

24.8



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

**“OPTIMIZACION DE LA HIDRAULICA
EN TUBERIA FLEXIBLE”**

Tesis Profesional

Que para obtener el título de:
INGENIERO PETROLERO

P r e s e n t a :

Juan de la Cruz Clavel López

Director de Tesis: M. I. Carlos Islas Silva



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

- I. INTRODUCCION
- II. EQUIPO DE TUBERIA FLEXIBLE
- III. APLICACION DEL EQUIPO DE TUBERIA FLEXIBLE
- IV. SISTEMA HIDRAULICO EN OPERACIONES DE CAMPO
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VI. NOMENCLATURA Y UNIDADES
- VII. REFERENCIAS

I.- INTRODUCCION⁽¹⁾

La Ingeniería Petrolera está encargada de programar, dirigir y ejecutar todas las actividades concernientes a la explotación de los hidrocarburos en forma óptima tanto técnica como económicamente. Para la realización de las operaciones correspondientes a dicha explotación, es necesaria la división por áreas de la Ingeniería Petrolera, como son: Ingeniería de Perforación, que se encarga de crear el conducto mediante el cual se comunican las formaciones productoras de hidrocarburos con la superficie; Ingeniería de Producción, cuya función consiste en manejar apropiadamente los hidrocarburos desde el yacimiento hasta las plantas de procesamiento o lugares de venta, y la Ingeniería de Yacimientos, que se encarga del desarrollo de los mismos y la optimización de su explotación.

La Ingeniería Petrolera también se auxilia de otras ramas de la Ingeniería como son la Ingeniería Geofísica y la Ingeniería Geológica, con el fin de realizar los estudios requeridos para la exploración de nuevos campos con posibilidades de ser explotados económicamente.

El cuidado, mantenimiento y conservación de los pozos está tradicionalmente diluido en las tres ramas citadas con anterioridad. Esta dilución, podría ocasionar el descuido de los pozos, por lo que es necesario dar la importancia que reviste, pudiéndose agrupar sus objetivos y actividades en otra rama de la Ingeniería Petrolera denominada Ingeniería de Pozos, la cual tendría la función de conservar en óptimas condiciones de explotación los pozos petroleros, mediante su adecuada terminación, control de explotación e inter-

venciones oportunas. En la figura 1 se puede apreciar el contexto que abarca la Ingeniería de Pozos.

Dentro de las intervenciones a los pozos se encuentran diversas operaciones que pueden ser efectuadas o ejecutadas mediante el uso del Equipo de Tubería Flexible.

Las operaciones que pueden efectuarse con dicho equipo son: Limpieza del pozo antes de ser disparado, o después si se le hace una estimulación a la formación para restaurar o mejorar las condiciones de flujo del medio poroso en la zona vecina; limpieza de arenamientos o partículas precipitadas por el propio proceso natural de producción; Inducción a la producción del pozo por medio del bombeo de nitrógeno para ocasionar el aligeramiento de la columna de fluido y de esta manera ayudar a elevar los mismos hacia la superficie; colocación de fluidos a la profundidad requerida; eliminación de cemento de la tubería de perforación o de producción por medio del uso de herramientas especiales; cementación forzada; y estimulación reactiva o no reactiva.

Todas las operaciones anteriormente son más económicas utilizando el Equipo de Tubería Flexible que usar un Equipo de Reparación Convencional o un equipo "Snubbing" ya que el costo diario de los dos últimos es superior al del primero.

Los Equipos de Tubería Flexible están compuestos de un cable de tubería, la cual puede ser de 1 pg. o de 1 1/4 pg., un inyector de tubería, la cabina de control y la unidad de

potencia los cuales serán descritos detalladamente en el si guiente capítulo.

En las intervenciones a los pozos en las cuales se utiliza el Equipo de Tubería Flexible es muy importante tomar en cuenta el tiempo en que se realizará la operación. Para efectuar dicha intervención en un tiempo mínimo es necesario saber y conocer cómo se puede optimizar la hidráulica del sistema de circulación dentro y fuera de la tubería flexible, por lo cual el tema y el capítulo más importante del presente trabajo es concerniente a la hidráulica óptima en dicha tubería.

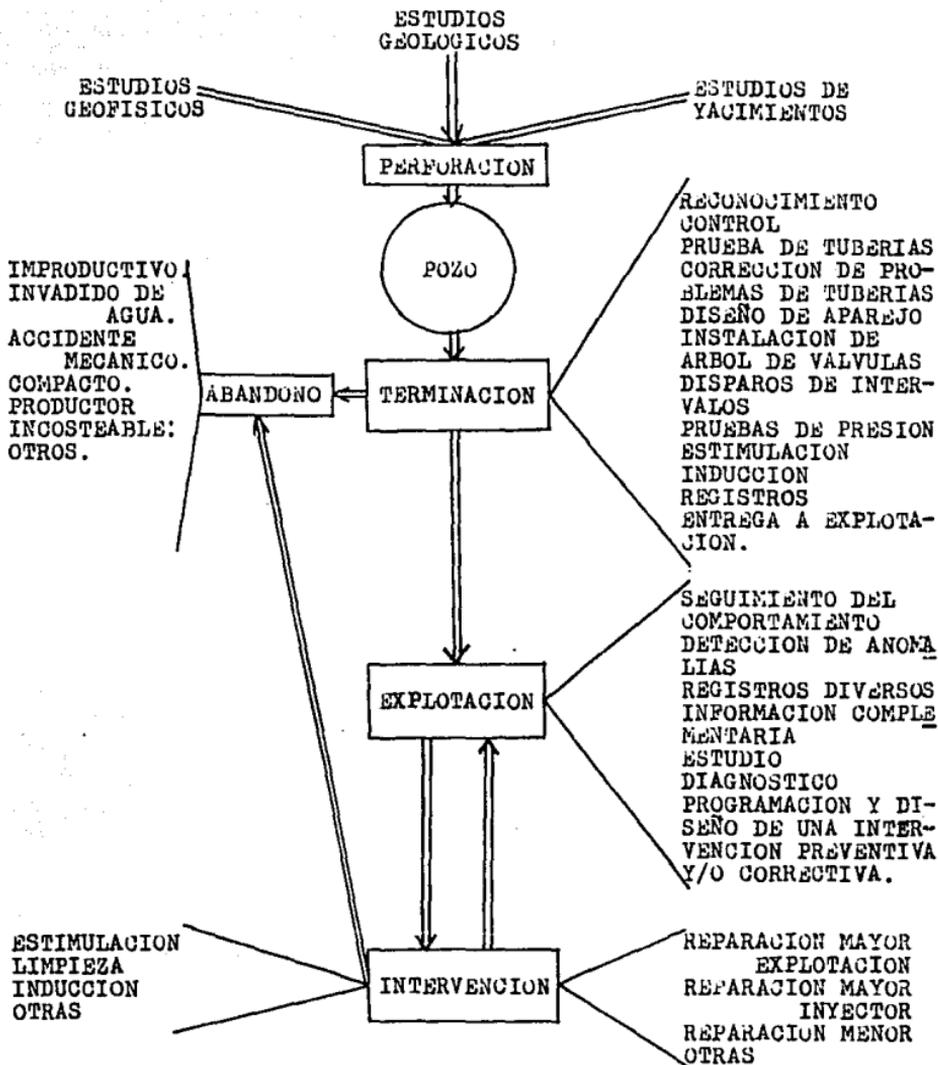


Fig. 1 Diagrama esquemático del contexto de la Ingeniería de Pozos.

II. EQUIPO DE TUBERIA FLEXIBLE

Los Equipos Marinos de Tubería Flexible están compuestos por módulos. Estos módulos tienen las características de ser de fácil manejo para las grúas de las plataformas, barcos abastecedores en los que se transportan, así también para los camiones de transporte en tierra.

Cada módulo cuenta con su propia estructura metálica protectora, montado en su patín correspondiente, con excepción del conjunto de preventores, el cual va alojado en la cabina de control, en el compartimiento donde se colocan las mangueras. Esta estructura protectora fue diseñada con el fin de que las partes componentes del equipo sean dañadas en menor grado posible en caso de recibir golpes en su manejo.

Los módulos en los que se divide la Unidad de Tubería Flexible son cinco, los cuales son:

- Unidad de Potencia
- Cabina de Control
- Cabeza Inyectora
- Carrete de Tubería
- Conjunto de preventores

En la figura 2 se muestra la forma más recomendable de alinear el Equipo de Tubería Flexible en una plataforma.

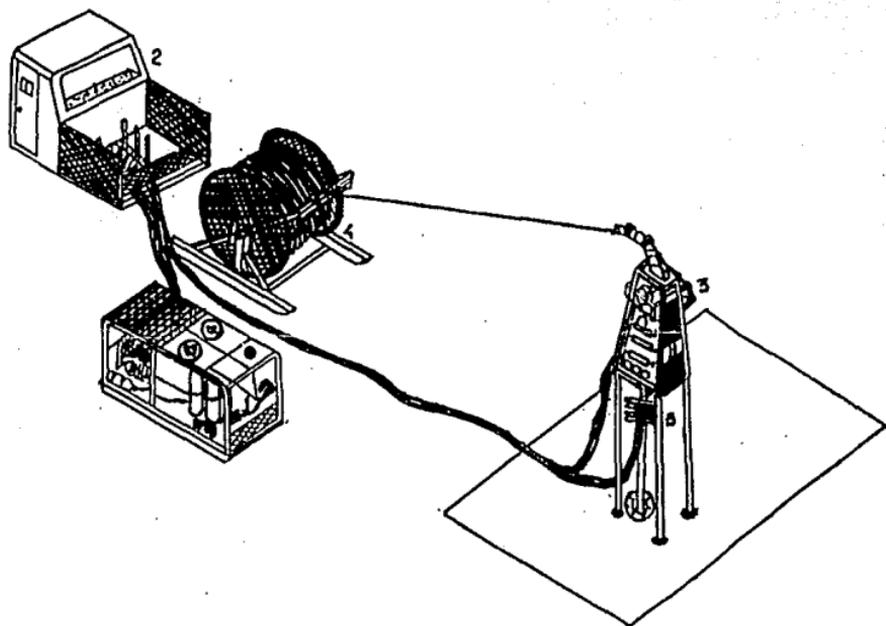


Fig. 2 Diagrama esquemático del alineamiento de un Equipo de Tubería Flexible en una plataforma.

Las principales partes que lo integran son: 1) Unidad de potencia; 2) Cabina de control; 3) Cabeza inyectora; 4) Carrete de tubería y 5) Conjunto de preventores.

UNIDAD DE POTENCIA⁽²⁾

La unidad de potencia está compuesta principalmente por un motor de combustión interna Detroit Diesel 6V - 71.

El motor 6V - 71 puede suministrar una potencia de 318 Hp - trabajando a 2 100 rpm, para realizar el bombeo hidráulico del sistema.

El sistema hidráulico de la unidad está alimentado por dos bombas hidráulicas dobles, las cuales accionan los mecanismos de la cabina de control, inyector de tubería, carrete - de tubería flexible y preventores por medio del bombeo a - presión de aceite hidráulico.

En la Fig. 3 se muestra el módulo de la unidad de potencia en el cual se aprecia su apariencia física.

Bomba hidráulica doble Denison. De esta bomba se desprenden dos circuitos:

El flujo de la sección trasera de esta bomba hidráulica tiene un gasto de 27 galones por minuto, el cual está regulado por la válvula de relevo inmediata a la bomba calibrada a 2 500 - - lb/pg², como se esquematiza en la Fig. 4.

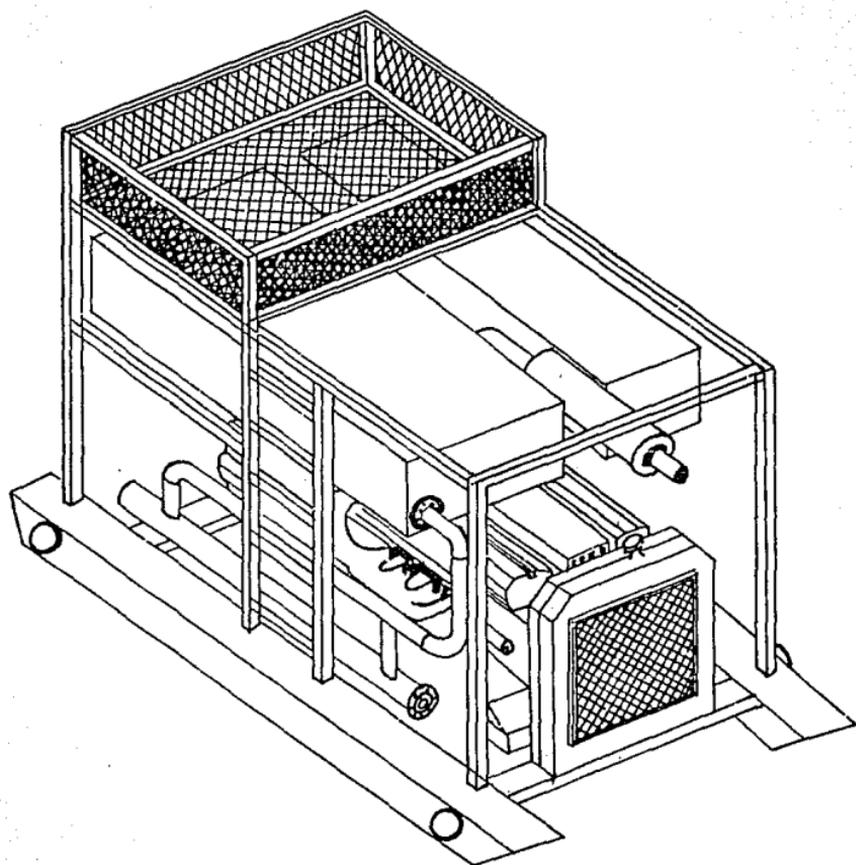


Fig. 3 Unidad de Potencia

El flujo continúa hacia la válvula direccional-de cuatro pasos, la cual dará la dirección del flujo para accionar el malacate de la pluma (su primido en equipos marinos) o la guía de la tubería en el carrete.

La parte delantera de esta bomba suministra un gasto de 10 gpm y está regulado por una válvula de relevo a una presión de 2 500 lb/pg², el flujo de esta sección es dirigido a la válvula de cuatro pasos y los pistones de la pluma de la grúa, o la presión del circuito de preventores.

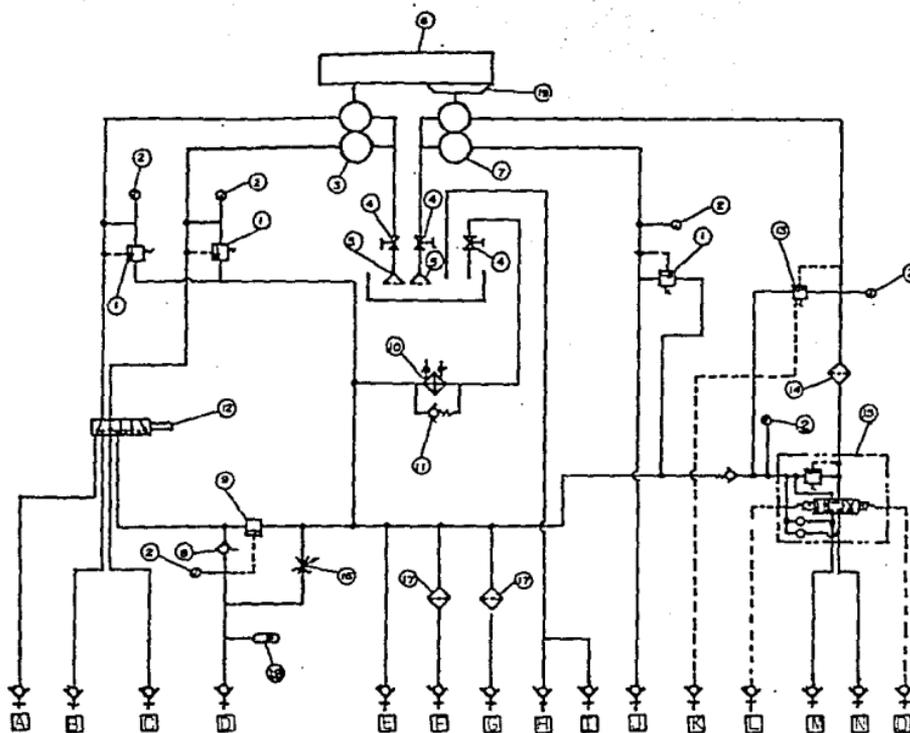
Al mandar el flujo hacia el circuito de preventores, se encuentra una válvula de descarga calibrada a 1 500 lb/pg² de presión, una válvula de retención, la cual impide que la presión regrese hacia la válvula de cuatro pasos. Este mismo flujo alimenta el acumulador de presión que sirve para actuar el circuito de preventores. Siguiendo esta misma línea de flujo, se encuentra una válvula de aguja para descargar la presión en el sistema de preventores.

Las válvulas de relevo o reguladoras de flujo mencionadas anteriormente están conectadas al múltiple de retorno, al igual que la válvula de descarga de preventores.

De la segunda bomba hidráulica doble Denison igualmente se desprenden dos circuitos.

La parte trasera de la segunda bomba hidráulica do ble Denison proporciona un gasto de 90 gal/min., - en la dirección del flujo de esta sección de la - bomba se encuentra una válvula de relevo inmediata, la cual está calibrada a una presión máxima de - - 2 500 lb/pg², con la diferencia a las anteriores - en que la presión de esta válvula es regulada a - control remoto desde la cabina. Continuando con el flujo de esta sección se tiene un filtro de alta - presión. Posteriormente se encuentra situada la - válvula direccional Husco de dos pasos, la cual va a dirigir el flujo para actuar los motores de la - cabeza inyectora para introducir o para extraer la tubería del pozo. Esta válvula direccional tiene - en su interior una válvula de relevo calibrada a - 3 000 lb/pg² y se controla por dos líneas piloto - que proceden de la cabina de control. En el retorno del flujo de la válvula direccional de dos pa- - sos se tiene una válvula de relevo, la cual mantie- - ne una contrapresión dentro de la válvula direccio- - nal de 175 lb/pg², (ver Fig. 4).

La sección delantera de esta bomba doble suminis- - tra un gasto de 14 gal/min. el cual es controlado- - por otra válvula de relevo calibrada a 2500 lb/pg², abasteciendo el circuito del carrete de tubería.



NR	NOMBRE
1	Válvula de relevo
2	Manómetro
3	Bomba hidráulica doble
4	Válvula de mariposa
5	Filtro de succión
6	Motor Detroit 6V - 71
7	Bomba hidráulica doble
8	Válvula de retención
9	Válvula reguladora de presión
10	Cambiador de calor
11	Válvula de relevo
12	Válvula de cuatro pasos
13	Válvula de relevo
14	Filtro de alta presión
15	Válvula de control direccional
16	Válvula de aguja
17	Filtro de aceite
18	Acumulador de presión
A	Pluma del malacate
B	Guía de tubería
C	Pistones de pluma
D	Preventores
E	Retorno de la grúa
F	Retorno del carrete
G	Retorno preventores
H	Freno del inyector
I	Retorno inyector
J	Presión del carrete
K	Cabina de control
L	Control direccional inyector
M	Presión de cadenas del inyector
N	Purga de presión
O	Control direccional

Fig. 4 Circuito hidráulico de la Unidad de Potencia

De igual forma que en la primera bomba doble, las válvulas de relevo inmediatas a la descarga de la bomba están conectadas al múltiple de retorno que está formado por un conducto al que retorna el aceite de todos los circuitos. En este múltiple se encuentran instalados dos filtros de aceite, - los cuales se rompen al tener cerradas las válvulas de mariposa, protegiendo de esta forma el circuito.

El aceite hidráulico después de efectuar un trabajo durante el circuito, sufre un calentamiento, por lo cual se tiene - un intercambiador de calor en el retorno antes de llegar al tanque para disminuir la temperatura de dicho aceite, auxiliado por el agua del radiador usado para el enfriamiento - del motor.

El tanque del aceite hidráulico tiene tres válvulas de mariposa, dos de las cuales son para la succión de las dos bombas dobles y la tercera para el retorno del aceite hidráulico de todo el sistema al tanque. Para lograr un mejor entendimiento de lo descrito anteriormente, en la Fig. 4 se puede observar con detenimiento el flujo de cada una de estas bombas por los circuitos correspondientes a cada una de - ellas.

La estructura protectora de la unidad de potencia y los tanques de aceite hidráulicos y combustible así como los tanques para el aire del compresor y para el aceite lubricante utilizado en la lubricación de las cadenas del inyector se presentan en la Fig. 5.

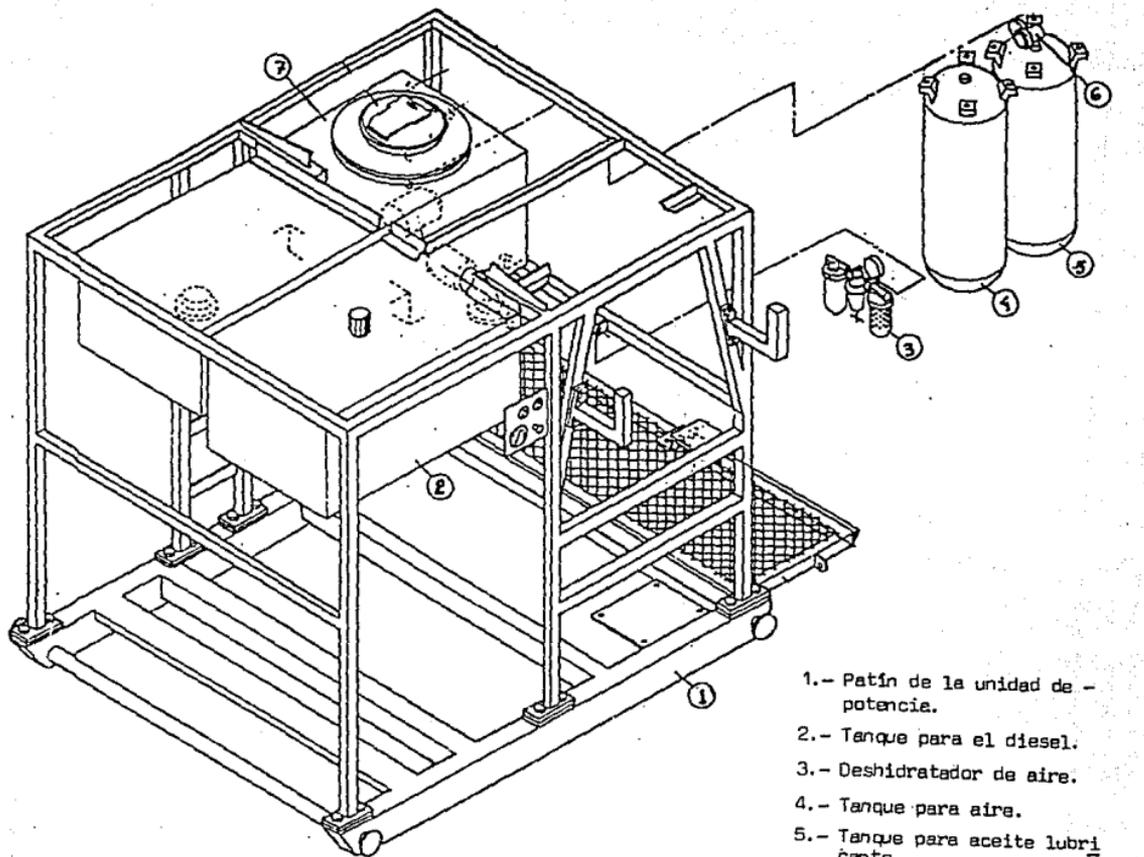


Fig. 5 Estructura protectora y tanques de la unidad de potencia.

- 1.- Patín de la unidad de - potencia.
- 2.- Tanque para el diesel.
- 3.- Deshidratador de aire.
- 4.- Tanque para aire.
- 5.- Tanque para aceite lubri cante.
- 6.- Regulador de presión de - aire.
- 7.- Tanque para aceite hidráu lico.

En la unidad de potencia también se encuentra alojado un - compresor de aire, el cual proporciona el aire a presión ne cesario para accionar el freno del carrete de tubería, para aumentar o disminuir el suministro de diesel al motor (ace- lerador), para impedir la entrada de diesel al motor (paro- del motor), para accionar la válvula neumática, para permi- tir la entrada de aire al motor (paro de emergencia) y para transmitirle la presión necesaria al aceite hidráulico para ejercer la presión necesaria en los hules empacadores del - estopero ("stripper"). Todo esto controlado desde la cabi- na.

En la Fig. 6, se presentan las partes más importantes de la unidad de potencia, las cuales fueron mencionadas anterior- mente en la explicación de los circuitos hidráulicos.

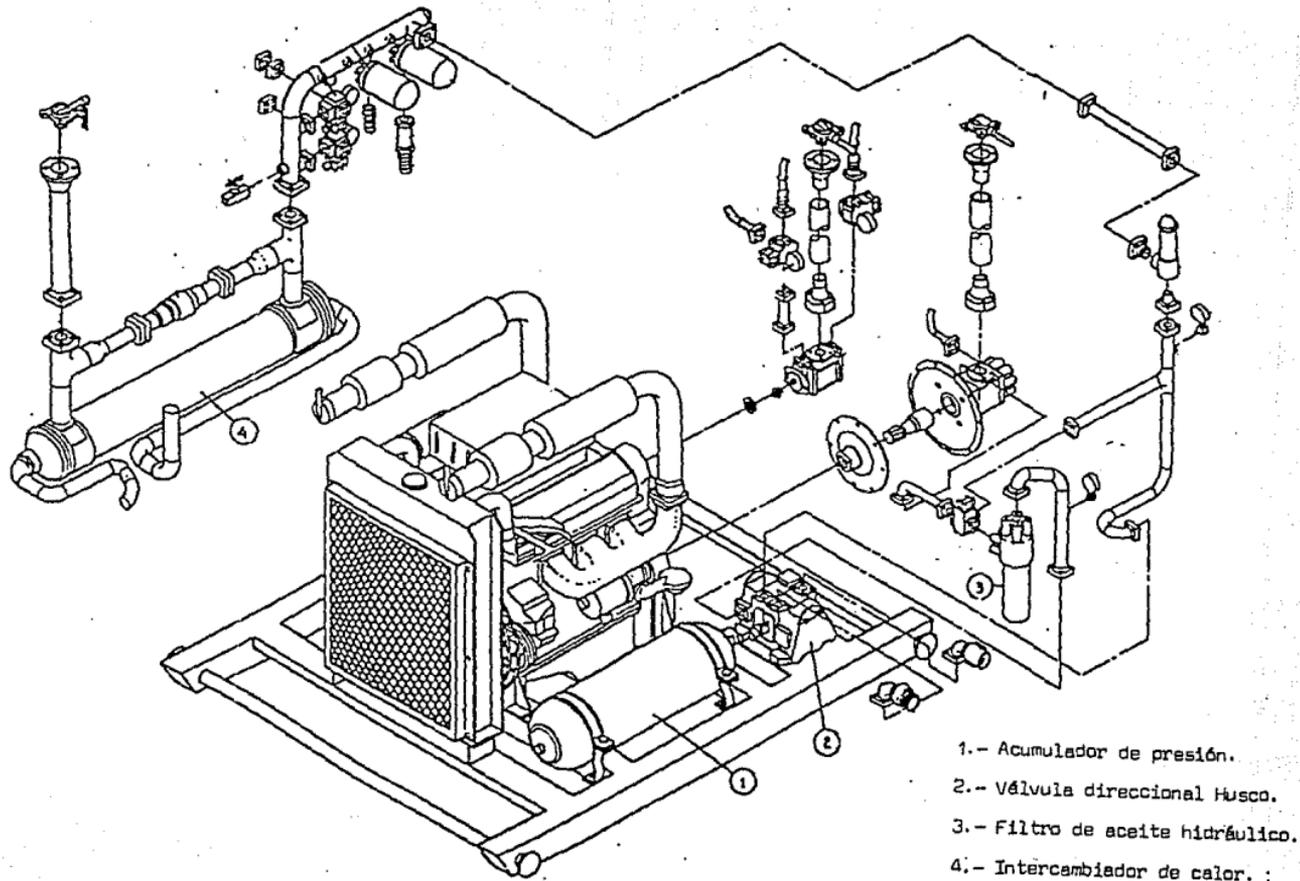


Fig. 6 Motor de combustión interna y bombas de la unidad de potencia.

CABINA DE CONTROL

En la cabina de control se centralizan todos los mandos hidráulicos y neumáticos de la Unidad de Tubería Flexible.

En esta cabina se cuenta con un panel constituido por los siguientes controles, que durante la operación se puede accionar:

- a) Ariste de preventores
- b) Inyector de tubería flexible
- c) Seleccionador de velocidad del inyector
- d) Accionador del freno del inyector
- e) Suministro de presión al inyector
- f) Suministro de presión a los gatos hidráulicos de tracción a las cadenas del inyector
- g) Suministro de presión a los empaques del estopero ("Stripper")
- h) Accionador de la lubricación a las cadenas del inyector
- i) Accionador de la guía de la tubería y movimiento del carrete hacia adelante o hacia atrás
- j) Suministro de la presión al motor del carrete de tubería
- k) Accionador del freno del carrete

- l) Accionador del apagado del motor
- m) Acelerador del motor de la unidad de potencia
- a) Para accionar los arietes de preventores se tienen cuatro válvulas de dos pasos, cada una tiene la función de abrir o cerrar los arietes correspondientes del conjunto de preventores, también cuenta esta sección con un perno de seguridad para evitar el cierre de algunos de los arietes en forma accidental.
- b) El inyector de tubería se acciona desde la cabina por medio de la válvula "Munson Tison" de tres pasos. Los pasos a seleccionar son: 1. Introducir Tubería, 2. Neutral, 3. Extraer tubería.
- c) La selección de velocidad a la cual se requiere operar, ya sea en la introducción o extracción de tubería, se hace a través de una válvula de dos pasos.
- d) Adjuntamente a la válvula anteriormente citada se encuentra otra del mismo tipo que sirve para accionar el freno del inyector.
- e) Una válvula de aguja situada junto a la válvula de control direccional del inyector, sirve para suministrar la presión a los motores del inyector, para fijar el ritmo deseado de introducción o extracción de la tubería; esto se hace accionando la perilla del acelerador del motor para que proporcio-

ne la potencia necesaria a las bombas.

- f) Para tener la tracción suficiente en las cadenas - se necesita del suministro de presión a los gatos-hidráulicos de la cabeza inyectora, para ello se - tienen seis válvulas de control de presión, tres - de ellas son para el suministro a los tres gatos - respectivamente y las tres restantes son para pur- gar dicha presión.
- g) Para accionar el estopero "stripper" de la cabeza- inyectora se tiene una serie de cuatro válvulas de aguja, dos son para suministrarle presión a los hu les o copas y al energizador respectivamente y las otras dos son utilizadas para su purga. Para poder accionar dichas válvulas es necesario del bombeo - a alta presión de aceite hidráulico por medio de - una bomba de desplazamiento positivo ("Haskell") - operada con aire o manualmente, situada en el piso de la cabina de control.
- h) Para lubricar las cadenas del inyector se cuenta - con una válvula reguladora de flujo.
- i) Para accionar la guía de la tubería y el movimien- to rotatorio del carrete (hacia adelante o hacia - atrás) se cuenta con las válvulas de tres pasos - respectivamente; para el carrete: enrollar, neu- - tral, desenrollar. Para la guía: movimiento a la - derecha, neutral, movimiento a la izquierda.
- j) Una válvula de aguja (control de presión) permite-

suministrarle presión al motor del carrete de la tubería flexible, con el fin de no permitir que se desenrolle demasiado o tener el enrollado adecuado en la extracción de la tubería.

- k) Para accionar el freno del carrete se cuenta con una válvula de dos pasos: freno activado y freno no activado.
- l) Para accionar el apagado y ahogador de emergencia del motor se cuenta con dos válvulas de dos pasos similares a la del freno del carrete.
- m) Existe también un regulador neumático (acelerador) para el suministro de combustible al motor de combustión interna de la unidad de potencia.

También se tiene una serie de manómetros que indican las presiones al accionar las válvulas mencionadas anteriormente, además se cuenta con un indicador de peso, graduado en miles de libras con una lectura máxima de 40 000 lbs, dos manómetros los cuales indican la presión superficial de circulación y la presión en la cabeza del pozo respectivamente. En la Fig. 7 se esquematizan los controles con sus respectivos manómetros.

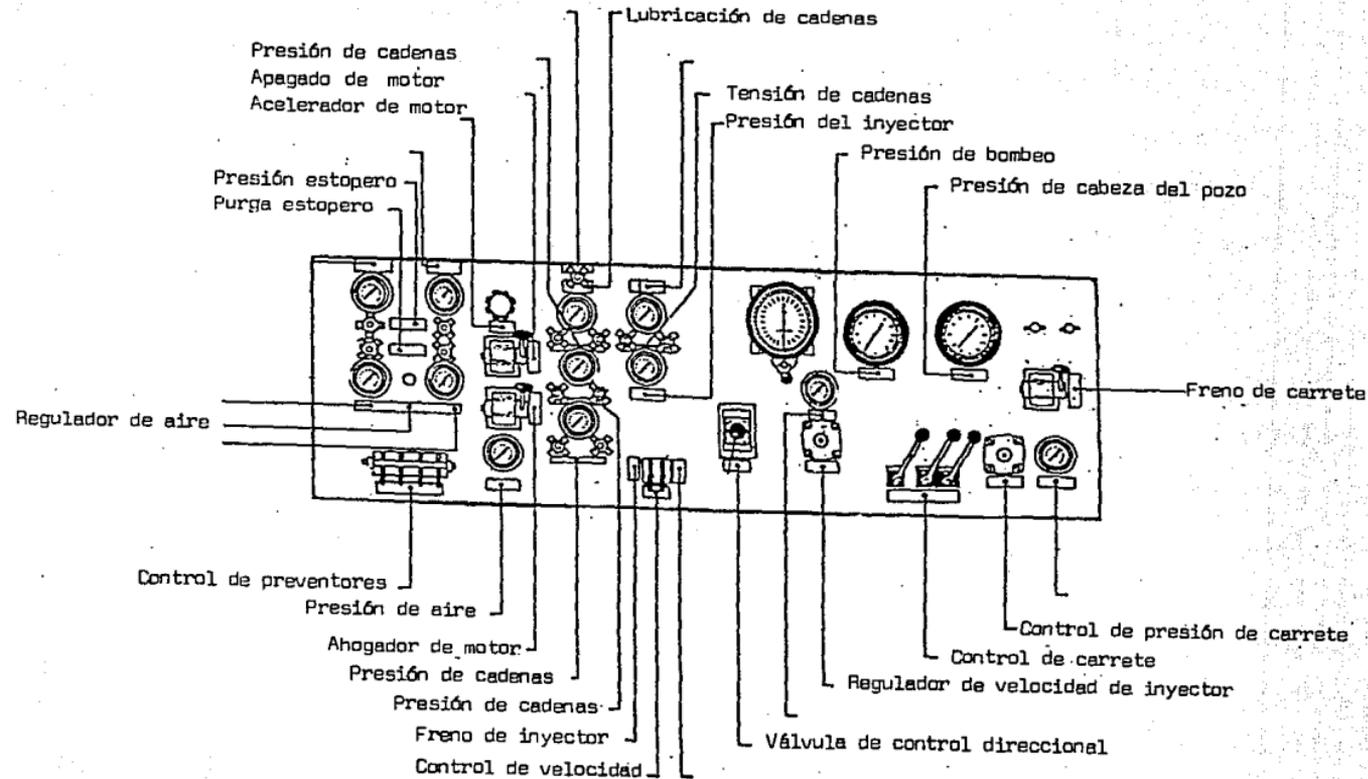


Fig. 7 Consola de Control de operación.

CABEZA INYECTORA^{(4),(5)}

La cabeza inyectora es parte fundamental de la Unidad de Tubería Flexible, la cual está instalada directamente sobre el árbol de válvulas del pozo o la sarta de perforación, y es el medio por el cual la tubería flexible es bajada, maniobrada y elevada dentro del pozo. Se monta sobre el conjunto de preventores por medio de una conexión rápida, el cual a su vez se conecta a un tubo lubricador ("madrina") para comunicarse con el pozo, como se puede observar en la Fig. 8. La cabeza inyectora se compone principalmente de un estopero ("stripper") el cual está diseñado para permitir la introducción o extracción de la tubería flexible bajo presión, sin que exista comunicación de los fluidos del pozo con la superficie, mientras que el preventor sólo actúa como un dispositivo de seguridad. Este estopero en su interior lleva empaques o copas de hule intercambiables, los cuales pueden ser cambiados durante la operación.

Montado cerca del estopero se encuentra el sistema inyector de tubería que está compuesto por dos motores de desplazamiento positivo los cuales mueven dos grupos de cadenas. Dichas cadenas son guiadas por un tren de baleros, uno de ellos está rígidamente montado, en tanto que el otro es posicionado hidráulicamente de forma tal que se tenga la sujeción requerida en la tubería para prevenir cualquier resbalamiento de la misma. Cuenta con una serie de gatos hidráulicos (tres pares) los cuales ejercen la presión necesaria para que las cadenas tengan la tracción suficiente y así la tubería pueda ser levantada o bajada.

El inyector cuenta con un embrague (clutch) de seguridad - para prevenir el movimiento de la tubería al ser bajada en - el pozo, el cual sirve de freno al iniciar el movimiento o al encontrarse estacionada sin tener la necesidad de dar - un empuje hacia arriba con los motores, igual al peso de - la tubería; sin embargo este embrague no puede actuar en - ambas direcciones, ya que se libera automáticamente cuando - la presión del aceite excede 300 lb/pg^2 de presión y se res - tablece cuando la presión cae por debajo de la misma.

La presión en los gatos hidráulicos que proporcionan la - - tracción necesaria a las cadenas, debe ser incrementada a - medida que la tubería va siendo introducida debido al peso - de la misma. Esto se hace con la finalidad de impedir que - la tubería resbale y caiga sin control alguno.

Existe otro sistema de frenado. Los motores hidráulicos - - transmiten su potencia a través de catarinas y cadenas de - la parte superior de la caja de la unidad de inyección has - ta la parte inferior de la misma. En la prolongación de - las flechas se encuentran dos engranes cilíndricos rectos - que se operan por medio de dos motores. Estas flechas tie - nen en los extremos opuestos, dos discos de fricción en los que operan las balatas del conjunto actuador neumático que - se actúa a control remoto desde la consola del operador, - lo que permite frenar de inmediato cuando la operación lo - requiera.

El inyector es capaz de ejercer una fuerza al introducir o extraer la tubería del orden de 15 000 lbf usando el sistema de engranes automático.

La cadena, sus motores y la caja de engranes están instalados en la subestructura como pivote en un eje vertical, al lado opuesto está colocada una celda hidráulica de presión a la cual se conecta un indicador de peso que está instalado en la cabina de control. Las fuerzas ejercidas por la acción del sistema de impulso y el peso de la tubería se aplican en dirección paralela a la línea de la tubería hacia el pivote de la subestructura. La deflexión angular de este pivote es muy pequeña y se controla por la compresibilidad de la celda de peso.

Como complemento del equipo inyector existe una guía con soportes para meter la tubería y que ésta quede exactamente sobre el eje vertical del inyector, ya que viene en un eje horizontal al salir del carrete.

Las especificaciones y dimensiones de la cabeza inyectora son las siguientes: velocidad máxima (motor medido a 2 100 rpm) con inyector de 1 1/4", motor 6V - 71, bomba de propela del circuito abierto y dos velocidades en los motores.

baja 125 pie/min.

alta 250 pie/min.

Tensión del inyector (a su máxima capacidad)

88% arranque 85% funcionando

baja 33 430 lb_f 32 360 lb_f

alta 16 715 lb_f 16 617 lb_f

Para poderse asentar la cabeza inyectora en el piso de perforación o en la plataforma, cuenta con patas telescópicas.

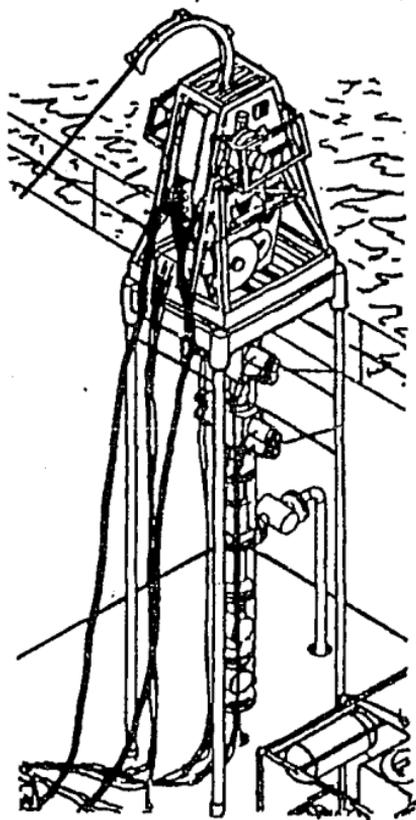


Fig. 8 Cabeza inyectora.

CARRETE DE TUBERIA (2),(4),(5)

La tubería se almacena en un carrete, enrollando sobre éste en la misma forma que el cable del malacate de un equipo de perforación. De esta forma aproximadamente 5 700 m de tubería de 1 1/4 pg de diámetro pueden ser guardados en un carrete sencillo. El diámetro del carrete es de seis pies (1.8 m) el cual es el mínimo permisible.

El continuo flexionamiento de la tubería cuando se encuentra en operación sufre un cambio de curvatura por el enrollamiento, esta curvatura es una deformación plástica del tubo de acero, aun cuando la tubería sufre dicha deformación, la fatiga no afecta la vida útil de la misma.

El carrete se sostiene sobre un eje y su movimiento de rotación lo proporciona un motor hidráulico controlado desde la cabina, este control tiene una doble función: el desenrollar la tubería para su inyección dentro del pozo y el desenrollar al extraerla. El motor actúa como un freno al torque constante, de este modo se evita tener la tubería bajo esfuerzos de tensión y proporciona el control sobre el momento rotacional del carrete cuando se enrolla. El sistema de control hace girar al carrete sometiendo a la tubería a una tensión constante. Para realizar esto, es importante que el sistema de control del carrete no sea usado para bajar o subir la tubería en el pozo y sólo una pequeña parte de la tensión se use para controlarla.

Para controlar el proceso de enrollamiento, de forma que la tubería sea correctamente enrollada sobre sí misma, se sincroniza una guía con la rotación del carrete, por medio de una cadena que va desde el eje hasta el embrague del motor de dicha guía. Una ventaja prevaeciente es modificar el movimiento de la guía por medio de un motor hidráulico a través de una caja diferencial de engranes ("clutch").

La última sección de la sarta de tubería se conecta en el centro del carrete, el cual incorpora una junta o sección rotatoria (Swivel) a la que se conecta la línea de bombeo.

La longitud de la tubería metida en el pozo se registra en un medidor que gira al hacer contacto con la tubería y está montado en la parte superior del carrete sobre la guía.

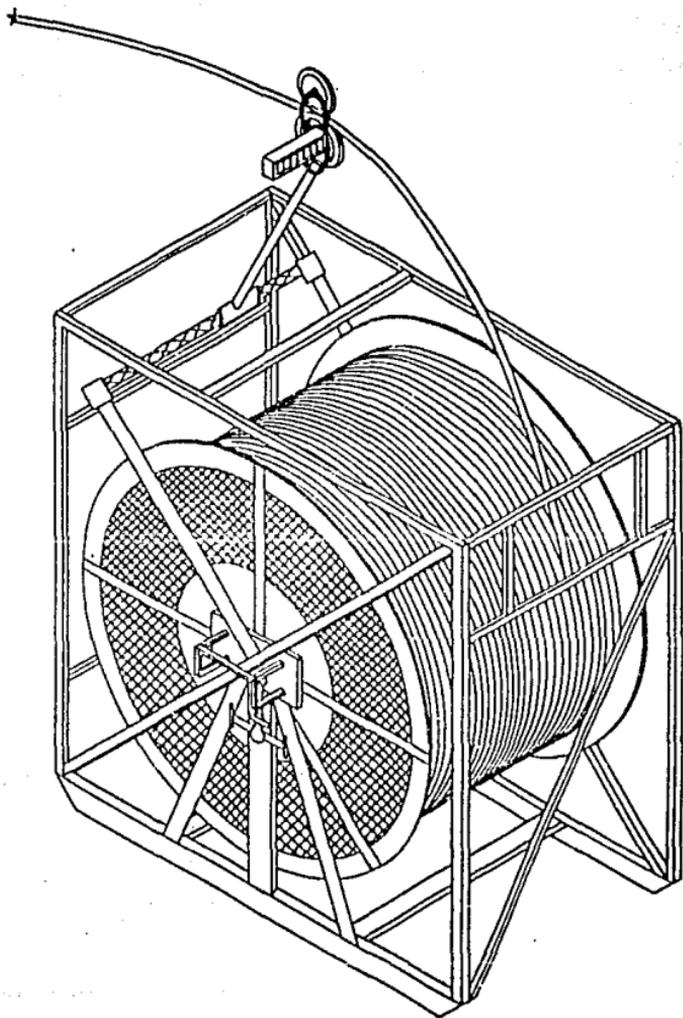


Fig. 9 Carrete de tubería. (4)

CONJUNTO DE PREVENTORES

El conjunto de preventores es un dispositivo de seguridad - que sirve para impedir el paso de los fluidos hacia la superficie en el momento en que el pozo aporta fluido a alta presión en la cabeza.

Los preventores son utilizados en el momento justo en que - la presión en la cabeza del pozo ya no puede ser controlada por el dispositivo de control de presión que permite introducir o extraer tubería ("Stripper").

El conjunto de preventores se componen de:

- 1.- Arietes ciegos
- 2.- Arietes de corte de tubería
- 3.- Cuñas de tubería
- 4.- Arietes anulares

Los arietes ciegos sólo pueden ser utilizados cuando se ha yan accionado los arietes de corte con anterioridad y levan tado ligeramente la tubería con el inyector para evitar que traten de cerrar sobre la tubería flexible, mordiéndola y - causándole daño a los elementos de sello de dichos arietes.

Antes de accionar los arietes de corte es necesario accio-

nar las cuñas para sostener la tubería y así evitar que se vaya al fondo del pozo y tener una pérdida de la misma -- ("pescado").

Los arietes anulares sirven para evitar el flujo de fluidos por el área exterior de la tubería flexible (espacio anular entre la tubería flexible y la tubería de producción). Son usados principalmente cuando es necesario cambiar los hules del estopero ("stripper") estando la tubería estacionada -- dentro del pozo. Cabe aclarar que los arietes anulares no permiten la introducción o extracción de la tubería al ser accionados, esto se debe a que ejercen una sujeción sobre -- la tubería flexible, la cual es difícil de vencer con los -- motores de la cabeza inyectora, además de ocasionar el co-- lapsamiento de dicha tubería. En la Fig. 10, se puede ob-- servar el conjunto de preventores en su forma física; las -- mangueras conectadas a los puntos negros sirven para cerrar los arietes y las mangueras conectadas a los círculos sir-- ven para abrir los mismos.

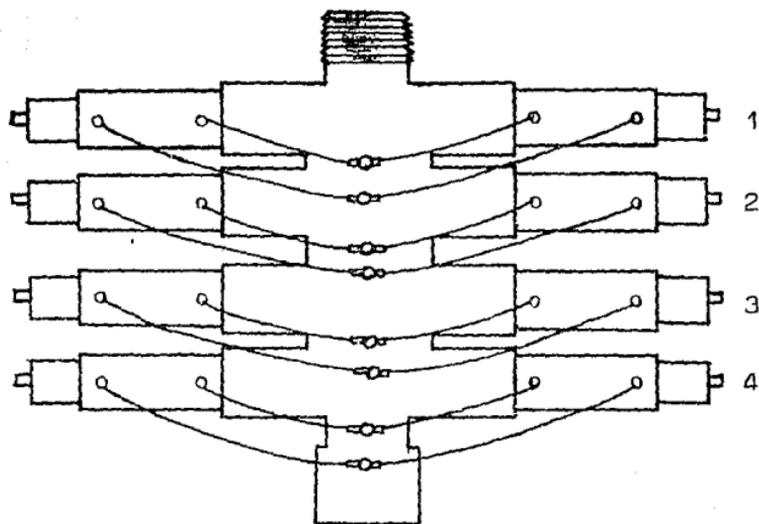


Fig. 10 Conjunto de preventores

ACCESORIOS ESPECIALES

Desde el inicio de la utilización de la tubería flexible en pozos con problemas de incrustaciones de sales (carbonatos), parafinas, asfaltenos o arenamientos, se ha tratado de adecuar el flujo del fluido de trabajo, para que éste remueva lo más pronto posible la resistencia, pero como se puede demostrar, si se introduce la tubería sin ninguna herramienta especial en el extremo como lo es el eyector, la fuerza de impacto sobre la resistencia es relativamente pequeña y como resultado se tiene una baja eficiencia de penetración o de remoción de la incrustación.

Con el objetivo de reducir el tiempo de operación del equipo y por consiguiente los costos, se han introducido eyectores a los pozos de diferentes características en cuanto a diámetros de orificios y dirección del flujo, como se muestran a continuación en las figuras 11 y 12. Normalmente no se hace un estudio previo del rango de diámetros de orificios factible para realizar la operación satisfactoriamente, lo que produce resultados poco alentadores.

Con el procedimiento de cálculo de la hidráulica óptima del método que se expone en el capítulo IV, se da solución a este problema.

Para lograr una fuerza de impacto efectiva sobre la incrus-

tación, es necesario que el eyector tenga orificios de diámetro pequeño, determinado según la hidráulica óptima que se tenga.

EYECTORES CONVENCIONALES⁽⁴⁾

Al efectuar una limpieza de pozo, es necesario que la punta de la tubería tenga un sistema de aspersión, para que el flujo lave la pared de la tubería o del pozo y el área afectada del mismo. Con este propósito se han diseñado distintos tipos de eyectores, los cuales se representan en las figuras 11 y 12. Estos eyectores, están rígidamente unidos a la tubería flexible, a través de un conector especial.

HERRAMIENTA DE LIMPIEZA⁽¹⁰⁾

La herramienta de limpieza "CTC" se encuentra unida a la tubería flexible de una manera convencional. Esta herramienta cuenta con una serie de agujeros pequeños, localizados radialmente sobre circunferencias de diferente tamaño. Los orificios que se encuentran sobre una misma circunferencia (no más de tres), tienen un espaciamiento aproximadamente igual entre ellos.

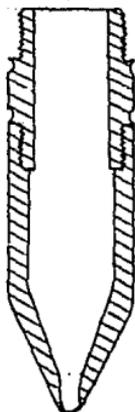


Fig. 11 Ejector con un solo -
orificio en el centro.

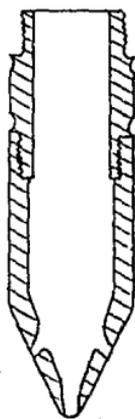


Fig. 12 Ejector de tres orificios;
dos laterales y uno central.

Los agujeros están situados en una serie de planos en la herramienta, y los chorros que producen están orientados perpendicularmente (normal) al eje o línea central de la herramienta, produciendo una trayectoria tangencial al diámetro interior de la misma (Fig. 13).

Al bombear el fluido a alta presión en la superficie a través de la tubería flexible, éste sale por los orificios en forma de chorros, los cuales ejercen una fuerza de reacción que provoca la torsión de la tubería flexible. Al variar la presión de bombeo se tienen diferentes grados de torsión de la tubería y con ello es posible limpiar totalmente las paredes de la tubería de producción o de revestimiento.

Cuando se tiene una penetración de la herramienta sobre la obstrucción lo suficientemente grande, se levanta y se vuelve a bajar la tubería flexible para tener una mayor eficiencia de lavado.

La herramienta de limpieza está hecha de tubería de producción de grado N 80 de 1.25 pg. de diámetro interior (2.2 pg de diámetro exterior) y su aplicación está limitada a pozos que tengan tubería de producción de diámetro suficientemente grande para permitir el paso de la herramienta y de la tubería flexible holgadamente.

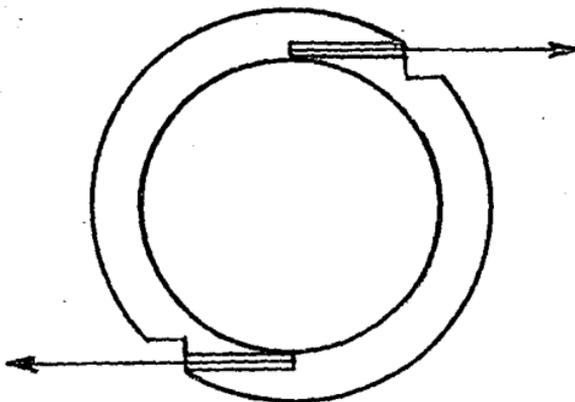
El objetivo primordial de esta herramienta es evitar la extracción del aparejo de producción o desanclar el empacador, para llevar a cabo la remoción de un tapón, incrustación o limpieza del pozo. Otros objetivos son: reducir el tiempo de operación, limpiar totalmente la pared de la tubería de producción y revestimiento, remover totalmente la obstrucción y disminuir los costos.

HERRAMIENTA DE PERFORACION⁽¹⁰⁾

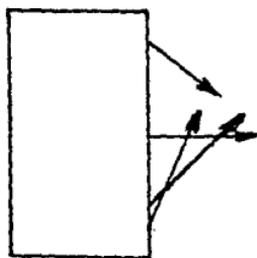
La herramienta de perforación "CTD" está unida a la tubería flexible de la misma forma que la herramienta de limpieza.- Cuenta con una serie de pequeños orificios en su cara inferior y cada orificio representa un chorro, el cual está alineado para tener una fuerza reactiva que hace rotar la herramienta. Cada orificio está dirigido hacia abajo helicoidalmente de modo tal que produce una acción perforativa. - Dos orificios adicionales se localizan en la herramienta lateralmente para que se proporcione mayor giro (Fig. 14).

La velocidad de penetración de la herramienta depende en gran parte del material a ser perforado; por ejemplo, el cemento endurecido podría tomar mayor tiempo que una arena compactada.

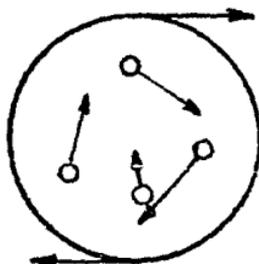
Para realizar la operación, se introduce la herramienta con la tubería flexible con bombeo hasta la obstrucción y cuando se encuentra sobre el material a perforar se incrementa la presión de bombeo, levantando la herramienta cada 2 ó 3 minutos con variación en la presión superficial de bombeo de 100 lb/pg² y posteriormente se vuelve a bajar hasta la cara a perforar y la presión es cambiada periódicamente, para tener una mayor velocidad de penetración.



- j. 13 Orificios laterales de la herramienta de limpieza. Los orificios se encuentran en una posición tangencial al diámetro interior de dicha herramienta para producir una fuerza de reacción mayor. (10)



Vista lateral



Vista inferior

- g. 14 Herramienta de perforación. Cada uno de los orificios de la herramienta proporciona una fuerza de reacción para hacerla girar respecto a la tubería. (10)

III. APLICACIONES DEL EQUIPO DE TUBERIA FLEXIBLE

La aplicación de la tubería flexible en las intervenciones de pozos productores de petróleo ha tomado gran importancia, debido a que las operaciones con dichos equipos son rápidas y menos costosas con relación al uso de equipos de reparación convencional. Además, la tubería flexible puede ir acompañada con herramienta especial en su extremo, como es el eyector, o la turbobarrena (Dyna Drill), para realizar operaciones de mayor dificultad.

Los usos más importantes de la tubería flexible son:

- Remoción de partículas (arenamientos) en la tubería de revestimiento, por abajo del empacador, y en la tubería de producción, por medio de la circulación de nitrógeno (N₂), fluidos gelados o espumas.
- Remoción de obstrucciones orgánicas e incrustaciones en el aparejo de producción.
- Colocación de baches de ácido, cemento, fluidos de terminación o químicos a la profundidad requerida.
- Aligeramiento de la columna hidrostática por medio del bombeo de nitrógeno, con el fin de inducir a la producción a un pozo.
- Eliminación de cemento de la tubería de perforación, de producción o de revestimiento, por medio del uso de una turbobarrena (Dyna Drill).
- Estimulación con ácido.

REMOCION DE ARENAMIENTO⁽⁸⁾

El arenamiento de pozos es muy común donde se tienen formaciones productoras de hidrocarburos compuestas principalmente de material no consolidado, el cual es arrastrado al interior del pozo por los fluidos producidos. Las partículas más pequeñas son arrastradas por dichos fluidos, pero las de mayor diámetro no pueden ser transportadas a la superficie, ya que su propio peso ocasiona que la velocidad de asentamiento sea mayor que la velocidad de arrastre del fluido, provocándose con esto la depositación y formación de bancos de arena en el pozo, ocasionando una disminución anormal en la producción del mismo, al grado de dejar de fluir.

Para remover estas partículas en los pozos con dicho problema, se circula a través de la tubería flexible agua, espuma o un fluido gelado (con polímero). En la Fig. 15 se puede apreciar esquemáticamente esta operación.

REMOCION DE ARENAMIENTO CON AGUA.

Para remover un banco de arena por medio de la circulación de agua, se introduce la tubería flexible hasta la resistencia con un gasto de bombeo de agua relativamente bajo, con el fin de evitar que se tapone o

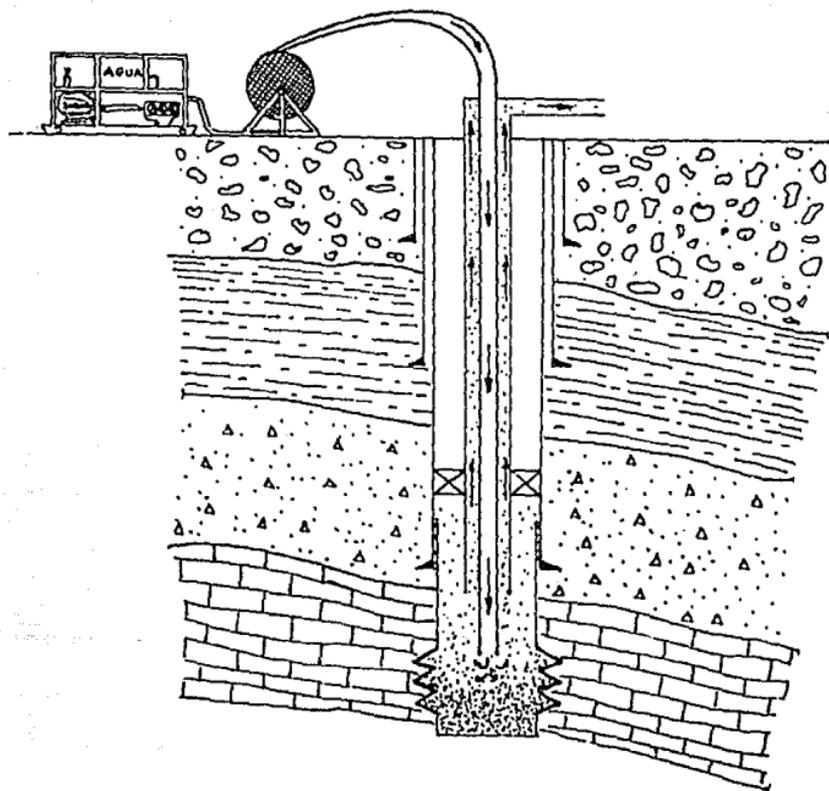


Fig. 15 Diagrama representativo de un pozo con arenamiento removido con agua por medio de la tubería flexible.

se llene de fluidos del pozo. Al tocar la resistencia se levanta la tubería aproximadamente 10 metros y posteriormente se incrementa el gasto de bombeo para tener una fuerza de impacto mayor sobre el banco de arena.

La tubería se va introduciendo lentamente, al tocar la resistencia se levanta nuevamente pero una longitud menor, sólo para evitar que quede atrapada por los sólidos removidos. Esto se hace constantemente hasta lograr remover totalmente el banco.

REMOCION DE ARENAMIENTO CON FLUIDO GELADO^{(4), (5)}

Esta remoción es similar a la anteriormente indicada, pero con la diferencia de que al utilizar estos fluidos resulta muy costoso, por lo que se introduce la tubería con bombeo de agua y antes de llegar a la resistencia se hace el cambio en el bombeo de agua por el fluido gelado, el cual incrementa la eficiencia en el transporte de las partículas removidas evitando que se precipiten y permitiendo un mayor gasto por la disminución de pérdidas de presión por fricción que propician los polímeros. Con esto se incrementa la velocidad de penetración de la tubería limpiando el pozo de una manera más rápida y eficiente.

REMOCIÓN DE ARENAMIENTO CON ESPUMA⁽⁴⁾

La circulación de espuma se debe iniciar desde el momento en que la tubería flexible se introduce al pozo con el fin de mantener constante la circulación. La excelente capacidad de arrastre de la espuma permite concentrar en ella grandes cantidades de arena, sin embargo, se debe tener la precaución de no lavar demasiado rápido, ya que puede ocurrir un asentamiento de partículas y quedar atrapada la tubería.

La remoción de arena del pozo se logra bombeando la espuma por el interior de la tubería flexible y desalojando la mezcla de espuma y arena hacia la superficie por el espacio anular, formado entre la tubería de producción y la tubería flexible.

Una vez que la arena ha sido removida completamente, se mantiene la circulación hasta que la espuma retorne a la superficie libre de sólidos. Después de concluir la intervención se suspende la inyección de espuma y se llena el pozo con fluido de control.

REMOCIÓN DE OBSTRUCCIONES ORGÁNICAS Y DE INCRUSTACIONES DE SALES EN EL APAREJO DE PRODUCCIÓN.

REMOCIÓN DE TAPONES DE PARAFINA EN LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN⁽⁴⁾

La depositación de parafinas en el aparejo de producción es un problema severo que es ocasionado en la mayoría de los casos por la disminución pronunciada de la temperatura en el viaje de los fluidos producidos por la tubería vertical en el pozo. Esto ocasiona que el aparejo se vaya obstruyendo paulatinamente hasta que el pozo deja de fluir, por haber una caída de presión mayor que la presión de fondo fluuyendo en dicha tubería debido a que el área transversal libre al flujo en la tubería es muy pequeña o casi nula.

Los factores que influyen el grado de depositación de parafina en los aparejos son:

- a) Composición química del aceite producido
- b) Temperatura de fondo del pozo
- c) Velocidad o ritmo de producción
- d) Transferencia de calor de los fluidos producidos al espacio anular.

REMOCIÓN DE TAPONES DE PARAFINA CON ACEITE CALIENTE

Una unidad de aceite caliente provee el mismo a una -

temperatura de 110°C. El método es muy efectivo ya - que se coloca aceite caliente sobre el tapón de parafina y por el intercambio de calor, el tapón aumenta su temperatura derritiéndose hasta deshacerse totalmente, quedando el aparejo de producción libre al flujo de fluidos de la formación.

REMOCIONES DE TAPONES DE PARAFINA CON AGUA CALIENTE

La circulación con agua caliente en los pozos con este problema es más ventajoso comparado con la circulación de aceite caliente por las siguientes razones:

- Seguridad. Si la tubería de la unidad de aceite caliente o la tubería flexible - llegara a sufrir alguna rotura o fisura, podría ocasionarse fácilmente un incendio o una explosión lo que no ocurriría al utilizar agua a la misma temperatura.
- Disponibilidad. En algunas localizaciones no - es posible proveer el volumen suficiente de aceite caliente.
- Costos. El costo del aceite es mucho mayor que el del agua, aún cuando éste puede recuperarse y el costo será menor.

- Contaminación. El agua es mucho más fácil de manejar y no existe riesgo de contaminar cuando hay derrames o fugas.

La limpieza con agua caliente es similar a la circulación de aceite caliente, la tubería flexible se calienta con la circulación del fluido antes de introducirla en el pozo, normalmente a una temperatura que va de 100 a 120°C. En la Fig. 16, se aprecia el diagrama representativo de un pozo que presenta el problema de obstrucción por parafinamiento.

REMOCIÓN DE TAPONES DE MATERIAL ASFÁLTICO POR MEDIO DEL USO DE PRODUCTOS QUÍMICOS⁽⁴⁾.

Las sustancias que propician los depósitos asfálticos son: asfaltenos, resinas neutras y ácidos asfaltogénicos que se encuentran en el aceite del subsuelo en forma coloidal y que se precipitan por la acción de cualquier fuerza química, mecánica o eléctrica, que promueve un desequilibrio entre las mezclas del material asfáltico y las sustancias que las rodean. Se ha comprobado que los cambios de temperatura, presión, composición química del aceite, potenciales de corriente y el contacto con sustancias de bajo pH (ácidos) propician el desequilibrio causando precipitación de las sustancias asfálticas, depositándolas en la tubería de producción.

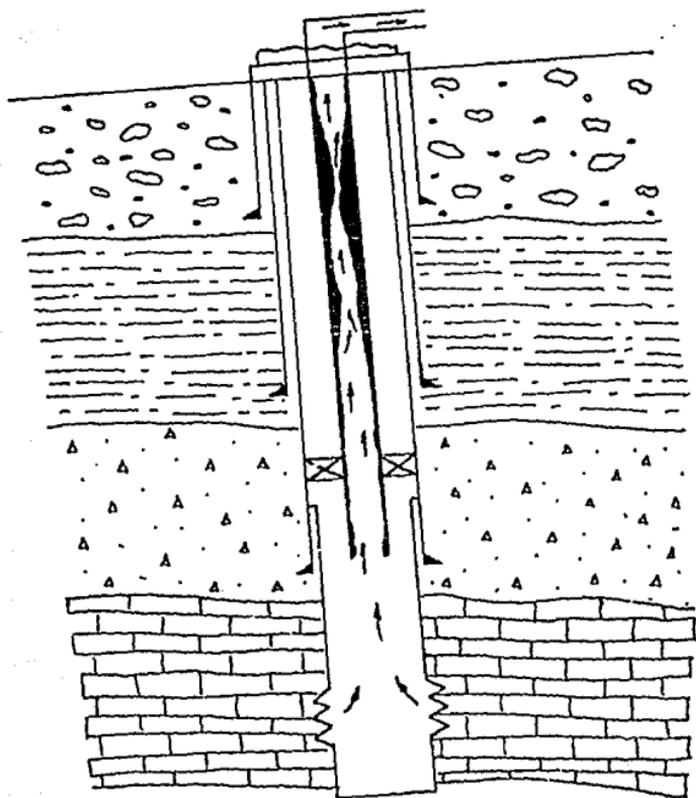


Fig. 16 Diagrama representativo de un pozo con obstrucción por parafinamiento en el aparejo de producción.

El uso de la tubería flexible con productos químicos para la remoción de tapones de asfaltenos ha dado buen resultado, al colocarse un bache de estos químicos sobre el tapón dejándose reposar el tiempo necesario y circulando lentamente para producir su remoción. Se instala de la manera usual y se conecta la bomba del producto químico al carrete, teniendo extrema precaución de que las conexiones sean las adecuadas y estén bien efectuadas.

Es necesaria una estrecha supervisión al bombear el producto químico (usualmente solvente aromático), debido a que es altamente tóxico e inflamable.

REMOCION DE TAPONES DE HIDRATOS EN POZOS DE GAS⁽⁴⁾.

En la remoción de hidratos que obstruyen los aparejos de producción en pozos productores de gas, también con la aplicación del Equipo de Tubería Flexible se soluciona dicho problema, mediante la circulación (bombeo a presión) de agua o alcohol.

Antes de iniciar el descenso de la tubería flexible dentro del pozo es necesario abrir el mismo por la línea que va al quemador para desfogar el gas que se encuentra represionado y así trabajar con una menor presión en la cabeza, para que sea llenado el pozo con diesel o agua con el fin de

verificar la profundidad en donde se encuentra obstruida - la tubería con dicho material y así bajar la tubería con - bombeo de diesel o agua hasta la cima de la misma. Una - vez tocando la cima de la obstrucción, se debe levantar la tubería de 5 a 10 metros para hacer el cambio del bombeo - de diesel o agua a alcohol sobre la resistencia, debiendo - continuar hasta que la obstrucción sea removida y salgan - todos los sedimentos producidos por la remoción de los hi-- dratos.

REMOCION DE TAPONES DIESEL - BENTONITA.

Los tapones de diesel-bentonita son colocados en las tube-- rías de revestimiento cortas ("liners") arriba de la pro-- fundidad en donde se encuentra el intervalo disparado y por debajo del aparejo de producción, con el fin de tener con-- trolado el pozo sin que represente un peligro latente - - mientras se extrae dicho aparejo para hacerle las reparacio-- nes y modificaciones necesarias. Para colocar un tapón - - diesel-bentonita se bombea inicialmente el bache de diesel con bentonita y posteriormente se desplaza con agua sala-- da hasta la profundidad programada. Al quedar en reposo - los fluidos dentro del pozo y acomodarse de acuerdo a su - densidad, al hacer contacto el agua con la bentonita se-- forma el tapón debido al hinchamiento de la arcilla.

Después de que se le hacen los cambios y ajustes al apare-
jo, se introduce nuevamente al pozo y se hace necesario en-
ese momento remover el tapón de control del pozo para poner
lo nuevamente en producción.

Por medio de la tubería flexible es posible remover estos -
tapones mediante el bombeo de diesel a alta presión. Para
realizar dicha remoción, se introduce la tubería con bombeo
de diesel a bajo gasto y presión hasta la cima del tapón,-
al llegar a éste, se levanta la tubería aproximadamente -
5 metros para iniciar el bombeo del mismo fluido pero con
mayor presión y gasto, para obtener un impacto hidráuli-
co mayor sobre la obstrucción. El tapón cede normalmente -
al paso de la tubería, pero en caso contrario se deja recar-
gada la tubería sobre la resistencia, continuando con el -
bombeo a alta presión y gasto de diesel. Si a pesar de -
haber realizado lo anterior durante 10 minutos y no se -
observa ningún avance, se procede a preparar y bombear un -
bache de diesel con producto dispersante (Dispersil, Cana-
dex, etc.) y colocarlo sobre el tapón dejándolo reposar de
2 a 4 horas, manteniendo levantada la tubería flexible - -
aproximadamente 200 metros arriba de la resistencia, para
que posteriormente se baje con bombeo de diesel a alta -
presión y gasto y remueva la obstrucción. Después de ha-
ber lavado todo el intervalo donde se colocó el tapón, se-
debe seguir bombeando diesel hasta terminar de desplazar -
los sedimentos provenientes de la remoción del mismo.

INCRUSTACIONES DE SALES (3), (4)

Una incrustación puede definirse como un depósito mineral - formado sobre las superficies que se encuentran en contacto con el agua.

La incrustación en la explotación del petróleo, se presenta desde la propia formación, en el equipo subsuperficial y - superficial de producción, en cambiadores de calor, tanques y sistemas de suministro de agua de inyección. Los depósitos incrustados, son en general formados como resultado de la cristalización y precipitación de las sales contenidas en el agua.

Los principales factores que promueven la formación de incrustaciones son: reducción de presión, cambios de temperatura, concentración de iones no comunes y mezcla de - - aguas conteniendo iones potencialmente incrustantes.

La formación de incrustaciones generalmente se lleva a cabo a condiciones dinámicas y sus causas no siempre son individuales.

Una vez que las condiciones son adecuadas para la precipitación, la formación de un depósito incrustante se lleva a cabo en varias etapas. Inicialmente, en una solución sobresaca

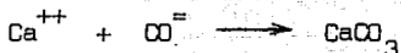
turada, dos iones incrustantes se combinan para formar una molécula. Al combinarse varios miles de moléculas se forma el núcleo que actúa como el punto inicial de crecimiento. - La siguiente etapa es el crecimiento del núcleo que llega a ser lo suficientemente grande, precipitando y formando - - cristales incrustantes visibles, una vez formado el precipitado, algunos cristales se incrustan en la superficie - rugosa del metal y actúan como semillas, a partir de las cuales crece el depósito, formando una estructura compacta y fuertemente adherida a la superficie.

La forma final del depósito, depende del método y tiempo - requerido para formarse la incrustación. Algunos depósitos son blandos y suaves, mientras que otros pueden ser - densos y duros. Estos últimos son el resultado de un lento crecimiento, por lo contrario, las incrustaciones blandas son depositadas rápidamente.

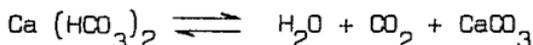
REMOCION DE INCRUSTACIONES DE CARBONATO DE CALCIO^{(3),(4)}

Las incrustaciones de carbonato de calcio son las más frecuentemente encontradas en la explotación del petróleo. El carbonato de calcio puede identificarse fácilmente al contacto con un ácido mineral. La evolución de un gas inodoro indica la presencia de carbonatos.

El carbonato de calcio se forma de acuerdo con la siguiente reacción química:



La presión, la temperatura, y la concentración de otras sales en solución, tienen un marcado efecto sobre la solubilidad del carbonato de calcio. Cuando el dióxido de carbono está en contacto con el agua, se disuelve formando ácido carbónico. Este ácido tiene dos constantes de disociación: K_1 y K_2 . Como K_1 es mayor que K_2 , el ión hidrógeno de la primera ionización debe combinarse con el ión carbonato libre, formándose el ión bicarbonato. Por lo tanto, la precipitación de carbonato de calcio puede expresarse por la ecuación:



La disminución de la presión del sistema, como es el caso - que se presenta desde la vecindad del pozo a través de todo el equipo subsuperficial, propicia la liberación de dióxido de carbono y consecuentemente disminuye la solubilidad del carbonato de calcio. Este desequilibrio químico promueve - la precipitación e incrustación del carbonato de calcio. - La temperatura afecta inversamente, decrementando la solubilidad del carbonato de calcio; sin embargo, este efecto es consideradamente menor que aquél que produce la pérdida de dióxido de carbono por caídas de presión.

La remoción de estas incrustaciones se efectúa colocando un bache de ácido clorhídrico (HCl) al 10% sobre la incrustación siendo desplazado éste con diesel a través de la tubería flexible. El ácido gastado y los productos de reacción son desalojados posteriormente por medio del bombeo de diesel a través de ésta, para que posteriormente se compruebe que la obstrucción haya sido eliminada, introduciéndola con bombeo de diesel a alta presión, hasta verificar la profundidad interior del pozo para eliminar los residuos de la incrustación, dejando así completamente limpio el pozo.

Una vez teniendo la tubería flexible en la superficie, ésta se debe lavar bombeando a través de ella el volumen equivalente de 3 veces la cantidad del volumen de ácido utilizado, con una solución de agua y cal.

REMOCIONES DE INCRUSTACIONES DE CLORURO DE SODIO^{(3),(4)}

La precipitación de cloruro de sodio (NaCl) por lo general es causada por una sobresaturación de la sal en solución - contenida en el agua producida, debido a la evaporación o a una disminución de temperatura.

En pozos productores de gas o en pozos de aceite con alta - relación gas aceite (RGA) produciendo pequeños volúmenes de agua, la precipitación de sal puede ser severa debido a la enorme caída de presión y de temperatura sufrida a través - de las perforaciones de sal.

Para remover este tipo de incrustaciones es necesario bom- bear agua dulce a alta presión, teniendo la tubería flexi- ble sobre la obstrucción, subiéndola y bajándola frecuen- temente sobre dicha incrustación hasta que éste ceda al pa- so de la misma. La Unidad de Tubería Flexible ha sido un excelente medio para efectuar este tipo de trabajos, ya - que puede circular el agua a la presión y profundidad - que se requieran.

COLOCACION DE BACHES DE ACIDO, CEMENTO, FLUIDOS DE TERMINACION O QUIMICOS A LA PROFUNDIDAD REQUERIDA.

A. COLOCACION DE BACHES DE ACIDO.

La colocación de baches de ácido a la profundidad deseada - es realizada muy eficientemente por medio de la tubería flexible. Como ya se mencionó este tipo de bache es usado para la remoción de carbonato de calcio (CaCO_3), también es utilizado este sistema para remover tapones de diesel bentonita que se encuentran fuertemente compactados, como un último recurso al no ceder por los procedimientos convencionales. Cuando se tiene la zona disparada obturada totalmente por sedimentos, y después de haber lavado dicha zona con fluido a alta presión y no se tiene ningún éxito (no admite la formación la inyección de fluido), entonces se coloca un bache de ácido con baja concentración frente a los disparos para que disuelva la mayor cantidad posible del material obturante, y así de esta forma permitir que la formación acepte la inyección de fluidos para posteriormente poder realizar una estimulación e incrementar su productividad.

La colocación de un bache de ácido también es recomendable antes de disparar el intervalo programado.

B. COLOCACION DE UN TAPON DE CEMENTO. (5)

Dentro de las intervenciones a los pozos en ocasiones es necesaria la inyección de baches de cemento para aislar un intervalo productor por diferentes motivos. Uno de ellos es la invasión de agua del intervalo perforado, por lo tanto es primordial la colocación de un tapón de cemento a la profundidad requerida y disparar otro intervalo arriba del taponado. Esta operación requiere en lo general de la instalación de un Equipo de Reparación Convencional, pero con el empleo del Equipo de Tubería Flexible también es posible realizarla, siendo ésta última una alternativa segura y económica.

Para colocar el bache de cemento, es necesario introducir la tubería flexible hasta la profundidad donde se colocará el tapón, con bombeo de agua para evitar un taponamiento o colapso de la misma. A continuación se mezcla la cantidad de cemento requerida midiendo exactamente el volumen del mismo, no olvidándose del rendimiento que tiene con el agua. Para adelgazar la mezcla y evitar turbulencia, se utiliza un aditivo reductor de fricción al 0.5%, también se usa un aditivo para evitar la pérdida de líquidos de 0.2 a 0.5% para disminuir la probabilidad de que el cemento se deshidrate y fragüe antes de tiempo y se quede en la tubería o se quede atrapada la tubería por el cemento. Para evitar fraguado prematuro se debe usar un aditivo retardador de fraguado el cual debe ser efectivo por dos veces o tres del tiempo total de bombeo del cemento más el

tiempo de desplazamiento del mismo, para asegurarse que podrá ser bombeado el cemento totalmente sin tener la incertidumbre de que fragüe la lechada y se quede atrapada la tubería o como ya se mencionó, fragüe en el viaje por la tubería flexible. Después de bombear el cemento y desplazarlo con agua, cuando la capacidad de la tubería flexible ha sido bombeada y el cemento empieza a salir por el extremo de la misma, ésta debe levantarse a una velocidad correspondiente al ritmo de bombeo del bache de desplazamiento, (esto asegura un tapón sólido), al término del desplazamiento del cemento, la punta de la tubería flexible deberá estar en la cima del tapón, posteriormente se levanta la misma de 30 a 50 m y se bombea un volumen cuando menos de 0.5 m³ de agua para desalojar cualquier residuo de cemento de su interior. En la Fig. 17 se puede apreciar cómo queda finalmente un tapón de cemento colocado con la tubería flexible.

C. COLOCACION DE FLUIDOS DE TERMINACION.

Para la colocación de fluidos de terminación en un pozo, se introduce la tubería hasta la profundidad donde será disparado el intervalo productor con bombeo de agua o del fluido de control del pozo, una vez llegando a dicha profundidad se inicia el bombeo del fluido de terminación que se requiere, desplazando un volumen total, igual a la capacidad total de la tubería, de producción y sacando la tubería flexible mientras se observa que esté saliendo el fluido del pozo por la línea de descarga al ser desplazado por el fluido

de terminación.

El procedimiento a seguir para colocar químicos a la profundidad requerida es el mismo seguido para la colocación de baches de ácido.

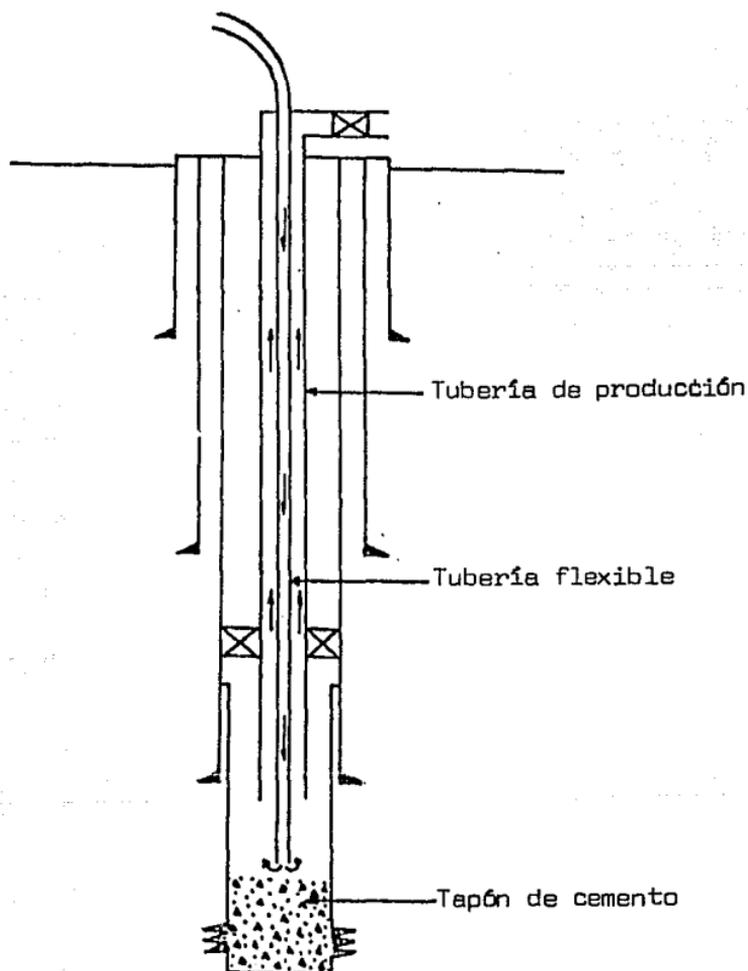


Fig. 17 Colocación de un tapón de cemento.

ALIGERAMIENTOS DE COLUMNAS DE FLUIDOS DEL POZO (INDUC- CION)(2)

En diversas ocasiones al efectuar los disparos en el intervalo productor del yacimiento, no se manifiesta la presión en la cabeza del pozo o sólo manifiesta un ligero "cabeceo" y posteriormente deja de fluir. Esto sucede cuando la presión en el fondo del pozo no es suficiente para vencer las caídas de presión en la tubería vertical y la columna de fluidos o también cuando se tiene un fluido de control con densidad demasiado alta.

Al suceder lo anteriormente expuesto, es necesario realizar una inducción (aligeramiento de la columna hidrostática), desplazando los fluidos del pozo por medio de un fluido de densidad mucho menor (nitrógeno). Con la aplicación del equipo de tubería flexible con unidades de apoyo, como lo son las unidades de inyección de nitrógeno (N_2), es posible realizar la operación en forma rápida, efectiva y económica.

Para realizar una inducción es necesario introducir la tubería flexible dentro del pozo hasta una profundidad ligeramente mayor a la que se encuentra el nivel de la columna de fluidos, e iniciar el bombeo de nitrógeno, mientras se continúa bajando la tubería. Se continúa metiendo la tubería flexible con bombeo de nitrógeno hasta que se termine de -

bombear el volumen programado del mismo, dejando el volumen suficiente de éste, para ser bombeado mientras se extrae - dicha tubería. Al terminar el bombeo de nitrógeno, si no - se ha terminado de extraer la tubería flexible se debe ce- rrar la válvula macho que se tiene en el carrete de tubería, para dejar represionada la tubería mientras se extrae para- evitar que los fluidos del pozo penetren en el interior de ésta y la obturen. La tubería se debe extraer lo más rápi- do posible, pero sin poner en peligro el equipo.

ELIMINACION DE CEMENTO DE LA TUBERIA DE PERFORACION, DE PRODUCCION O DE REVESTIMIENTO USANDO UNA TURBOBARRENA (DYNA DRILL)⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾

La turbobarrena es una herramienta que es útil en la perforación de puentes sólidos, de tapones de cemento o tapones de sedimento fuertemente compactados, donde con simple lavado no se puede limpiar con la tubería flexible. Esta herramienta es usada como un último recurso, ya que la operación con la misma es muy delicada. La herramienta no es recomendable para su uso en pozos desviados, ya que se produce una fricción excesiva entre la tubería flexible y la zapata del aparejo de producción, lo que podría ocasionar una rotura de dicha tubería, cuando se intenta perforar un tapón que se encuentra abajo del mismo, lo cual se debe a la rotación de la herramienta sobre la obstrucción, y a que en todo momento la tubería flexible se encuentra recargada sobre la tubería de producción.

Para perforar con esta herramienta, se conecta la turbobarrena en la tubería flexible por medio de un adaptador y posteriormente se prueba el correcto funcionamiento de la misma por medio del bombeo de fluido a través de ella y observando su movimiento. Después de probar hidráulicamente el equipo, se inicia el descenso de la herramienta con bajo bombeo de fluido hasta el tapón, donde se incrementa la presión de bombeo hasta donde se haya programado para el inicio de la perforación.

Cuando se incrementa la presión en el manómetro de la unidad de bombeo sin haber incrementado el bombeo de fluido, - se debe a que la barrena se ha detenido por un posible atascamiento de la misma al perforar demasiado rápido. Cuando esto sucede, se debe subir la tubería flexible y bajarla nuevamente pero lentamente cargándole el peso adecuado para perforar no permitiendo que se detenga su rotación por - atascamiento debido al exceso de peso recargado (máximo - - 1350 Kg.). Después de perforar el intervalo programado, se repasa 3 ó 4 veces con dicha herramienta para estar seguros de haber eliminado el tapón y sacar la herramienta a la superficie.

ESTIMULACION CON ACIDO^{(1),(4)}

La estimulación de un pozo puede definirse como el proceso mediante el cual se restituye o se crea un sistema extensivo de canales que sirven como sistema de conducción para facilitar el flujo de fluidos de la formación al pozo, o de éste a la formación.

Una de las aplicaciones más importantes de la estimulación es la remoción del daño en la formación en la zona vecinal al pozo. El daño a una formación productora de hidrocarburos es la pérdida de productividad parcial o total y natural o inducida de un pozo, resultado de un contacto con fluidos o materiales extraños o de un obturamiento de los canales permeables asociado con el proceso natural de producción.

Las fuentes principales de daño a la formación son dos: la primera y más importante se origina por el contacto e invasión de materiales extraños al yacimiento, como pueden ser materiales provenientes de los fluidos de perforación, terminación o reparación o inclusive de la propia estimulación del pozo. La otra fuente se origina por el proceso natural de producción de los pozos al alterarse las características originales de los fluidos producidos o por la alteración entre el flujo de estos fluidos y los materiales sólidos que constituyen la roca.

Por medio de la unidad de tubería flexible se pueden realizar estimulaciones con ácido, ya que se puede colocar el bache en forma precisa a la profundidad de los disparos y forzarlo contra la formación con lo cual se limpiará la pared del pozo y la zona vecina, permitiendo un mejor flujo de fluidos del yacimiento hacia el pozo o del pozo a la formación.

Para realizar esta operación es necesario bajar la tubería flexible en el pozo, bombeando fluido (agua o diesel) a través de ella, para mantener la presión en su interior y evitar que penetren los fluidos del pozo en su interior. A 200 m arriba de la profundidad programada, bombear fluido con un gasto de 80 lts/min, hasta obtener circulación y bajar hasta la profundidad programada. En esta profundidad se debe estacionar la tubería y bombear un volumen determinado de una solución acuosa concentrada de inhibidor de corrosión e iniciar el bombeo del ácido el cual debe llevar un inhibidor de corrosión con concentración mínima de dos veces al recomendado en el primer bache, siendo desplazado con un volumen de agua equivalente a la capacidad total de la tubería flexible. Posteriormente se levanta ésta, hasta que quede arriba del ácido, y se represiona por una rama de la tubería de producción (habiendo cerrado la válvula macho del carrete para evitar el colapso de la tubería) para inyectar el ácido a la formación productora de hidrocarburos. Se saca la tubería flexible bombeando agua a través de ella.

IV. SISTEMA HIDRAULICO EN
OPERACIONES DE CAMPO

Las condiciones hidráulicas bajo las cuales la tubería flexible opera en el campo, se han basado tradicionalmente solo en los datos superficiales de presión y gasto. Actualmente dicho gasto de circulación con su respectiva presión superficial, se fija sin hacer un verdadero análisis del comportamiento de flujo del fluido en el sistema tubería flexible pozo y zona donde se encuentra la resistencia a vencer. En ocasiones se utilizan eyectores en la punta de la tubería con el fin de realizar la operación en forma rápida, pero los diámetros de los orificios son elegidos al azar, sin tomar en consideración parámetros que indiquen que se está trabajando con una hidráulica optimizada en el sistema de circulación. Esto arroja malos resultados y en muchas ocasiones conduce a realizar la operación con costos excesivos y en forma ineficiente.

A continuación se planteará una forma de optimizar la hidráulica del sistema de circulación de la tubería flexible y el pozo, utilizando eyectores en la punta de dicha tubería, basándose en un método de campo utilizado en la perforación de pozos⁽⁷⁾. Este método toma como parámetros principalmente: la presión superficial de bombeo, la caída de presión sufrida a través del eyector y la pérdida de presión por fricción en el sistema de circulación.

PLANTEAMIENTO TEORICO.

Cuando se utiliza la hidráulica óptima, se pueden obtener - excelentes velocidades de penetración. Para hacer el diseño adecuado de la hidráulica óptima, es necesario determinar - la caída de presión a través del sistema de circulación, - (tubería flexible y espacio anular, entre ésta y la tubería de producción) que permita el mayor gasto posible que maximice la fuerza de impacto, pudiéndose obtener con el método que se presenta a continuación. Así también se requiere determinar la caída de presión a través de los orificios del - eyector, la cual puede calcularse de manera precisa por medio del procedimiento presentado más adelante.

Aquí se presenta un análisis gráfico, el cual maximiza el - impacto hidráulico en el fondo del agujero (donde se encuentre la resistencia). Este análisis es similar a uno presentado por Preston L. Moore⁽⁸⁾, e incluye todas las condiciones limitantes, para no permitir un cálculo erróneo.

Las reglas del cálculo hidráulico asumen que cuando el flujo es laminar la caída de presión varía linealmente con el gasto, y cuando el flujo es turbulento, la caída de presión varía proporcionalmente con el gasto elevado al cuadrado⁽⁸⁾.

CALCULO HIDRAULICO⁽⁷⁾.

Mientras se circula a la profundidad donde se encuentra la resistencia, habiendo introducido la tubería con un eyector de diámetro aleatorio, la máxima fuerza de impacto es lograda por el fluido cuando la potencia hidráulica es apropiadamente distribuida entre pérdidas por fricción y el trabajo útil en el eyector.

Una vez que el pozo está siendo intervenido, las pérdidas de presión se pueden determinar experimentalmente en una forma rápida y precisa.

En el momento mismo de estar situada la tubería con el eyector en la cima de la resistencia, se mide el gasto de bombeo a través de la tubería flexible, a tres o más diferentes presiones distribuidas uniformemente dentro del rango de presión máxima permisible, por ejemplo; si la presión máxima permisible en la superficie es de 5000 lb/pg² se pueden seleccionar las presiones de 1000, 2000 y 4000 lb/pg² y se mide a cada presión estabilizada el gasto correspondiente. En estas condiciones la presión superficial de bombeo (P_s) va a estar constituida de dos partes:

- a) La caída de presión que se tiene en el sistema de circulación (ΔP_{circ}), (tubería flexible y espacio-anular, entre ésta y la tubería de producción).

b) La caída de presión a través de los orificios --
(ΔP_{orif}):

$$P_s = \Delta P_{\text{circ}} + \Delta P_{\text{orif.}} \quad (1)^*$$

La caída de presión sufrida a través de los orificios del -
eyector se puede calcular por medio de la ecuación de balan-
ce de energía de Bernulli: (9)

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} \quad (2)^*$$

despejando P_1 de la ecuación (2):

$$P_1 = P_2 + \frac{\rho(\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2)}{2g} \quad (3)$$

Debido a que la velocidad del fluido en el interior de la -
herramienta es mucho menor que a la salida de la misma se -
tiene que:

$$\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2 \cong \bar{V}_2^2 \quad (4)$$

por lo tanto:

$$\bar{V}_2 \cong \left[\frac{2g}{\rho} (P_1 - P_2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

* Nomenclatura y unidades en el Capítulo VI.

Para poder tener una igualdad, una práctica común es la introducción a la ecuación de un factor de corrección conocido como coeficiente de descarga (C_d), el cual modifica la ecuación de la siguiente manera:

$$\vec{V}_2 = C_d \left[\frac{2g}{\rho} (P_1 - P_2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Debido a que la diferencia de presión existente entre la presión en el interior de la herramienta (P_1) y la presión a la salida de la misma (P_2) da como resultado la caída de presión en los orificios, se tiene:

$$\Delta P_{\text{orif}} = \frac{\rho \vec{V}_2^2}{2g C_d^2} \quad (7)$$

debido a que:

$$\vec{V}_2 = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

entonces:

$$\Delta P_{\text{orif}} = \frac{\rho Q^2}{2g C_d^2 A^2} \quad (9)$$

El valor que toma el coeficiente de descarga para velocidad-

des relativamente altas, es de 0.98, pero un valor de 0.95- es un límite más práctico⁽⁶⁾. Un estudio subsecuente hecho por Havenar⁽¹⁰⁾ indica que el valor del coeficiente de descarga está influenciado solamente por la geometría del orificio.

La ecuación incluyendo el valor del coeficiente de descarga puede expresarse en unidades prácticas de la siguiente manera:⁽⁹⁾

$$\Delta P_{\text{orif.}} = \frac{f Q^2}{10853 A^2} \quad (10)$$

De acuerdo con la densidad del fluido y el área libre al flujo correspondiente a los orificios del eyector, con los valores del gasto medido a las tres diferentes presiones antes mencionadas, se calcula con la ecuación (10) las correspondientes pérdidas de presión en los orificios. Con estos valores y la ecuación (1), teniendo ya el valor de la presión superficial de bombeo para cada gasto, se obtienen las pérdidas de presión por fricción en el sistema de circulación.

Al graficar en papel doble logarítmico los valores de presión superficial de bombeo contra el gasto correspondiente, se obtiene una tendencia a línea recta tal como se presenta con pequeños cuadrados en la Fig. 18. Si ahora a cada valor de presión superficial se le resta el asociado de pérdi

da de presión en los orificios obtenida con la ecuación (10), tal como se indica en la Fig. 19 con círculos, se determina una tendencia lineal en la gráfica para las pérdidas de presión en el sistema de circulación. Esta línea de referencia tiene una pendiente que se denominará u .

Para la determinación de la expresión que indica la caída de presión óptima en los orificios, y por consiguiente la caída de presión óptima en el sistema de circulación, es necesario hacer el siguiente análisis. ⁽¹²⁾

De acuerdo con la segunda Ley de Newton se tiene:

$$F = m a \quad (11)$$

$$a = \vec{v}/t \quad (12)$$

Sustituyendo la ecuación (12) en la número (11) se tiene:

$$F = m \vec{v}/t \quad (13)$$

Haciendo un análisis dimensional se tiene:

$$\frac{m}{t} = \rho Q \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación (14) en la (15) se tiene:

$$F = \rho Q \bar{v} \quad (15)$$

De la ecuación (9) se tiene:

$$\Delta P_{\text{orif.}} = \frac{\rho Q^2}{K_1 A^2} \quad (16)$$

Teniendo como base que:

$$Q = A \bar{v} \quad (17)$$

entonces:

$$Q^2 = A^2 \bar{v}^2 \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación (18) en la (16) se tiene:

$$\Delta P_{\text{orif.}} = \rho \bar{v}^2 / K_1 \quad (19)$$

Despejando la velocidad \bar{v} de la ecuación (19):

$$\bar{v} = (\Delta P_{\text{orif.}} K_1 / \rho)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Sustituyendo la ecuación (20) en la ecuación (15):

$$F = Q (K_1 \rho \Delta P_{\text{orif.}})^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Si la densidad del fluido se considera constante, se puede definir otra constante:

$$K = (K_1 \rho)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación (22) en la (21):

$$F = K Q \Delta P_{\text{orif.}}^{0.5} \quad (23)$$

Esta ecuación relaciona directamente la fuerza de impacto del fluido contra la obstrucción, con la caída de presión a través de los orificios.

Por otra parte, de la ecuación (1) se tiene:

$$\Delta P_{\text{orif.}} = P_s - \Delta P_{\text{circ.}} \quad (24)$$

De acuerdo al comportamiento de la caída de presión en el sistema de circulación indicado en la Figura 15, ésta puede representarse como directamente proporcional al gasto Q ele

vado al exponente u , es decir:

$$\Delta P_{\text{circ.}} = K_p Q^u \quad (25)$$

donde: $K_p = \text{Cte.}$ y normalmente se ha encontrado que⁽⁷⁾:

si el flujo es laminar:

$$u = 1$$

si el flujo es turbulento:

$$u = 2$$

Como se aprecia en la ecuación (23), la fuerza máxima de im pacto se tendrá para la máxima caída de presión en los orificios, asimismo de la ecuación (24) para obtener la máxima caída de presión en los orificios se hace necesario reali-
zar la operación con la presión superficial máxima permisi-
ble y la mínima caída de presión en el sistema de circula-
ción que optimice la pérdida de presión en los orificios. -
De aquí se tendrá:

$$\Delta P_{\text{orif. opt.}} = P_{s \text{ max.}} - \Delta P_{\text{circ. opt.}} \quad (26)$$

Sustituyendo la ecuación (25) en la ecuación (26) se tiene:

$$\Delta P_{\text{orif. opt.}} = P_{s \text{ max.}} - K_p Q^u \quad (27)$$

Sustituyendo ahora la ecuación (27) en la ecuación (23):

$$F_{\text{orif.}} = K Q (P_{s \text{ max.}} - K_p Q^u)^{0.5} \quad (28)$$

Arreglando términos en la ecuación (28) queda:

$$F_{\text{orif.}} = K (Q^2 P_{s \text{ max.}} - K_p Q^{u+2})^{0.5} \quad (29)$$

Derivando la fuerza $F_{\text{orif.}}$ respecto al gasto Q , se tiene:

$$\frac{dF_{\text{orif.}}}{dQ} = \frac{K [2Q P_{s \text{ max.}} - K_p (2+u) Q^{u+1}]}{2(Q^2 P_{s \text{ max.}} - K_p Q^{u+2})^{0.5}} \quad (30)$$

Para maximizar la fuerza de impacto se debe tener:

$$\frac{dF_{\text{orif.}}}{dQ} = 0 \quad (31)$$

Para que esto se cumpla, el numerador de la ecuación (30) - se tiene que igualar a cero:

$$2Q P_{s \text{ max.}} - K_p (2 + u) Q^{u+1} = 0 \quad (32)$$

Despejando la presión superficial máxima de la ecuación -- (32) queda de la siguiente manera:

$$P_{s \text{ max.}} = \left(\frac{2 + u}{2} \right) K_p Q^u \quad (33)$$

Sustituyendo la ecuación (25) en la ecuación (33) se tiene:

$$P_{s \text{ max.}} = \left(\frac{2 + u}{2} \right) \Delta P_{\text{circ. opt.}} \quad (34)$$

debido a que de esta manera se tiene maximizada la fuerza de impacto, también se tendrá optimizada la caída de presión en los orificios y en el sistema de circulación.

Despejando la caída de presión óptima en el sistema de circulación $\Delta P_{\text{circ. opt.}}$ de la ecuación (34):

$$\Delta P_{\text{circ. opt.}} = \left(\frac{2}{u + 2} \right) P_{s \text{ max.}} \quad (35)$$

Sustituyendo la ecuación (35) en la ecuación (26):

$$\Delta P_{\text{orif. opt.}} = P_{s \text{ max.}} - \left(\frac{2}{u + 2} \right) P_{s \text{ max.}} \quad (36)$$

Arreglando términos:

$$\Delta P_{\text{orif. opt.}} = \left(1 - \frac{2}{u + 2}\right) P_s \text{ max.} \quad (37)$$

Finalmente la ecuación (37) se puede expresar:

$$\Delta P_{\text{orif. opt.}} = \left(\frac{u}{u + 2}\right) P_s \text{ max.} \quad (38)$$

El valor de u se puede obtener como la pendiente de la recta asociada a la gráfica doble logarítmica de la caída de presión en el sistema de circulación contra gasto como se puede apreciar en la Fig. 19.

El valor de la caída de presión óptima a través del sistema de circulación obtenido por medio de la ecuación (35) se intersecta con la recta de la gráfica doble logarítmica de caída de presión a través del sistema de circulación, contra el gasto y se obtiene el gasto óptimo correspondiente a dicho valor, como se presenta en la Fig. 19.

Despejando el área de la ecuación (10) es la forma como se obtiene el área de los orificios correspondiente al gasto óptimo:

$$A = Q_{\text{opt.}} \left(\frac{\rho}{10853 \Delta P_{\text{orif. opt.}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

como:

$$A = \frac{\pi D_{\text{orif.}}^2}{4}$$

de esta ecuación se tiene:

$$D_{\text{orif.}} = 2 (A/\pi)^{0.5} \quad (40)$$

La velocidad del fluido se obtiene mediante la ecuación (8), y sustituyéndose la misma al igual que el gasto óptimo y la densidad del fluido en la ecuación (15), se obtiene la fuerza de impacto que se tendría sobre la obstrucción.

EJEMPLO DE APLICACION

Con el fin de aplicar el método antes expuesto, se hicieron determinaciones de campo con la tubería flexible colocada sobre la resistencia presentada por un tapón diesel bentonita a 2612 m. en las condiciones del pozo esquematizado en la Fig. 20. Los gastos obtenidos para diferentes presiones de bombeo de diesel, en condiciones de circulación del pozo fueron los siguientes:

P_s (lb/pg ²)	Q (gal/min)
1 000	10.5
2 000	21.0
3 000	31.5
4 000	42.0

teniéndose un diámetro de orificio de 0.6 pg, la densidad del fluido de 6.66 lb/gal (0.8 gr/cm³) y la presión superficial máxima permisible de 5 000 lb/pg² como datos adicionales.

Por medio de la ecuación (10) se calcula la caída de presión a través del orificio del eyector para cada gasto como se anota a continuación:

Q (gal/min)	$\Delta P_{\text{orif.}}$ (lb/pg ²)
10.5	0.84
21.0	3.38
31.5	7.62
42.0	13.54

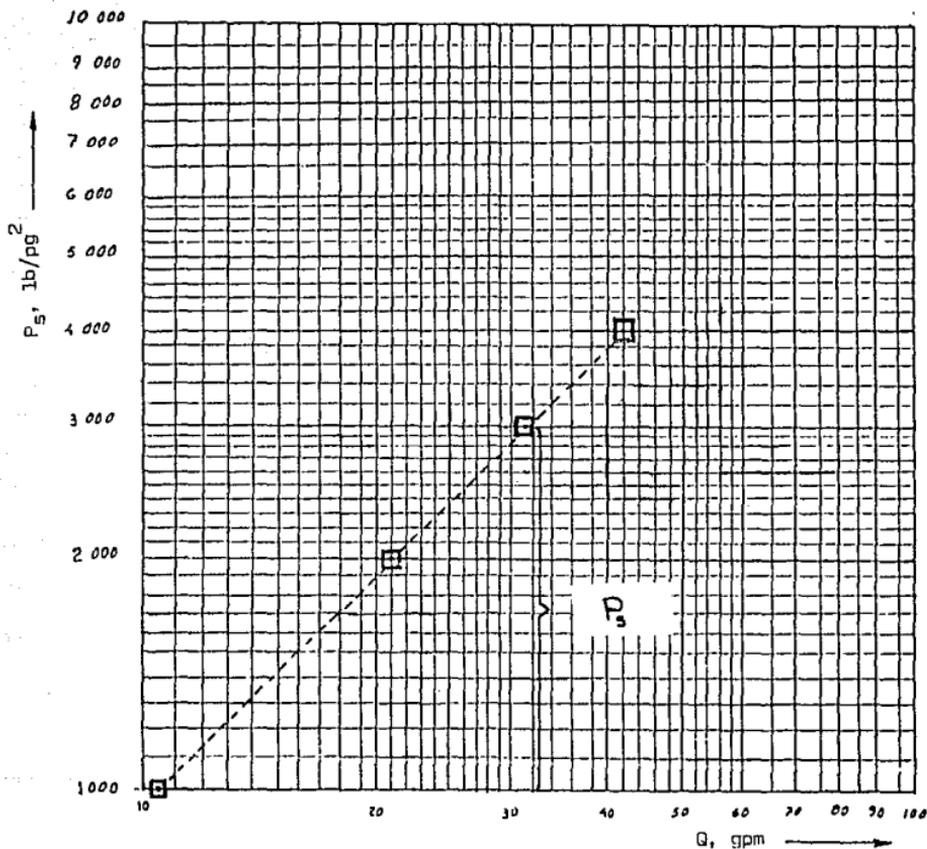


Fig. 1B Comportamiento doble logarítmico de la presión superficial de bombeo, contra el gasto.

Debido a que la caída de presión a través del sistema de circulación está dada por la ecuación (24), haciendo el despeje de la misma y sustituyendo los valores de la caída de presión sufrida a través del orificio ya calculados anteriormente se tiene:

Q (gal/min)	$\Delta P_{\text{circ.}} (\text{lb/pg}^2)$
10.5	999.16
21.0	1 996.72
31.5	2 992.38
42.0	3 986.46

Se construye una gráfica en papel doble logarítmico de la presión superficial de bombeo contra el gasto, y de la caída de presión a través del sistema de circulación contra el gasto con los datos obtenidos anteriormente. Se traza una recta que pase por el mayor número de puntos graficados de la caída de presión en el sistema de circulación contra el gasto, como se ilustra en la figura 19. La recta anteriormente mencionada tiene una pendiente u con el valor siguiente:

$$u = 1.0075$$

Por medio de la ecuación (35) y (38) se determina la caída de presión óptima a través del sistema de circulación y a través del orificio respectivamente, en unidades prácticas:

$$\Delta P_{\text{circ. opt.}} = \frac{2}{2 + 1.0075} (5\ 000) = 3\ 325 \text{ lb/pg}^2$$

$$\Delta P_{\text{orif. opt.}} = \frac{1.0075}{1.0075 + 2} (5\ 000) = 1\ 675 \text{ lb/pg}^2$$

Con el valor de la caída de presión óptima a través del sistema de circulación se intersecta a la recta de la gráfica en la Fig. 19 y se obtiene el gasto óptimo correspondiente, el cual es:

$$Q_{\text{opt.}} = 36.4 \text{ gal/min} = 0.08109 \text{ pie}^3/\text{seg.}$$

Sustituyendo este valor del gasto, el valor de la caída de presión óptima a través del orificio y el de la densidad del fluido en la ecuación (39) se obtiene el área de los orificios correspondientes al gasto óptimo:

$$A = 36.4 \left(\frac{6.664}{10853 * 1675} \right)^{0.5} = 0.02203 \text{ pg}^2 = 1.5309 \times 10^{-4} \text{ pie}^2$$

El diámetro del orificio se obtiene con la ecuación (40)

$$D_{\text{orif. opt.}} = 2 \left(\frac{0.02203}{\pi} \right)^{0.5} = 0.16747 \text{ pg}$$

La velocidad del fluido a la salida del orificio se obtiene mediante la ecuación (8):

$$\bar{V}_{\text{opt.}} = \frac{0.08109}{1.530 \times 10^{-4}} = 530 \text{ pie/seg}$$

La fuerza de impacto está dada por la ecuación (15); y en unidades prácticas es:

$$F_{\text{orif. opt.}} = \frac{6.664 (36.4) (530)}{60 * 32.2} = 66.54 \text{ Lb}_f$$

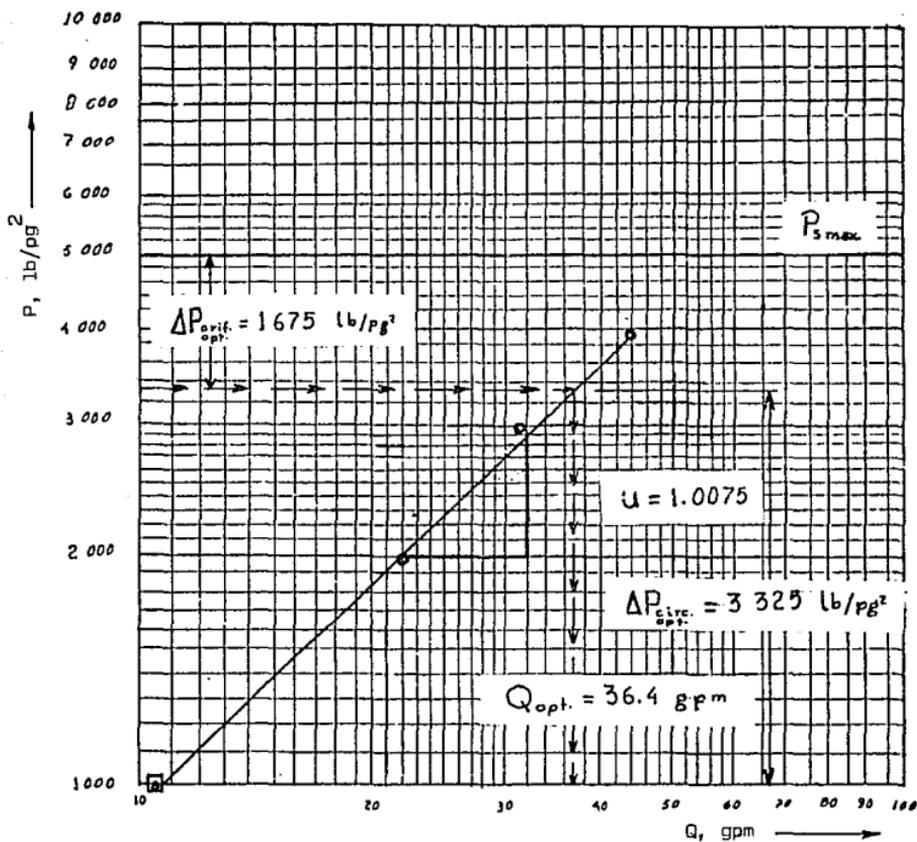


Fig. 19 Diagrama representativo del comportamiento doble logarítmico de la caída de presión en el sistema de circulación contra el gasto.

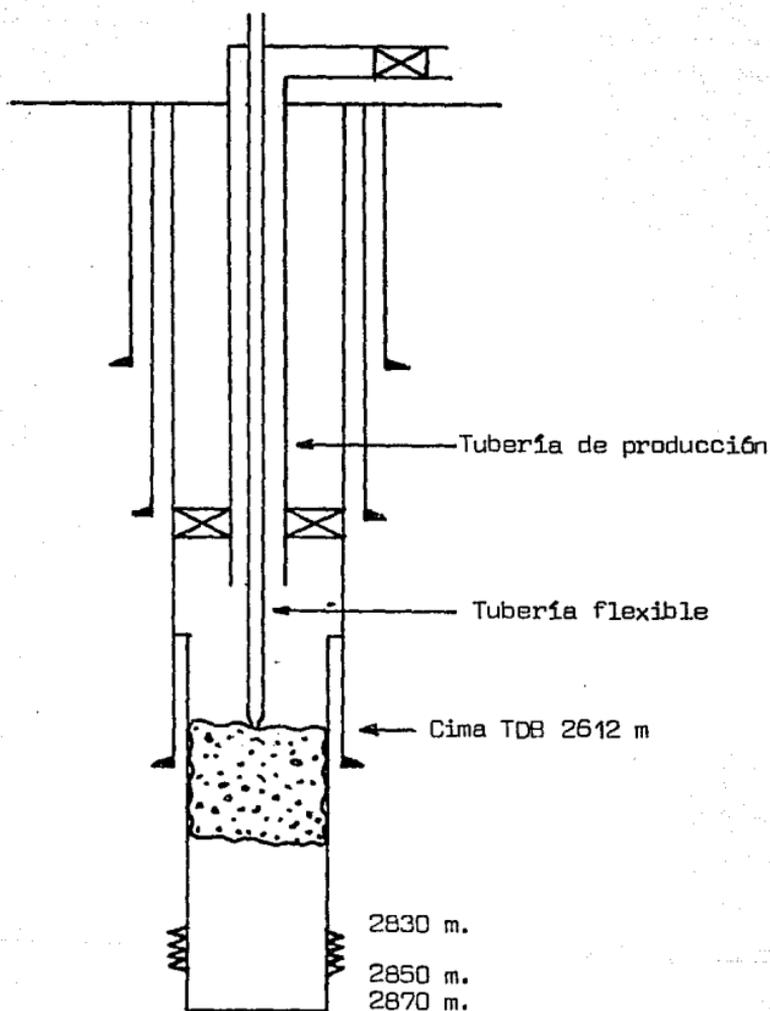


Fig. 20 Diagrama representativo de un pozo con un tapón de diesel bentonita.

USO DE POLIMEROS

Para mejorar la hidráulica del sistema de circulación, se puede reducir la pérdida de presión por fricción creada por el flujo del fluido a través de la tubería flexible y el espacio anular formado por ésta y la tubería de producción mediante la adición de un polímero en una proporción de 0.3 % en volumen mezclado, y de esta forma tener una mayor presión en el eyector, la cual es aprovechada para incrementar el impacto hidráulico.

La Fig. 21 muestra la capacidad de la reducción de fricción del polímero. Esta prueba fue realizada para determinar la pérdida de presión por fricción en tubería flexible de 1 pg. de diámetro exterior y 0.85 pg. de diámetro interior con una longitud total de 7 175 pies, teniendo la punta abierta y con un filtro dentro de la misma. La reducción de fricción máxima presentada es aproximadamente del 51 %. La capacidad de reducción de resistencia al avance del polímero a través del sistema, se presenta en la Fig. 22 y se puede observar que a una efectividad máxima, se tiene una reducción de fricción del 54%. Para esta prueba la concentración del polímero fue de 50 ppm, con un gasto de 20 gpm, a través de 7 175 pies de tubería con diámetro interior de 0.85 pg. (10)

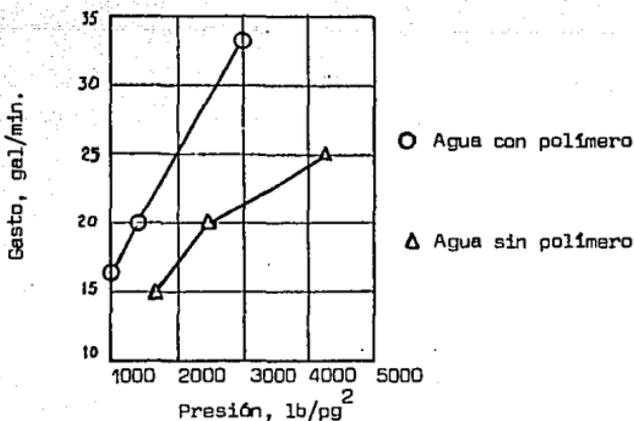


Fig. 21 Capacidad de reducción de fricción proporcionada por un polímero. (10)

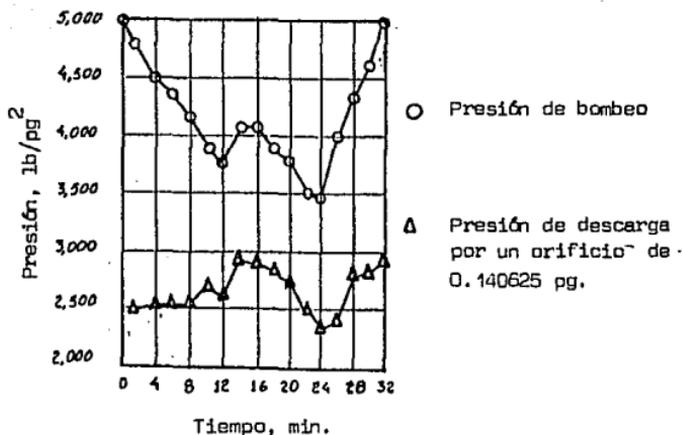


Fig. 22 Capacidad de reducción de la resistencia al avance del polímero contra el tiempo, empezando sin polímero y posteriormente agregando baches a través del sistema. (10)

V. CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES.

El saber lo que se va a hacer cuando se solicita el servicio del Equipo de Tubería Flexible a un pozo, concerniente a la hidráulica del sistema de circulación es muy importante, ya que de ello depende que la intervención sea efectiva y económica.

Con la utilización de eyectores y del método para optimizar la hidráulica en las intervenciones a los pozos con problemas de obstrucciones o tapones de control (diesel bentonita) es posible reducir el tiempo de operación y disminuir los volúmenes del fluido que se utiliza.

El método presentado en el capítulo IV permite obtener una hidráulica optimizada en forma rápida y precisa, ya que basta con hacer pruebas de presión y gasto con un eyector en el extremo de la tubería flexible, y posteriormente seguir los pasos de dicho método para la obtención del diámetro óptimo de orificios del eyector y de la fuerza de impacto que se tendrá sobre la obstrucción con el eyector adecuado. Con esto, es posible efectuar operaciones más eficientes y en menor tiempo.

Es recomendable el uso de la herramienta de limpieza a la cual se hace referencia en el capítulo II, ya que su utilización asegura una mayor limpieza del pozo. También el uso de eyectores convencionales es conveniente, debido a que si se introduce sin ninguna herramienta en el extremo, se puede asegurar que la operación se realizará en un tiempo mucho mayor al que se llevaría si se usa dicha herramienta, trayendo como consecuencia el manejo y desperdicio de gran-

des volúmenes de fluido de limpieza.

Como se puede constatar en el ejemplo de aplicación presentado en el capítulo IV, la fuerza de impacto óptima, teniendo un diámetro óptimo de orificios y la potencia hidráulica apropiadamente distribuida entre pérdidas por fricción y pérdida en el orificio del eyector resulta de 64.5 lb_f. Esta fuerza de impacto es posible obtenerla teniendo un eyector con diámetro óptimo de orificio de 0.165 pg, un gasto de 35.5 gal/min., o en su caso varios orificios con áreas de flujo equivalentes a un orificio de 0.165 pg.

Con este mismo gasto y con el diámetro interior de la tubería flexible de 1.1 pg. sin eyector en el extremo, teniendo bombeo del mismo fluido y haciendo el cálculo con la ecuación (15) en unidades prácticas, se obtiene sólo una fuerza de impacto de 1.5 lb_f.

La diferencia o incremento en la fuerza de impacto es de 63 lb_f lo cual indica que la utilización de este tipo de herramientas proporciona grandes posibilidades de reducir el tiempo y el costo de la operación.

En el mismo ejemplo y en la Fig. 19 se puede apreciar que la mayor parte de la presión de bombeo se pierde por fricción en la tubería ($P_{circ.}$), pero con la utilización de polímeros en el fluido con el fin de reducir las pérdidas hasta en un 5% permitiría tener una mayor presión aplicable en el eyector y en consecuencia, una mayor fuerza de impacto sobre la obstrucción.

VI. NOMENCLATURA
Y
UNIDADES

SIMBOLO	N O M B R E	UNIDADES	
		CONSISTENTES	PRACTICAS
A	Area de los orificios del eyector.	cm ²	pg ²
A _{opt.}	Area óptima de los orificios	cm ²	pg ²
C _d	Coefficiente de descarga.	Adim.	Adim.
D _{orif.}	Diámetro del orificio	cm	pg.
D _{orif. opt.}	Diámetro del orificio óptimo o equivalente.	cm	pg
F	Fuerza	gr _f	lb _f
F _{orif. opt.}	Fuerza de impacto del fluido en la salida de los orificios del eyector óptima.	gr _f	lb _f
g	Aceleración gravitacional.	cm/seg ²	pie/seg ²
K	Constante.	(gr _m /cm ³) ^{1/2}	(lb _m /gal) ^{1/2}
K ₁	Constante.	Adim.	Adim.
K _p	Constante.	Adim.	Adim.

UNIDADES

SIMBOLO	N O M B R E	UNIDADES	
		CONSISTENTES	PRACTICAS
m	Masa	gr _m	lb _m
P ₁	Presión en el interior del eyector.	gr _f /cm ²	lb _f /cm ²
P ₂	Presión a la salida - de los orificios del eyector.	gr _f /cm ²	lb _f /cm ²
P _s	Presión superficial - de bombeo.	gr _f /cm ²	lb _f /pg ²
P _{s max.}	Presión superficial - de bombeo máxima.	gr _f /cm ²	lb _f /pg ²
Q	Gasto de circulación	cm ³ /seg	gal/min.
Q _{opt.}	Gasto óptimo	cm ³ /seg	gal/min.
t	Tiempo	seg.	seg.
u	Pendiente de la recta asociada a los valores graficados de presión y gasto.	Adim.	Adim.
v	Velocidad del fluido - a la salida de los orificios del eyector.	cm/seg	pie/seg

SIMBOLO	N O M B R E	UNIDADES	
		CONSISTENTES	PRACTICAS
\vec{v}_1	Velocidad del fluido dentro del eyector	cm/seg	pie/seg
\vec{v}_2	Velocidad del fluido a la salida de los orificios.	cm/seg	pie/seg
$\vec{v}_{opt.}$	Velocidad óptima del fluido a la salida de los orificios.	cm/seg	pie/seg
$\Delta P_{circ.}$	Caída de presión en el sistema de circulación.	gr_f/cm^2	lb_f/pg^2
$\Delta P_{circ. opt.}$	Caída de presión óptima en el sistema de circulación.	gr_f/cm^2	lb_f/pg^2
$\Delta P_{orif.}$	Caída de presión en los orificios del eyector.	gr_f/cm^2	lb_f/pg^2
$\Delta P_{orif. opt.}$	Caída de presión óptima en el orificio del eyector.	gr_f/cm^2	lb_f/pg^2
ρ	Densidad del fluido	gr_f/cm^3	lb_f/gal

VII. REFERENCIAS

- 1.- Apuntes de Estimulación de Pozos
Carlos Islas S.
UNAM, 1987
- 2.- Manual Hydra-Rig
Hydra Rig, Co.
- 3.- Evaluación Experimental de Inhibidor de Incrustaciones
A. Muñoz H.
Carlos Islas S.
Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, Enero 1977.
- 4.- Manual de Procedimientos para la Intervención de Pozos
Petroleros Costafuera con Tubería Flexible.
M.A. Mendoza H.
Tesis Profesional, México. 1986
- 5.- Endless Tubing Unit Manual
Newsco Well Service, LTD 1981
- 6.- Flow of Muds, Sludges, and Suspensions in Circular Pipe
D. H. Caldwell
H. E. Babbit
Industrial Engineering Chemistry, 33, 249 (1941)
- 7.- On Site Nozzle Selection Increase Drilling Performance
Leon Robinson
Petroleum Engineer International
December 1981

- 8.- Drilling and Practices Manual
Preston L. Moore
- 9.- Design Drilling and Production
B. C. Craft
W. R. Holden
E. D. Graves Jr.
Prentice Hall, Inc, 51-53, 1960.
- 10.- New Coil Tubin Jet Cleaning System Reduces Costs.
Charles C. Cobb.
Casper W. Zublin.
Petroleum Engineer International
October 1985
- 11.- Equipos Hidráulicos Especiales para el Mantenimiento -
de Pozos, Caso de la Tubería Flexible.
Olivares Torralba Aciel.
Tesis Profesional, México, 1987
- 12.- Design and Operation of jet Bit Programs For Maximum
Hydraulic Horsepower, Impact Force or Jet Velocity.
H. A. Kendall
W. C. Goins
Trans. AIME, 1960