

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO**



“ Estudio Técnico Económico de los  
Sistemas de Control de Sólidos en los  
Lobos de Perforación en el Noroeste”

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
**INGENIERO PETROQUIMICO**

**MANUEL H. VASQUEZ ALEGRE**

*Promoción 78 - 2*

**Lima - Perú - 1990**

**ESTUDIO TECNICO ECONOMICO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE SOLIDOS  
EN LOS LODOS DE PERFORACION EN EL NOROESTE.**

**SUMARIO**

El presente trabajo contempla el estudio técnico económico de los equipos de control de sólidos de los equipos de perforar de Petróleos del Perú en el Noroeste.

Se ha realizado un análisis de la conveniencia de trabajar con equipos de control de sólidos en óptimas condiciones, realizándose la evaluación económica respectiva en base al ahorro potencial que hubiese tenido la empresa, en la perforación de los pozos del año 1988.

Se ha determinado la eficiencia con que han venido trabajando los equipos de control de sólidos, mediante pruebas de campo.

Asimismo se diseñó cada uno de los equipos (zaranda, desarenador y desilter), considerando para tal efecto un lodo base con ciertas propiedades reológicas, velocidad de penetración, y un determinado caudal de bombas, que sirva de guía para realizar cualquier diseño a diferentes condiciones de operación, puesto que cada pozo tiene que ser visto individualmente, por tener diferentes propiedades de lodo, condiciones de operación (Bombas, cantinas, etc.), estado de los equipos de control de sólidos, velocidad de penetración, etc

## INDICE

### I Antecedentes

### II Introducción

2.1.Objetivo del estudio

2.2.Historia de los equipos de control de solidos (zaranda,  
hidrociclones)

### III.Desarrollo teórico

3.1.Problemas de los sólidos en los fluidos de perforación

3.2.Efectos de los sólidos sobre las propiedades reologicas

3.3.Clasificación de los sólidos de perforación

3.4. Causas potenciales de los problemas de sólidos

3.5.Remoción de sólidos

### 3.6. Vibradores ó zarandas

3.6.1.Generalidades

3.6.2.Indicadores de la operación normal de una zaranda

3.6.3.Determinación de la capacidad de una zaranda

3.6.4.Mantenimiento

### 3.7.Hidrociclones

3.7.1.Generalidades

3.7.2.Diámetro límite de separación

3.7.3.Dimensionamiento

3.7.4.Clasificación de los hidrociclones

3.7.5.Variables que afectan el rendimiento de los  
hidrociclones

3.7.6.Condiciones de operación

3.7.7.Clasificación según el tamaño de los hidrociclones

3.7.8.Mantenimiento

### 3.8.Evaluación de equipos de control de sólidos

3.8.1.Cálculo de la eficiencia de un equipo de control de  
sólidos

3.8.2.Medición del rendimiento de los hidrociclones

#### IV. Aplicaciones

4.1. Eficiencia del equipo de control de sólidos en el  
Noroeste

4.2. Diseño de los equipos de control de sólidos

#### V. Evaluación económica

#### VI. Conclusiones y Recomendaciones

#### VII. Bibliografía

#### VIII. Anexos

## I. ANTECEDENTES

Previamente a la realización de este trabajo, se realizó un estudio preliminar en el cual se determinó que se estaba gastando adicionalmente a los costos de perforación cientos de miles de dólares, por tener un deficiente equipo de control de sólidos. Inicialmente se pensó optimar el funcionamiento de dichos equipos pero debido a la escasez de repuestos ó materiales como son las mallas, conos, boquillas, manómetros, etc.; muchos de estos equipos se encuentran inoperativos ó en su defecto se encuentran trabajando con limitaciones según se muestra en el Anexo I.

En tal sentido se decidió realizar la evaluación técnica económica respectiva, evaluar el estado actual de los equipos de control de sólidos, determinar los parámetros a considerar en el diseño de dichos equipos y preparar las respectivas recomendaciones y conclusiones para tratar de reducir al máximo los cientos de miles de dólares que se están gastando por deficiencia de dichos equipos.

## II. INTRODUCCION

El factor mas importante que contribuye por si solo a mantener buenas propiedades reológicas en la mayoría de los fluidos de perforación, es un contenido bajo de sólidos nativos. Son bien conocidas las ventajas de usar un fluido de perforación con un contenido de sólidos lo más bajo posible.

No solamente se consiguen velocidades de penetración mas rápidas sino que las bombas operan mas eficientemente, un mejor revoque es formado en la pared del pozo y se usa menos material en el fluido de perforación. También la bomba puede desplazar un fluido a un caudal dado con un menor aumento de presión, reduciendo las presiones anulares y minimizar la posibilidad de pérdida de circulación.

Un mayor caballaje hidráulico, que de otro modo se perdería en el sondeo y portamechas, es transmitido a las boquillas del trépano. Los recortes no removidos consumen caballaje al ser recirculados y dispersados en la fase líquida causando una reología pobre, limpieza de pozo inadecuada y velocidades de perforación reducidas. El problemas de control de sólidos es tan complejo y económicamente tan importante que cualquier medio disponible debería ser utilizado para su solución. Aunque no es una tarea fácil en la mayoría de las veces, la remoción de los sólidos incorporados se hace más difícil en un lodo pesado.

## 2.1. OBJETIVO DEL ESTUDIO

El propósito de este trabajo es determinar la importancia del uso de los equipos de control de sólidos, fijar los métodos de control de eficiencia de separación de sólidos y tratar de mejorar y/o optimar dichas condiciones operación, además de ver cual es su repercusión económica en la perforación de los pozos del Noroeste.

Es de conocimiento que el mayor costo del tratamiento del fluido de perforación se debe principalmente al tratamiento los sólidos de perforación en el sistema; siempre es más económico remover los sólidos de perforación que controlarlos con productos químicos.

## 2.2. HISTORIA DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE SOLIDOS (ZARANDAS, HIDROCICLONES)

Los medios mecánicos para la limpieza del lodo fueron usados por la minería, muchos años antes de empezar la perforación rotaria, en el tratamiento de los minerales y en el vaceado del carbón

Hubieron 3 tipos básicos:

1. Cantinas ubicadas en un plano inclinado para lavar los minerales.
2. Mallas de hierro perforadas ligeramente inclinadas
3. Zarandas vibratorias inclinadas y lisas, posteriormente introdujo la mallas rotativas.

Antes de 1930 el lodo de la perforación rotaria estaba sujeto a remociones de las cantinas de asentamiento. A fines de 1929 el primer medio mecánico para la limpieza del lodo de perforación fue introducido dentro de los campos de KETTLEMAN HILLS OIL FIELD de California por la Cía. Link-Belt, fabricante de equipos para minería. Este primer dispositivo fue la zaranda desarrollado a partir del tamiz ó mallas vibratorias.

Los siguientes párrafos fueron preparados por un ingeniero de Link Belt, durante los inicios de 1950.

La zaranda consiste esencialmente de una malla o celosía de acero montada elásticamente, a la cual se añade una unidad vibratoria tipo desbalanceada, la cual imparte a la malla un movimiento aproximadamente de 1/16" de órbita circular y de 1800 a 2000 ciclos/minuto. La malla media es generalmente de acero inoxidable de 20 a 30 de malla, tiene aberturas entre 0.033 y 0.020 pulg. La malla es estrechamente tensionada en la estructura y responde a las vibraciones impartidas a través de la estructura. No solamente se asegura la remoción de los cortes, arena y arcilla mayores que el tamaño de la malla, sino que por adhesión, a estas, partículas mas pequeñas que el tamaño de la malla son eliminadas. La zaranda vibratoria además ofrece lá ventaja adicional del reacondicionamiento del lodo cortado por GAS, debido a la aereación a medida que este pasa a través de la malla.

La zaranda entonces ofrece las siguientes ventajas evidentes:

1. Una separación de los cortes y el lodo. Aun con lodos viscosos, pesados se obtiene una buena separación; anteriormente el lodo tenia que ser descartado, debido a que

los cortes no se separaban. Tal remoción reduce el uso y desgaste de las partes de la bomba, tubería y líneas de superficie a un mínimo.

2. Prácticamente se recupera el 100% de los componentes de perforación. La parte baja de las cantinas de asentamiento, es la que no puede ser salvada y tiene que ser desechada.

3. El sistema completo de circulación del lodo es simplificado y se hace más barato, mediante la eliminación ó reducción del tamaño de la cantina de asentamiento.

4. La desgasificación del lodo hace posible un control preciso del peso y prácticamente elimina el peligro de reventones.

5. Debido a un fluido de perforación más uniforme, es posible un tiempo de perforación más rápido y para la misma bomba las presiones son más bajas.

La Cía. LINK-BELT introdujo la zaranda para estas aplicaciones en los campos de KETTLEMEN en California, a fines de 1929. Las instalaciones iniciales fueron de cubiertas simple, tres pies de ancho por ocho pies de largo.

Las primeras operaciones en el área del Continente medio fueron en los campos de Hobbs en Nuevo México, trabajando según las consideraciones de operación y diseño alcanzados por los Ingenieros de Link-Belt, trayendo consigo el desarrollo de la zaranda.

Las operaciones de campo probaron que una zaranda más corta de 8 pies (instalación original) era más deseable, por liberar los recortes más rápidamente. Los tamaños standard adoptados fueron de 2' x 4', 3' x 4' y 4' x 5', todos los cuales pueden operarse simplemente ó en unidades duales, es decir montado sobre un

tanque común, soportado y manejados desde una simple fuente de potencia.

En 1937 una zaranda tubular rotaria fue introducida al mercado por la Cía Thompson Tool de Iowa Park, Texas.

El mérito de las zarandas como un medio para recuperar el lodo, fue reconocido desde sus inicios, hasta la actualidad, habiéndose hecho cambios en el diseño con el tiempo, e incluso la vida de la malla de la zaranda, la cual es el punto mas caro, se ha incrementado de una expectativa original de 30 días a 1 año o más. Las mejoras en las conexiones, soporte y tensionamiento de las mallas han sido importantes en la extensión de la vida de la zaranda.

Otra máquina que surgió de la industria minera fue el clasificador de cono, el cual apareció a inicios de 1930. El fluido es rotado mecánicamente, el principio básico de la separación de materiales mas gruesos y pesados del fluido de perforación es la acción centrífuga de este material mas grueso y pesado, que se mueve lejos del centro de rotación, separando el lodo cargado con arena, del lodo de perforación, aparato que se conoce como hidrociclón

### III. DESARROLLO TEORICO

#### 3.1. PROBLEMAS DE LOS SOLIDOS EN LOS FLUIDOS DE PERFORACION

Las propiedades reológicas y la velocidad de penetración son afectadas por la cantidad, el tamaño y la composición de los sólidos en el lodo. El control de esos sólidos es importante para que un sistema de lodo tenga éxito. A los sólidos en suspensión se les puede dividir en deseables e indeseables.

Los sólidos deseables pueden ser tanto activos (arcilla bentonítica), como inertes (baritina). Los sólidos indeseables generalmente son los sólidos perforados de variada granulometría que se incorporan al lodo.

Los efectos adversos producidos por los sólidos de perforación producen una mayor parte de los desembolsos para el mantenimiento del lodo. Los costos globales de la perforación pueden ser afectados seriamente por los sólidos de perforación incorporados en el sistema. En muchos casos los aumentos en el costo de perforación generados por el control inadecuado de los sólidos, excede de los desembolsos para el mantenimiento del lodo.

Un programa de control de sólidos, diseñado, debe tomar en cuenta el efecto sinérgico del fluido de perforación más adecuado, complementado por los equipos de control mecánico de sólidos requeridos para una determinada operación. Al hacer caso omiso del control mecánico de sólidos, se puede reducir los efectos deseados de la inhibición química. Al contrario un ambiente dispersivo puede producir una hidratación acelerada y la dispersión de las partículas de arcillas, somete a los

equipos mecánicos a una mayor concentración de sólidos que excede la capacidad de los equipos.

Los efectos adversos que pueden resultar de los sólidos de perforación incluirían los siguientes:

- 1) Aumentos en los costos de mantenimiento del lodo
- 2) Mayor dificultad en mantener las óptimas propiedades reológicas
- 3) Aumento del filtrado y mala calidad del Revoque-grueso poroso y quebradizo, pudiéndose originar:
  - a) Aumenta mucho el peligro de pegado por presión diferencial.
  - b) La estabilidad de las paredes del pozo disminuye, aumenta el peligro de desmoronamiento
  - c) Los diámetros de los pozos son bastantes grandes, lo que puede causar dificultades tanto en la limpieza del pozo como en las cementaciones primarias.
  - d) Aumenta el torque y el arrastre en las maniobras
- 4) Una reducción en la velocidad de penetración
- 5) Una reducción en la vida útil de la broca y un aumento en la velocidad de desgaste de las piezas de la bomba.
- 6) Un aumento en las pérdidas de presión de circulación y el consiguiente aumento en la posibilidad de pérdida de circulación.
- 7) Un aumento en la tendencia del pozo a producir el suabeo en los viajes y posiblemente una contribución a los problemas de control de presión

En muchos aspectos el lodo ideal para perforar sería aquel que no contenga sólidos. En ciertas ocasiones se puede perforar con agua, pero en la mayoría de los casos se necesitan filtrados

bajos y que el lodo posea cierta reología, lo que hace imprescindible el agregado de sólidos. Por lo tanto el problema se transforma en mantener la cantidad y tipo de sólidos del sistema en niveles que sean tolerables.

### 3.2 EFECTOS DE LOS SOLIDOS SOBRE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS EN LOS FLUIDOS DE PERFORACION BASE-ACUOSA.

- La viscosidad plástica.- Se debe principalmente a la fricción mecánica entre las partículas de sólidos en el lodo, y la magnitud de la viscosidad plástica depende principalmente del tamaño, configuración y concentración de los sólidos en el lodo, y de la fase líquida.

Las tendencias diarias en la viscosidad plástica pueden dar una indicación de la rapidez como aumenta la concentración de sólidos y pueden ser usados como un valor guía para determinar la necesidad de centrifugar y/o la adición de agua.

- El punto cedente y las resistencias de gel.- Indican el grado de las fuerzas de atracción que existen entre las partículas en el sistema de lodo. Generalmente cuando hay presentes altos valores de punto cedente y de resistencia de gel, estos indican el tratamiento químico. Sin embargo, se debe tomar nota de que la extracción mecánica o la dilución de los sólidos, también puede reducir el punto cedente y/o las resistencias de gel, porque las fuerzas de atracción son sensibles a la distancia entre las partículas, y la dilución producirá un aumento en dicha distancia.

La extracción de las partículas de un tamaño muy fino produce

mayores reducciones en la viscosidad que la extracción de las partículas de un tamaño más grueso, debido a las diferencias que existen en el área de superficie.

### 3.3. CLASIFICACION DE LOS SOLIDOS DE PERFORACION

Los sólidos pueden ser clasificados en categorías en base de:

a) La gravedad específica: Los sólidos en los fluidos de perforación, esencialmente pueden ser separados por densidad. Los sólidos de alta gravedad específica son aquellos que tengan una gravedad específica de aproximadamente 4.25, la cual es la baritina que se agrega para aumentos en la gravedad específica. Los sólidos de una baja gravedad pueden oscilar entre 1.1 para la lignita hasta 2.9 para la caliza compacta. El promedio de gravedad específica para los sólidos de baja gravedad específica normalmente es  $\pm 2.6$ . Un lodo compuesto solamente de sólidos de baja gravedad específica puede pesar desde 8.5 a 12 lb/gal. Los lodos de diferentes pesos tendrán proporciones variadas de sólidos de alta y baja gravedad (Ver Anexo II)

b) El tamaño de la partícula: Debido al tamaño de las partículas del lodo que es extremadamente pequeño, dichas partículas se miden en Micrones. El micrón es una unidad de medición del sistema métrico, y es 1/1000 de un milímetro ó 1/25400 de pulgada.

Los sólidos se clasifican y se agrupan por tamaño medido en micrones. La clasificación API de los sólidos por el rango de tamaño se detalla como sigue:

"CORTES" (cuttings), partículas descartadas por la zaranda

ARENA API - Mayores de 74 micrones

LIMO - De 2 hasta 74 micrones

COLOIDAL - 2 micrones ó menos

La baritina cae normalmente dentro de la categoría de Limo, mientras que las arcillas de primera calidad están dentro del rango coloidal. El Limo puede incluir fango, lutitas, cuarzo fino, como también baritina comercial. La arena puede incluir, arena de cuarzo, lutita, pedazos de material de pérdida de circulación y baritina gruesa.

c) La Actividad Eléctrica

- Los sólidos inertes.- Son los sólidos que prácticamente no llevan ninguna carga eléctrica, incluirían barita, arena, material de pérdida de circulación y algunas arcillas de formación.

- Sólidos solubles.- en la fase acuosa de un lodo se encuentran disueltas sales que provienen de la misma agua usada en la fabricación del lodo; otras sales se incorporan con el agua de formación que ingresa al pozo. Estas sales a veces se agregan al lodo buscando algún fin específico (ejem. en perforación Offshore).

Los aditivos químicos también son sólidos solubles. Estos pueden ser lignito, tanino, lignosulfonato, quebracho, fosfatos y otros que se agregan al lodo para tratar los sólidos activos en suspensión, buscando cambiar la reología ó el filtrado. Estos sólidos disueltos forman parte del porcentaje de sólidos totales que aparecen en el ensayo de la retorta y a fin de determinar el contenido de los otros sólidos se debe hacer una corrección.

- Sólidos Activos.- Son las arcillas hidratables que tienen la propiedad de proveer ciertas propiedades reológicas al lodo, y formar un revoque impermeable en la pared del pozo, estabilizándola.

La arcilla hidratable puede agregarse al lodo en superficie o puede incorporarse del terreno que se está perforando, formando lo que se llama "lodo natural". La partícula de arcilla una vez hidratada y dispersa tiene un tamaño no mayor de 2 micrones. Dentro del tamaño coloidal, también se incluyen los almidones, CMC y otros productos similares que reducen el filtrado. La cantidad total de arcilla hidratable que puede aceptarse en un sistema dependen de su calidad y granulometría. Algunas arcillas que son perforadas, por degradación química y mecánica pueden alcanzar dimensión coloidal y trabajan dentro como tal. Pero está demostrado por la práctica que estas "arcillas" requieren más tratamiento que las bentoníticas y no dan los resultados esperados.

Otras rocas perforadas y aún la baritina por degradación mecánica pueden llegar a tener tamaño coloidal. Estos coloides no son muy reactivos, pero debido a la superficie humectada le provee viscosidad al lodo, cualquiera sea la roca de donde provienen.

El propósito del control de sólidos es el de disminuir estos procesos para que se puedan separar en la superficie mas recortes y mas grandes para prevenir su recirculación y desintegración posterior.

#### 3.4. CAUSAS POTENCIALES DE PROBLEMAS DE SOLIDOS

- Contenido de arena

Un exceso de arena indicado por el ensayo del contenido de arena puede originarse por lo siguiente:

1. Perforación dentro de una arena de formación
2. Uso insuficiente del equipo de control de sólidos
3. Alta reología que no permite que la arena sedimente en las piletas del lodo.
4. Viscosidad demasiado alta que no permite que el equipo de control de sólidos opere eficientemente.
5. La presencia de baritina y mica que aparece como arena en el ensayo.

-Retorta: Por ciento de sólidos en volumen.

En lodos base acuosa, un alto contenido de sólidos puede originarse por:

1. Uso inadecuado del equipo del control de sólidos
2. Muy poca dilución

### 3.5.REMOCION DE SOLIDOS

Los tres métodos con que se puede quitar ó reducir los sólidos de perforación son: (1) El asentamiento, (2) La dilución y (3) La extracción por medio de dispositivos mecánicos.

La extracción de los sólidos por asentamiento generalmente se limita a los lodos de baja viscosidad y de baja densidad, y requiere un tanque de asentamiento de área bastante grande para permitir que las partículas tengan el tiempo necesario para asentarse. La dilución reduce la concentración de sólidos con

aumentar el volumen de fluido. Este es el método más caro para el control de sólidos, y el propósito del control mecánico es el de minimizar los requerimientos de dilución.

Los equipos para la extracción mecánica de los sólidos y que serán vistos son:

- Vibradores ó zarandas
- Hidrociclones: a) Desarenador
  - b) Desilter ó deslimador

En el Anexo III se muestra un resumen de los equipos de extracción de sólidos.

### 3.6. VIBRADORES O ZARANDAS

#### 3.6.1. Generalidades

La zaranda vibratoria es el primer elemento en el tren de remoción de sólidos, es básicamente un tamiz vibratorio, cuya función es separar los sólidos más gruesos del fluido de perforación.

Sus principios operativos son relativamente simples.

1. Se alimenta el lodo sobre una malla vibratoria ó varias mallas.
2. Mientras el lodo fluye a través de la superficie de la malla, la vibración separa los sólidos del lodo
3. Los sólidos mas grandes no pueden pasar a través de las aberturas de la malla, por lo tanto salen de la malla para ser descartados.
4. El lodo que contiene las partículas de sólidos más pequeños

pasa a través de las aberturas de la malla al tanque del equipo de perforación.

El tamaño de las partículas sólidas que se remueven en la zaranda depende del tamaño de las aberturas de la malla (ver Anexo IV).

Hay muchos tipos de telas del tamiz, pero por lejos la más usada para el tamizado de fluidos de perforación es el de tejido cuadrado plano. Para este tipo de tamiz, el número de alambres por pulgada lineal, se llama MESH. El diámetro de alambre en este caso es el mismo en cada dirección.

El porcentaje de área abierta es el área del tejido menos el área proyectada del alambre todo dividido por el área de la tela y por 100.

La especificación API de una malla es la siguiente, por ejemplo: 30 x 30 (516, 516, 37.1).

Esto equivale a decir que es un tamizado cuadrado de 30 aberturas por pulgada en cada dirección, con un tamaño de abertura de 516 micrones ( $\mu$ ) en cada dirección y un área abierta de 37.1%.

### 3.6.2. Indicadores de la operación normal de una zaranda

1. Las mallas sobre las cuales fluye el lodo no deben estar rotas por que los sólidos indeseables atravesarán las áreas rotas y retornarán al lodo.
2. Las mallas deben vibrar para separar efectivamente los sólidos más grande del lodo.
3. No debe caer lodo fuera de las mallas, sólo los sólidos

húmedos pueden salir por los extremos de las mallas. Si todo el lodo se cae fuera de las mallas es una indicación que existe una separación inadecuada y se está desperdiciando un fluido de perforación costoso.

### 3.6.3. Determinación de la capacidad de una zaranda.

Para la determinación de la capacidad se utiliza un modelo analítico desarrollado por HOBBERACK para fluidos sin sólidos.

Las curvas mostradas en el anexo V son para un tipo particular de zaranda, especificado en cada figura. En ellas vemos graficadas la capacidad de la zaranda versus la relación entre viscosidad plástica y densidad y como parámetro la característica del tamiz

Sin embargo estas curvas deben ser modificadas para tener en cuenta la carga de sólidos.

La expresión a utilizar es de sencilla resolución y utiliza parámetros de fácil evaluación.

$$Q_s = \frac{\delta}{1 + P} Q_f$$

$Q_s$ :(GPM) Es la capacidad de la tela para un fluido con sólidos.

$Q_f$ :(GPM) Es la capacidad de la tela para un fluido sólo, obtenido de curvas.

$\delta$  : Es un factor de taponamiento empírico, cuyo valor se halla tabulado en el margen superior derecho de la

figura.

P: Es el volumen por ciento de sólidos frescos perforados en el anulo, dado por:

$$P = 0.0678 \frac{(ROP \times D^2)}{Q}$$

Q

Donde: ROP -Es la velocidad de penetración en pies /hora.

D -Diámetro del pozo en pulgadas

Q -Caudal real de circulación en Gls./Minuto.

#### 3.6.4. Mantenimiento.

Las zarandas requieren un mínimo de mantenimiento pero ciertos procedimientos de rutina mejoran la vida del tamiz. La malla será lavada al comienzo de cada viaje para minimizar:

- 1) El segamiento y desgaste por abrasión.
- 2) La concentración de celdas de corrosión debido a un recubrimiento del lodo sobre el alambre.

Además una adecuada tensión de la tela alargará la vida de la misma, con la consiguiente reducción de costos.

### 3.7.HIDROCICLONES

#### 3.7.1. Generalidades

Los hidrociclones son recipientes de forma cilíndrico cónica en los cuales la energía de presión es convertida en fuerza centrífuga. Esto es logrado por medio de la alimentación tangencial dentro del citado recipiente.

La fuerza centrífuga desarrollada, multiplica la velocidad de sedimentación del material de la fase sólida, conduciéndola hacia la pared interna del cono y bajando en forma de espiral hacia la descarga del mismo.

El material de la fase ligera se mueve hacia arriba en un movimiento espiralado, hasta la conexión de descarga de la fase liviana del ciclón (Ver Anexo VI).

El vértice del cono por donde descargan los sólidos, no debe de ninguna manera tomarse como una restricción, sino que el mismo surge de un balance entre sólidos descargados y fluido perdido. Debido a estos dos fluidos espiralados, uno bajando y otro subiendo es lógico pensar que cercano al centro hay corrientes parásitas que hacen que partículas que originalmente deberían ser descargadas por el fondo, vuelvan a la corriente ascendente y sean descargados con la corriente ya tratada.

La geometría del recipiente y sus dimensiones son críticas para la eficiencia del mismo. Hay un gran número de fórmulas para el diseño de hidrociclones, pero el diseño óptimo se logra por trabajo empírico.

El fabricante fija la presión máxima de trabajo en 50 psi, trabajar a mayores presiones haría que el desgaste fuera inaceptable económicamente. Se puede pensar que el diámetro límite de remoción se puede reducir hasta donde sea necesario aumentando la velocidad tangencial ó reduciendo el diámetro de los hidrociclones, pero estos parámetros tienen sus límites.

En cuanto al diámetro mínimo del hidrociclón, la práctica ha dejado ver que es 4". Este tamaño proporciona el caudal de procesamiento necesario normal de un pozo de petróleo. Los

hidrociclones mas chicos que 4" están limitados por la capacidad y se usan fundamentalmente como recuperadores de baritina en lodos pesados.

### 3.7.2. Diámetro límite de separación.

Cuando se dice que un determinado hidrociclón tiene una media de separación é diámetro límite de separación de 15 micrones por ejemplo, significa que las partículas de los micrones tienen un 50% de probabilidades de ser removidas como de ser recirculados. Esto también significa que el hidrociclón no separa todas las partículas mayores de 15 micrones, sino que estas tienen mayores probabilidades de ser eliminadas a medida que aumentan de tamaño, siendo afectados por la viscosidad y la densidad del lodo.

### 3.7.3. Dimensionamiento

El dimensionamiento está íntimamente ligado al principio de funcionamiento. Por un lado tenemos hecho que la capacidad de los hidrociclones para separar partículas de un determinado tamaño es un fenómeno probabilístico. Para mejorar el rendimiento esas partículas recirculadas deben tener otra oportunidad de ser removidas.

Por otra parte también se sabe que la capacidad de remoción aumenta cuando la concentración de sólidos es relativamente baja

Ambos efectos se consiguen dimensionando capacidad de

procesamiento de los hidrociclones de tal forma que traten más de una vez el caudal de la bomba. Para DESARENADORES se aconseja un caudal de procesamiento de 125% mayor que el caudal de la bomba y de 125 a 150% para DESILTERS ó DESLIMADORES.

Para el dimensionamiento se tendrá en cuenta la peor condición de trabajo, esto es el mayor caudal de la bomba con la mayor carga de sólidos. Una vez fijado el caudal de procesamiento, ayudado por los catálogos del fabricante, se determinará la cantidad de conos para el desarenador y desilter ó deslimadores.

#### 3.7.4. Clasificación de los hidrociclones

Los hidrociclones se especifican de acuerdo al diámetro interior de la parte cilíndrica, donde tiene lugar la entrada tangencial y su denominación depende de la dimensión de los sólidos que separan.

Los hidrociclones menores de 6" se llaman desilters ó deslimadores y los mayores o iguales, desarenadores. Esta denominación se basa en que los hidrociclones menores de 6" pueden separar hasta un 100% de todas las partículas menores de 74 micrones.

Estadísticamente se ha comprobado que los desarenadores pueden eliminar partículas entre 30 y 40 micrones, mientras que los desilter ó deslimadores tienen una media de separación entre 15 y 20 micrones.

#### 3.7.5. Variables que afectan el rendimiento de los hidrociclones.

a) Equilibrio de presiones.

La energía de presión proporcionada por la bomba se transforma totalmente en energía de velocidad en la boquilla de entrada al ciclón, este movimiento rectilíneo se transforma totalmente en movimiento rotacional, formando un vórtice que tiene un tubo central con presión atmosférica. Esto significa que el interior del cono no está presurizado estáticamente, por lo tanto el rendimiento y la circulación del lodo queda librado al equilibrio de presiones de entrada y salida.

La presión de alimentación es la que proporciona la energía al hidrociclón para mantener formada el vórtice. Al formarse el vórtice el hidrociclón genera su propio campo gravitacional y el lodo girado se pega a las paredes formando una superficie libre vertical en este caso es el tubo de vorticidad central.

Al llenándose el cono, el espesor de líquido que está girando aumenta (sube el nivel en su campo gravitacional horizontal). La salida axial superior es de mayor diámetro que la inferior, por lo que el nivel del lodo al subir encuentra antes la salida superior y se derrama por ella hacia arriba como una corona giratoria de lodo. Si en la salida superior el fluido se encuentra con presión mayor a la atmosférica, suficiente como para impedirle la descarga aumentaría el nivel (El tubo de vorticidad reducirá su diámetro) hasta alcanzar la descarga inferior. Si ocurre esto la densidad de la descarga disminuirá y correspondientemente aumentará la relación líquido-sólido.

Con el fin de que este fenómeno adverso sea mínimo, lo ideal es que la descarga superior sea a la atmósfera, lo cual es imposible. El colector de salida de los conos debe estar diseñado de tal forma que en las peores condiciones de circulación proporcione una presión lo más cercana posible a la atmosférica ó en un nivel tal que no perturbe la salida.

Los valores de presión positiva se pueden alcanzar por:

- 1.- Por estar la descarga del colector más alta que la descarga de los hidrociclones.
- 2.- Por ser el diámetro del tubo colector chico para ese caudal.
- 3.- Por tener el lodo viscosidad ó densidad muy alta.

Si hubiera vacío excesivo en el colector de descarga sería un factor negativo ya que ayudaría a aumentar la velocidad del flujo, dentro del cono y también provoca una corriente de aire muy fuerte que ingresa por debajo.

Ambos efectos tienen como consecuencia inmediata aumentar la densidad de la descarga. Aparentemente, esto mejora el rendimiento, ya que se reduce la relación líquido sólido, pero en realidad es un hecho muy nocivo, porque, tanto el reducido tiempo de permanencia dentro del hidrociclón como el arrastre de la corriente de aire, hace que los sólidos finos tengan menos probabilidad de decantar.

Cuando la descarga provoca vacío, este se puede eliminar de dos formas:

- Reduciendo el sifón.
- Abriendo comunicaciones en el colector para equalizar la presión con la atmosférica.

Los valores de presión en el colector de descarga positiva ó negativa que pueden influir en el rendimiento del hidrociclón son variables.

Estas presiones incluso van cambiando así como varían los parámetros del lodo, habiendo un entorno en más ó en menos de la presión atmosférica, en el cual el hidrociclón no es afectado.

b) Tipo de descarga inferior.

La forma del flujo en la descarga inferior tiene mucho que ver en la cantidad y calidad de los sólidos removidos.

-Descarga en spray:

Los sólidos decantados contra las paredes del hidrociclón, bajan describiendo una hélice cada vez más pequeña; cuanto menor es la hélice mayor es la velocidad anular a fin de mantener la cantidad de momento angular.

Dicho anillo giratorio de sólidos cuando llega a la descarga inferior lo sobrepasa y se descarga al exterior en el aire.

Esta forma de descarga asegura spray formando un cono en el aire. Esta forma de descarga asegura que todos los sólidos que llegan son eliminados. Por el centro de ese anillo circula el aire que es aspirado del exterior.

-Descarga sólida continúa.

La densidad del anillo de sólidos que llega a la descarga inferior, no es uniforme con respecto al diámetro, lo que está mas cerca a la pared tiene los sólidos más grandes, y el lodo mas alejado de la pared contiene los sólidos más finos.

Si por alguna razón la capacidad del hidrociclón no es suficiente para procesar la carga de sólidos que le llega, se forma un tapón dinámico. La descarga deja de salir en spray y se transforma en un cilindro de alta densidad, sin rotación.

La densidad de este tipo de descarga, es mayor que la descarga en spray; la relación líquido-sólido es alta pero el porcentaje de sólidos finos y el caudal total de sólidos disminuye. Esto se debe a que la zona de baja presión que normalmente es ocupada por el aire que entra por abajo, ahora debe completarse con el lodo pesado y prácticamente quieto del fondo del cono. Este lodo, que es justamente el que tiene la fracción fina, es succionado y recirculado al sistema.

La descarga en "Cuerda" puede ocurrir cuando hay una sobrecarga de sólidos, que el hidrociclón no puede procesar y cuando la boquilla es demasiado chica para el caudal de descarga.

Generalmente cuando los hidrociclones comienzan a trabajar con la descarga continua, se obturan con facilidad

-Presión de alimentación

presión de alimentación debe mantenerse dentro del rango recomendado del fabricante para cada tipo de hidrociclón.

Si es menor, el rendimiento y la capacidad se ven seriamente afectados a pesar de formarse el vórtice; si es mayor el desgaste será económicamente inaceptable.

La presión de alimentación debe ir variando en función de la densidad del lodo.

-Oportunidad del uso.

Para obtener el mayor beneficio de los hidrociclones, estos deben trabajar desde el comienzo del pozo, aún desde cuando se

estén perforando los pozos auxiliares. en ciertos casos se deberían tener en marcha cuando no se perforan para limpiar el circuito de superficie.

La razón de esto se debe a la naturaleza del funcionamiento de los hidrociclones. Recuérdese que un hidrociclón que tenga un diámetro límite de separación de 15 micrones significa que las partículas de 15 micrones tienen un 50 % de probabilidades ser removidas y un 50% de ser recirculadas al sistema. El 50% que es recirculado se degrada mecánicamente en la bomba y el trépano volviendo del pozo con menor diámetro y con muchas menos posibilidades de ser removido.

De cualquier forma aún cuando los hidrociclones estuvieran trabajando desde un primer momento, el porcentaje de sólidos va subiendo lenta pero indefectiblemente con el transcurrir del tiempo y con el aumento de la profundidad. Esto implica la necesidad de una cierta dilución para mantener los porcentajes dentro de lo aceptable.

### 3.7.6. Condiciones de operación

Generalmente se comete ciertos errores en la operación de estos equipos, que es muy importante tenerlas en cuenta. La primera equivocación, concierne a el hecho de que los ciclones tiran mucho lodo al campo. En efecto, esto es así, porque ellos están diseñados para hacerlo, con una importantísima diferencia:

El lodo que sale al campo tiene una concentración de sólidos mucho más alta que la alimentación.

Luego debemos pensar en el hidrociclón como una descarga

optimizada del lodo.

El segundo concepto equivocado se mueve alrededor de la noción que de la descarga del hidrociclón debe ser lo más pesada posible, y una menor velocidad de descarga es deseable. Ciertamente la descarga más pesada contendrá mayor contenido de sólidos, desafortunadamente, si ajustamos el vértice del cono para producir descargas más pesadas, también resultará en una reducción de la velocidad de descarga.

### 3.7.7. Clasificación según el tamaño de los hidrociclones:

Probablemente el primer paso en la evaluación de la instalación de un hidrociclón, es verificar la capacidad del equipo; esto es: ¿Puede un desarenador ó un desilter procesar un 125% ó más de la máxima velocidad de circulación anticipada durante la perforación, sobre un significativo intervalo de profundidad?

Para resumir el proceso:

- 1.- Contar con el número de conos.
- 2.- Determinar el tamaño del cono (4, 5, 6, 8, 10 ó 12").
- 3.- Determinar la capacidad para cada tamaño de cono.
- 4.- Multiplicar el número de conos por la capacidad de cada cono para alcanzar la capacidad del equipo.
- 5.- Comparar con la capacidad requerida.

Típicos tamaño de conos son: 4, 5, 6, 8, 10 y 12". Estas son dimensiones nominales, y no necesariamente la real dimensión.

El tamaño del cono puede ser determinado por inspección ó medida, y por consulta con el fabricante. También puede ser determinado por medida de un cono de reemplazo, (ó como último

recurso, por medida del diámetro exterior del cono y quitándole alrededor de 1.1/2", etc.).

La capacidad de un tamaño particular está casi universalmente especificado a 75 pies de cabeza de alimentación, y es consistente con casi todos los fabricantes.

Recordemos que la capacidad de los hidrociclones debe exceder la máxima velocidad de circulación anticipada en un 25% al menos.

Este sobredimensionamiento no solo asegura que la totalidad del fluido está siendo procesada, sino también, da adicional capacidad para procesar fluido entrante al compartimiento de la alimentación por las escopetas.

#### CAPACIDAD DE VARIOS TAMAÑOS DE HIDROCICLONES A 75 PIES DE ALTURA DE CABEZA

Tamaño de Cono (en pulgadas)	Capacidad del Cono (en gal/min.)
4	50 a 75
5	75
6	100
8	150
10	500
12	500

La próxima etapa en la evaluación de un hidrociclón es la alimentación del mismo, a través del colector. Si la alimentación al hidrociclón no se realiza en el rango recomendado (70 a 80 pies, 2.3 a 2.6 m.) ciertos pasos deben seguirse para corregir esta situación pues la performance, es radicalmente afectada por la baja presión hidrostática de

alimentación.

Para obtener la correcta presión de alimentación, uno debe transformar la altura hidrostática en presión.

Esto se hace muy fácilmente con la siguiente ecuación:

$$P = 0.052 \times D \times Mw$$

D: Altura hidrostática (pies)

Mw: Densidad lb/gal.

Como el valor recomendado de D=75 pies reemplazando :

$$P = 4 Mw$$

Esta ecuación nos dice, la presión de alimentación que es requerida para un particular peso del lodo a correr en los hidrociclones.

Esta ecuación puede ser arreglada de la siguiente forma:

$$D = P / 0.052 \times Mw.$$

La cual permite calcular la altura de alimentación disponible, basada en la presión de la bomba y la densidad del lodo.

Esta puede usarse en la selección de una adecuada motobomba cuando la altura de alimentación es muy baja.

Si un hidrociclón fue correctamente diseñado en cuanto a tamaño, pro operado a una reducida altura (50 pies por ejemplo) simplemente será capaz de procesar el fluido de circulación, nada mas y combinado con una muy pobre remoción de sólidos.

Por lo tanto debemos contar con un indicador de la presión de alimentación para estar seguros de que el equipo trabaja bien.

Si se observa que la presión es de  $4 \times Mw$  (+/- 2 psi.), la motobomba impulsora está correctamente seleccionada y el hidrociclón estará recibiendo la presión correcta. Una baja

presión de alimentación, generalmente indica alguna de las siguientes condiciones:

1.- Una adecuada selección del sistema de bombeo con una obstrucción en la entrada. Por otro lado deben reducirse las pérdidas de cargas grandes en la succión de la bomba. El taponamiento en la succión puede producir cavitación en la bomba y dañarla.

2.-Un inadecuado diseño del sistema de bombeo. En esta situación los componentes del sistema corriente de bombeo no suministra los requerimientos de altura aún bajo las mejores condiciones.

Los requerimientos de altura de la bomba los podemos tomar como compuestos por 3 items:

1.- Pérdida de altura debido al levantamiento del fluido. Se requiere energía para levantar el fluido que está siendo bombeado, desde el tanque de lodo al colector del hidrociclón. Esta es la distancia medida en pies ( ó metros), desde la superficie del lodo en el tanque a dicho colector. Generalmente este término es de alrededor de 5 a 8 pies en equipo de tierra y tan altos como 15 a 20 pies en offshore.

2. Pérdida de altura en la succión y en la descarga. Esta es la energía perdida debida la fricción. Varios métodos existen para determinar este término. Un adecuado procedimiento puede ser encontrado en la literatura.

Este término generalmente estará en el rango de 5 a 15 pies para velocidad de proceso típica y para juego de llaves de compuerta simple ó complejo. Puede asumirse que dicha pérdida será en este rango si no tenemos una mejor información.

3.-Pérdida de altura a través de los hidrociclones. Esta es la pérdida la energía en los hidrociclones, y para propósitos de selección de bombas se asume que es 70 a 80 pies.

Podemos asumir que tendremos un requerimiento de altura total de alrededor de 100 pies, por lo tanto el sistema de bombeo debe ser capaz de producir dicha altura.

#### SELECCION DE BOMBA-MOTOR-IMPULSOR.

Se debe realizar lo siguiente:

1. Medir las pérdidas por levantamiento del fluido.

2. Calcular las pérdidas por fricción en la succión y descarga a la capacidad requerida por el hidrociclón o estimarla entre 5 y 15 pies, dependiendo de la complejidad del sistema de cañerías.

3.-Adicionar los resultados de los pasos 1 y 2 a la altura recomendada para la alimentación del hidrociclón (75 pies) para conseguir la altura total requerida (siempre como mínimo 90 pies).

4.-Identificar el tamaño de la bomba.

5.-Identificar las rpm del motor y la potencia. Si el motor es de 1150 rpm., la combinación bomba-motor probablemente no es la adecuada y será reemplazada por un equipo de 1750 rpm.

6.-Asumiendo un motor de 1750 rpm, encontrar la curva de operación para su bomba (5x6 ó 6x8) operando a esa velocidad.

7.-Sobre ese gráfico, localizar la intersección de la altura total requerida y la capacidad para su instalación del hidrociclón.

8. Seleccionar la mayor de los 2 tamaños de impulsores si ese punto cae entre las curvas.

### 3.7.8. MANTENIMIENTO.

Las instalaciones de los hidrociclones requieren significativamente más mantenimiento que las zarandas vibratorias. El taponamiento y el desgaste, resulta en una pobre operación en algunos casos inaceptable (alta velocidades de flujo inferior de descarga).

Se hace mención de una serie de problemas que implican una operación de mantenimiento y su solución.

1. Alimentación parcial por taponamiento interno. El hidrociclón debe ser removido y limpiado para retirar la obstrucción.

2. Taponamiento total de la entrada de alimentación. El hidrociclón debe ser removido y limpiado para retirar la obstrucción.

3. Descarga en forma de cuerda-sobrecarga de sólidos. Puede ser corregida abriendo el orificio del vértice (la mayoría son ajustables), hasta que la descarga es mas parecida a una descarga spray.

### 3.8. EVALUACION DE EQUIPOS DE CONTROL DE SOLIDOS

3.8.1. Cálculo de la eficiencia de un equipo de control de sólidos.

En toda operación es de gran importancia conocer con exactitud cual es la eficiencia con la cual trabaja el equipo de control de sólidos. Si la eficiencia no es la deseada se puede hacer los ajustes necesarios para mejorarla. Todo equipo de control de sólidos va a descartar sólidos de diferente naturaleza y

origen. Entre ellos podemos mencionar:

-Sólidos perforados.

-Baritina

-Fluido de perforación

Analizando la composición del descarte y comparándole contra la cantidad de sólidos que se está generando, se puede determinar la eficiencia con que el equipo trabaja y también cuales son los ajustes necesarios para mejorar su rendimiento. Mediante una serie de cálculos y un muestreo sistemático del equipo vamos a calcular la cantidad y la naturaleza de los materiales que el equipo está descartando.

La base de este procedimiento es un muestreo del equipo que a continuación se detalla:

1. De cada una de las zarandas y de la malla del Mud Cleaner juntar una muestra representativa de varias libras y determinar el tiempo que se ha tardado para coleccionar esa muestra.

Determinar la densidad de las muestras en libras/galón.

2. Muestrear los hidrocilones es decir a los conos de los desarenadores, deslimadores y del Mud Cleaner. El muestreo consiste en juntar una muestra de un litro de la descarga, determinando el tiempo en que se obtuvo la muestra. Determinar la densidad de cada muestra en libras/galón.

3. Obtener una muestra de 5 galones de la centrífuga. Se debe determinar en que tiempo se obtienen una muestra de 5 galones de la alimentación y otra muestra similar de la descarga. Determinar la densidad de la muestra .

4. El próxima paso será la determinación del contenido de humedad de las muestras tomadas. Para ello se secará en un

horno a 230 °F una pequeña cantidad de cada una de las muestras juntadas. La diferencia del peso de la muestra antes y después de ser secada en el horno, determinará el contenido de humedad.

Sabiendo el contenido de humedad se puede calcular la cantidad de sólidos secos y fluido de perforación que cada pieza del equipo está eliminando.

Secuencia de cálculo:

1. Sólidos húmedos descargados: WSD (lb/hr.).

Zaranda:  $WSD = P \times 3600 / T$ .

P: Peso de la muestra en libras.

T: Tiempo tardado en segundos

Hidrociclones:  $WSD = (Dd) \times 900 / T$

Dd: Densidad de la descarga en lb/gal.

T: Tiempo para juntar un litro de muestra en segundos

Centrífuga:  $WSD = 36 \times G \times Dd \times (100/Tf - 100/To)$

G: Volumen de la muestra en galones.

Dd: Densidad de la descarga en libras/galón.

Tf: Tiempo para muestrear a la alimentación en segundos.

To: Tiempo para muestrear a la descarga en segundos.

2. Porcentaje de sólidos secos en muestra (% S).

$\% S = (\text{Muestra seca/muestra húmeda}) \times 100$ .

3. Sólidos secos descartados: DSD (lb/hr).

Sólo parte de la cantidad de sólidos calculados en el paso 1 corresponde al contenido de verdaderos sólidos. Un porcentaje de lo calculado corresponde a la humedad contenida en las muestras, es decir determinará la cantidad de lodo que cada equipo descarga.

$$DSD = (WSD) \quad (\% S) / 100.$$

4. Cálculo de la cantidad de lodo descartado por hora: LD (gal/hr.)

$$LD = (WSD - DSD) / 8.33$$

5. Cálculo de la gravedad específica promedio de los sólidos (ASG)

Este paso intermedio se necesita para poder calcular de una forma posterior la cantidad de baritina y sólidos perforados que cada pieza del equipo está descargando

$$ASG = (\%S) / [(833 / Dd) \quad (100 - \%S)]$$

6. Cálculo de la remoción de la baritina: BD (lb/hr).

Como ya se ha expresado con anterioridad parte de los sólidos corresponde a la baritina que el equipo está descartando. Esto debe ser conocido y si es excesivo debe ser corregido.

La cantidad de baritina que se descarta, se calcula basado en la gravedad específica de los sólidos y en la tabla del Anexo VII.

7. Cálculo de los sólidos perforados descartados: DS (lb/hr.)

$$DS = (DSD) - (BD)$$

8. Cálculo de los sólidos perforados generados: W (lb/hr.)

Una vez que se terminó el proceso de muestreo del equipo de control de sólidos, se debe determinar el origen de los recortes que se está analizando. También se deberá calcular la cantidad de sólidos generados por pie de hueco perforado y los sólidos perforados totales basados en la penetración. El origen y profundidad de los recortes se debe calcular basado en el tiempo de retorno.

$$W = (DH)^2 \quad \times 0.884 \quad \times \text{penetración.}$$

DH: Diámetro del hueco en pulgadas.

Penetración en pies/hr.

9. Análisis del rendimiento del equipo de control de sólidos.

% Eficiencia =  $(DS/W) \times 100$

DS: Sólidos perforados descartados en lb/hr.

W: Sólidos perforados generados en lb/hr.

En el Anexo VIII se muestra la elaboración de un formato para determinar la eficiencia en forma general de los equipos de control de sólidos, adaptado para las operaciones en el Noroeste.

### 3.8.2. Medición del rendimiento de los hidrociclones.

El API editó un folleto sobre equipos de procesamiento de lodo-Drilling Fluids Processing Equipment, API Bulletin 13C de junio de 1974, donde se fijan las normas para evaluar el rendimiento de los hidrociclones y las zarandas.

Este ensayo se basa en el uso de la retorta, para determinar la concentración de sólidos y líquidos. Se propone un método más sencillo y bastante exacto para lodos no baritinados, aunque también se puede aplicar de los pesados y tomar los resultados como variaciones relativas. Este método tiene la gran ventaja de que lo puede realizar el engrampador, usando los elementos con que dispone para medir la viscosidad API y la densidad del lodo.

Se procede de la siguiente forma:

1. Se toma la densidad del lodo en el compartimiento succión del hidrociclón.

2. Se toma la densidad de la descarga inferior del hidrociclón a considerar.

3. Se mide el caudal de descarga inferior en galones/minuto.

Las densidades se miden con la balanza de lodos, el caudal se mide con el recipiente de 1/4 de galón y un cronómetro. El segundero de un reloj pulsera común de bastante exactitud para un caudal normal de descarga.

Se asume que la diferencia de densidades entre el lodo "limpio" y el "sucio" son despreciables comparadas con las que hay entre cualquiera de las dos y la densidad de descarga inferior.

$\rho_1$ : Densidad del lodo en lb/gal.

$\rho_d$ : Densidad de la descarga en lb/gal.

$\rho_s$ : Densidad de los sólidos perforados, ésta densidad se asume constante e igual a 20.625 lb/gal. (2.5 kg/lt.)

$Q_d$ : Caudal de descarga (sólidos + lodo), en gal/min.

$$Q_d = Q_s + Q_1 \quad (1)$$

$Q_s$ : Caudal de sólidos en galones/minuto.

$Q_1$ : Caudal del lodo en descarga (sin sólidos) en gal/min.

El peso del caudal es igual:

$$Q_d \times \rho_d = Q_s \times \rho_s + Q_1 \times \rho_1 \quad (2)$$

De (1)  $Q_s = Q_d - Q_1$ .

Reemplazando en (2) y despejando:

$$Q_1 = Q_d \left[ \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s - \rho_1} \right].$$

$$Q_s = Q_d - Q_1$$

El caudal en peso de sólidos en la descarga será:  $Q_p$  (lb/min.).

$$Q_p = Q_s \times \rho_s = (Q_d - Q_1) \times \rho_s$$

Haciendo la división en  $Q_1$  y  $Q_p$  se encuentra la relación

líquido-sólido.

$R = Q_1/Q_p$ , expresado en galones de lodo por libra de sólidos.

Esta relación  $R$  muestra los galones de lodo que se están invirtiendo en la eliminación de cada libra de sólido.

Este ensayo se usa para evaluar diferentes condiciones de trabajo, diferentes presiones de alimentación, diferentes boquillas, etc. Los datos para el ensayo se deben tomar lo más rápidamente posible, antes que cambien la concentración de sólidos en el lodo, especialmente cuando la perforabilidad es alta y la formación no es homogénea.

En el Anexo IX se muestra la elaboración de un formato para evaluar los hidrociclones.

#### IV. APLICACIONES

##### 4.1. EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE SOLIDOS

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de campo realizadas para determinar la eficiencia y/o rendimiento de los equipos de control de sólidos de los equipos de perforar de Petroperú S.A. y que se encuentran operativos. Estas pruebas sirvieron para ver como estaban trabajando dichos equipos.

## 4.2. DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE SÓLIDOS

## Consideraciones:

Lodo base: Densidad 10 lb/gal.

Viscosidad de embudo: 45 seg.

Viscosidad plástica: 20 cp.

Punto cedente : 10 lb/100 pies cuadrados.

Caudal de bomba: 315 gal./min.

Máximo caudal de bomba: 400 gal/min.

Rate de penetración: 35 pies/hr.

Diámetro del hueco 7-7/8 pulg.

## ZARANDAS

Para determinar la capacidad de una zaranda se aplica lo mencionado en el capítulo 3.6.3 y las curvas que se muestran en el Anexo V, de acuerdo al tipo de zaranda que se tenga en ese momento.

Para nuestro caso, vamos a considerar una zaranda con cubierta a 0°, 4 pie de ancho x 5 pies de largo, 4.5g de aceleración normal y 67% de extensión cubierta por el fluido, según se muestra en la figura 1 del Anexo V.

El punto de partida es el tamaño de malla deseado, para maximizar la remoción de sólidos por la zaranda.

Tamaño de malla deseado 60 x 60.

$P = 0.0678 \times (35 \text{ pies/hr.}) \times (7.875 \text{ pulg.cuadradas.}) / (315 \text{ gal/min}).$

$P = 0.47$

Viscosidad plástica/peso de lodo =  $VP/MW = 20/10 = 2.0$

QF: Capacidad de la zaranda con fluido solamente, se saca de la

figura 1 del Anexo V.

$QF = 480$  gal/min.

$QS$ : Capacidad de la zaranda con lodo

Factor  $\delta$  para malla 60 x 60  $\delta = 0.71$

$QS = [(0.71)/(1+0.47)] \times 480 = 232$  gal/min. (INSUFICIENTE)

Malla 50 x 50

$QS = [(0.77)/(1+0.47)] \times 640 = 335$  gal/min

La malla más fina a instalarse con el lodo a una razón  $VP/MW = 2.0$ , será una 50 x 50.

DESARENADORES.

Se considera el caudal de alimentación = 1.25 veces el caudal máximo de operación.

Para nuestro caso se puede considerar un cono de 12" de 500 GPM (Ver Anexo VII).

Aplicando lo mencionado en el capítulo 3.7.7. para nuestro ejemplo se puede considerar lo siguiente:

Pérdida de carga para levantar el fluido desde la superficie del lodo en el tanque de succión, hasta el manifold de alimentación del desarenador: 8 pies de agua de cabeza hidrostática.

-Pérdida de carga en las líneas de succión y descarga debido a la fricción: 15 pies de agua de cabeza hidrostática.

-Pérdida de carga a través de los hidrociclones (función de la presión de alimentación).

Para un lodo de 10 lb/gal. será:  $10 \text{ lb/gal.} \times 4 = 40$  PSI.

equivalente a una cabeza hidrostática de 92 pies de agua.

Tendremos un requerimiento de altura total de alrededor de 115 pies de agua, por lo tanto el sistema de bombeo debe ser capaz de producir dicha altura.

Para la selección del motor eléctrico y la bomba centrífuga correspondiente, remitirse al Anexo X.

De la carta (A) considerando que se usa una bomba centrífuga para 500 gal/min. de caudal de alimentación y una altura total requerida de 115 pies, encontramos que necesitamos una bomba 4W-71 (4" x 5" x R&C), un motor de 25 HP y 1750 RPM. Este mismo anexo de la curva de operación de esta bomba determinamos que con un impeller ó impulsor de 10-1/2", la bomba es capaz de desarrollar 130 pies de altura de agua, que es suficiente para nuestro caso.

#### DESILTERS O DESLIMADORES

Se considera el caudal de alimentación igual a 1.25 veces el caudal máximo de operación. Para 500 gal/min. de caudal de alimentación se necesitarán 10 conos de 4 pulgadas de diámetro (Ver Anexo XI).

Considerando una pérdida de carga 115 pies de altura de agua necesitaremos también una bomba centrífuga 4W-71 (4"x5"xR&C), motor de 25 HP y 1750 RPM, además un impulsor de 10-1/2", de la carta (A) y curvas de operación de la bomba del Anexo X.

Adicionalmente anotaremos que la carta (A) y la performance de las curvas de la bomba presentan la potencia para bombear agua con gravedad específica de 1.0 y una densidad de 8.34 lb/gal.,

para fluido de perforación con gravedad específica mayores a la del agua, la performance de las curvas del agua se corrige de la siguiente manera:

1. Determinar la densidad del lodo en libras/gal.
2. Multiplicar la potencia mostrada en la curva por la densidad de lodo en lb/gal., dividido por 8.34. Para nuestro ejemplo se necesitará, para 10 lb/gal.de densidad de lodo, un motor de 30 HP tanto para el desarenador como para el desilter según:

Potencia corregida (Potencia de la curva x densidad de lodo lb/gal.)/8.34.

Potencia corregida =(25 HP x 10 lb/gal.)/8.34 lb/gal.=30 HP.

## V. EVALUACION ECONOMICA.

Un sistema de lodo durante el transcurso de una operación sufre cambios constantes. Como consecuencia el lodo debe ser sometido a un tratamiento continuo para mantener a las propiedades en un nivel deseado.

Considerando que actualmente los equipos de control de sólidos de los equipos de perforar de Petroperú se encuentran trabajando deficientemente, se ha tratado de determinar alternativa económica más conveniente para la empresa, y poder perforar así con un lodo que tenga las propiedades requeridas. En tal sentido se ha elaborado un cuadro en el cual determina la cantidad de dinero gastado adicionalmente por exceso de dilución, al trabajar los equipos de sólidos en forma deficiente ó nula, según se muestra en el Anexo XII; habiéndose tomado como base los pozos perforados en el año 1988, por considerarse un año normal en cuanto a perforación de pozos se refiere.

Se ha considerado tres alternativas ser evaluadas para dar solución al gasto adicional por exceso de dilución.

ALTERNATIVA A: Compra de equipos de sólidos (zaranda, desarenador y deslimador ó desilter):

ALTERNATIVA B. Alquiler de zaranda, desarenador y desilter ó delimador.

ALTERNATIVA C. Operar con los mismos equipos

## COSTO DE LOS EQUIPOS

- |  |              |
|--|--------------|
| 1. Costo CIF (según cotizaciones para un equipo          | \$41,000.00  |
| 2. Impuestos Aduaneros (Exonerado)                       |              |
| 3. Imprevistos   | \$ 4,000.00  |
|  | \$45,000.00  |
| 4. Nro. Equipos/Año: 4.46 (Reporte Anual de Perforación) |              |
| 5. Total Inversión: \$45,000.00 x 4.46 =                 | \$ 200,700.0 |

COSTOS	\$
1. Zaranda	17,700.00
1 Desarenador	3,100.00
1 Desilter ó Mud cleaner	20,200.00
Total	41,000.00

## LINEAMIENTOS ECONOMICOS

ALTERNATIVA "A": **Compra de** zaranda, desarenador y desilter o Mud cleaner.

1. Inversión \$200,700.00

2. Gasto operación y mantenimiento \$123,890.00/Año

(1633.42 días de operación sg. Reporte Anual de **perforación.**

**A. Zaranda:** (2 mallas)

-Mallas

2 mallas/15 días

$(1633.42 \text{ días} / 15 \text{ días}) \times 2 \text{ mallas} = 218 \text{ mallas.}$

218 mallas  $\times$  255 \$/malla \$55,590.00.

-Mantenimiento (1 vez/año \$ 9,000.00

[Mano de obra, cambio de cauchos y/o resortes etc.]

B.-Desarenador (1 cono)

Repuestos y Mantenimiento \$ 6,700.00

**C.-Mud cleaner**

-Mallas

1 malla/20 días.

$(1633.42 \text{ días} / 20 \text{ días}) \times 1 \text{ malla} = 82 \text{ mallas}$

82 mallas  $\times$  450 \$/malla \$36,900.00

Repuestos y mantenimiento \$15,700.00

3. Depreciación \$40,140.00

$(\$200,700.00 / 5 \text{ años})$

4. Impuestos al patrimonio: 35%

5. Tasa de interés: 15%

6. Factor de descuento: FD

$$FD = [(1+i)^n - 1] / [(1+i)^n \cdot i]$$

n=5 años

i=0.15

FD=3.3522

7. VAN=Sumatoria del flujo de fondos descontados.

$$VAN = -200,700 + 2.18X - 222,850$$

X: Ingresos brutos ó ahorro potencial = \$505,288.00

VAN = 677,978.00 US\$

8. Cálculo de Tasa Interna de Retorno (TIR),

$$VAN = -\text{Inversión} + (\text{Flujo Fondos}) \times FD = 0$$

$$-200,700 + (0.65X - 66,480) \times FD = 0$$

FD: 0.7662

$$[(1+i)^5 - 1] / [(1+i)^5 \cdot i] = 0.7662$$

TIR = 127%

9. Pay Out (tiempo de recuperación de la inversión)

$$\text{Inversión} / (\text{Flujo Fondos/año}) = 200,700 / (0.65X - 66,480) = 0.766 \text{ años}$$

Pay Out = 9 meses

ALTERNATIVA "B": Alquiler de equipos de control de sólidos.

1. Inversión: -----

## 2. Costo Operación y Mantenimiento

## a. Zaranda:

200 \$/día x 1633.42 días/año	\$326,684.00
-------------------------------	--------------

Mallas:

218 mallas x 255 \$/malla	\$ 55,590.00
---------------------------	--------------

## b. Desarenador:

50 \$/día x 1633.42 días/año	\$ 81,671.00
------------------------------	--------------

## c. Mud Cleaner:

200 \$/día x 1633.42 días/año	\$326,684.00
-------------------------------	--------------

Mallas:

82 mallas x 450 \$/malla	\$ 36,900.00
--------------------------	--------------

TOTAL	\$827,529.00
-------	--------------

3. Depreciación: -----

4. Impuesto al patrimonio: 35%

5. Tasa de interés: 15%

6. FD=3.3522

7. VAN=2.18 X - 1803,128

X. Ahorro potencial = 505,238 US\$

VAN=-701,600 US\$ (No atractivo)

ALTERNATIVA "C": Operar con los mismos equipos .

1. Inversión ó Gasto de Operación y mantenimiento:

\$123,890.00

2. Depreciación:

\$ 24,778.00

3. Impuesto al patrimonio:35%

4. Tasa de interés: 15%

5. FD: 3.3522

6.  $VAN = -123,890 + 2.18 X$

$X$ : Ahorro potencial=505,288 US\$

$VAN = 977,638$  US\$

7. Tasa interna de retorno ( $VAN=0$ )

$-123,890 + (0.65 X) \times FD = 0$

$FD = 0.377$

$TIR = 265\%$

8. Pay Out= (Inversión)/(Flujo Fondos/Año)

$123,890 / 0.65 X = 0.377$  años

Pay Out= 4.5 meses

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1.- Los equipos de control de sólidos están trabajando deficientemente por falta de materiales y repuestos como son las mallas apropiadas, conos, manómetros, boquillas, etc.

2.- La deficiencia de los equipos de control de sólidos está causando aumentos de los costos de mantenimiento del fluido de perforación, dificultad en mantener óptimas las propiedades reológicas, reducción en el rate de penetración, reducción de la vida útil de la broca, desgaste de las piezas de la bomba, mal muestreo durante la perforación.

3.- Debido a la falta de repuestos, no se puede optimar los equipos de control de sólidos, dichos equipos están trabajando con lo que se tiene a la mano, sin tener ningún tipo de control de rendimiento, calidad, etc.

4.- En el medio existe poco conocimiento sobre los equipos de control de sólidos, por lo que no se puede medir la importancia que tienen dichos equipos, tanto personal de Petroperú como de las Cías. de servicios de lodos.

5.- Existe diversidad de marcas de los equipos de control de sólidos que dificultan aún más el problema de repuestos para

los equipos.

6.-Se gastó **aproximadamente** 505,000 U.S. al año por deficiencias de los equipos de control de sólidos, al haber un control inadecuado de los mismos, realizándose una mayor cantidad de diluciones para disminuir el contenido de sólidos y arenas, originándose exceso de desembolsos para el mantenimiento del lodo. Asimismo, se gastó una cantidad similar en las operaciones del Zócalo Continental, al tener los mismos problemas de repuestos que Petroperú.

7.-Cuando el lodo no puede pasar por la zaranda ya sea por problemas con las mallas, planta de luz etc. no transcurre mucho tiempo sin que se tapone los hidrociclones, agudizándose el problema **de densidad**, viscosidad, filtrado, **impurezas**, sólidos, etc.

8.-Los hidrociclones se obturan con facilidad cuando trabajan con descarga continua.

9.-El no control de los sólidos en el fluido de perforación incrementa la densidad de lodo, originando que la diferencia de presiones entre la hidrostática y la formación sea mayor, trayendo como consecuencia que el ROP disminuya.

10.-La viscosidad también se incrementa por los sólidos que entran al sistema, haciendo imposible el control por el escaso rendimiento de los equipos de control de sólidos.

11.-Las deficiencias de los separadores de sólidos y el excesivo porcentaje de dilución ocasionan la inestabilidad de las paredes del hueco, así como retrasos en la perforación.

## RECOMENDACIONES

1.-Preparar personal técnico en el conocimiento profundo de las técnicas disponibles para el control de sólidos para poder maximizar el comportamiento y rendimiento de los equipos de control de sólidos y utilizar un buen lodo de perforar, minimizando así los costos en el mantenimiento del lodo.

2.-El problema de control de sólidos es tan complejo económicamente tan importante que cualquier medio disponible debería ser utilizado para su solución, en tal sentido se debería solucionar el problema de repuestos, minimizando así el requerimiento de diluciones que es el método más caro para el control de sólidos ó en su defecto comprar E.C.S..

3.-Buscar la alternativa en el futuro de standarizar los equipos de control de sólidos, tratando de eliminar el problema de la diversidad de repuestos.

4.-Se debe diseñar un programa de control de sólidos para cada pozo, ningún tipo de equipo de control de sólidos es ideal para todas las locaciones, cada pozo tiene que ser visto individualmente y se deben considerar factores como economía, diseño, tamaño del sistema de lodo, volumen de lodo, tipo y

propiedades del lodo, aspectos ambientales condiciones geológicas, antes de elegir los aparatos que se ajusten a las necesidades.

5.-Los sólidos de perforación deben ser extraídos lo más que se pueda, durante la primera circulación, dado que estos puedan separarse rápidamente o desintegrarse en tamaños menores de partícula, cuando permanecen en circulación continua recirculan, más aún que la velocidad de desintegración varía con la formación, tipo de fluido perforación, tipo de broca, tiempo de exposición y la abrasión mecánica producida por la sarta de perforar.

6.-Los hidrociclones deben trabajar en Spray, ya que si trabajan con descarga continua, se obturan con facilidad.

7.-Para obtener el mayor beneficio de los separadores de sólidos se deberían trabajar desde el comienzo del pozo, aún desde cuando se están perforando los pozos auxiliares, en ciertos casos se deberían tener en marcha cuando no se perfora para limpiar el circuito de superficie y proveer de esta manera mejores condiciones de limpieza y seguridad para la perforación del pozo.

8.-Buscar la alternativa a través de los departamentos correspondientes de nuestra empresa, para que se ponga en contacto con ITINTEC para ver la fabricación de los equipos nacionales de control de sólidos.

9.-Mantener un stock mínimo de repuestos ó partes cambiables de los equipos de control de sólidos que aseguren una buena separación de los sólidos indeseables.

10.-El lavado de los tanques de asentamiento deberá ser más regularizado, para evitar la mayor acumulación de sólidos perforados así como su recirculación incorporación al circuito.

## VII.- BIBLIOGRAFIA

1. Manual para un buen control de sólidos de AMOCO por Grant Young-Primera Edición. Junio 1983
2. Manual de remoción de sólidos de Hughes Drilling Fluids
3. Imco Service Halliburton Co. Tecnología aplicada de lodos Capítulo 21, página 1-16
4. Catálogo N°263-1 Mission Centrifugal Pump Oilfield Páginas- 1-18.
5. Swaco Dresser Industries Inc. Equipment Technical Memorandum N°0401-68M. Solids Control Techniques. Págs. 1-13
6. Limpiador de lodo (Mud Cleaner) P.Regnault. Octubre 1979.
7. Petroleum Engineer International. Solids Control For the Man on the rig.  
  
Part 1: Solids Removal Economics and shale shaker selection. Octubre 1982.  
  
Part.2: Hydrociclone and centrifugal pump sizing. Noviembre 1982.  
  
Part.3: Fluid Routing, Maintenance and Troubleshooting. Diciembre 1982

8. Petroleos del Perú. Comité de Trabajo sobre optimización de la hidráulica de los equipos de perforación. Diciembre 1981.
9. J.E.Branthy."History of oil well Drilling".  
Capítulo 15. Pág. 729-804, Capítulo 22, Pág.1122-1145.
10. Milchen Venezuela Corporation. Control mecánico de sólidos.
11. Petróleos del Perú. Manual de fluidos de perforación. Talara Noviembre 1988, Capítulo: Control de Sólidos, Pág.1-53
12. Hugo J.Mochiutti "Rendimiento de hidrociclones", Primer Congreso Latinoamericano de Perforación.
13. L L Hoberock, Amoco Production Company. "Modern Shale Shakers-Key To Improved Driling
14. L L Hoberock, Amoco Production Company "Screen Selection For Shale Shakers"
15. Journal of Petroleum Technology " A Study of Vibratory Screening of Drilling Fluids" Noviembre 1980.
16. L L Hoberock, Amoco Production Company "Dinamics of Shale Shakers"
17. L L Hoberock, Amoco Production Company "Flows Limits for unconventional shale shaker screens"

18. L.L.Hoberock, Amoco Production Company "Field Operation shale shakers"
19. L.L. Hoberock, Amoco Production Company "Fluids capacity limits for conventional shale shaker screens"
20. N.L.Petroleum Services "Solving Mud Problems with solids control equipment"
21. Word Oil "How to Design a Mud system for optimum solids removal". Octubre 1982.
22. Sweco Oil Field Service Division "Solids Control Handbook"
23. N.L.Baroid "Control de sólidos"
24. Mud Equipment Manual Handbook 3 (Shale shaker) Gulf Publishing Co.
25. Mud Equipment Manual Handbook 4 (Centrifugal pumps) Gulf publishing Co
26. Mud Equipment Manual Handbooks 6 and 7 (Hydrociclones and Mud Cleaners) Gulf Publishing Co.