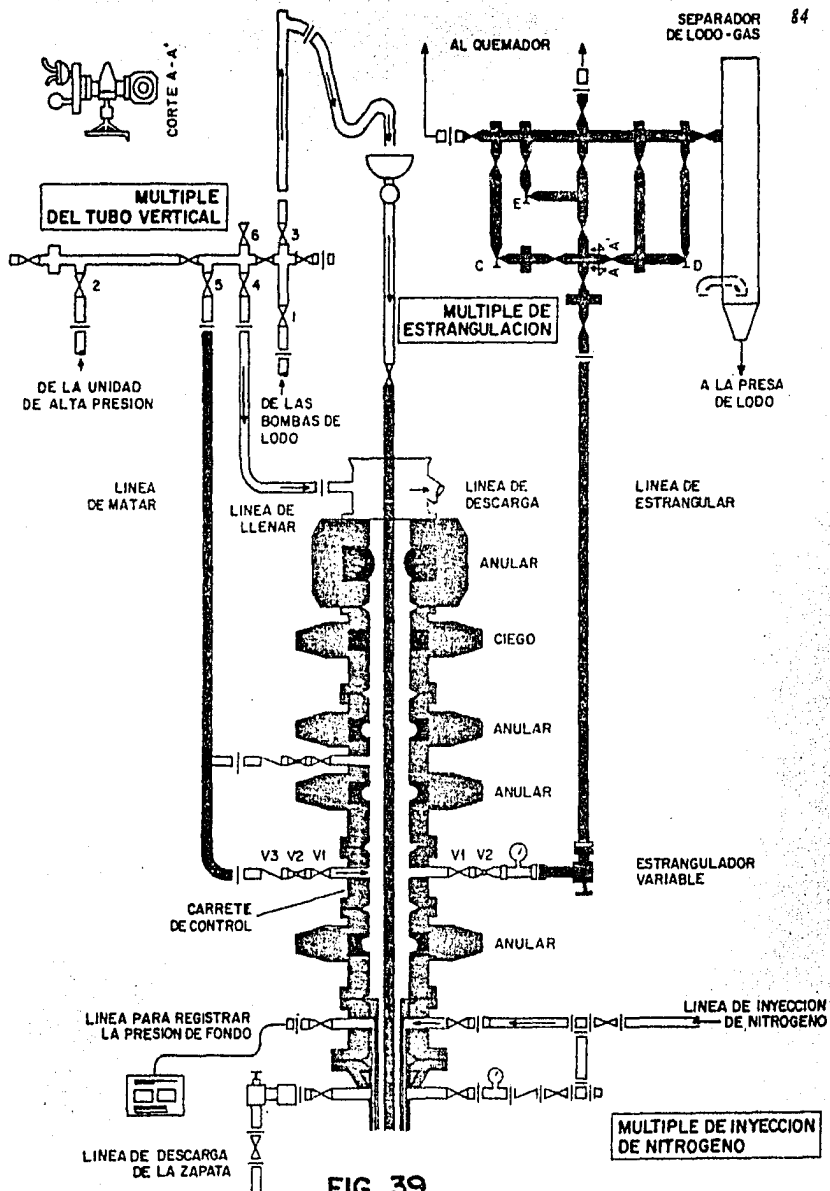


FIG. 39
SISTEMA SUPERFICIAL DE CONTROL DEL POZO ESCUELA
(DIAGRAMA COMPLETO)

tical que cuenta con tres entradas, cuatro salidas, un manómetro que registra la presión en T.P. y un dispositivo hidráulico o neumático que transmite la presión a los manómetros instalados en las consolas de control. De las tres entradas, una (1) recibe fluido de las bombas de lodo, otra (2) de la unidad de alta presión y otra está disponible para cualquier uso. De las 4 salidas, (3) conduce al tubo vertical, otra (4) a la línea de llenar, otra más (5) a la línea de matar y una cuarta (6) para cualquier uso.

CAPITULO VI

DISTRIBUCION SUPERFICIAL DEL POZO ESCUELA

El equipo superficial del pozo escuela, incluye todos y cada uno de los elementos presentes en un equipo convencional de perforación o reparación de pozos, por lo que su distribución en la superficie es igual a la de éstos, con la salvedad de que en el pozo escuela se está considerando una distribución más segura y eficiente, para los fines del pozo. En las figuras 40 y 41 se muestra la distribución general del equipo en las que se puede observar la ubicación del equipo de inyección de nitrógeno, del cuarto de instrumentos o centro de operación del pozo y del salón donde se impartirá la parte teórica del curso de control de brotes. Es importante destacar la posición del tanque de viajes que a continuación se describe ampliamente, del múltiple de estrangulación y de las consolas de control del estrangulador automático del múltiple. El área que ocupará el equipo será de aproximadamente una hectárea.

TANQUE DE VIAJES DEL POZO ESCUELA.

El conocimiento del volumen necesario de fluido para llenar el pozo es determinante para evitar o detectar la ocurrencia de un brote durante un viaje. Esto se debe, a que cuando se saca una sarta de tubería y no se cuida el llenado del pozo con un volumen de fluido equivalente al volumen del acero extraído, el nivel del fluido en el espacio anular se abate y origina una disminución en la presión hidrostática.

Por otro lado, si se introduce la sarta en el pozo y no se lleva a cabo un control del volumen de fluido desplazado se provocará la ocurrencia de un brote, siempre y cuando el gradiente de perforación sea mayor a la presión hidrostática.

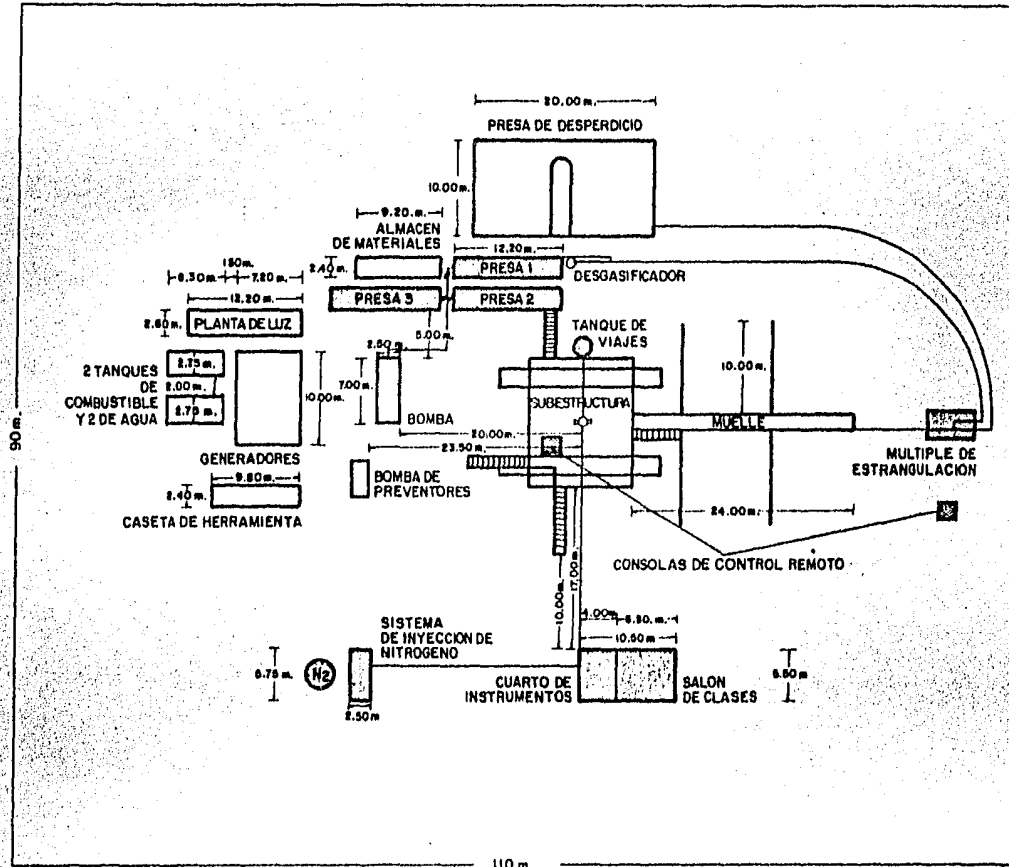


FIG. 40 DISTRIBUCION GENERAL DEL EQUIPO SUPERFICIAL DEL POZO ESCUELA

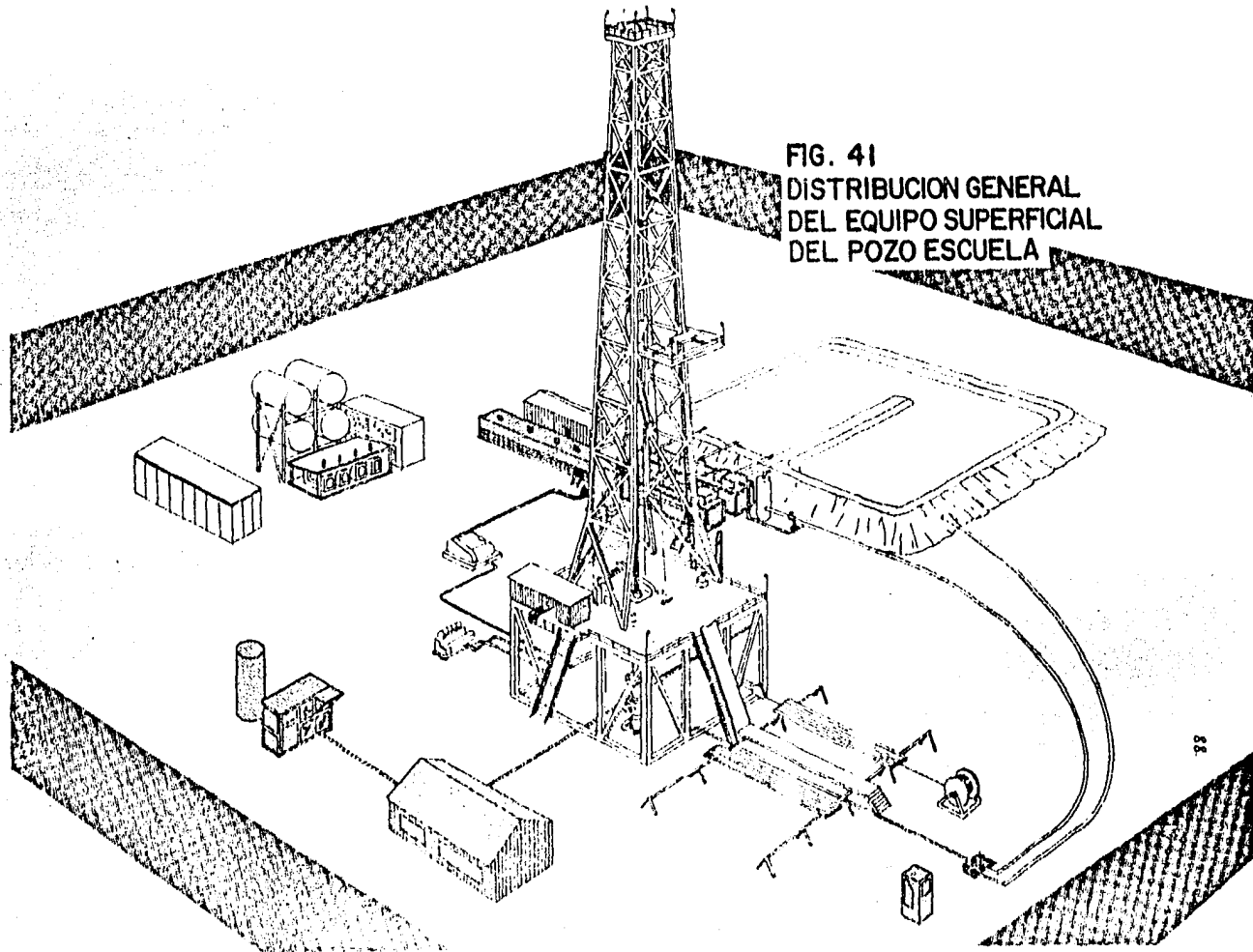


FIG. 41
DISTRIBUCION GENERAL
DEL EQUIPO SUPERFICIAL
DEL POZO ESCUELA

La forma de medir los volúmenes mencionados, es a través de los totalizadores automáticos de volumen; sin embargo como no todos los equipos cuentan con esos sistemas de medición, estos además presentarían fallas con cierta frecuencia y de un costo elevado, por esto existe la alternativa de utilizar los tanques de viajes que son de más bajo costo.

Los tanques de viajes, miden en forma directa mediante un recipiente pequeño, el volumen de fluido necesario y suficiente para llenar el pozo cuando se está sacando tubería y el volumen que desplaza la tubería cuando se mete al pozo. Cualquier variación de los volúmenes de llenado o desplazamiento puede interpretarse, según sea el caso, como una pérdida de fluido o un brote. De ahí su utilidad para familiarizar al personal con el uso del mismo, se muestran en la Fig. 42 y 43.

Cuando se mete tubería al pozo, el tanque se irá llenando por gravedad y registrará mediante el flotador con la varilla que se ilustran en la Fig. 43. Al sacar tubería del pozo, una bomba centrífuga tomará fluido del tanque de viajes e irá llenando al pozo y a su vez registrando el nivel de fluido en el tanque, con lo cual se podrá conocer en todo momento el volumen de fluido que fue bombeado al pozo. El tanque cuenta con un sistema que evita que al estar llenando el pozo el nivel de fluido llegue hasta la descarga y fluya hacia las presas, de tal manera que cuando el pozo esté lleno el fluido recirculará al tanque de viajes y así mantener el nivel. Un diagrama general de las conexiones del tanque de viajes del pozo escuela se muestra en la Fig. 44.

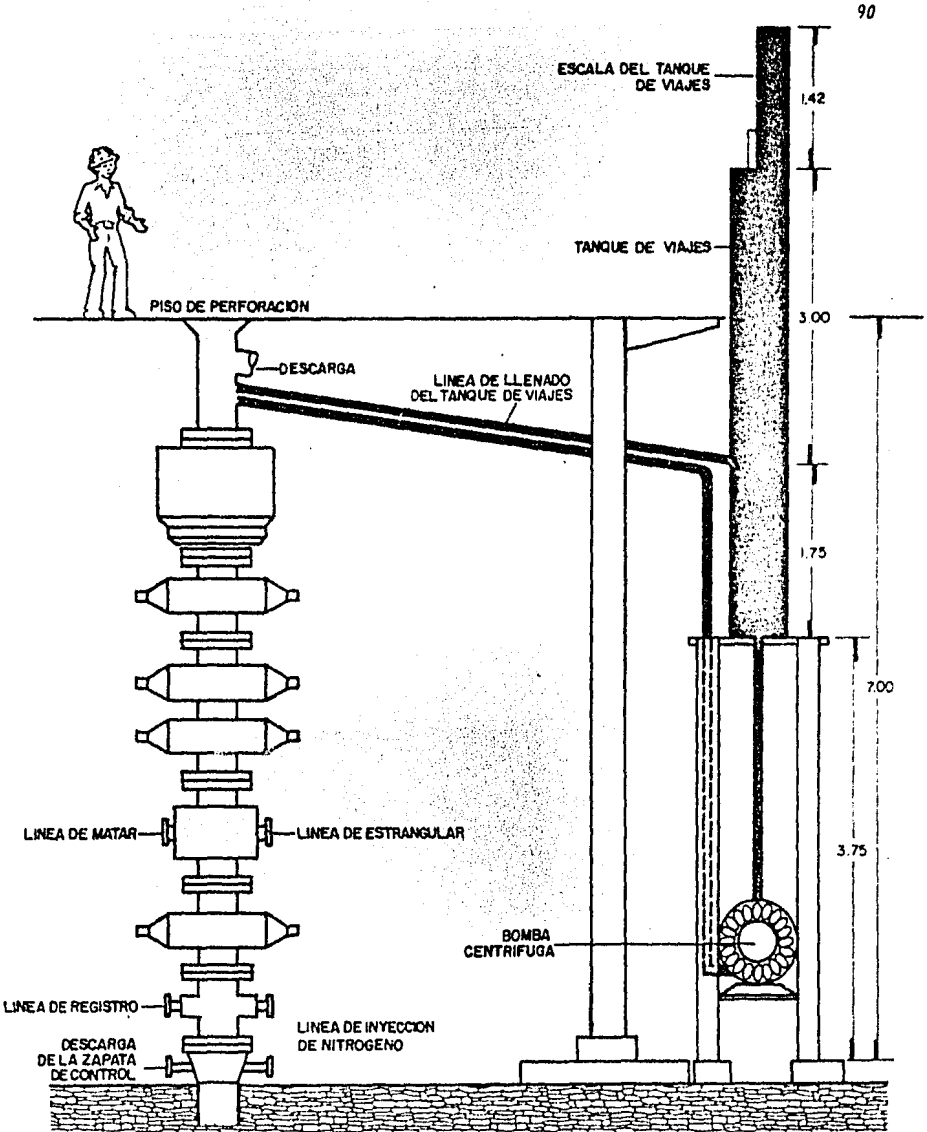


FIG. 42 TANQUE DE VIAJES DEL POZO ESCUELA

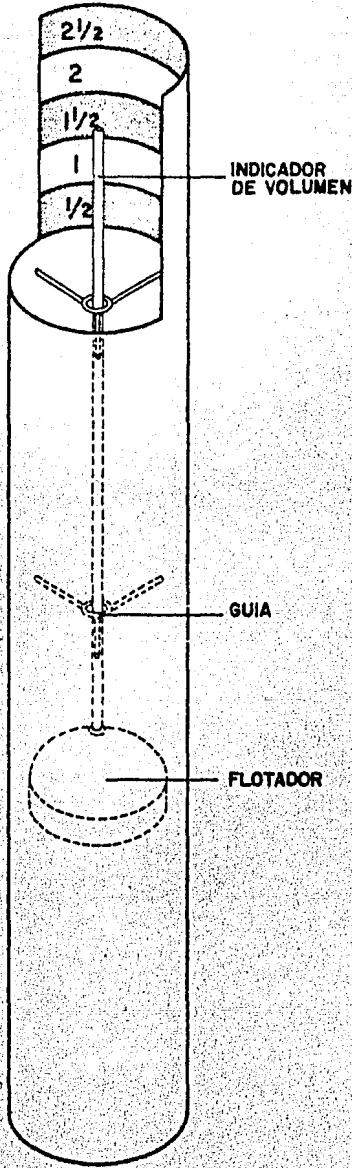


FIG.43 TANQUE DE VIAJES (DETALLE) DEL POZO ESCUELA

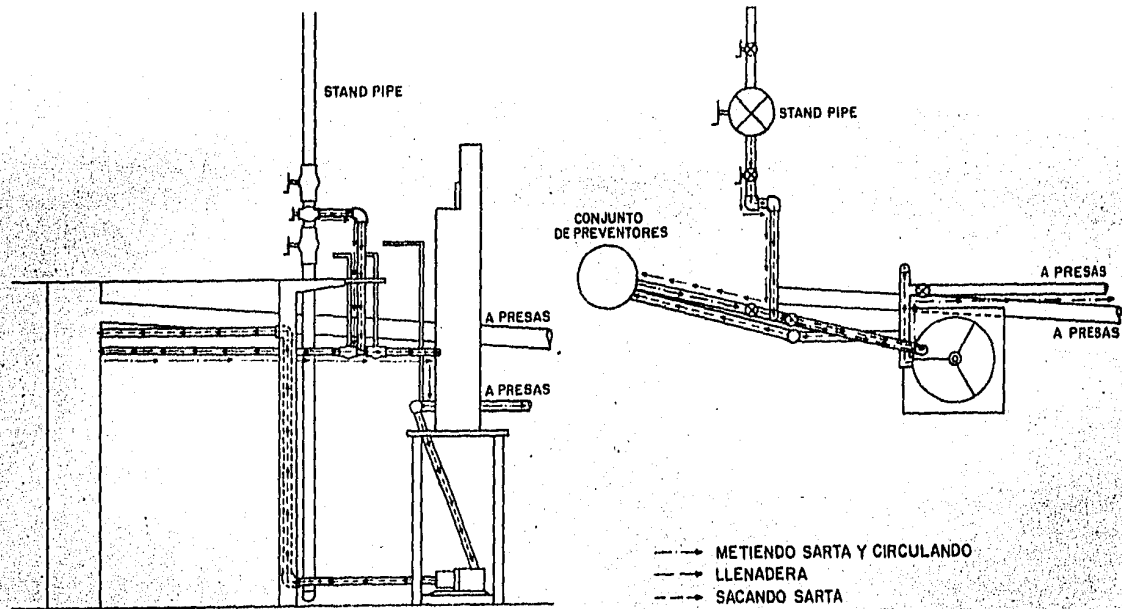


FIG.44 CIRCUITO DE FLUJO DEL TANQUE DE VIAJES

VII
CONCLUSIONES

1. El diseño en general satisface los objetivos definidos tales como la simulación del brote, la pérdida de circulación por las diferentes causas, fractura en la zapata y del brote subterráneo.
2. Con el registro continuo de la presión de fondo, se podrán ajustar, confirmar o desarrollar nuevos modelos matemáticos.
3. Permitirá analizar el comportamiento del gas, bajo diferentes circunstancias.
4. Se llevará a cabo el adiestramiento de personal en la detección y control de brotes, así como el control y manejo adecuado del equipo superficial y la aplicación de las técnicas nuevas o existentes en el control de brotes.
5. El pozo podrá servir de laboratorio para probar y desarrollar nuevas técnicas a emplearse en perforación, reparación, terminación y producción de pozos.
6. La configuración del pozo escuela es versátil, ya que tanto el conjunto de trabajo como sus elementos principales son recuperables y de fácil recuperación, mantenimiento o de modificaciones futuras para mejorar los sistemas que integran el pozo.
7. El empleo del pozo escuela en la capacitación del personal que interviene en las operaciones de perforación y reparación de pozos, disminuirá el riesgo de descontrol.

BIBLIOGRAFIA

1. CORTES Ponce de León Elías Alfredo,
"Control de Brotes en Perforación de Pozos"
Manual del Curso Impartido a personal de PEMEX - IMP
Subdirección de Tecnología de Explotación, México - 1982.
2. CRAFT, HOLDEN and Graves
"Well Design, Drilling and Production"
Prentice Hall
3. DE LA TORRE Aldape Emilio
"Arreglo y Pruebas Hidráulicas de un Sistema
Superficial para la Prevención de Reventones"
IMP - Subdirección de Tecnología de Explotación,
México, 1981.
4. DE LA TORRE Aldape Emilio
Traducción "Temas Selectos sobre Control de Brotes"
IMP Subdirección de Tecnología de Explotación,
México, 1981
5. GOINS, W. C. Jr.
"Blowout Prevention"
Gulf Publishing Company Houston Texas
Second Printing - 1973
6. O'Brien, T. B.
"Problemas en la Perforación de Pozos Profundos,
Causas y una Solución Posible"
Trabajo SPE-7850
7. PRESTON L. Moore
"Drilling Practices"
8. REHM
"Pressure Control in Drilling"
Serie de artículos publicados por la revista
Oil and Gas Journal
Ago. 14/69 y Feb. 16/70
9. ZUNIGA Puente Horacio
"Diseño y Estudio Analítico del Bombeo Neumático
Intermitente"
Universidad Nacional Autónoma de México
Fac. Ingeniería 1969

10

Universidad de Texas
Blowout Prevention Unidad III lección 3
División de Extensión Petrolera, Austin Texas.

A P E N D I C E S

A P E N D I C E A

CONDICIONES DE MÁXIMA PRESIÓN EN EL SISTEMA

Después de que se ha detectado un brote de gas y el pozo ha sido cerrado totalmente*, el gas que penetró tiende a viajar (por efectos de segregación - gravitacional) hacia la superficie, manteniendo su presión y volumen constantes. Cuando el gas llega a la superficie sin que se haya permitido su expansión, se establece la condición de máxima presión, en la cual la presión en la cabeza del pozo es igual a la presión de poro de la formación fluyente y la presión de fondo es el resultado de la adición de la presión en la cabeza, más la presión debida a la columna hidrostática (ver Fig. 1A).

Obviamente, esta condición puede también presentarse en el pozo escuela cuando después de generar un brote artificial, se cierre totalmente* el pozo; el nitrógeno inyectado tenderá a ir hacia la superficie incrementando paulatinamente la presión en el sistema, hasta alcanzar la condición de máxima presión cuando llegue a la cabeza del pozo, como se ve en la Fig. 2A.

La condición de máxima presión en el pozo, está determinada por la máxima densidad del fluido que se utilice para el control de un brote artificial, ya que la presión máxima de inyección de nitrógeno al fondo del pozo no deberá rebasar la presión hidrostática del fluido de control.

Entonces, considerando que la densidad máxima del fluido de control en el pozo escuela será de 1.4 g/cc, se tiene que la presión máxima de inyección o presión de formación" a 1500 m de profundidad será de 210 kg/cm^2 (2982 lb/pulg^2) y que las presiones máximas en los puntos críticos del sistema, cuando el nitrógeno alcance la cabeza del pozo sin expandirse, serán iguales a la presión de inyección o formación, más las presiones hidrostáticas generadas por los

* Cerrar totalmente el pozo implica que el estrangulador no opere en ningún momento.

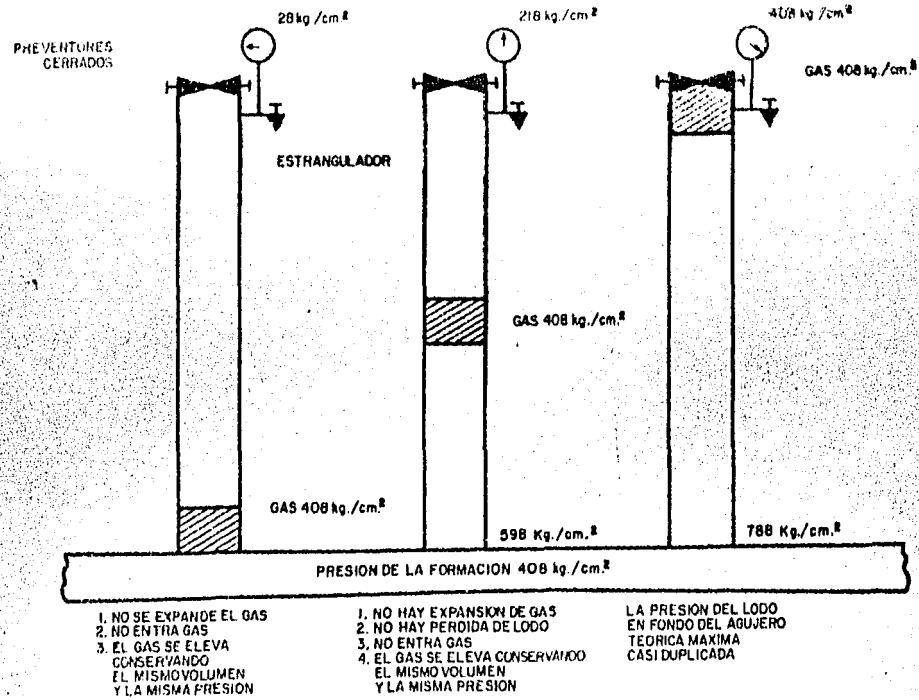


FIG.1A COMPORTAMIENTO DE LA PRESION DESPUES DE OCURRIR UN BROTE Y CERRAR EL POZO TOTALMENTE

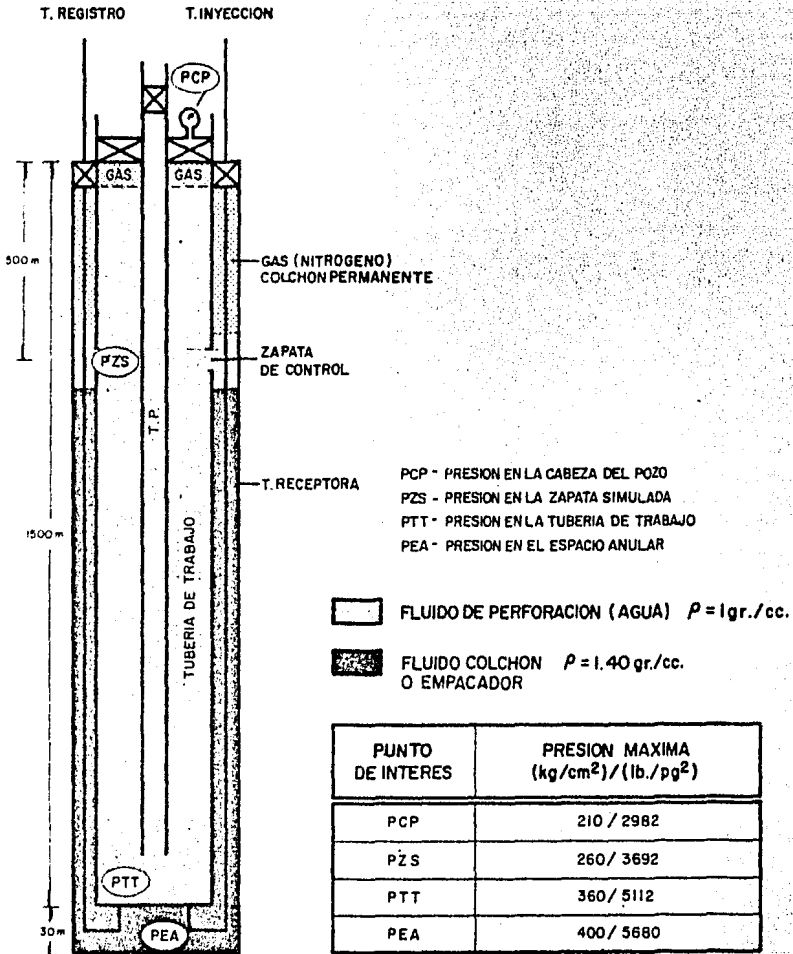


FIG.2A CONDICIONES DE MAXIMA PRESION EN EL SISTEMA

fluidos presentes abajo de la cabeza de gas. Así, cuando durante una práctica de control con el pozo lleno con agua, se genere un brote de 210 kg/cm^2 y se cierre total y permanentemente el pozo, las presiones máximas en los puntos críticos del sistema serán las siguientes:

a) Presión máxima en la zapata de control (PZC)

PZC = Presión máxima de inyección + Presión Hidrostática en la zapata de control

$$PZC = PMI + PHZ$$

Despreciando el volumen de agua desalojado durante el brote:

$$PHZ = \frac{1 \times 500}{10} = 50 \text{ kg/cm}^2$$

y:

$$PZC = 210 + 50 = 260 \text{ kg/cm}^2 \text{ (3692 lb/pulg}^2\text{)}$$

b) Presión máxima en el interior de la tubería de trabajo (PTT)

PTT = presión máxima de inyección + Presión hidrostática en el fondo de la tubería de trabajo

$$PTT = PMI + PHTT$$

$$PTT = 210 + \frac{1 \times 1500}{10} = 360 \text{ kg/cm}^2 \text{ (5112 lb/pulg}^2\text{)}$$

Esta presión está calculada considerando que la tubería de trabajo está en el aire, es decir, que no se encuentra en el seno de un fluido. En realidad, la presión que actúa sobre la tubería de trabajo en las condiciones que aquí se analizan, es la presión diferencial entre la presión interna y la presión en el espacio anular. La presión en el espacio anular depende también de la presión máxima de inyección puesto que existe comunicación entre la tubería de trabajo y la tubería receptora, a través de los orificios de la zapata de con -

trol, por lo que la diferencial de presión estará dada por:

$$\Delta PTT = \text{presión máxima en el espacio anular} - \text{Presión máxima en el interior de la tubería de trabajo,}$$

$$\Delta PTT = PEA - PTT$$

c) PRESION MAXIMA EN EL ESPACIO ANULAR ENTRE LA TUBERIA RECEPTORA Y EL APAREJO DE TRABAJO (PEA)

$$PEA = \text{Presión máxima de inyección} + \text{Presión hidrostática en la } \bar{z}_a + \text{Presión hidrostática debida al fluido empa-cador en el espacio anular.}$$

$$PEA = PMI + PHZ + PHEA$$

$$PEA = 210 + 50 + \frac{1.4 \times 1000}{10}$$

$$PEA = 400 \text{ kg/cm}^2 \text{ (5680 lb/pulg}^2\text{)}$$

$$\therefore \Delta PTT = 400 - 360 = 40 \text{ kg/cm}^2 \text{ (568 lb/pulg}^2\text{)}$$

Una segunda condición de máxima presión en el sistema, particularmente en la tubería de trabajo, se tendrá cuando después de producirse un brote, los preventores no se cerraran y el pozo fluyera libremente a la superficie. En estas circunstancias, la tubería de trabajo se vaciaría y soportaría la presión hidrostática de los fluidos contenidos en el espacio anular que sería aproximadamente 190 kg/cm^2 (2698 lb/pulg^2), si se le considera lleno de agua hasta la zapata y de fluido empa-cador de 1.4 gr/cc de la zapata hasta el fondo.

Una vez que se han definido las dos posibles condiciones de máxima presión en el sistema, es importante mencionar, que durante una operación de control normal, en la que la válvula que simula a la zapata esté calibrada para que abra una presión "de fractura" menor a la presión máxima es la zapata de control, la condición de máxima presión en el sistema por pozo cerrado nunca se alcanzará, ya que al igualarse o rebasarse la presión de fractura durante el tiempo que el pozo se mantenga cerrado, la válvula de la zapata se --

abrirá y relevará la presión en el sistema. Sin embargo, para el diseño del pozo se está tomando en cuenta una probable falla en el sistema de apertura de la válvula de la zapata y la muy remota posibilidad de que el pozo después de haber generado un brote, se cierre total y permanentemente.

A P E N D I C E B

CAIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA DE CIRCULACION DEL POZO

Para calcular las caídas de presión en el sistema de circulación de los diferentes diseños del pozo escuela, se utilizó el programa de cómputo MOD-5 de la División de Perforación del IMP, el cual utiliza los modelos de Binham, Ley de Potencias y Ley de Potencias con Punto de Cedencia para calcular las caídas de presión en el interior de la T.P., en la barrera y el espacio anular, así como en las conexiones superficiales del pozo.

A continuación, la Tabla B-1 muestra las caídas de presiones en las diferentes secciones del sistema de circulación propuesto, resultando en 23 kg/cm^2 (256 lb/pulg^2) y con un tiempo promedio de circulación de 33 minutos.

SECCIONES

INTERIOR T.P.	INTERIOR L.B.	EN LA BARRENA	ANULAR T.R. - T.P.	ANULAR T.R. - L.B.	TOTAL	TIEMPO DE CIRCULACION COMPLETA (min.)
Kg./cm. ²	Kg./cm. ²	Kg./cm. ²	Kg./cm. ²	Kg./cm. ²	Kg./cm. ²	
lb./pg. ²	lb./pg. ²	lb./pg. ²	lb./pg. ²	lb./pg. ²	lb./pg. ²	
16	3	1	2	1	23	33.25
227.3	42.6	14.2	28.4	14.2	326.6	

T.P. - TUBERIA DE PERFORACION
 T.R. - TUBERIA DE REVESTIMIENTO
 L.B. - LABRABARRENAS

* LAS CAIDAS DE PRESION SE CALCULARON CONSIDERANDO UN GASTO REDUCIDO DE CIRCULACION DE 250 gal/min Y AGUA COMO FLUIDO DE CIRCULACION

APENDICE BI. CAIDAS DE PRESION EN LA TUBERIA DE TRABAJO *

A P E N D I C E C

PERDIDA DE CIRCULACION A TRAVES DE LOS
ORIFICIOS DE LA ZAPATA DE CONTROL

La pérdida de circulación a través de los orificios de la zapata de control, se logrará gracias a la diferencia de alturas hidrostáticas entre el interior de la tubería de trabajo de 75/8" y el espacio anular de la tubería receptora de 16". Para estimar el tiempo mínimo que transcurrirá desde el momento en que se inicie la pérdida al abrir la válvula superficial de la zapata de control, hasta que cese por completo al igualarse la altura de las columnas hidrostáticas, se procedió mediante un programa de cómputo a establecer una función analítica en base a la capacidad de los espacios anulares y al diámetro y número de los orificios de la zapata de control.

Considerando que el gasto que pasará a través de los orificios está en función de la altura hidrostática en la tubería de trabajo.

$$Q = C_o A_o \sqrt{2gh}$$

- Q - gasto (m³/seg)
- C_o - coeficiente de orificio
- A_o - área de flujo
- g - aceleración de la gravedad
- h - altura hidrostática en la tubería de trabajo

Luego la variación del volumen sería:

$$dv = Qdt = C_o A_o \sqrt{2gh} dt \quad \dots\dots\dots 1$$

En el intervalo de tiempo dt, la variación de la altura hidrostática sería dh, la cual estaría en función de las capacidades de los espacios anulares, de tal

manera que:

$$dh = dy + \left(\frac{\text{Area T.R. } 7.5/8''}{\text{Area Espacio Anular T.R. } 16''} \right) dy \quad \dots\dots\dots 2$$

De tal manera que la variación del volumen en función de la altura hidrostática sería:

$$dv = \text{Area T.R. } 7.5/8'' dy \quad \dots\dots\dots 3$$

sustituyendo valores en 1 considerando 4 orificios de 1 pulgada

$$dv = 0.8 \times 0.00203 \sqrt{2gh} dt$$

$$dv = 0.0072 \sqrt{h} dt \quad \dots\dots\dots 4$$

$$dh = -dy + (0.02319/0.07414) dy$$

$$dh = 1.3128 dy$$

$$dy = \frac{dh}{1.3128} \quad \dots\dots\dots 5$$

sustituyendo 5 en 3

$$dv = 0.02319 \frac{dh}{1.3128}; \quad dv = 0.0177 dh \quad \dots\dots\dots 6$$

igualando 4 con 6 e integrando tenemos que:

$$0.0072 \sqrt{h} dt = 0.0177 dh$$

$$dt = (0.0177/0.0072) h^{-1/2} dh$$

$$dt = 2.4583 h^{-1/2} dh$$

$$t = 2.4583 \int_0^{500} h^{-1/2} dh$$

$$t = 2.4583 \cdot 2 (500^{1/2} - 0)$$

$$t = 110 \text{ seg} = 1.83 \text{ minutos} \rightarrow 2 \text{ minutos}$$

Mediante el programa de cómputo se hizo variar por intervalos la carga hidros-

tática y el tiempo calculado fue de 1,5 minutos,

NOTA: Es importante volver a mencionar en este apéndice, que la velocidad de la pérdida de circulación se podrá regular con el estrangulador de la línea de descarga de la zapata de control, con lo cual se tendrá un control absoluto sobre el volumen y el tiempo de la pérdida.

Esta Tesis fué elaborada en su
totalidad en los Talleres de -
Impresos Moya, Rep. de Cuba -
No. 99, Despacho 23.
México 1, D.F. Tel. 5-10-89-52