

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS
APLICADO AL POZO ANH-BVENTURA 1 ST-P**

**ABELARDO RONDÓN MEJIA
JAIME YESID ULLOA REYES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS
APLICADO AL POZO ANH-BVENTURA 1 ST-P**

**ABELARDO RONDÓN MEJIA
JAIME YESID ULLOA REYES**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de
Ingeniero de Petróleos**

**Director
FELIX ARENAS RUEDA
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

Primeramente a DIOS sobre todas las cosas, gracias a él hoy puedo gozar de un anhelo y gran triunfo de ser PROFESIONAL, gracias a ti por haberme otorgado tantas bendiciones durante mi vida Universitaria brindándome la salud, la protección y el bienestar.

A mi gran Padre JORGE ELI, hombre de grandes luchas y mi gran orgullo; gracias papá por todo este apoyo y dedicación, el cual me permitió ser el profesional que hoy en día soy. A mí Hermosa Madre ELIZABETH, que día a día con sus oraciones me cuidaba desde lejos. Tú mamita, que prefieres soportar tantas cosas por ver la felicidad en los ojos de tus hijos, te otorgo este gran triunfo. Mi hermanito JORGE EDUARDO, por permitirme ser su ejemplo “hermanito lo logramos”.

A mi compañero, el Ingeniero ABELARDO, hermano gracias por enseñarme que el conocimiento no es solo lo que nos otorgan, también hay más maneras por aprender y no quedarnos con lo básico.

Mis colegas y amigos de Universidad Ricardo, Sandra, Raúl, Ana, William y Lucia. Aquellos que con sus grandes aportes y distintas cualidades, formaron parte de mi vida, tanto personal como profesional. Se pasaron momentos difíciles, pero a la vez momentos inolvidables que nos despejaban de la vida estudiantil, con esas cervezas y salidas de campo. “Nadie nos dijo que ser un gran profesional iba ser fácil, pero tampoco iba ser imposible, la gozamos con orgullo”.

A Mary, Heidy, Angie (mis hermanolas), Miriam y Mari, gracias por su gran apoyo y palabras de aliento que hoy me llenan de felicidad.

JAIME

DEDICATORIA

A DIOS que es el único que me dio fuerzas para continuar con el cumplimiento de esta meta en los momentos cuando quería renunciar.

A mi señor padre FAUSTINO G RONDON MORENO que siempre me ha apoyado en cada una de las metas que me he propuesto y por todas sus enseñanzas de la vida, las cuales aplicare en el camino que me espera. A mi señora madre MIRIAM MEJIA LEON por el amor incondicional y su apoyo constante además de todo el aguante que ha tenido conmigo.

A mis hermanos ORLANDO ANDRES Y HERNAN ALVARES alias los gordos, maparios gracias por todos los momentos vividos y por el apoyo constante en las situaciones difíciles, por los consejos de abuelito y especialmente por ser mis amigos.

A ti ANGELICA VILLABONA, por el apoyo constante, el cariño y las palabras de ánimo en los momentos que dije que no quería continuar y tú estabas hay diciendo que confiabas en mí. GRACIAS ooo-

A mis parceros de la office vagancia camilo, kala, klistian, ñato, lau, Sergio, gio, cali y el flaco gracias por todo locos, por las horas gastadas hablando y arreglando el país, los paseos, risas y cervezas y por todas las experiencias que nos falta compartir.

A mi amigo y compañero de Tesis el viejo Jaime que estuvo conmigo en la lucha de hacer posible lo que en algunos momentos parecía imposible. Gracias loco.

ABE

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero FELIX ARENAS RUEDA nuestro Director, un hombre de grandes conocimientos, que confió en nosotros, permitiéndonos trabajar con tan bella profesión, donde llegamos a decir que “nos lavábamos con la lluvia y nos secábamos con el sol”, gracias Ingeniero que DIOS lo bendiga.

A los Ingenieros de Lodos ROBERTO y MARTÍN, que nos otorgaron sus conocimientos en experiencias de campo.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería de Petróleos, que nos recibió como familia, ofreciéndonos beneficios, a lo largo de la carrera.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. FUNDAMENTOS TEORICOS	21
1.1 Perforación de Pozos ¹	21
1.2 Fluidos de Perforación y sus funciones ²	22
1.2.1 Refrigerar y lubricar la broca y la sarta de perforación	22
1.2.2 Limpiar el fondo del pozo de fragmentos de roca y llevarlos a superficie ...	23
1.2.3 Evitar daño a Formaciones Productoras	24
1.2.4 Suministrar la suficiente presión hidrostática.	24
1.2.5 Mantener la integridad del pozo hasta que pueda ser revestido.	27
1.2.6 Ayuda a la toma de registros geofísicos.	27
1.2.7 Minimizar la corrosión de las tuberías.	28
1.2.8 Mejorar la velocidad de perforación.	28
1.2.9 Tipos de fluidos de perforación.	31
1.3 Propiedades Del Fluido De Perforación ³	34
1.3.1 Densidad del lodo o peso del lodo.	34
1.3.2 Viscosidad.	35
1.3.3 Viscosidad Plástica.	36
1.3.4 Yield Point.	37
1.3.5 Resistencia de Gel.	37
1.3.6 Contenido de Sólidos.	37
1.3.7 Contenido de Arenas.	38
1.3.8 Filtración.	39
2. FUNDAMENTOS TEORICOS DEL CONTROL DE SOLIDOS ⁴	40
2.1 Beneficios de la remoción de los sólidos.	45

2.2 Efectos de los Sólidos en el Fluido de Perforación.....	45
2.3 Disminución de la Tasa de Penetración (ROP).....	46
2.4 Reducción de la Vida Útil de los Equipos de Superficie, bombas y barrenas.	46
2.5 Atascamiento de la Tubería.	47
2.6 Excesivo Torque y Arrastre.....	47
2.7 Daño a la Formación.....	47
2.8 Pérdidas de Circulación.	47
2.9 Aumento del Costo del Lodo.....	48
2.10 Distribución del tamaño de los sólidos.....	48
2.11 Clasificación de los sólidos de perforación.	51
2.12 Tipos de sólidos presentes en el lodo de perforación.	52
2.12.1 Sólidos Inertes.	52
2.12.2 Sólidos Reactivos.	53
2.12.3 Sólidos de alta y de baja gravedad específica.	53
2.13 Ley Que Rige La Sedimentación De Los Sólidos.	53
2.13.1 Fuerza G.	54
3. METODOS DE CONTROL DE SOLIDOS	55
3.1 Separación mecánica.	55
3.2 Equipos de Control de Sólidos ⁵	56
3.2.1 Método de separación primarios.....	57
3.2.2 Divisor de flujo.	57
3.2.3 Shale Shakers.....	58
3.2.4 Tamiz de mallas.....	61
3.2.5 Vida del tamiz.	61
3.2.6 Tamaño de la malla.	62
3.3 Área de abertura ⁶	63
3.3.1 Eficiencia de Separación o Punto de Corte.....	64
3.3.2 Conductancia de la malla.....	65
3.3.3 Relación entre Conductancia y Porcentaje de Área abierta para diferentes Mallas ⁷	66

3.4 Tipo de tamiz.	67
3.5 Inclinación de la canasta.....	69
3.6 Aumento de la inclinación.	69
3.7 Disminución de la inclinación.....	69
3.8 Tipos de fluido de perforación.....	70
3.9 Tasa de bombeo.	71
3.10 Tipo de movimiento de las zarandas Vibratorias ⁸	71
3.10.1 Zarandas del movimiento circular.	71
3.10.2 Zarandas de movimiento elíptico.	72
3.10.3 Zarandas de movimiento lineal.	74
3.11 Separación Mecánica: Clasificación Húmeda ⁹	75
3.11.1 Hidrociclones.	75
3.11.2 Cabeza hidrostática.	77
3.11.3 Tipo de descarga.	78
3.12 Tipos de Hidrociclones Según sus Dimensiones y Usos.	80
3.13 Desarenadores y Deslimadores.....	83
3.14 Acondicionadores de lodo.....	85
3.15 Tres en uno y acondicionadores de lodo.	89
3.16 Sistema de centrifugación.....	90
3.17 Desempeño de las Centrifugas de Decantadoras.....	93
3.18 Aplicaciones de las Centrífugas.....	95
3.19 Otros métodos de Separación de Sólidos.....	97
3.19.1 Dilución.	97
3.19.2 Desplazamiento.	98
3.19.3 Piscinas de asentamiento.	98
4. GENERALIDADES DEL POZO.....	99
4.1 Ubicación del pozo.....	99
4.2 Metodología de Análisis de Datos.....	101
4.3 Cálculo de los Costos del Equipo de Control de Sólidos comparado con los gastos generados por Dilución.....	105

4.3.1 Dilución.	105
4.3.2 Costos por separación mecánica de sólidos.....	105
4.4 Análisis de Datos.	106
4.5 Determinar la Eficiencia de cada uno de los Equipos que componen el Sistema de Control de Sólidos.....	109
4.6 Optimizar la Eficiencia del Equipo de Control de Sólidos que lo requieran para su óptimo desempeño.....	113
4.7 Análisis económico del mejoramiento del Sistema de Control de Sólidos. ...	116
4.8 Evaluar la Factibilidad del mejoramiento del sistema de Control de Sólidos y su efecto en los costos operacionales de la perforación.	118
4.9 Análisis del Aporte del Inhibidor de Arcillas a la Eficiencia del Sistema.....	119
4.10 Análisis del efecto de los Sólidos en las Propiedades del Lodo.....	122
5. CONCLUSIONES.....	127
6. RECOMENDACIONES	129
BIBLIOGRAFÍA.....	130

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perforación de Pozo	21
Figura 2. Balanza de Lodos	35
Figura 3. Embudo de Marsh	36
Figura 4. Viscosímetro de FANN	36
Figura 5. Kit de Retorta	38
Figura 6. Arenómetro ó Prueba de la Zanahoria.....	39
Figura 7. Diagrama del Trommel	41
Figura 8. Tipo básico de máquinas continúa	42
Figura 9. Centrifuga de los años 1950's	44
Figura 10. Tamaño de los Sólidos presentes en el lodo de perforación	49
Figura 11. Tipo de Sólidos	52
Figura 12. Partículas que eliminan los diferentes Equipos de Control de Sólidos .	57
Figura 13. Diferentes Tipos de Zarandas Vibratorias.....	59
Figura 14. Tipo de Tamiz	67
Figura 15. Tipos de Mallas.....	68
Figura 16. Zaranda de Movimiento Circular.....	72
Figura 17. Zaranda Movimiento Elíptico Desbalanceado.....	73
Figura 18. Zaranda de Movimiento Elíptico Balanceado.....	73
Figura 19. Hidrociclones	76
Figura 20. Tipo de Descarga de un Hidrociclón	79
Figura 21. Tipo de Descarga de un Hidrociclón.....	79
Figura 22. Desarenadores	83
Figura 23. Deslimador.....	84

Figura 24. Acondicionador de Lodo	87
Figura 25. Tres en Uno	89
Figura 26. Estructura Interna de una Centrifuga	93
Figura 27. Ubicación del Pozo	100
Figura 28. Balance Equipos de Control de Sólidos.....	103
Figura 29. Mallas Dañadas	111
Figura 30. Obstrucción salida de Lodo-Hidrociclón.....	114
Figura 31. Óptima salida de Lodo-Hidrociclón	115
Figura 32. Control de Limpieza	115
Figura 33. Descripción Litológica y Porcentual	121

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Viscosidad del Lodo.	50
Gráfica 2. Diámetro de Partículas.	51
Gráfica 3. Tamaño de Malla Vs Abertura en Micrones.	60
Gráfica 4. Área de Aberturas.	63
Gráfica 5. Punto de Corte.	65
Gráfica 6. Relación entre Conductancia y Porcentaje de Área abierta para diferentes mallas.	66
Gráfica 7. Comportamiento Típico de Remoción de un Hidrociclón.	81
Gráfica 8. Efecto de la Centrifuga sobre la Remoción de Sólidos y la Razón de Área Removida.	91
Gráfica 9. Eficiencia de la Zaranda 1 y Zaranda 2.	112
Gráfica 10. Análisis de la Densidad y el Lodo.	122
Gráfica 11. Densidad. Gráfica 12. Vp. Grafica 13. Yp.	125
Gráfica 14. MBT.	126

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diámetro del Cono vs Caudal que maneja.....	81
Tabla 2. Ficha Técnica del Pozo.....	101
Tabla 3. Pozo ANH-BVentura 1 ST-P.....	106
Tabla 4. Zaranda 1.....	108
Tabla 5. Zaranda 2.....	108
Tabla 6. Eficiencia de la Zaranda 1.....	109
Tabla 7. Eficiencia de la Zaranda 2.....	110
Tabla 8. Eficiencia del Sistema de Control de Sólidos.....	111
Tabla 9. Costos Asociados al Lodo.....	116
Tabla 10. Distribución de Caudales.	117
Tabla 11. Costos por Dilución y Separación Mecánica.....	117
Tabla 12. Costos Operacionales.....	118
Tabla 13. Beneficios Económicos.....	118

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS APLICADO AL POZO ANH-BVENTURA 1 ST-P.

AUTORES: RONDÓN MEJÍA ABELARDO,
ULLOA REYES JAIME YESID **

PALABRAS CLAVES:

Control de sólidos, Sólidos de perforación, Separación mecánica, Inhibidor de arcillas, Pozo ANH-BVENTURA 1 ST-P

DESCRIPCIÓN:

En la industria petrolera, durante la perforación de un pozo la remoción de los sólidos es uno de los aspectos más importantes en el sistema de lodos, ya que el dinero invertido en el control y en la solución de los problemas relacionados con los sólidos de perforación representa una porción importante de los costos globales de la operación.

Mantener el equipo de control de sólidos en buenas condiciones además de operarlo adecuadamente, ayuda a que los ripsos generados por el hueco puedan ser separados eficientemente, disminuyendo los productos químicos y los volúmenes de dilución necesarios para mantener la concentración de sólidos en los porcentajes permitidos, de tal manera que los sólidos no se degraden y sean intratables por medios mecánicos, con el fin de prevenir el cambio negativo en las propiedades del lodo como la densidad, propiedades reológicas, filtración, porcentaje de sólidos y MBT, ya que una alteración en estas propiedades anteriormente mencionadas afecta los parámetros operaciones como la velocidad de penetración (ROP), la hidráulica, el torque y el arrastre, las pérdidas de surgencia y pistoneo, pegaduras por presión diferencial, perdidas de circulación, estabilidad del pozo, el embolamiento de la broca y el conjunto de fondo (BHA).

Por lo tanto la buena eficiencia del sistema de control de solidos es uno de los factores más importantes para llevar a cabo la perforación eficiente de un pozo.

^{*}Trabajo de grado.

^{**}Aspirantes al título de Ingenieros de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director FELIX ARENAS RUEDA.

ABSTRACT

TÍTULO: ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE SYSTEM OF CONTROL OF SOLID APPLIED TO THE WELL ANH-BVENTURA 1 ST-P*.

AUTHORS: RONDÓN MEJÍA ABELARDO,
ULLOA REYES JAIME YESID **

KEY WORDS:

Control of solid, Solid of perforation, Mechanical Separation, Inhibitor of clays, Well ANH-BVENTURA 1 ST-P

ABSTRACT:

In petroleum industry, during the drilling of a well, solids removal is one of the most important aspects in the mud system, because the money invested in the control and solving problems related to drilling solids, represents a significant portion of the overall costs of the operation.

Keep the solids control equipment in good working and properly operated, helps that cuttings generated by the hole can be separated efficiently, reducing the chemicals products, and dilution volumes required to maintain the solids concentration in the percentages permitted, so that the solids do not degrade and are intractable by mechanical means, in order to prevent negative change in mud properties such as density, rheological properties, filtration, percentage solids and MBT, because an alteration in these properties mentioned above affects operations parameters as the rate of penetration (ROP), hydraulics, torque and drag, losses in knock and upwelling, jams due to the differential pressure, lost circulation, wellbore stability, the location of the drill and bottomhole assembly (BHA).

Therefore good efficiency solids control system, is one of the most important factors to conduct an efficient drilling operation of a well.

*Degree Project.

**Petroleum Engineers Candidates of the Industrial University of Santander. Faculty of Physical Chemistry, School of Petroleum Engineering. Director FELIX ARENAS RUEDA.

INTRODUCCIÓN

Durante la perforación de un pozo es fundamental remover los sólidos indeseables, ya que los mismos tienen efectos perjudiciales sobre las propiedades del lodo en el proceso de perforación, convirtiéndose en un problema difícil de controlar cuando la concentración de sólidos se vuelve excesiva, provocando un aumento del volumen de filtrado a las formaciones permeables, atascamiento de la tubería, disminución de la tasa de perforación y un agotamiento de la vida útil de las brocas, ocasionando problemas operacionales.

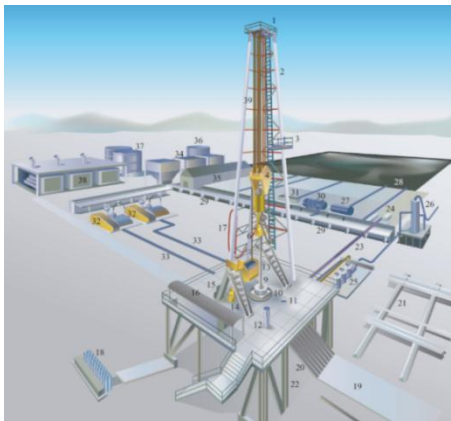
El objetivo del diseño de cualquier sistema de control de sólidos es alcanzar, paso a paso, la remoción progresiva de los sólidos perforados, de allí la importancia de mantener el lodo de perforación limpio de arena u otros sólidos mediante la aplicación de buenas prácticas, una eficiente utilización de los equipos y un efectivo control de las variables como caudales, velocidad de las centrifugas, relación inhibidor de arcillas-caudal que disminuya los costos operacionales.

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 Perforación de Pozos.

La perforación de un pozo consiste en el proceso de construir un hueco en el subsuelo con el fin de llevar a cabo la exploración o la extracción de recursos naturales tales como agua, gas o petróleo. La perforación de un pozo ya sea en tierra o mar, consiste en la penetración de las diversas capas de roca hasta llegar al yacimiento o punto de interés. Para perforar un pozo, de la manera más general se utiliza, un sistema rotatorio que consiste en hacer girar una broca de diferentes diámetros, la cual está conectada a una tubería de perforación¹. Los fragmentos que resultan de esta operación son llevados a la superficie con ayuda del lodo de perforación, el cual se diseña de tal forma que cumpla una serie de funciones, como suspender y transportar los cortes a través del espacio anular hasta la superficie. (Figura 1).

Figura 1. Perforación de Pozo.



Fuente: Torre de Perforación

¹ Funciones de los Fluidos de Perforación. Manual de Fluidos de Perforación

1.2 Fluidos de Perforación y sus funciones².

Los fluidos de perforación (según la norma API) tienen una función primordial, la cual es remover los cortes de la perforación y llevarlos a superficie, además de lubricar y refrigerar la broca y la sarta de perforación. De hecho el lodo tiene muchas otras funciones y de la cual puede decir que es “la columna vertebral” de todas las operaciones de perforación de un pozo. Por lo tanto es muy importante que el fluido de perforación pueda llevar a cabo todas estas funciones eficientemente, que generalmente se elabora a base de agua o aceite con algunos productos químicos y con arcilla; de aquí es como se le conoce con su nombre coloquial de “Lodo de Perforación” y sus funciones durante el proceso de perforación son los siguientes:

- ✚ Refrigerar y lubricar la broca y la sarta de perforación.
- ✚ Evitar daño a las formaciones productoras.
- ✚ Limpiar el fondo del pozo de fragmentos de roca que se han generado por la broca y llevarlos a superficie.
- ✚ Suministrar la suficiente presión hidrostática.
- ✚ Mantener la integridad del pozo hasta que pueda ser revestido.
- ✚ Ayudar a la toma de registros geofísicos.
- ✚ Minimizar la corrosión de las tuberías.
- ✚ Mejorar la velocidad de penetración.
- ✚ Sosteniendo los recortes y el material densificante en suspensión cuando se interrumpe la circulación.
- ✚ Transmitir la potencia hidráulica a la formación.
- ✚ Dar un efecto de flotación.

1.2.1 Refrigerar y lubricar la broca y la sarta de perforación. La acción de la perforación y la rotación de la sarta de perforación generan altas temperaturas debido a las fricciones presentes durante la operación. Este calor es absorbido por

el fluido de perforación y es liberado o dispersado, hasta salir a superficie con el fin de poder extender la vida útil de los elementos que se exponen a las operaciones normales. El fluido de perforación reduce aún más el calor lubricando la broca y la sarta al incluir aditivos, los cuales incrementan la lubricación al tiempo que reduce la torsión, la fricción y el arrastre.

1.2.2 Limpiar el fondo del pozo de fragmentos de roca y llevarlos a superficie. Esta es la función más importante que realiza el fluido de perforación, el cual pasa a través de las boquillas o jets para expulsar los cortes producto de la perforación y arrastrarlos a través del anular hasta la superficie. Siendo de vital importancia debido a que mantiene el fondo del pozo limpio de cortes y además previene el empacamiento de la broca (Acumulación de los cortes y embolamiento de la broca), aumentando así la vida de la broca e incrementando la eficiencia de la perforación. Para que la limpieza del pozo se lleve a cabo de manera eficiente se debe tener presente la velocidad anular, en la cual juegan un papel muy importante:

- ✚ Capacidad de la bomba
- ✚ Velocidad de la Bomba
- ✚ Tamaño del agujero
- ✚ Diámetro de la tubería de perforación

$$\text{Velocidad Anular} = \frac{\text{Gasto de la Bomba}}{\text{Volumen Anular}} \qquad \text{Ecuación N° 1}$$

La hidráulica óptima se da cuando se genera el recorte al momento en que la broca hace contacto con la roca, al mismo instante se ve afectada por una velocidad de asentamiento la cual es ejercida sobre el corte, de tal manera que la velocidad de asentamiento debe ser menor a la del flujo para que los recortes lleguen a superficie.

1.2.3 Evitar daño a Formaciones Productoras. Cuando un fluido de perforación entra en contacto con la formación alterarán las características originales de la formación, el daño a las formaciones se presenta de dos formas diferentes:

- ✚ Reducción en la capacidad de una formación para producir hidrocarburos.
- ✚ Reducción de la estabilidad de las paredes del pozo.

Para que haya una inestabilidad de las paredes del pozo, es debido a la consecuencia del taponamiento físico por sólidos inertes o de una reacción química entre los componentes del fluido y los de la formación.

1.2.4 Suministrar la suficiente presión hidrostática. Se conoce como presión hidrostática del lodo, debido a la presión que se ejerce en el fondo del pozo, debida al peso acumulado de la columna vertical de fluido de perforación. Donde se dice que si un pozo esta balanceado, es porque su presión de formación es igual a la presión hidrostática, de lo contrario si las presiones no son iguales, se dice entonces que los fluidos, sean de formación o de perforación tienden a moverse hacia donde la presión sea menor.

En el caso en que la presión hidrostática sea menor que la presión de formación, se dice que el pozo está en bajo balance y por lo tanto sometidos a influjos de formación, los cuales pueden resultar en patadas de pozo y en último caso, en reventones. Durante la perforación la formación se puede ver sometida a presiones normales y anormales:

- ✚ Las presiones normales son aquellas que nos vamos encontrando conforme se va perforando dependiendo de su profundidad y que se generan a partir de un proceso “normal” de compactación de las rocas.

- Las presiones anormales son causadas por efectos diagenéticos, asentamientos estructurales como plegamientos, fallamientos, levantamientos, inclinación de estratos o intrusiones diapíricas, o una combinación de éstos.

Se ha determinado que la presión normal en zonas continentales es igual a 1.00 gr/cm³ (0.4335 psi/pie), y en zonas costeras y marinas es de 1.07 gr/cm³ (0.465 psi/pie). La presión hidrostática que ejerce el fluido sobre la formación, puede llegar a fracturar ésta, en caso de tener baja presión hidrostática deberá aumentarse la densidad al fluido.

$$p_h = H * D * (0.052) \quad \text{Ecuación N° 2}$$

$$p_h = \frac{h * \rho}{10} \quad \text{Ecuación N° 3}$$

Dónde:

PH = presión hidrostática

D = densidad en lb/gal

H = profundidad en pies

ρ = densidad g/cm³

H = profundidad en metros

Para aumentar la densidad del fluido se puede recurrir a la siguiente ecuación:

$$W_{Bar} = \frac{V_i(\rho_f - \rho_i)}{1 - \rho_f / \rho_{Bar}} \quad \text{Ecuación N° 4}$$

Dónde:

WBar = Peso del material densificante por agregar

V_i = Volumen inicial del fluido

ρ = Densidad final

ρ = Densidad inicial

ρ_{Bar} = Densidad del material densificante

Pero en el caso de las presiones anormales se puede decir lo siguiente:

1.2.4.1 Anormalmente Bajas. Se conocen así, debido a que su presión de formación está por debajo de la presión normal, esto se genera debido a los movimientos tectónicos, cuando una capa litológica pasa de una posición original a otra posición más alta.

Las capas superficiales que cubren a la capa de interés pueden ser erosionadas ocasionando que dicha capa se encuentre libre de esfuerzos de sobrecarga y por lo tanto tiende a expandirse, aumentando así el volumen de sus poros, dando como resultado que los fluidos contenidos en los poros se encuentren sometidos a una presión menor que la normal.

Cuando por movimientos tectónicos existen capas litológicas contenidas entre formaciones de muy baja permeabilidad que son sometidas a efectos de compresión horizontal, una de las capas se expande y otra sufre una compresión; las capas que se expanden tendrán una presión menor que la normal y las presiones de formación anormales bajas pueden resultar de un modo artificial cuando se efectúa la explotación de un yacimiento.

1.2.4.2 Anormalmente Alta. Para que ocurra este proceso se debe a que el fluido en el espacio poroso comienza a soportar más sobrecarga que la normal. Como es al efectuarse la depositación normal de los sedimentos, quedan los fluidos atrapados en algunas formaciones. Posteriormente a esta depositación se inicia un proceso en el que se depositan algunos materiales, los cuales tienen la particularidad de sellar la capa inferior, sin permitir que el fluido que quedó atrapado tenga la facilidad de escapar.

Al seguir el fenómeno de la depositación, las siguientes capas de sedimento ejercerán una compresión sobre la capa de interés, ocasionando que el fluido

atrapado soporte una carga mayor que la normal. Otro caso es cuando las capas litológicas que se comprimen, tendrán fluidos que soportarán una presión de formación mayor que la normal.

1.2.5 Mantener la integridad del pozo hasta que pueda ser revestido. A menudo se presentan problemas de estabilidad de las paredes del pozo descubierto debido a fenómenos geológicos tales como zonas fracturadas, arcillas hidratables, formaciones bajo compactadas y zonas presurizadas, que pueden provocar un derrumbe o algún problema con el pozo, por lo que el fluido de perforación tiene que ser capaz de controlar dichos problemas de tal manera que la parte perforada permanezca estable y se pueda profundizar más el pozo de manera continua hasta que sea revestido.

1.2.6 Ayuda a la toma de registros geofísicos. Los fluidos de perforación se modificaron con el propósito de mejorar el aspecto de evaluación de la formación. Con mayores viscosidades se tienen mejores recortes, con menor filtración se minimiza la invasión del fluido a la formación y con fluidos especiales para mejorar las características de los registros y las pruebas de formación. Las propiedades físicas y químicas del fluido pueden afectar la toma de registros. Los fluidos base aceite dificultan la evaluación de los horizontes potencialmente productores y los fluidos base agua salada limitan el uso del registro de potencial espontáneo para reconocer zonas permeables, la invasión de agua o aceite afectan la resistividad. Por ejemplo, un lodo muy salado hace poco confiable un registro del potencial espontáneo (SP) debido a que las salinidades del lodo y de la formación pueden ser casi iguales, los lodos base aceite nulifican los registros de resistividad ya que actúan como un dieléctrico, etc. Por lo que el programa de registros deberá estar de acuerdo con los fluidos que se tenga adentro del pozo.

1.2.7 Minimizar la corrosión de las tuberías. En la actualidad se están perforando pozos donde existen formaciones que contienen H₂S, el cual es un gas que además de ser mortal, causa el debilitamiento y falla del acero, para evitar o retrasar estos efectos, se le pueden agregar ciertos aditivos al fluido de perforación, que eliminan o reducen la concentración de estos gases de las formaciones en que están presentes.

1.2.8 Mejorar la velocidad de perforación. La velocidad de perforación se ve afectada por las propiedades del lodo, los bajos filtrados y los contenidos de sólidos, que casi siempre retardan la perforación.

Mientras menor sea la presión diferencial de la columna de fluido con respecto a la presión de la formación se incrementa la velocidad de penetración. Sin embargo es importante tener en cuenta problemas como daño a la formación, estabilidad del pozo, etc. Las variables alterables que permiten el aumento de la velocidad de perforación son las siguientes:

1.2.8.1 Densidad. Se puede referenciar de una mejor manera con la interpretación del concepto de presión diferencial:

$$\text{Presión Diferencial} = \text{Presión Hidrostatica} - \text{Presión de Formación} \quad \text{Ecuación N° 5}$$

Si es positiva, la fuerza que se ejerce sobre los recortes trata de mantenerlos en el fondo remoliéndolos sin penetrar a la roca y por tanto reduciendo la velocidad de penetración.

² Elaboración de un método de evaluación del sistema de Control de Sólidos, basado en una nueva definición de los objetivos funcionales de los Equipos y en un nuevo concepto de eficiencia.

1.2.8.2 Viscosidad. El efecto de la viscosidad sobre la velocidad de penetración puede ser contemplado como un problema de limpieza en el fondo del pozo. La limpieza del pozo es mayor cuando se emplean fluidos de baja viscosidad que permiten el flujo más fácilmente. En otro enfoque, la velocidad de perforación puede ser una función del número de Reynolds, el cual se evalúa con la viscosidad, junto a otras variables:

$$R = f(NRe) = f\left(\frac{dv\rho}{\mu}\right) = f\left(\frac{Q\rho}{dn\mu}\right) \quad \text{Ecuación N° 6}$$

1.2.8.3 Contenido de Sólidos. Un incremento en el contenido de sólidos reduce sustancialmente el ritmo de penetración, debido al incremento en densidad, viscosidad, enjarre, etc. porque existen más sólidos en el lodo de perforación. Por lo tanto, para lograr una perforación eficiente es necesario mantener el contenido de sólidos tan bajo como sea posible ya que entre más pequeñas sean las partículas de sólidos y mayor sea la dispersión mayor es el efecto de reducción.

1.2.8.4 Filtrado. El filtrado depende principalmente del contenido y tipo de sólidos en el lodo, de la permeabilidad de la formación y de la presión diferencial. Si se forma un enjarre rápidamente y este es impermeable, dará como resultado un menor filtrado. Un fluido con alta pérdida inicial de filtrado tiende a incrementar el ritmo de penetración, sin embargo un alto filtrado inicial causará un alto daño a la formación.

1.2.8.5 Sosteniendo los recortes y el material densificante en suspensión cuando se interrumpe la circulación. Un buen fluido de perforación debe tener propiedades que le permitan acarrear los recortes durante la perforación y

soportarlos durante el tiempo que este suspendida la misma, ya que si caen causarán problemas al meter tubería nuevamente. Para lograr esta suspensión es útil el punto de cadencia y la gelatinosidad, estas propiedades al igual que el resto, deben controlarse con el fin de lograr el punto óptimo de trabajo de cada una de ellas. Casi todos los fluidos caen en la clasificación de los plásticos de Bingham, los cuales tienen como principal propiedad la tixotropía, cuando éstos se encuentran en circulación son fluidos ligeros y cuando se quedan en reposo tienden a formar una estructura gelatinosa debida a las cargas electroquímicas de las fases reactivas, la gelatinosidad depende de la magnitud de dichas fuerzas. El fluido debe permitir que una vez que los recortes lleguen a la superficie se puedan eliminar fácilmente, bien sea por medios mecánicos como los desarenadores, desarcilladores, etc., o por medios físicos como la precipitación.

1.2.8.6 Transmitir la potencia hidráulica a la formación. El uso de la potencia hidráulica en la broca o el impacto hidráulico se justifica porque la remoción de los recortes depende de la cantidad de energía del fluido gastada en la broca y del efecto de erosión del fluido en el fondo del pozo.

1.2.8.7 Dar un efecto de flotación a la sarta y a la TR. El fluido de perforación tiene, entre otras funciones la de sostener la sarta de perforación y de revestimiento. Esto se realiza por medio de un empuje ascendente que actúa en la tubería al estar sumergida en el fluido de perforación. Este empuje dependerá de la profundidad a la que se encuentre la tubería y de la densidad del fluido sustentante, un aumento en la densidad del fluido, aumentará el empuje y reducirá el peso total soportado por el equipo.

1.2.9 Tipos de fluidos de perforación. Existen tres tipos principales de fluidos de perforación, según la formulación del fluido base.

1.2.9.1 AIRE/GAS. Utilizado para perforar formaciones duras y secas o para combatir pérdidas de circulación. Rara vez se utiliza costa afuera, con la excepción de pozos de bajo balance o en perforación de tubería flexible o de producción.

1.2.9.2 Lodos Base Agua. Los tipos principales de sistemas de lodos base agua, son:

- ✚ No-Dispersos
- ✚ Dispersos
- ✚ Calados o Cálculos
- ✚ Polímeros
- ✚ Bajos en Sólidos
- ✚ Salinos (Saturados en Sal)

1.2.9.3 Lodos No-Dispersos. Generalmente incluyen lodos de poco peso ligeramente tratados y lodos de inicio. No tiene adición de adelgazantes. Usualmente empleados para perforar las secciones de tope del agujero y pozos poco profundos.

1.2.9.4 Lodos Dispersos. Para profundidades en incremento y pesos de lodo mayores, las formulaciones de lodo requieren aditivos dispersantes (lingosulfonatos, lignitos y taninos) para cancelar las fuerzas atractivas entre

partículas que crean viscosidad en el lodo base agua. Esto extiende efectivamente el uso del sistema de lodos hasta que tenga que ser reemplazado.

1.2.9.5 Lodos Cálccicos. Típicamente este grupo incluiría los lodos base yeso-lignito y lodos base calcio. En este punto se adicionará en exceso una fuerza de calcio (yeso, cal) para asegurar un constante suministro de iones de calcio que es efectivo para desacelerar el proceso de hidratación de las lutitas. Este lodo tiende a ser relativamente barato de operar y las prácticas de desechado y dilución son la norma para el control final de sólidos.

1.2.9.6 Lodos Poliméricos. Estos lodos utilizan polímeros de largas cadenas con alto peso molecular, los cuales pueden encapsular los sólidos perforados para prevenir la dispersión o cubrirlos para la inhibición. También proveen viscosidad y propiedades para el control de pérdidas de fluido. Los ejemplos más comunes de lodos polímeros son PHPA – “Poli-Acrilato Parcialmente Hidrolizado”, CMC – “Carboxi-metil-Celulosa” y PAC – “Celulosa Poli-Aniónica”. Son intolerantes a la contaminación de calcio y no soportan temperaturas mayores a 300°F.

1.2.9.7 Lodos Bajos en Sólidos. Estos son por lo general lodos base polímero diseñados para tener un máximo del 6% al 10% de contenido de sólidos por volumen.

1.2.9.8 Lodos Salinos (base agua saturada con sal). Estos incluirían los sistemas poliméricos con base de agua saturada con sal y con agua de mar, en

donde otros polímeros agregados proveen viscosidad y las propiedades para control de pérdida de fluido.

1.2.9.9 Lodos Base Aceite. Están formulados utilizando 100% de aceite como fluido base y son usualmente considerados ideales para la toma de núcleo o como fluidos de perforación del yacimiento.

Los tipos principales de lodos base aceite, son:

- ✚ Base Diésel
- ✚ Emulsión Inversa
- ✚ Base Aceite (Todo Aceite)
- ✚ Sintéticos

1.2.9.10 Lodo Base Diésel. Comprenden aceite diésel como la base del fluido mezclado con una salmuera emulsionada y aún son utilizados en algunas áreas del mundo a pesar del alto contenido de hidrocarburos aromáticos y a las preocupaciones de HSE-Salud, Seguridad y Medio Ambiente-(reacciones adversas en la piel, carcinogénico). El contenido aromático (componente cancerígeno) del diésel es de aproximadamente 30% por volumen.

1.2.9.11 Lodos de Emulsión Inversa. Son esencialmente formulaciones con base de aceite mineral con salmuera de cloruro de calcio emulsionada en proporción desde 5 a 50% de la fase líquida. El contenido de aromático de la base aceite es menor al 10%.

1.2.9.12 Lodos Sintéticos. Están formulados como los lodos de emulsiones inversa pero el fluido base utilizado no contiene aromáticos de los tipos ésteres, éteres, PAO'S (poli-alfa-olefinas) ni parafinas.

1.3 Propiedades Del Fluido De Perforación³.

1.3.1 Densidad del lodo o peso del lodo. La densidad de un lodo es el factor, más importante para controlar las presiones de formación a lo largo de todo el espacio perforado del pozo, esta propiedad se incrementa a medida que la cantidad de sólidos aumenta dentro del sistema de lodo, por la alteración del balance de materia sólido-liquido de la mezcla (Figura 2). La densidad e vera entonces afectada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_{\text{base}} * (1 - \%S) + \rho_{\text{Sólido}} * (\%S) \quad \text{Ecuación N° 7}$$

Dónde:

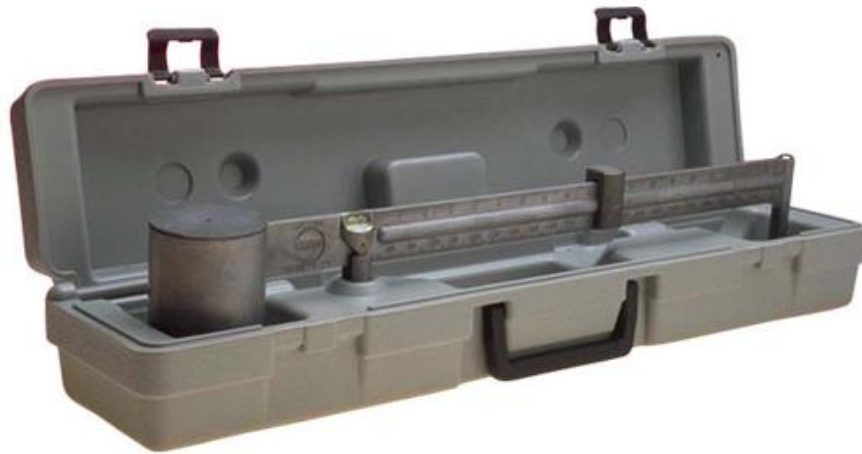
ρ =Densidad promedio del lodo con un % de sólidos determinado, lpg

%S =Sólidos dentro del sistema, fracción

ρ_{Base} =Densidad del fluido base (Agua o Petróleo), lpg

$\rho_{\text{Sólido}}$ =Densidad de los sólidos introducidos en el sistema, lpg

Figura 2. Balanza de Lodos.



Fuente: Balanza Para Lodos

1.3.2 Viscosidad. Esta se define como la capacidad del lodo de lograr una buena limpieza útil en la perforación, de mantener en suspensión desalojar los detritus. Esta propiedad aumenta con la incorporación de sólidos de baja gravedad y su efecto se manifiesta en un aumento de los geles.

Para que el lodo sea fácilmente bombeable debe tener una Viscosidad no muy grande, pero no tan pequeña que impida al lodo extraer los cortes. La viscosidad del lodo se determina a pie de sondeo mediante el denominado "embudo Marsh", y según normas API, expresándose por el tiempo (en segundos) que tarda en salir por un orificio calibrado un determinado volumen de lodo. Para la perforación de pozos, la viscosidad óptima suele oscilar entre 40 y 45 segundos, preferentemente alrededor de 38 (la viscosidad Marsh es aproximadamente de 26 s). La medida de la viscosidad debe realizarse con lodo recién agitado. El embudo de Marsh se puede utilizar para determinar si la viscosidad está en el rango adecuado. (Figura 3).

Figura 3. Embudo de Marsh.



Fuente: Embudo de Viscosidad de Marsh

1.3.3 Viscosidad Plástica. Es la viscosidad que resulta de la fricción mecánica entre: sólido- sólido y liquido o entre liquido- liquido, esta propiedad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido, y se controla con equipos mecánicos de control de solidos o mediante la dilución del lodo. Este control es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración (ROP) (Figura 4). Cabe mencionar que una baja viscosidad plástica con lleva a un alto punto cedente permitiendo una limpieza más efectiva del pozo con altas tasas de penetración.

Figura 4. Viscosímetro de FANN.



Fuente: Viscosímetro de FANN 35^a

1.3.4 Yield Point. Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio, y por los sólidos reactivos de la formación.

1.3.5 Resistencia de Gel. La resistencia o fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. Está relacionada con la capacidad de suspensión del fluido y se controla de la misma forma como se controlaba el punto cedente, puesto que la origina el mismo tipo de sólido (reactivo). Las mediciones comunes de esta propiedad se toman a los diez segundos y a los diez minutos, pero pueden ser medidas para cualquier espacio de tiempo deseado. Esta fuerza debe ser lo suficientemente baja para permitir el asentamiento de los sólidos en los tanques de superficie, principalmente en la trampa de arena.

1.3.6 Contenido de Sólidos. El porcentaje de sólidos y líquidos se determina con una prueba de retorta. Los resultados obtenidos permiten conocer a través de un análisis de sólidos, el porcentaje de sólidos de alta y baja gravedad específica. En los fluidos base agua, se pueden conocer los porcentajes de bentonita, arcilla de formación y sólidos no reactivos de formación, pero en los fluidos base aceite, no es posible conocer este tipo de información, porque resulta imposible hacerles una prueba de MBT (Figura 5).

Figura 5. Kit de Retorta.



Fuente: Kit de Retorta Aceite y 10 ml de agua

1.3.7 Contenido de Arenas. La arena es un sólido no reactivo indeseable de baja gravedad específica. Es indispensable mencionar que un lodo de perforación en buenas condiciones debe presentar un contenido en fracciones arenosas practicante nulo o inferior al 3 %, con el fin de evitar daños a los equipos de perforación, debido a que es completamente abrasiva y causa daños considerables a las camisas de las bombas del lodo.

Se llegó a comprobado que un contenido de arena superior al 15%, los lodos sufren un incremento "ficticio" de la densidad, que se ve reflejado en la viscosidad y la tixotropía. El control del contenido en arena se realiza mediante tamices normalizados, más concretamente, el tamiz 200 (200 hilos por pulgada, equivalente a 0,074 mm, 74 micras), expresándose en porcentajes (Figura 6).

Figura 6. Arenómetro ó Prueba de la Zanahoria.



Fuente: Kit de Porcentaje de la Prueba de Arena

1.3.8 Filtración. El filtrado indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables del pozo, cuando el fluido es sometido a una presión diferencial. Esta característica es afectada por los siguientes factores: presión, dispersión, temperatura y tiempo.

³ Manual de fluidos de perforación - procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación.

2. FUNDAMENTOS TEORICOS DEL CONTROL DE SOLIDOS⁴

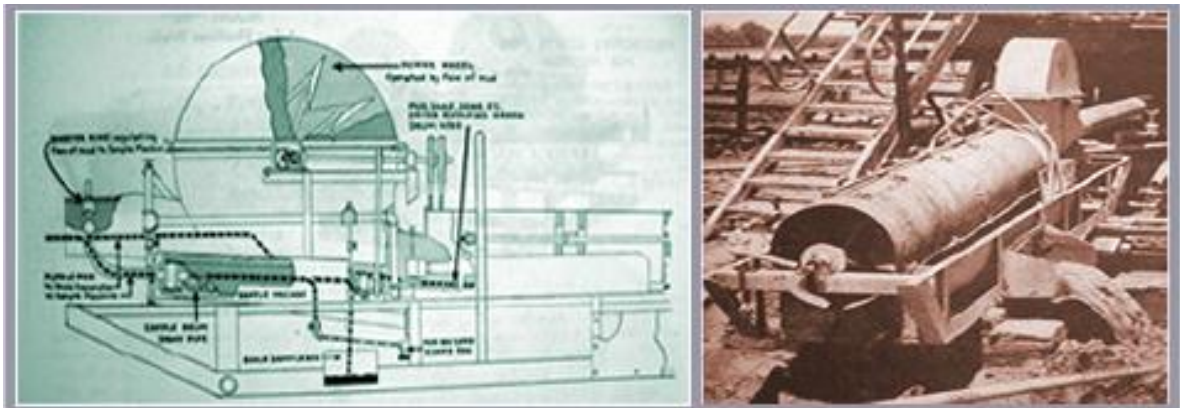
Lo que hoy conocemos como tecnología de control de sólidos, ha sido un proceso evolutivo que se dio a través de muchos años, el cual se basó en métodos rudimentarios que buscaban darle una pronta solución a problemas que se fueron incrementando a medida que el proceso de perforación se iba perfeccionando. El método más rudimentario fue la utilización de fosas de sedimentación de fluido para el control de sólidos. Sin embargo, en vista de las implicaciones económicas y ambientales que traían estas cosas, la industria petrolera adoptó los métodos de separación ya existentes en la industria de la minería y el carbón, pero con algunas modificaciones y adaptaciones al área petrolera. Una vez que se observaron los beneficios que traían la remoción de sólidos del fluido de perforación, las grandes compañías petroleras comenzaron a crear laboratorios de investigación para estudiar las soluciones a las comunes aplicaciones de perforación de pozos y entonces comenzaron a mejorar los métodos disponibles para la industria. Las principales compañías petroleras, junto con los proveedores de servicios, unieron fuerzas para desarrollar mejores equipos y métodos de control de sólidos con el fin de reducir los costos de perforación y minimizar problemas en el pozo relacionados con la contaminación de sólidos.

A mediados de los años 1800's, el uso de fluidos de perforación se introdujo para suspender los ripios perforados hasta que el pozo fue vaciado, enfriar la broca de perforación y suspender los ripios para su posterior remoción.

La primera forma de control de sólidos fue un sistema de fosas de canales que eran excavados en el sitio, donde los ripios eran separados del fluido por gravedad conforme el lodo fluía desde el tubo campana a través de las fosas y canales de sedimentación hacia una fosa de succión. El fluido "limpio" era levantado por una bomba y recirculado. Con el tiempo, en estas fosas llenas con los ripios, el fluido llegaba ser demasiado viscoso para ser bombeado. Para resolver este problema, parte del fluido era bombeado hacia una fosa de reserva y el remanente era

líquido con agua para reducir su viscosidad lo suficiente para reanudar la perforación. A finales de los años 1920's y comienzos de los 1930's vino la introducción de la tecnología de separación de las industrias de procesamiento de minerales y el carbón. Dos ideas, llamadas cribas de tambor rotatorio o cribas rotatorias, ganaron aceptación en la perforación de pozos. Estas cribas, llamadas tromeles, fueron ampliamente utilizadas en los equipos de subestructura de baja altura donde fueron incorporadas dentro de la línea de flujo (Figura 7). Estas primeras máquinas utilizaban telas de 4 a 12 mallas (4.75 mm a 1.7 mm) y fueron populares porque no requerían de energía para operar. Las unidades eran conducidas por una rueda grande de potencia que brotaba la criba tambor utilizando el flujo del lodo del pozo perforado. Esta rueda de potencia proporcionada toda la energía requerida para rotar la criba tambor mediante el uso de bandas y engranajes.

Figura 7. Diagrama del Trommel.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo

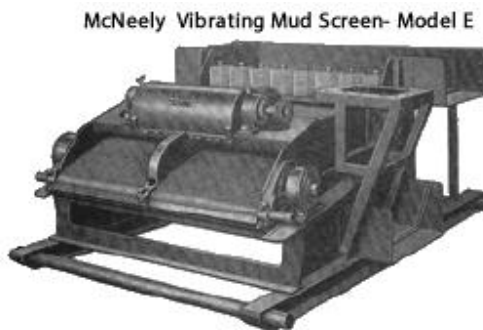
San Cristóbal, distrito San Tomé. Pág. 45

Las cribas vibratorias “zarandas”, también fueron adaptadas a las aplicaciones de perforación de pozos petroleros y por muchos años llegaron a ser el único equipo utilizado en el taladro para el control de sólidos. Las primeras máquinas fueron cribas vibratorias diseñadas para trabajar en seco, adaptadas y modificadas para trabajar con fluidos de perforación. El nombre de “zarandas” fue dado con el propósito de distinguirlas de las cribas vibratorias utilizadas en la minería, aunque los mismos fabricantes proporcionaban máquinas para ambas industrias.

Algunas de las modificaciones efectuadas para el uso en el control de sólidos, incluye las mallas estilo gancho de 4 pies por 5 pies, las cuales eran tensadas por los lados utilizando pernos para apretarlas. El movimiento de esas máquinas elíptico y las canastas tenían una inclinación cuesta abajo, utilizando la gravedad para asistir en la descarga de los ripios, las telas eran limitadas hasta 30 mallas (590 micrones).

Este tipo básico de máquinas continúa siendo la principal forma de control de sólidos hasta finales de los años 1960’s y hasta cierto punto, con algunas mejoras, sigue siendo utilizada. (Figura 8).

Figura 8. Tipo básico de máquinas continúa.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé. Pág. 46

A medida que el proceso se hacía más complejo observó que mientras más pequeños eran los ripsos que quedaban en el fluido se afectaba el proceso la perforación en forma negativa. Y es a principios del año 1930, que en búsqueda de soluciones para esta situación y gracias al esfuerzo de las grandes compañías petroleras, se introdujo otra tecnología utilizada en la industria minera, el hidrociclón, o mejor conocido como cono. El principio operación de este nuevo dispositivo fue la separación de partículas pesadas y gruesas del fluido por la acción centrífuga de los sólidos transportados por el fluido dentro del hidrociclón, donde los sólidos son forzados hacia la periferia del cono y las partículas más pesadas salen por el fondo del cono, el fluido más limpio asciende hacia la parte superior del cono y se descarga como el efluente. Éstos desarenadores (desanders) estaban en el rango de 6 a 12 pulgadas y eran capaces de remover partículas mayores de 60 micrones (230 mallas).

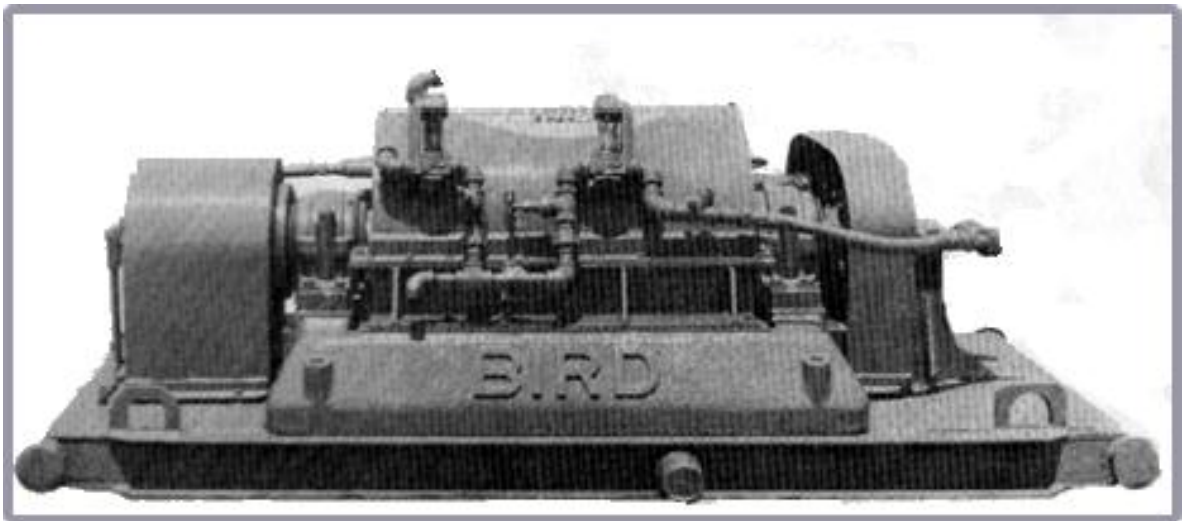
A pesar del uso de los desarenadores, aún existían problemas de atascamiento en las paredes de los pozos, las cuales se atribuían a lo grueso de los revoques, ya que quedaba un remanente de sólidos demasiado finos en el fluido de perforación. Para la remoción de éstos sólidos, un cono desarenador de cuatro pulgadas se introdujo a principios de los años 1960's.

Estos pequeños Hidrociclones eran capaces de remover partículas mucho más pequeñas, de hasta 20 a 30 micrones, y llegaron a ser conocidos como deslimadores (desilters), dando como resultado un incremento en la vida de la broca, reduciendo los costos de reparación de las bombas, incrementando las tasas de penetración y disminuyendo los costos del fluido de perforación.

Investigaciones posteriores llevadas a cabo por las principales compañías petroleras, encontraron que las partículas ultra finas, menores de 10 micrones en el fluido de perforación, obstruían grandes cantidades de líquido y creaban problemas de viscosidad que podían sólo resolverse mediante la dilución. Entonces, a principios de los años 1950's, se introdujo el uso de las centrífugas, las cuales habían sido utilizadas en otras industrias por muchos años, fueron

introducidas y adaptadas para su uso en el campo petrolero. Su primer uso fue el de remoción y descarga de partículas de tamaño coloidal en fluidos pesados. Sólo en años recientes, éstas han sido utilizadas en fluidos no pesados para reducir y desechar los sólidos ultra finos. (Figura 9).

Figura 9. Centrifuga de los años 1950's.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé. Pág. 48

A principios de los años 1970's el limpiador de lodos (mud cleaner), fue desarrollada con objeto de reducir la descarga de la costosa fase líquida de los fluidos de perforación causada por el desarenamiento y deslimamiento de los conos. Esta innovación hizo uso de la funcionalidad del hidrociclón e incorporó una zaranda con malla fina capaz de eliminar los sólidos de malla hasta 200 (74 micrones), permitiendo que la fase líquida y la barita retornaran al sistema. Innovaciones más recientes son las zarandas de movimiento lineal, las cuales son capaces de hacer separaciones más finas que los tipos de zarandas previas y con

mayores capacidades. Estas máquinas tienen la capacidad de ser inclinadas cuesta arriba lo cual reduce la pérdida de la fase líquida sobre la malla.

Todas estas mejoras tienen los mismos objetivos generales, reducir la cantidad de residuos de perforación que sean desechados.

Para conocer el inicio y la historia general de los equipos que conforman el sistema de control de sólidos, es de vital importancia conocer una serie de conceptos fundamentales que nos servirán más adelante para la comprensión de la eficiencia de dichos equipos.

2.1 Beneficios de la remoción de los sólidos.

La principal razón para remover los sólidos perforados del sistema es para prevenir problemas operacionales durante la perforación y reducir los costos de tratamiento del lodo, además de los costos de manejo de desechos. En definitiva reducir el costo total de la perforación.

2.2 Efectos de los Sólidos en el Fluido de Perforación.

Los fluidos de perforación son generalmente elaborados a base de agua o aceite y dependiendo de su cantidad y tipo de surfactantes, sólidos, álcalis, sales, polímeros, etc., presentes en el mismo, las propiedades tanto físicas o químicas reportaran propiedades específicas propias de cada tipo.

En el proceso de perforación se introducen sólidos inertes en el sistema del lodo tales como (arena, caliza entre otras) y sólidos reactivos como las arcillas (feldespatos, limos, jumbos) los cuales se hidratan y traen complicaciones, produciendo un incremento de las pérdidas por fricción durante el flujo del lodo a través de la tubería y el pozo, el cual ocasiona cambios en las propiedades del

fluido de perforación, lo cual incrementa de manera considerable las posibilidades de posibles problemas durante la operación como los mencionados a continuación.

2.3 Disminución de la Tasa de Penetración (ROP).

En los cálculos realizados a la ROP, se ha demostrado que la tasa de penetración es proporcional al número de Reynolds, que a su vez, es función de la densidad del fluido y de la viscosidad, la cual es función de la concentración de sólidos, como lo podemos observar en la ecuación que se presenta a continuación.

$$\text{ROP} = f(\text{N}^\circ \text{ reynolds})^{0.45} = f(\rho * \text{D interno} * (\frac{\text{veloc}}{\mu})) \quad \text{Ecuación N}^\circ 8$$

Dónde :

ROP	= Tasa de Penetración
Reynolds	= Numero de Reynolds
F	= Función
ρ	= Densidad
Dinterno	= Diámetro interno
Veloc	= Velocidad
μ	= Viscosidad

2.4 Reducción de la Vida Útil de los Equipos de Superficie, bombas y barrenas.

La reducción de la vida de los equipos de superficie se debe a la fricción que existe entre las partículas sólidas y cada uno de los equipos, el cual causa un desgaste del material.

2.5 Atascamiento de la Tubería.

En general este es uno de los problemas que más se deben de controlar ya que los sólidos producen la formación de un revoque grueso y pegajoso, que a su vez incrementa la posibilidad de que la tubería se pegue a la pared del pozo.

2.6 Excesivo Torque y Arrastre.

Si el contenido de sólidos es muy alto esto nos atribuye complicaciones en el aumento del torque y arrastre, y a la formación de un revoque grueso y muy pegajoso.

2.7 Daño a la Formación.

Uno de los daños que se deben controlar en las perforaciones es el existente en daño a las formaciones permeables productoras, consecuencia de los sólidos en el filtrado, ya que estos penetran los espacios porosos, obstruyendo los canales disponibles para el flujo del petróleo hacia el pozo.

2.8 Pérdidas de Circulación.

Este es uno de los casos que más se debe controlar debido a la incorporación de sólidos al sistema del lodo, el cual provocara un aumento en la densidad y de la viscosidad, que a su vez incrementa así la posibilidad que la columna del lodo sobrepase la presión de las formaciones y por ende, se produzcan pérdidas de circulación. También la formación de un revoque grueso provoca que aumenten las pérdidas por fricción en el espacio anular, que podría sobrepasar la presión de la formación.

2.9 Aumento del Costo del Lodo.

Lo que se debe procurar es el aumento de mayor cantidad de aditivos y fluidos base (agua, aceite, etc.) al lodo de perforación para poder mantener sus propiedades, ya que esto trae consecuencias económicas no viables para la empresa, por tal motivo lo que se debe tratar, es que el fluido de perforación contenga la mínima cantidad no removible de sólidos presentes en el, de lo contrario traería un incremento del costo del mismo.

2.10 Distribución del tamaño de los sólidos.

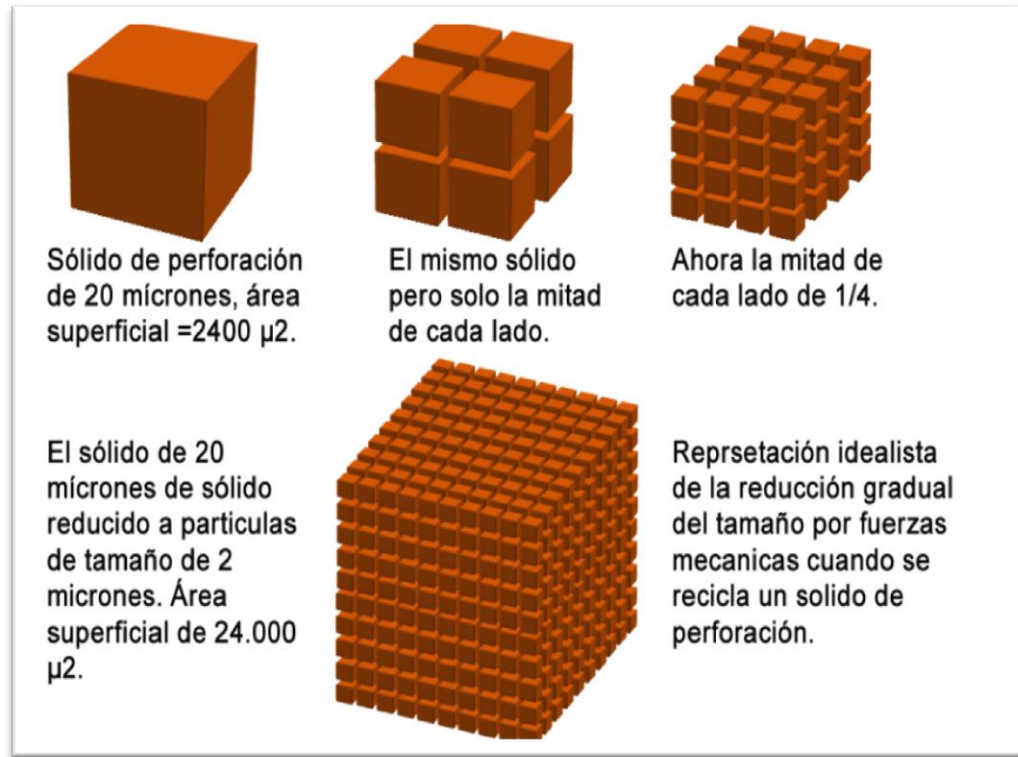
Durante su recorrido del lodo de perforación a través del espacio anular, los sólidos perforados están continuamente presentando una reducción en su tamaño debido a las constantes colisiones con otras partículas. Los sólidos perforados, pueden ser redondos, angulares, esféricos, cúbicos entre otros.

La abrasividad de los sólidos en el lodo es determinada por la forma y la dureza de las partículas. Cabe agregar que los sólidos presentan diferentes formas, que van desde redondos, angulares, esféricos y cúbicos. Además las partículas con tamaños menores a los 15 micrones son mucho menos abrasivos que los sólidos más grandes, por lo que los sólidos más pequeños causan un menor efecto abrasivo en los equipos de perforación. Las partículas como la Barita no son tan duras como los demás sólidos perforados, siendo generalmente menos abrasivos que los demás sólidos provenientes de la formación.

El tamaño de los sólidos presentes en el lodo de perforación juega un papel muy importante en el área superficial, ya que la misma aumenta a medida que la partícula se va degradando, provocando cambios en las propiedades del lodo, ocasionado problemas operaciones durante la perforación. Por esta razón los sólidos menores a 2 micrones denominados sólidos coloidales deben ser extraídos. Por ejemplo si un sólido de 40 micrones presentara un área superficial de $9600 \mu^2$ y si ese mismo sólido se degrada en varias partículas de un micrón, presentara una rea superficial de $38400 \mu^2$, como se puede observar la siguiente

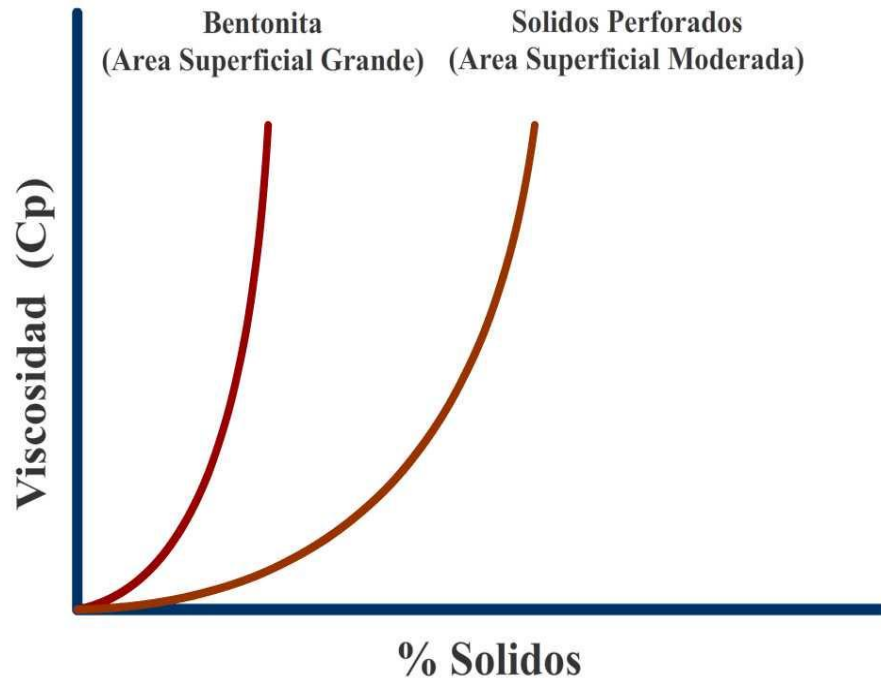
(Figura 10), al mismo tiempo se presentara un aumento en la viscosidad del lodo de manera notoria debido a que habrá más liquido humectando la nueva distribución de partículas, como lo podemos observar en la siguiente (Gráfica 1).

Figura 10. Tamaño de los Sólidos presentes en el lodo de perforación.



Fuente: Curso de Adiestramiento de Control de Solidos M-I SWACO

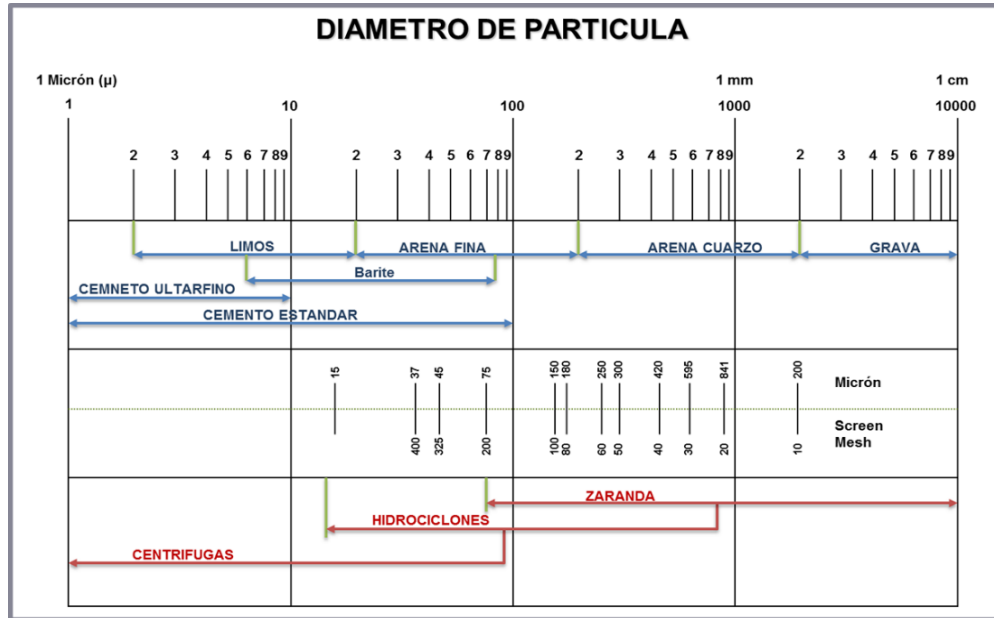
Gráfica 1. Viscosidad del Lodo.



Fuente: Curso de Control de Sólidos en Fluidos de Perforación PDVSA 2004

Los sólidos presentes en los fluidos de perforación son medidos en micrones debido a sus tamaños tan pequeños. Un micrón (μ) es una unidad de medida del sistema métrico internacional que corresponde a $1 \cdot 10^{-6}$ metros (Gráfica 2). Por lo tanto para tener una idea más aproximada de la distribución de los tamaños de los sólidos presentes en el lodo de perforación, presentamos la siguiente grafica donde se ilustra de una forma más detallada la clasificación API del tamaño de los sólidos.

Gráfica 2. Diámetro de Partículas.

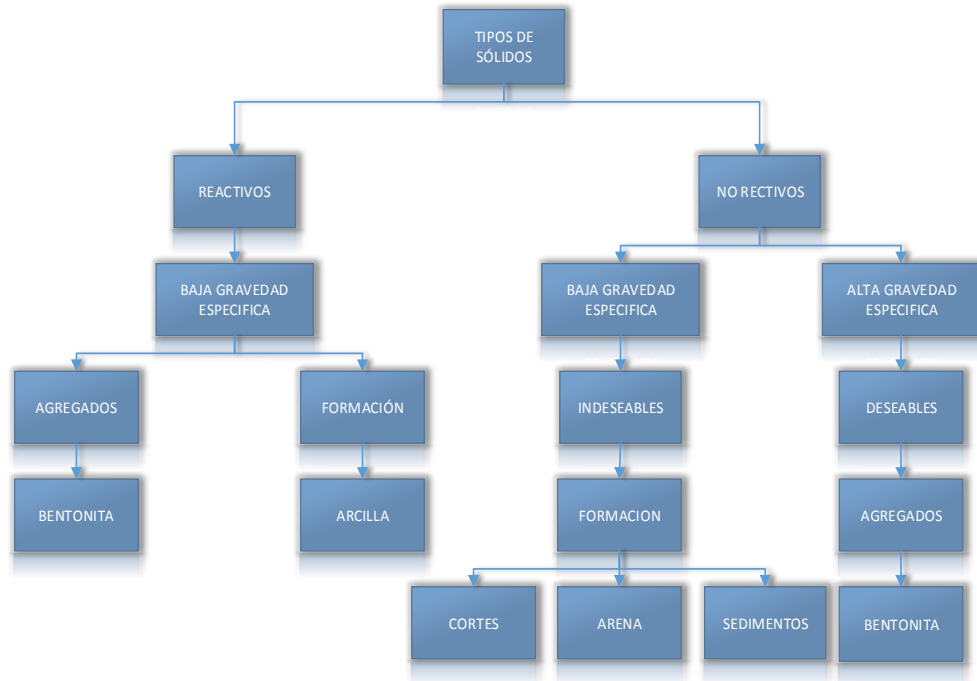


Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 51, *Modificada por Autores*

2.11 Clasificación de los sólidos de perforación.

Durante la perforación las dos fuentes principales de sólidos son los aditivos químicos y los recortes de la formación. Los recortes de la formación son contaminantes o sólidos indeseables que degradan el rendimiento del lodo, alterando las propiedades necesarias del lodo para que se pueda llevar a cabo la operación (Figura 11). Cabe mencionar que si no se lleva a cabo la remoción de dichos recortes, serán molidos y reducidos a partículas más pequeñas por los equipos del taladro (bombas, brocas y por los equipos de control de sólidos), haciendo cada vez más difícil la remoción del fluido de perforación, lo cual podría resultar en un cambio total del lodo de perforación, siendo esta una de las situaciones que buscamos evitar debido a su alto costo económico.

Figura 11. Tipo de Sólidos.



Fuente: Autores

2.12 Tipos de sólidos presentes en el lodo de perforación.

Existen dos tipos de sólidos que están presentes en el lodo de perforación

2.12.1 Sólidos Inertes. Son todos aquellos sólidos no reactivos, de alta gravedad específica, que sirven para densificar el lodo. Entre los cuales se encuentran los sólidos deseables: sulfato de bario (barita), óxido de hierro (hemetita), sulfuro de plomo (galena), etc.; y entre los no deseables se tienen los sólidos perforados tales como: arena, caliza, sílice y la dolomita. Este tipo de sólidos son aquellos que deben ser removidos del lodo de la manera más eficientemente como sea posible, para evitar cambios en las propiedades del lodo y evitar futuros problemas operacionales durante la perforación.

2.12.2 Sólidos Reactivos. Son sólidos arcillosos que poseen cargas eléctricas, que se pueden agregar al lodo o ser incorporados de la formación, entre los agregados se encuentra los comerciales como la bentonita, y entre los incorporados de la formación se tienen las arcillas de la formación.

El grado de dispersión o hinchamiento de las arcillas depende del área específica de su superficie, debido a ello a mayor hinchamiento y mayor dispersión mayor será el rendimiento de las arcillas. Los sólidos arcillosos son coloides que pueden ser removidos parcialmente del lodo mediante la utilización de una centrifuga de alta velocidad.

2.12.3 Sólidos de alta y de baja gravedad específica.

2.12.3.1 Sólidos de baja gravedad específica (LGS). Son todos aquellos sólidos que tienen una gravedad específica entre 2,3 y 2,8; y los mismos son utilizados obtener densidades menores a 10 lb/gal, como las arcillas, CaCO_3 y demás aditivos del lodo.

2.12.3.2 Sólidos de alta gravedad específica (HGS). Son aquellos sólidos que presentan una gravedad específica entre 4,2 o superior, y son utilizados para obtener densidades mayores a 10 lb/gal, como la Barita, Hemetita, o cualquier otro material densificante de alta gravedad específica.

2.13 Ley Que Rige La Sedimentación De Los Sólidos.

La Ley de Stokes demuestra que partículas de diferentes densidades (ρ) y tamaños, pero con la misma masa, donde ($m=V*\rho$) se sedimentan al mismo tiempo. Por tal razón es posible separar una partícula de lutita de 60 micrones con

una de Barita de 40 micrones. A continuación se presenta la ecuación derivada de dicha ley.

$$V_s = \frac{G \cdot D_s^2 \cdot (\rho_s - \rho_l)}{46,3 \cdot \mu} \quad \text{Ecuación N° 9}$$

Dónde :

- Vs = Velocidad de sedimentación (pies/seg)
- G = Fuerza gravitacional (pies/seg²)
- Ds = Diámetro del sólido (pies)
- ρs = Densidad de los sólidos (Lb/pie³)
- ρl = Densidad del líquido (Lb/pie³)
- μ = Viscosidad del líquido que contiene a los sólidos (cp)

Los factores que favorecen la sedimentación de las partículas grandes son de abaja viscosidad y una baja tasa del lodo.

2.13.1 Fuerza G. Es la aceleración gravitacional que es capaz de generar el equipo; la misma representa la gravedad en la ecuación anterior y es función de la longitud de desplazamiento recíprocante (stroke) y el cuadrado de las RPM según la ecuación descrita a continuación.

$$G = \text{Long Stroke (pulg)} * \left(\frac{\text{RPM}^2}{70400}\right) \quad \text{Ecuación N° 10}$$

La fuerza G es la fuerza que actúa sobre las partículas sólidas y es igual a la fuerza de separación.

⁴ Selección de un sistema adecuado de control de sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo san Cristóbal, distrito san tomé.

3. METODOS DE CONTROL DE SOLIDOS

El control de solidos es el proceso mediante el cual la acumulación de solidos indeseables en un sistema de lodo es controlada, debido que los mismos tienen efectos directos sobre las propiedades del fluido y sobre el proceso de perforación.

Las propiedades reológicas y de filtración pueden hacerse difíciles de controlar cuando la concentración de solidos pertenecientes a la formación perforada se vuelve excesiva, provocando un aumento en las propiedades reológicas y en el volumen de filtrado a las formaciones permeables, así como la disminución de productividad de formaciones productoras, atascamiento de la tubería, disminución en la rata de perforación, así como la reducción de la vida útil de las brocas, lo cual ocasiona la aparición de los problemas operacionales y de productividad de los pozos.

El objetivo de tener un sistema de control de sólidos en los taladros de perforación, es para llevar a cabo la extracción de los sólidos generados por la formación, cortados durante la perforación. Razón por la cual para llevar a cabo una buena eficiencia en la remoción de sólidos, será necesario llevar a cabo un buen mantenimiento y seguimiento detallado del funcionamiento de los equipos, a través de un personal adiestrado que se encargue que el sistema trabaje eficientemente para lograr ventajas económicas, reduciendo los costos de los procesos de dilución del lodo de perforación.

3.1 Separación mecánica.

Este método de control de sólidos, permite la separación selectiva de los sólidos perforados del lodo por diferencias de tamaño y masa lo cual hace que el lodo de perforación pueda llevar a cabo cada una de sus funciones necesarias durante la

perforación, evitando drásticamente los problemas causados por la contaminación excesiva de sólidos.

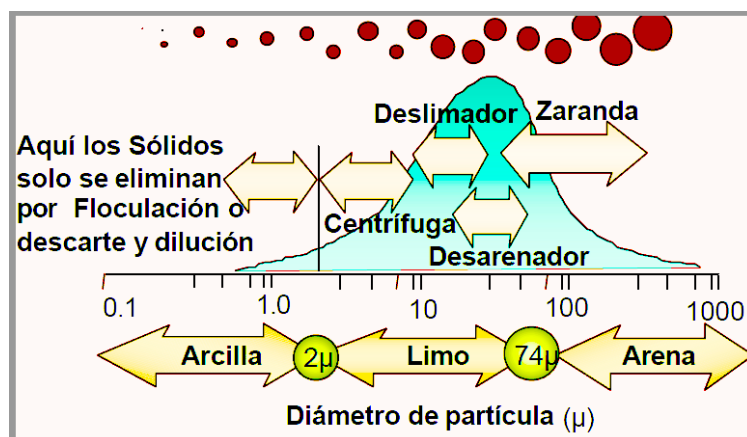
Una efectiva remoción de sólidos por separación mecánica puede reducir la cantidad de sólidos presentes en el lodo, lo cual disminuye la necesidad de llevar a cabo una dilución, reduciendo el costo del material pesante y de química agregado al lodo debido a su alto valor, teniendo en cuenta que el costo total del lodo podría llegar a estimarse en un 10% del costo total de la perforación.

3.2 Equipos de Control de Sólidos⁵.

El objetivo de los sistemas de control de sólidos en la actualidad, es remover todos los sólidos producidos durante la perforación de manera rápida y eficiente, además de disminuir las pérdidas de fluido. Dado que el tamaño de los sólidos perforados presentes en el lodo varían de cortes con diámetros superiores a una pulgada e inferiores a una micra, por tal razón existen diferentes tipos de equipos de separación que pueden ser utilizados dependiendo de una situación específica.

Además cabe mencionar que los equipos de control de sólidos trabajan principalmente según la Ley de Stokes, la cual se basa en la velocidad de asentamiento de la partícula. Dichas partículas son separadas secuencialmente desde tamaños de Arena y Limo hasta tamaños de Arcilla (Coloides). Tal como se muestra en la (Figura 12) se utilizan las Zarandas Vibratorias para las Arenas, los equipos de clasificación húmeda para los limos y los procesos químicos tales como: Floculación o Descarte y Dilución para las Arcillas (Coloides).

Figura 12. Partículas que eliminan los diferentes Equipos de Control de Sólidos.



Fuente: Elaboración de un método de Evaluación del Sistema de Control de Sólidos, Basado en una nueva definición de los objetivos funcionales de los Equipos y en un nuevo concepto de eficiencia. Pág. 37

A continuación se describen con mayor profundidad las características de cada uno de estos Métodos de Separación de Sólidos.

3.2.1 Método de separación primarios. Estos métodos son los primeros mecanismos de defensa contra los sólidos provenientes de la formación y en esta sección serán detallados.

3.2.2 Divisor de flujo. Los tanques de procesamiento de lodo son en general diseñados con un área superficial específica que en función de los flujos de entrada y salida que maneja.

Los tanques de asentamiento están ubicados debajo de los equipos de control de sólidos, para eliminar partículas grandes que pudieran haber burlado las zarandas

por desbordamiento o por rupturas en mallas, también sirven para mantener en agitación el fluido que pasa a través de los equipos de control de sólidos. Por lo general se colocan tanques en pozos donde la capacidad de las zarandas es inferior con el fin de poder eliminar las partículas grandes. Cabe mencionar que estos tanques no son usualmente usados en las operaciones modernas de perforación y la proporción de sólidos que se depositan dependerán de:

- ✚ Tamaño, forma y gravedad específica de las partículas
- ✚ Densidad y viscosidad del fluido de perforación
- ✚ Tipo de régimen de flujos de fluidos
- ✚ Tiempo de estancia en el tanque

3.2.3 Shale Shakers. Las zarandas vibratorias son la primera línea de defensa contra el aumento de sólidos en el fluido de perforación. Se puede describir una zaranda vibratoria como un separador vibratorio con tamices o pantallas, usada para remover sólidos de perforación del fluido. Las máquinas tienen un depósito debajo del panel vibrador para recolectar el fluido de perforación limpio y retomararlo al sistema de lodo. Mientras tanto, los sólidos se quedan retenidos por las aberturas de las mallas del tamiz, las cuales son más pequeñas que el diámetro de los sólidos de mayor tamaño, para posteriormente ser descargados y desechados luego de pasar por las zarandas.

El fluido es transportado hasta los vertederos a los que se le conoce como divisores de flujo, donde se distribuye el fluido equivalente entre el número de zarandas principales. Debido a que los fluidos fluyen a las zarandas desde el pozo por gravedad, donde existe muy poca degradación mecánica de los sólidos perforados antes de que éstos alcancen la superficie del tamiz.

Esta es la mejor oportunidad remover los sólidos más frágiles del fluido de perforación antes de que éstos generen partículas pequeñas por la acción de los agitadores y las bombas centrífugas (Figura 13).

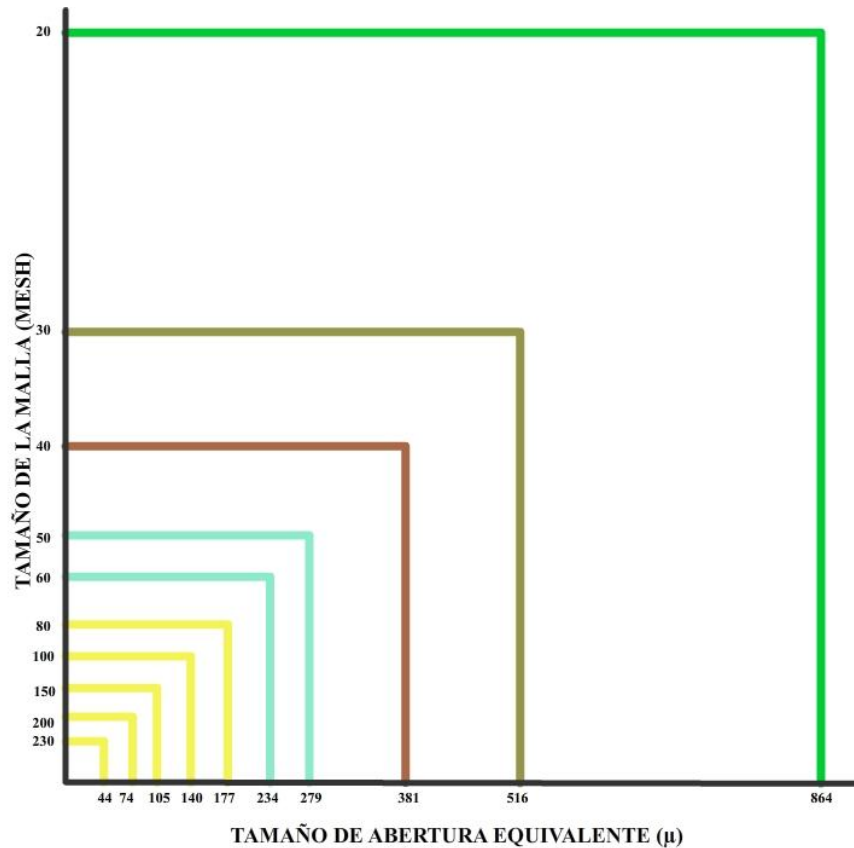
Figura 13. Diferentes Tipos de Zarandas Vibratorias.



Fuente: Curso de Adiestramiento de Control de Sólidos M-I SWACO

Se dice que la zaranda vibratoria es la técnica más importante en un sistema de control de sólidos, debido a que diferencia del resto de los equipos, ellas por sí solas remueven casi el 100% de las partículas mayores e iguales a un tamaño en particular según la abertura de los orificios de la malla. Por ejemplo, si se tiene un tamiz cuadrado de 200 mallas, la zaranda será capaz de remover el 100% de los sólidos de tamaño mayor o igual a 74 micrones. En el gráfico que se ilustra a continuación se puede observar la relación existente entre el número de la malla del tamiz y el tamaño de abertura de los orificios, o el tamaño de la partícula que se espera remover (Gráfica 3).

Gráfica 3. Tamaño de Malla Vs Abertura en Micrones.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 56, *Modificada* por Autores

Varios tipos diferentes de zarandas pueden ser combinadas “en cascada” para producir la mejor eficiencia de remoción de sólidos. Las zarandas de movimiento circular a veces son usadas como zarandas “de preparación preliminar” para eliminar los sólidos grandes y pegajosos. Luego el fluido pasa una zaranda elíptica o lineal que produce una fuerza más alta para eliminar los sólidos más finos. Las zarandas previenen que los sólidos de mayor tamaño sean recirculados y degradados, de esta manera 90% de los sólidos generados pueden ser removidos por ellas. El 10% restante corresponde a partículas del tamaño limo y coloidal, las

cuales son removidas por el resto de los equipos que conforman el sistema de control de sólidos o por dilución.

El funcionamiento de las zarandas depende de varios factores que influyen de una manera u otra en la eficiencia real de la remoción de estas. Sin embargo, cuando se habla del rendimiento y funcionamiento de las zarandas se debe hablar principalmente de la calidad y tipo de tamiz, tipo de fluido de perforación, tasa de bombeo, y del efecto de la localización del vibrador respecto al centro de gravedad de la máquina “tipo de zarandas”, ya que estos son los parámetros que más afectan la eficiencia de las mismas. A continuación se describen dichos parámetros.

3.2.4 Tamiz de mallas. La calidad los sólidos removidos por las zarandas depende completamente de la malla del tamiz, ya que mientras más finas la malla habrá más remoción de sólidos. Por lo tanto las zarandas vibratorias son tan buenas como lo sean el tamaño de la malla y la calidad del tamiz. Todas las características de rendimiento de las zaranda llegan a ser insignificantes si la malla no transmite la vibración y las fuerzas G a los ripios y al fluido de perforación.

Frecuentemente la selección del tamiz está basada en la experiencia previa combinada con el conocimiento los diferentes tipos de tamiz, con sus diferencias en diseño y capacidades. De esta manera la selección del tamiz se realiza en función de la serie de consideraciones y términos que generalmente se utilizan para describirlo.

3.2.5 Vida del tamiz. Está determinada por el diámetro del alambre del tamiz y el soporte del mismo en la cama vibratoria. La malla generalmente se elabora con alambres que se encuentra en el rango de 0.028 mm a 0.71 mm, y son de acero

inoxidable de grado 304 o 306. En cuanto al tamaño de la malla, van desde mallas de 8(2360 micrones) hasta malla 400 (37 micrones).

La vida de tamiz depende en gran medida de la frecuencia y vibración de la cama vibratoria, dichas frecuencias de vibración generalmente disponibles para las aplicaciones de perforación son de 1200 VPM (vibraciones por minuto), 1500 VPM y 1800 VPM. Considerando la frecuencia y amplitud de vibración, se obtiene como resultado una fuerza G. Esta fuerza G para el caso de las zarandas, puede ser expresada mediante la siguiente ecuación.

$$G = a * \left(\frac{RPM^2}{1.788 * 160} \right) \quad \text{Ecuación N° 11}$$

La medida de la amplitud **a** en milímetros, y de las **RPM** de la máquina, nos permite establecer el factor G de las zarandas. Las máquinas de hoy varían desde 3.5 G's hasta 10 G's, dependiendo de las aplicaciones. Generalmente hablando, conforme mayor el factor G, mayores a las capacidades volumétricas de las zarandas. También lo inverso aplica para las mallas, conforme el factor G se incrementa, la vida de la malla llega a ser más corta particularmente si esta fuerza es mayor a 5 G's.

3.2.6 Tamaño de la malla. Se refiere el número de aberturas que tienen en el tamiz por pulgada lineal. La descripción del tipo del tamiz se hace en función del número y según él se conoce el tipo de la malla a utilizarse. Si se tiene un tamiz cuadrado de malla 30 x 30, se quiere decir que tiene 30 aberturas a lo largo de una pulgada en ambas direcciones. Mientras que con un tamiz oblongo de malla 70 x 30 (abertura rectangular), se quiere decir que se tiene 70 aberturas a lo largo de una pulgada en una dirección, y 30 en la otra.

⁵ Curso de Adiestramiento de Control de Sólidos M-I SWACO

Según el fabricante se puede conocer el mismo tipo de tamiz bajo diferentes nombres, y muchas veces se nombra un tamiz según su área cuadrada equivalente, para intentar describir una malla rectangular.

3.3 Área de abertura⁶.

Se refiere al área afectiva abierta de la malla, o al área total de la malla que no está bloqueada por los alambres una estructura de soporte. Es una medida de cuál porcentaje de esta área está procesando fluido (Gráfica 4).

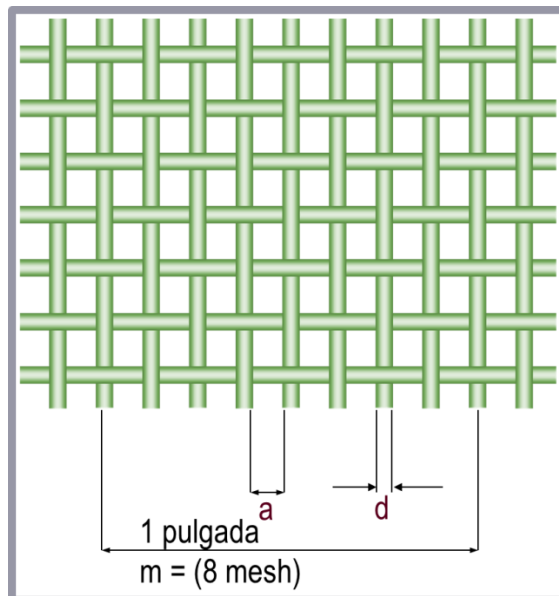
$$\text{Área Abierta} = \left(\frac{1}{m} - d\right)$$

Ecuación N° 12

$$\% \text{Área Abierta} = \left(\frac{1}{\text{malla}} - \phi_{\text{alambre}}\right) * \text{malla}^2 * 100$$

Ecuación N° 13

Gráfica 4. Área de Aberturas.



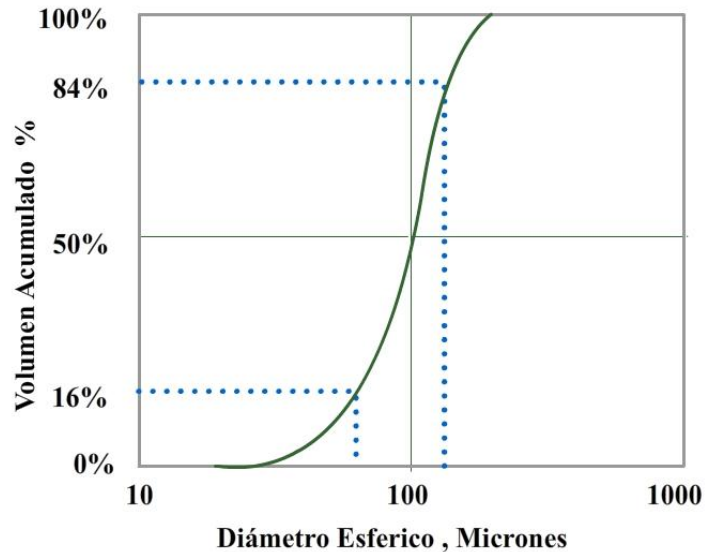
Fuente: Curso de Entrenamiento de Mallas Brandt 2005

3.3.1 Eficiencia de Separación o Punto de Corte. El punto de corte se conoce como la relación existente entre el tamaño de una partícula y el porcentaje de esa partícula removida del sistema según el tamaño de abertura. Se denota con la letra “D” con un subíndice que indica el porcentaje remoción de un tamaño de partícula en específico, y de las partículas de mayor tamaño. Por ejemplo un punto de corte D_{50} de partículas de 40 micrones, significa que el 50% de las partículas desde tamaños son removidas y el otro 50% se mantienen en el sistema. Además, se puede decir que una malla puede estar etiquetada con un punto de corte de D_{75} de malla 150 (106 micrones), lo que quiere decir que este tamiz remueve el 75% de los sólidos mayores a mallas 150 inclusive, y el 25% restante permanece en el sistema.

Existen los puntos de corte de referencia D_{84} y D_{16} , con los cuales se mide cual es el tamaño de partícula en el cual se remueve el sistema el 84% y 16% respectivamente. La razón entre tamaño D_{84} y D_{16} da una idea de la eficiencia remoción, y un rango estimado de separación en el cual todos los sólidos mayores a un tamaño específico son removidos, pero no los de menor tamaño. Lo deseable es tener un tamiz con una razón de separación D_{84}/D_{16} , lo cual significa que todos los valores de tamaño de las partículas son iguales entre sí, y las aberturas de la malla del tamiz, por lo tanto la eficiencia remoción es muy cercana al 100%. En la figura que se muestra continuación se pudo observar la curva de separación potencial de una malla según el volumen de sólidos acumulado (Gráfica 5).

⁶ Curso de Entrenamiento de Mallas Brandt 2005

Gráfica 5. Punto de Corte.



Fuente: Curso de Entrenamiento de Mallas Brandt 2005

3.3.2 Conductancia de la malla. Es la medida de la capacidad de manejo volumétrico de una malla, es decir, es una medida de la facilidad el flujo a través de la malla o su permeabilidad. Se denota con la letra “C”, y se expresa en unidades de tasa de flujo o permeabilidad por unidades peso del tamiz, Kilodarcy/cm pero pueden variar según el fabricante a KD/mm, y se puede calcular según la siguiente ecuación (Gráfica 6).

$$C = 0.014375 * Q * \left(\frac{\mu}{A * \Delta P}\right) \quad \text{Ecuación N° 14}$$

Dónde:

Q = Flujo Volumétrico (GPM)

μ = Viscosidad del fluido (centipoise)

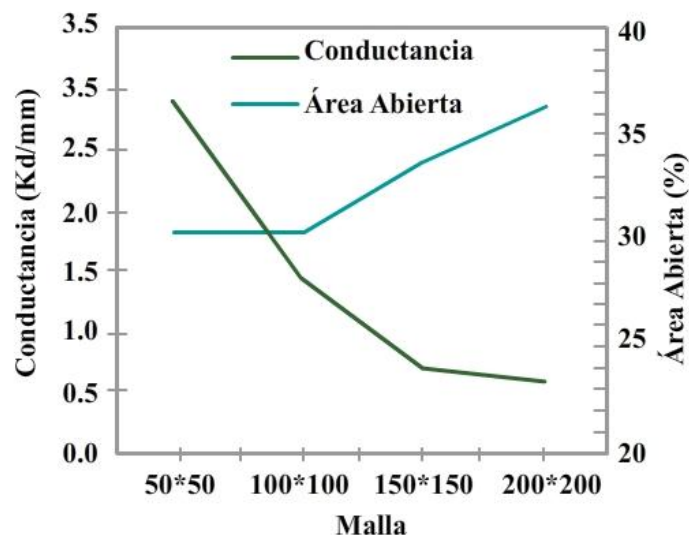
A = Área de la malla (ft²)

ΔP = Caída de presión a través de la malla (lb/plg²)

Cuando se tiene una malla de tres capas la conductancia total (Ct) es la suma de las conductancias de las capas individuales.

A medida que los alambres de las mallas son más finos, la conductancia aumenta, y con ella la capacidad volumétrica de la malla, pero de igual manera la vida de la malla disminuye de manera continua. En el gráfico que se muestra continuación se puede observar la relación de conductancia con el porcentaje de área de abertura.

Gráfica 6. Relación entre Conductancia y Porcentaje de Área abierta para diferentes mallas.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 61, *Modificada por Autores*

3.3.3 Relación entre Conductancia y Porcentaje de Área abierta para diferentes Mallas⁷. El número C, medio en galones por minuto por pie cuadrado de tamiz, es particularmente importante a la hora determinar el tipo de malla que

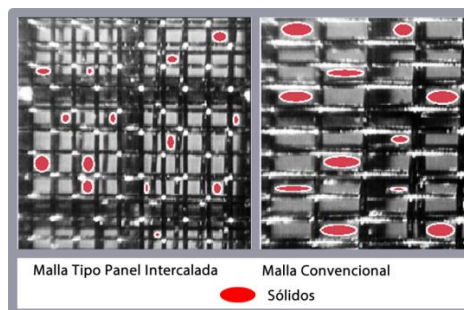
se va a utilizar basándose en la cobertura del área de la malla por el fluido de perforación.

3.4 Tipo de tamiz.

Los tamices que se utilizan hoy en día se diferencian según la construcción o diseño, y finura de la malla (Figura 14). La finura de la malla determina el porcentaje de área de abertura, mientras que según su diseño las mallas se construyen de tipo bidimensional y tridimensional. Los tamices bidimensionales se pueden clasificar en:

- ✚ Tamiz de paneles, con 2 o 3 capas unidas en cada lado por una tira de una pieza en gancho doblada en dos.
- ✚ Tamiz de chapas perforadas, con dos o tres capas unidas en una chapa metálica perforada que proporciona sostén y es fácil de reparar. A continuación se muestran los tipos de tamiz.

Figura 14. Tipo de Tamiz.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 62

Sus tamices tridimensionales son mallas de chapa perforada con una superficie corrugada que corre paralelamente el flujo del fluido. Esta configuración proporciona mayor área de separación que la configuración de la malla bidimensional. Los diferentes tipos de tamiz tridimensionales son:

✚ Pirámide

✚ Meseta

Además del diseño del tamiz, se puede considerar el tipo de tejido de la malla, ya que se cuenta con tejidos de mallas estándar utilizadas específicamente para la industria petrolera, tales como el tejido cuadrado simple, tejido cuadrado cruzado, tejido rectangular simple y tejido rectangular especial. Por otra parte, el tamiz puede ser configurado en una sola capa, con respaldo o en múltiples capas con respaldo. La combinación de todas estas diferentes configuraciones de mallas y capas se efectúa con el propósito de maximizar las características de separación potencial y del manejo volumétrico de la malla (Figura 15). En la figura se observan los diferentes tipos de mallas.

Figura 15. Tipos de Mallas.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 63

3.5 Inclinación de la canasta.

Para obtener la mayor remoción de partículas del sistema, se debe extender la mayor cantidad posible de fluido sobre la superficie del tamiz, para la cual se utilizan las compuertas de control de alimentación que se encuentran entre el “falso y vientre” y la superficie del tamiz. Sin embargo, para lograr la remoción efectiva de partículas, la canasta de las zarandas de tener un inclinación óptima, buscando que el fluido de retorno se extiende hasta dentro de un pie del extremo el tamiz, ya que ésta la condición ideal para lograr la mayor remoción de sólidos indeseables. Los cambios en la inclinación de la canasta afectan la velocidad en marcha del fluido y el tiempo de retención según la posición de la canasta se obtienen las siguientes características en la remoción de sólidos.

3.6 Aumento de la inclinación.

Si la inclinación es cuesta abajo, aumenta la velocidad en marcha del fluido y disminuye el tiempo de retención, por lo cual los rípios se descargan más húmedos y se un maneja mayor caudal de fluido. Si la inclinación es cuesta arriba (se recomienda máximo 3°), el sólido se mueve lentamente hacia delante y el sólido se descarga más seco, lo cual favorece a la degradación de tamaño de sólidos o partículas de menor tamaño.

3.7 Disminución de la inclinación.

Mientras más cercana es la posición horizontal, se reduce la velocidad de avance del fluido y aumenta el tiempo de retención, por lo cual el rípio se descarga más seco, pero a su vez se manejó menor caudal del fluido.

Se recomienda antes de realizar algún cambio en el tamiz de una zaranda por problemas de caudal, ajustar primero la inclinación del mismo para ver si se puede solucionar el problema.

De vez en cuando se observa que los ripsos pueden ser del mismo tamaño que la abertura de las mallas y por lo tanto esta se obstruyen. Esto genera una reducción en la capacidad del manejo del tamiz y en consecuencia, pérdida de una porción significativa del fluido. Para solucionar este tipo de problemas se recomienda la sustitución inmediata del tamiz por uno de malla más fina. De esta manera se retienen los ripsos para que puedan ser transportados hacia el final de las zarandas.

La selección del tamiz depende de la experiencia del seleccionador, y por supuesto, de las condiciones observadas en la locación, además del caudal del fluido en circulación. Por lo cual la acción más recomendable cuando los volúmenes manejados sobrepasan la capacidad del tamiz, o si la cobertura de los mismos por el fluido no es la adecuada, es cambiar el tamaño de la malla del tamiz.

3.8 Tipos de fluido de perforación.

El tipo de fluido de perforación que se utiliza durante el proceso de perforación, es el factor determinante a la hora de seleccionar el tipo de zarandas y tamiz que se va utilizar. Si se está en presencia un lodo de baja densidad, se pueden utilizar tamices de malla muy pequeño para remover la mayor cantidad de sólidos indeseables. Mientras que si el fluido es de alta densidad, una consecuencia utilizar tamices de mallas muy pequeñas, será la pérdida de la mayor parte del material densificante. Se debe tener presente que la barita (principal aditivo densificante en los fluidos de perforación), tiene un tamaño comprendido entre los 2 y 74 micrones, y más de un 90% de las partículas son menores a los 20 micrones, por lo cual se hace prácticamente imposible usar mallas muy finas para la remoción de sólidos ya que se perdería gran parte de la barita.

⁷ Universidad Nacional De Ingeniería, Facultad de Ingeniería de Petróleos, Gas Natural y Petroquímica. "Manejo de desechos y Deshidratación (DEWATERING) de los fluidos de Perforación Base Agua"

Otra consideración importante en la selección del tipo de zarandas que se va a utilizar es la cantidad de sólidos presentes en el sistema, ya que dependiendo del volumen de los mismos, se seleccionará el equipo que tenga la capacidad de manejar dichos volúmenes. Además, la eficiencia de separación de las zarandas viene determinada por otros factores tales como la forma de las partículas, viscosidad del fluido, y cohesión de las partículas.

3.9 Tasa de bombeo.

Este viene a ser un factor importante en la selección de las zarandas, debido a que las mismas deben contar con mallas capaces de manejar los volúmenes de fluido bombeado desde el pozo hasta las líneas del sistema de fluido, para evitar el desbordamiento del mismo sobre la superficie de las zarandas, y en consecuencia la pérdida considerable de gran parte del fluido de perforación. En este sentido se puede decir que el tamaño de los tamices es proporcional a la tasa de bombeo.

3.10 Tipo de movimiento de las zarandas Vibratorias⁸.

Las diferencias básicas en el diseño de las zarandas son atribuidas al tipo de movimiento, frecuencia y amplitud de la vibración y la configuración de la Cámara de la malla.

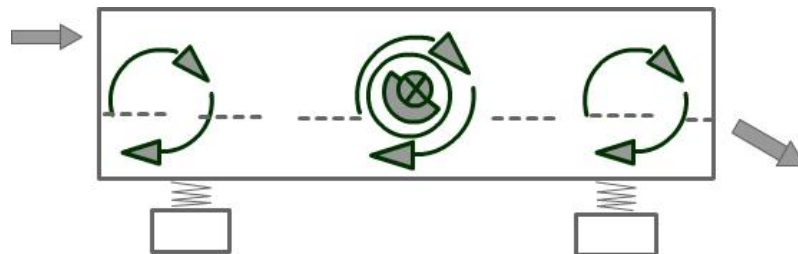
El efecto de la localización del vibrador de las zarandas, con respecto al centro de gravedad de las mismas, dicta el tipo de movimiento producido por la máquina. Los tres tipos básicos de zarandas utilizadas hoy en día son.

3.10.1 Zarandas del movimiento circular. Producen la menor fuerza centrífuga, o fuerza G, que consiste en un vibrador simple que es colocado cerca del centro

de gravedad, de modo tal que el movimiento de transporte sería el mismo en todos los puntos de las zarandas. En este tipo de zarandas se puede inclinar el tamiz tanto cuesta arriba como cuesta abajo, aunque lo más recomendable es la posición cuesta abajo (Figura 16).

El transporte de los ripios se hace de manera muy rápida con este tipo de movimiento, y principalmente funciona con sólidos de tipo arcilloso, ya que reduce el impacto de estos en la superficie del tamiz. Sin embargo, este tipo de zarandas posee una muy baja capacidad para secar los ripios, por lo cual se descarga gran cantidad de sólidos húmedos.

Figura 16. Zaranda de Movimiento Circular.

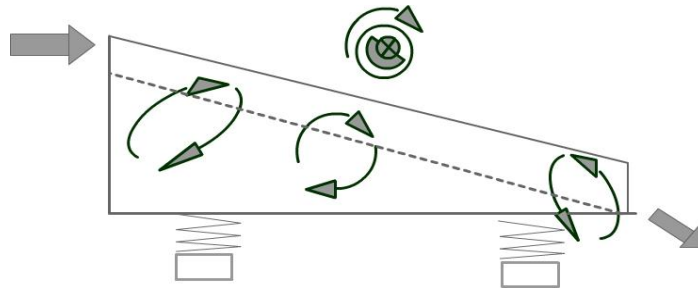


Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 66

3.10.2 Zarandas de movimiento elíptico. Son una modificación de las zarandas de movimiento circular, donde la fuente de vibración se encuentra localizada por encima del centro de gravedad, por lo tanto el movimiento de transporte no será el mismo en todos los puntos de las zarandas, generándose un movimiento elíptico, este tipo de movimiento se llama elíptico desbalanceado (Figura 17).

Esta característica provee una pobre descarga de los sólidos, y por lo tanto su acumulación al final de las zarandas, motivo por el cual se debe inclinar el tamiz cuesta abajo para obtener una descarga de sólidos eficiente.

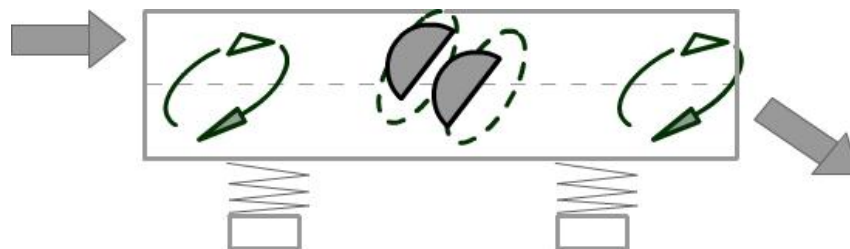
Figura 17. Zaranda Movimiento Elíptico Desbalanceado.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 67

Existe un tipo de zaranda de movimiento elíptico balanceado, en el cual se colocan dos vibradores que se muestran en el mismo sentido en el centro de gravedad de las zarandas (Figura 18), lo que produce un movimiento y un transporte igual en todos los puntos de la zaranda. En consecuencia no es necesaria una inclinación del tamiz.

Figura 18. Zaranda de Movimiento Elíptico Balanceado.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 67

Las zarandas de movimiento elíptico generan una fuerza G moderadamente alta y un transporte lento en comparación con las de movimiento circular o las de movimiento lineal. Producen mejor secado de los ripios, de manera que tienen aplicación en fluidos densificados como un acondicionador de lodos.

3.10.3 Zarandas de movimiento lineal. Utiliza dos motores de movimiento circular montados en el mismo punto, pero colocados de tal manera que rotan en sentidos opuestos, para producir una fuerza G hacia abajo y una hacia arriba cuando los movimientos son complementarios, pero no genera ninguna fuerza G cuando la rotación es opuesta. Esta fuerza G es variable entre 3 y 8 G's.

Estas zarandas de movimiento lineal, son las más versátiles, ya que producen una fuerza G alta y un transporte potencialmente rápido dependiendo de la velocidad de rotación, ángulo de inclinación y posición del vibrador.

Las zarandas de movimiento elíptico balanceado de movimiento lineal son sólo dos diseños que permiten una inclinación cuesta arriba de la canasta vibratoria, debido a que los lípidos son transportados mediante liberación el lugar de la fuerza de gravedad. Las zarandas de movimiento lineal también proporcionan el mayor impacto de cualquier zaranda en el mercado, y por consiguiente, tienen una mayor capacidad de manejo volumétrico en comparación con las antiguas zarandas convencionales.

⁸ Selección de un sistema adecuado de control de sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo san Cristóbal, distrito san tomé.

3.11 Separación Mecánica: Clasificación Húmeda⁹.

Se llama clasificación húmeda a la separación de los sólidos del fluido de acuerdo con sus a la masa de la partícula, tamaño y densidad, mediante equipos diferentes a las zarandas vibratorias. Todos los equipos de clasificación húmeda se basan en la ley de Stoke para la separación de los ripios, y en función de esta ley existen ciertos factores que gobiernan la clasificación húmeda:

- ✚ Entre partículas de igual gravedad específica, tendrá mayor velocidad de asentamiento aquellas que sean de mayor tamaño.
- ✚ Entre partículas de igual tamaño, tendrá mayor velocidad de asentamiento aquellas que sean de mayor gravedad específica.
- ✚ La tasa asentamiento disminuye a medida que se incrementa en la viscosidad y la densidad del lodo.

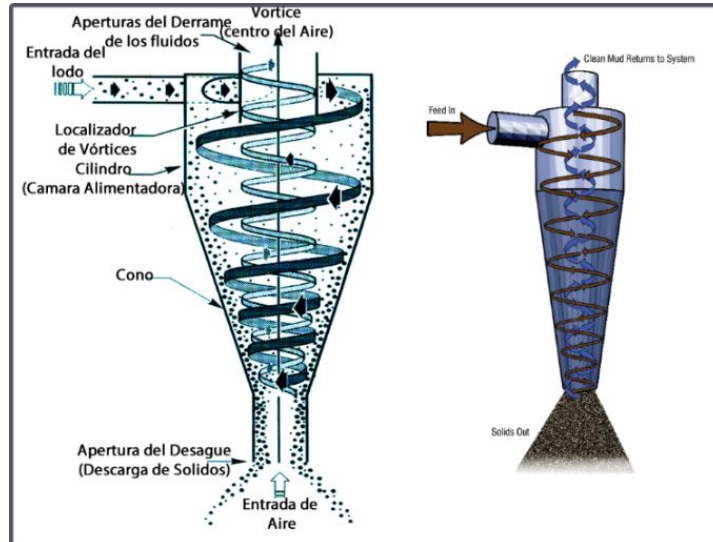
Entre los equipos de clasificación húmeda utilizados con mayor frecuencia para la remoción de los ripios, encontramos a los Hidrociclones y las centrífugas. Estos equipos operan en función de la densidad, viscosidad del fluido y de la generación de una fuerza gravitacional acorde con los requerimientos de remoción de cada caso. Dicho equipo incrementan el asentamiento y la tasa de procesamiento, mediante el aumento de la fuerza G que actúa sobre las partículas.

A continuación se hará una breve descripción de algunos de los equipos de clasificación húmeda, así como su utilización y características operacionales.

3.11.1 Hidrociclones. Los Hidrociclones son recipientes de forma cónica en los cuales la energía de presión es transformada en fuerza centrífuga. El fluido es alimentado, por medio de una bomba centrífuga, a través de una entrada que lo envía tangencialmente a la cámara de la alimentación. Una corta tubería llamada tubo vórtice se extiende hacia abajo en el cuerpo del cono forzando a la corriente en forma de remolino a dirigirse hacia abajo en dirección del extremo delgado del

cono, donde la abertura del fondo debe ser menor que la abertura del vórtice. Las fuerzas centrífugas que se desarrollan en esas circunstancias multiplica la velocidad de sedimentación de los sólidos más pesados (de igual manera sucede con las partículas de líquido más denso), forzándolos hacia fuera contra la pared del cono (Figura 19). Las partículas más livianas se dirigen hacia dentro y hacia arriba como un vórtice espiralado que las lleva hacia el orificio de la descarga superior o del afluente.

Figura 19. Hidrociclones.



Fuente: Curso de Adiestramiento de Control de Sólidos M-I SWACO

Los Hidrociclones están diseñados para descargar un fluido muy pesado el cual es generalmente de 1 a 4lpg más pesado que el fluido del sistema original. Estos suelen ser utilizados en todos los fluidos base agua de baja densidad, y no son recomendados en sistemas de fluidos densificados, debido a que la mayor parte de la barita es descargada. Los Hidrociclones presentan una gran ventaja en cuanto a su simplicidad y funcionamiento poco costoso, además de procesar altas

tasas de fluido, sin embargo es difícil dar un punto de corte preciso con los Hidrociclones.

La operación y mantenimiento apropiados de los Hidrociclones, asegura la remoción de una gran cantidad de sólidos extremadamente finos a un bajo costo, pero para alcanzar este comportamiento eficiente de los equipos se debe tener en consideración ciertos parámetros indispensables para la selección y manejo de los mismos, como son la cantidad apropiada de cabeza hidrostática, el tipo de descarga generada, y las dimensiones de los conos según el tipo de fluido y caudal manejados. Estos parámetros se describen a continuación.

3.11.2 Cabeza hidrostática. Cuando se utiliza la cantidad adecuada de cabeza hidrostática, lo cual se traduce como presión, el resultado es un movimiento del fluido como el de un tornado o ciclón, este es el principio operación básico de todos los Hidrociclones, por lo tanto es un parámetro determinante en el funcionamiento de los mismos. La cabeza hidrostática está relacionada con la presión de la siguiente manera.

$$CH = \left(\frac{P}{0.52 \cdot \rho} \right) \quad \text{Ecuación N° 15}$$

Dónde:

CH= Cabeza Hidrostática (pies)

P= Presión (psi)

P= Densidad del Lodo (lpg)

La cabeza hidrostática debe ser media la entrada de la válvula, debido a que disminuirá entre la bomba y la válvula del hidrociclón. Si se tiene menos cabeza hidrostática de la necesaria se obtendrán pequeños volúmenes de fluido

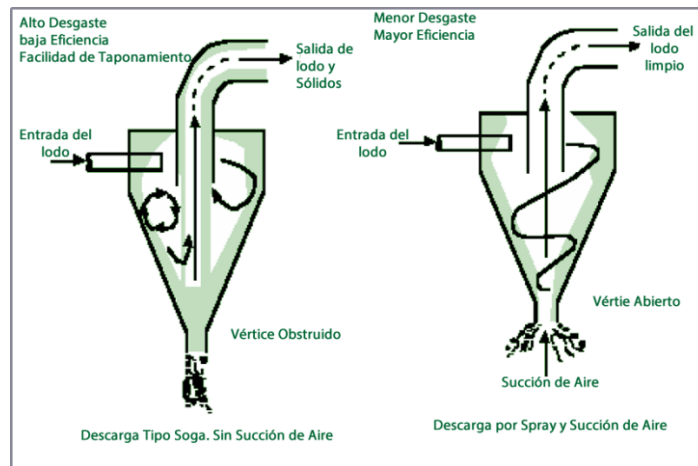
procesado y un punto de corte mayor al deseado. Por otro lado una cantidad muy alta de cabeza hidrostática también es perjudicial debido a que una gran cantidad de sólidos permanecen en el sistema de lodo.

La mayoría de los fabricantes recomiendan 75 pies de cabeza hidrostática la entrada de la válvula, debido a que ésta genera la presión generalmente requerida para crear las fuerzas centrifugas dentro del hidrociclón que permitirán la operación de los sólidos del líquido.

Para la operación de los Hidrociclones se recomienda que las presiones se deban encontrarse en el rango de 50 a 100 pies de cabeza hidrostática.

3.11.3 Tipo de descarga. La operación eficiente de los Hidrociclones depende en gran parte del tipo de descarga inferior que se generen, por lo tanto debe ser tomada muy en cuenta. El tipo de descarga deseada es de tipo estándar, es decir, en forma de una aspersión fina, y con una ligera succión de aire en el centro (Figura 20-21). También se pueda tener una descarga en forma de chorros si instrucción de hábiles, la cual no es deseable debido a que la remoción de sólidos será deficiente y por ende se tendrán altos puntos de corte.

Figura 20. Tipo de Descarga de un Hidrociclón.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 72

Figura 21. Tipo de Descarga de un Hidrociclón.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 72

La única situación en la que se tolera este tipo de descarga en forma de chorro, es cuando se está perforando rápidamente en un pozo de gran diámetro, ya que la alimentación de los equipos puede encontrarse sobrecargada, y en dicho caso es peor desconectar la unidad y no tener ningún tipo de control de sólidos. Por el contrario si se tiene este tipo de descarga y no se está perforando bajo las condiciones anteriormente mencionadas, se debe ajustar el tamaño del vórtice para que de una descarga en forma de aspersion, por medio de un ajustador o por algún otro dispositivo similar. Si a pesar de estas acciones el problema persiste, lo más probable es que la cantidad de los conos sea muy pequeña para la cantidad de sólidos a remover del sistema. Se debe tener cuidado con la limpieza del orificio de descarga para evitar taponamientos en el equipo.

3.12 Tipos de Hidrociclones Según sus Dimensiones y Usos.

El tamaño de los conos es determinante para establecer el tamaño de partícula a separar. Por lo tanto el tamaño y la cantidad de los Hidrociclones dependerán del uso y la aplicación que se les da. Por ejemplo Hidrociclones utilizados como desarenadores usualmente son de 6 a 12" de largo, donde lo más frecuente es utilizar unidades de 12", los deslimadores son de 4 a 6" de largo y se utilizan generalmente 12 o más Hidrociclones de 4", y con los microclones o eyectores de arcilla que son de 2" de largo se utilizan alrededor de 20 unidades (Tabla 1). La capacidad de manejo obviamente está relacionada con el tamaño del hidrociclón, así mientras más pequeño sea el mismo, más cantidad unidades serán necesarias para una cantidad específica de fluidos. Para Hidrociclones trabajando con una cabeza hidrostática de 75 pies se aplican las siguientes capacidades según el tamaño de los mismos.

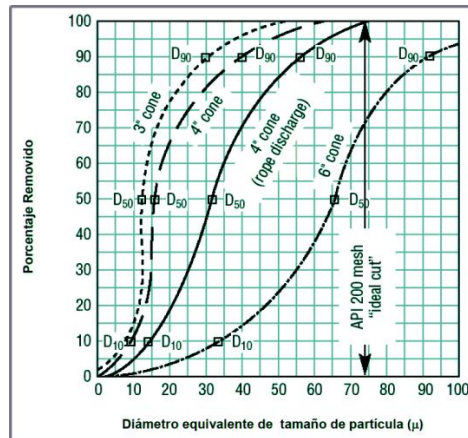
Tabla 1. Diámetro del Cono vs Caudal que maneja.

Diámetro del Cono (Pulgadas)	CAUDAL QUE MANEJA (GPM/CONO)
4"	50
5"	75
6"	100
8"	150
10"	450
12"	500

Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 73

A continuación se presenta la eficiencia de remoción para ciertos tamaños de Hidrociclones en función de los puntos de corte (Gráfica 7).

Gráfica 7. Comportamiento Típico de Remoción de un Hidrociclón.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 74

Una vez seleccionado el tamaño de hidrociclón emplearse, se procede a situarlos apropiadamente, para lo cual se debe calcular el número de Hidrociclones necesarios mediante la siguiente ecuación.

$$C_n = \left(\frac{Q_{CT} * 11}{Q_{FC}} \right) \quad \text{Ecuación N° 16}$$

Dónde:

C_n = Numero de conos necesarios

Q_{CT} = Tasa de circulación del taladro (gpm)

Q_{FC} = Tasa de flujo de cada cono (gpm)

La capacidad de los Hidrociclones es generalmente afectada por la reducción de presiones en la entrada de la válvula, y se manifiesta como una disminución en la capacidad de manejo de volumen del equipo. Este comportamiento se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$Q_N = Q_A * \left(\frac{CH_A}{CH_N} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación N° 17}$$

Dónde:

Q_N = Nueva capacidad de flujo del equipo (gpm)

Q_A = Antigua capacidad de flujo del equipo (gpm)

CH_N = Nueva altura de cabeza hidrostática (pies)

CH_A = Antigua altura de cabeza hidrostática (pies)

En cuanto a la colocación o ubicación de Hidrociclones, éstos deben ser colocados de manera tal que tomen succión de un comportamiento corriente arriba y la descarga se realice en comportamiento corriente abajo.

3.13 Desarenadores y Deslimadores.

Los desarenadores son necesarios para prevenir la sobrecarga de los deslimadores, para lo cual se utiliza generalmente una unidad de dos Hidrociclones de 12" con capacidad de 500 gpm/cono. La ventaja de estos conos es su gran capacidad de manejo volumétrico, pero tienen un alto punto de corte comprendido en el rango de 45 a 74 micrones.

Los desarenadores (Figura 22) deben ser utilizados en fluidos ligeramente densificados en los cuales no se pueden utilizar zarandas de malla muy fina, pero en donde el contenido de arena debe ser reducido. Durante la utilización de los desarenadores como equipo de control de sólidos, el peso del lodo y el contenido de barita deben ser monitoreados cuidadosamente, debido a que gran parte de la barita podría ser removida por el equipo. En las figuras a continuación se muestran un desarenador y un deslimador respectivamente.

Figura 22. Desarenadores.



Fuente: The Handbook on Solids Control and Drilling Waste Management

Para alcanzar la máxima eficiencia de remoción, el fluido debe ser desarenado antes de pasar por el equipo deslimador. Normalmente se utiliza una unidad de 12 Hidrociclones o más de 4" cada uno, los cuales manejan un volumen de 75 gpm/cono, con los cuales se logra un punto de corte D_{50} en partículas entre 15 y 35 micrones, y de D_{90} en partículas mayores a 40 micrones. Debido a que la barita cae dentro del rango anteriormente mencionado, los deslimadores son rara vez utilizados en fluidos con densidades mayores a los 12.5 lpg debido a que remueven gran parte de la barita.

Los desarenadores y deslimadores deben ser colocados secuencialmente y no en paralelo. El desarenador debe normalmente, tomar succión del comportamiento descarga desde el desgasificador si lo hay, y descargar en el siguiente comportamiento corriente abajo mientras que el deslimador debe tomar succión del comportamiento descarga de los desarenadores y descargar, de igual manera, en el siguiente comportamiento corriente abajo (Figura 23).

Figura 23. Deslimador.



Fuente: The Handbook on Solids Control and Drilling Waste Management

La capacidad volumétrica apropiada para los desarenadores y los deslimadores debe ser igual a un rango de 115 a 150% de la tasa de circulación del fluido.

Ambos, desarenadores y deslimadores, deben ser utilizados principalmente mientras se está perforando pozos de superficie, y cuando se estén utilizando fluidos ligeramente densificados.

La industria de emigrado a dos tamaños básicos, el ciclón estándar deslimador de 4", y el ciclón de 10". En algunas aplicaciones por ciclón más pequeño de 2" conocido como el "micro cono" está aún siendo utilizado. Estos ciclones son capaces de efectuar separaciones por debajo de los 10 micrones, pero son muy susceptibles al taponamiento del ápex si materia orgánica gruesa entra al ciclón.

3.14 Acondicionadores de lodo.

Los acondicionadores de lodo son instalados para funcionar como una segunda etapa del sistema de control de sólidos, debido a que estos funciona como un dispositivo de respaldo para las zarandas o sistema de zarandas, cuando las propiedades del fluido y las condiciones de perforación no permiten el uso de mallas más finas requeridas sobre las zarandas.

Consisten en una batería de conos desarenadores que también pueden ser deslimadores, generalmente de 10 pulgadas, posicionados de manera tal que el subflujo, o material de descarga, es cernido sobre una superficie de una zaranda vibratoria, logrando así que los sólidos de tamaño arena sean removidos por la unidad de Hidrociclones, y la descarga de los mismos cae sobre un tamiz vibratorio de malla fina. El fluido que se recupera luego el cernido de los sólidos es retornado al sistema de fluidos, mientras que los sólidos removidos tanto de la unidad de Hidrociclones como de las zarandas son desechados. El tamaño de la malla de los tamices varía entre 100 y 135, pero generalmente lo más común es trabajar con mallas de tamaño de 150, sobre todo cuando el acondicionador de lodos trabaja continuamente, debido a que éstos garantizan una limpieza eficiente del fluido de la recuperación considerable de la barita hacia el sistema. Dado que el 97% de la barita de tamaño inferior a los 74 micrones, esta es procesada por los

Hidrociclones y descargada hacia las zarandas, pero luego esta pasa a través de la malla del tamiz y es reincorporada al sistema de lodo. En la siguiente (Figura 24) se muestra un acondicionador de lodo.

La cantidad barita descargada por un acondicionador de lodos puede ser calculada mediante la realización de un balance del peso del lodo, mediante la prueba de retorta, la cual se realiza una porción del flujo que es retornado al sistema de fluido luego de pasar por el tamiz del acondicionador.

Los acondicionadores de lodo son utilizados cuando existen problemas de contaminación de arena en fluidos densificados para garantizar la recuperación de la barita, sin embargo también son utilizados cuando se necesita una limpieza extra los fluidos poco densificados, caso en el cual el acondicionador de lodos es utilizado como deslimador, y se colocan mallas mucho más finas a la malla 150 normalmente iniciada. Otro uso importante de los acondicionadores de lodo, es para la conservación de la fase continua de fluidos en los cuales dicha fase es muy costosa, caso en el cual se utilizan mallas finas para garantizar el secado de los sólidos y la recuperación de la mayor cantidad de la fase continua posible. Una ventaja muy particular es que el material descargado por las zarandas se desecha tan notablemente seco, que en muchas ocasiones se disminuye el volumen y humedad del material de desecho y disminuye el costo por disposición de dichos materiales.

Figura 24. Acondicionador de Lodo.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 78

Los acondicionadores modernos caen dentro de tres categorías básicas:

- 1) El acondicionador de lodos desarenador, el cual es un múltiple de Hidrociclones con conos de 10" montados sobre una zaranda de movimiento lineal.
- 2) El acondicionador de lodos deslimador, el cual es un múltiple de Hidrociclones con conos de 4" montados sobre una zaranda de movimiento lineal.
- 3) El doble cabezal, también llamada unidad tres en uno, que consta de dos múltiples, un desarenador y otro deslimador, montados sobre una zaranda de movimiento lineal.

Debido a los incrementos del nivel de fluido, se debe tener especial cuidado con la sobrecarga de sólidos del tamiz, ya que estos pueden taponar la malla. Si existe la sobrecarga de sólidos, se recomienda remover tantos conos como sea necesario para evitar la descarga excesiva del fluido, pero siempre se debe tener en cuenta que el acondicionador de ser capaz de procesar al menos la tasa de circulación del fluido del taladro. Durante las operaciones de adición de barita, se puede observar la descarga de la misma sobre el tamiz de la zaranda, y si es excesiva se recomienda apagar la unidad durante una o dos circulaciones hasta que se vuelva a la normalidad de operación del sistema. Es la única situación en la cual el acondicionador no opera de manera constante, del resto debería trabajar constantemente.

La correcta colocación acondicionador es en paralelo con los deslimadores del taladro, y como los deslimadores, debe tomar succión del compartimiento de descarga de los desarenadores y descargar en el siguiente compartimiento aguas abajo.

Los desarenado y deslimadores convencionales, en los cuales la descarga inferior es enviada a la fosas de desecho, están siendo lentamente reemplazadas por los acondicionadores de fluido con el fin de reducir las descargas de líquidos generadas por el sistema de control de sólidos. Sin embargo, a menos que el acondicionador de lodo esté descargando una cantidad significativa de sólidos, las bombas centrífugas que alimentan los deslimadores causarán la degradación de las partículas a tamaños inferiores. Si se están empleando zarandas vibratorias de malla 200 o más finas como equipo principal del sistema de control de sólidos, y las mismas están operando eficientemente, sin sobre flujo del lodo sobre las zarandas, el acondicionador de lodos no traería ningún beneficio adicional. Además, para que un acondicionador aporte un servicio eficiente de control de sólidos el tamaño de la malla del tamiz del acondicionador debería ser menor a la malla de las zarandas principales.

3.15 Tres en uno y acondicionadores de lodo.

El tres en uno está compuesto por dos múltiples, uno con ciclones de 10" y otro con ciclones de 4", ambos montados sobre una zaranda vibratoria de movimiento lineal. La ventaja es el diseño compacto del equipo que requiere sólo una zaranda para ambos múltiples de conos y de menos espacio para su instalación. Este tipo de unidad requiere de dos bombas centrífugas para alimentar el lodo al respectivo múltiple de ciclones. El segundo problema es que la descarga inferior de ambos múltiples de ciclones cae sobre la misma malla, y muy frecuentemente, causan que la zaranda se sobrecargue debido a las diferencias en separación hechas por los dos tipos de ciclones (Figura 25).

Figura 25. Tres en Uno.



Fuente: The Handbook on Solids Control and Drilling Waste Management

Este tipo debe ser utilizado en situaciones donde hay un alto contenido de arena, en este caso se debe usar un tamaño de malla lo suficientemente grande para separar la arena, y el fluido recuperado debe ser tratado por una centrífuga. En la perforación de huecos superficiales se recomienda utilizar desarenadores. En los huecos intermedios y productores se utiliza cuando las zarandas tanto primarias

como secundarias no son suficientes para remover los sólidos generados en la perforación.

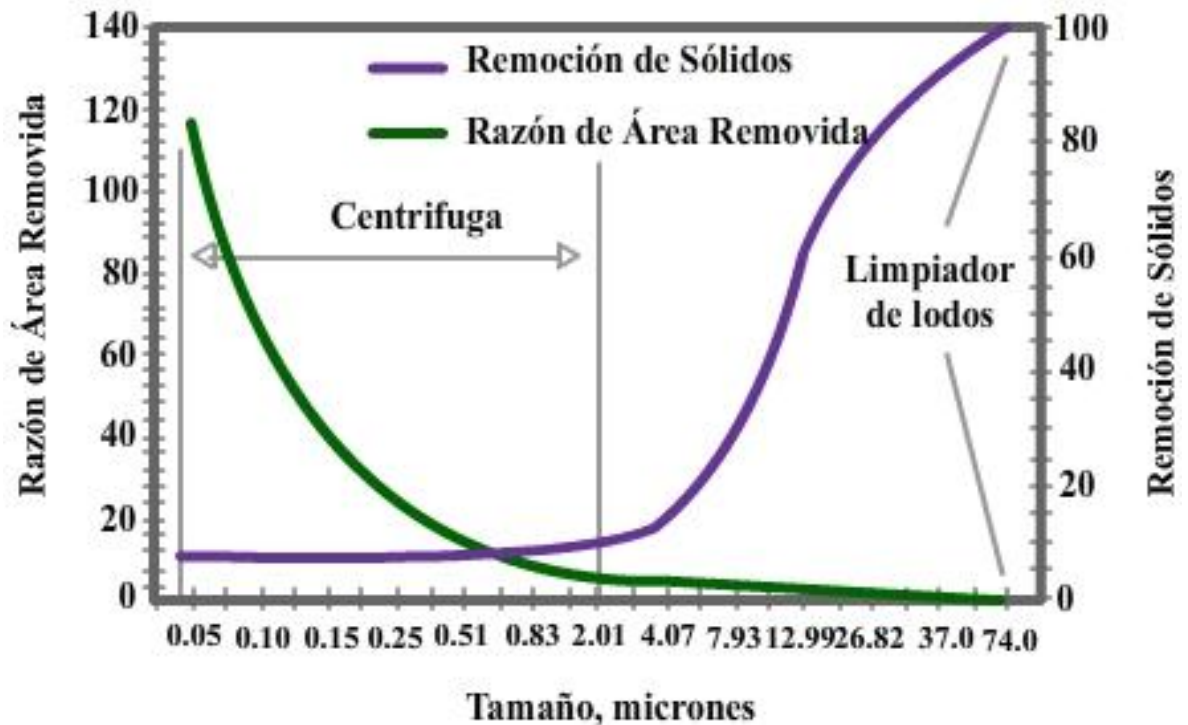
Una alternativa para el uso de los tres en uno es la utilización de unos Hidrociclones capaces de procesar grandes volúmenes de fluido de perforación a la vez que efectúan una separación más fina. Estos Hidrociclones emplean una geometría variable única en su diseño y son conocidos como los súper conos o ciclones. Un súper cono de 10“, tienen la capacidad procesamiento de 114 m³/hora o 500 galones por minuto, y es capaz de hacer la misma separación de un ciclón típico de cuatro pulgadas que procesa 50 galones por minuto. De esta manera se ha desarrollado un acondicionador de lodos altamente eficiente que es igual de compacto que el tres en uno, pero sólo requiere de un múltiple con ciclones de 10 pulgadas, el cual tiene una capacidad procesamiento de 1500 gpm para lo cual sólo necesitarán 3 ciclones lugar de 30 ciclones convencionales de cuatro pulgadas. La incorporación de una unidad de alto volumen de acondicionamiento del lodo en el sistema de control de sólidos, incrementará la eficiencia del sistema total, debido a que la cantidad de sólidos finos en el sistema de lodos, resultante de la atracción de partículas debido a los agitadores, bombas centrífugas, bombas de fluido, inyectores de chorro en el taladro, se mantendrá en un mínimo. Al mantener la concentración de sólidos finos menores a 74 micrones en un mínimo, se reducirán los requerimientos de dilución, así como la acumulación de partículas coloidales que son por perjudiciales a las propiedades del fluido.

3.16 Sistema de centrifugación.

La necesidad de la centrífuga llegó a ser evidente por el hecho de que por cada partícula de 74 micrones, que no es removida por las zarandas y acondicionadores de lodo, se generan 3 millones de partículas, una vez que una de ellas se haya degradado en partículas de 0.5 micrones, con un aumento

acompañado del área superficial de 143 veces el área original. En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de remoción de una centrífuga (Gráfica 8).

Gráfica 8. Efecto de la Centrífuga sobre la Remoción de Sólidos y la Razón de Área Removida.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 83

Así con el propósito de realizar una separación eficiente, existen dos tipos de centrífugas disponibles:

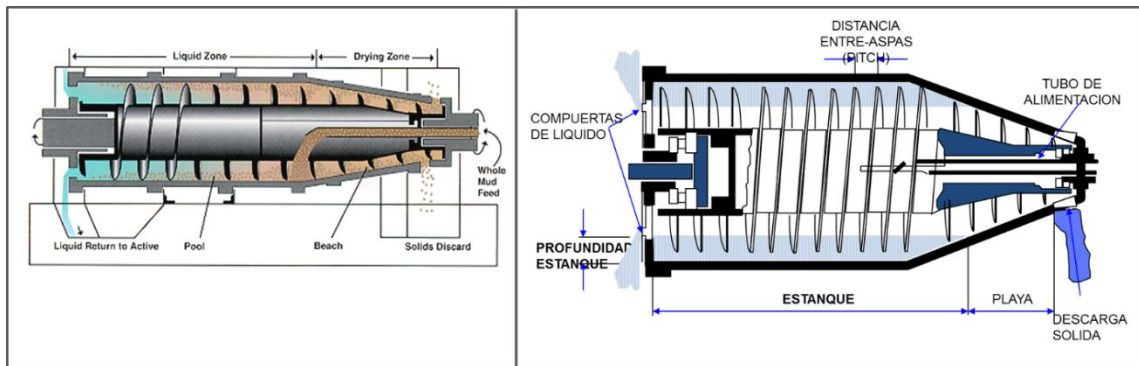
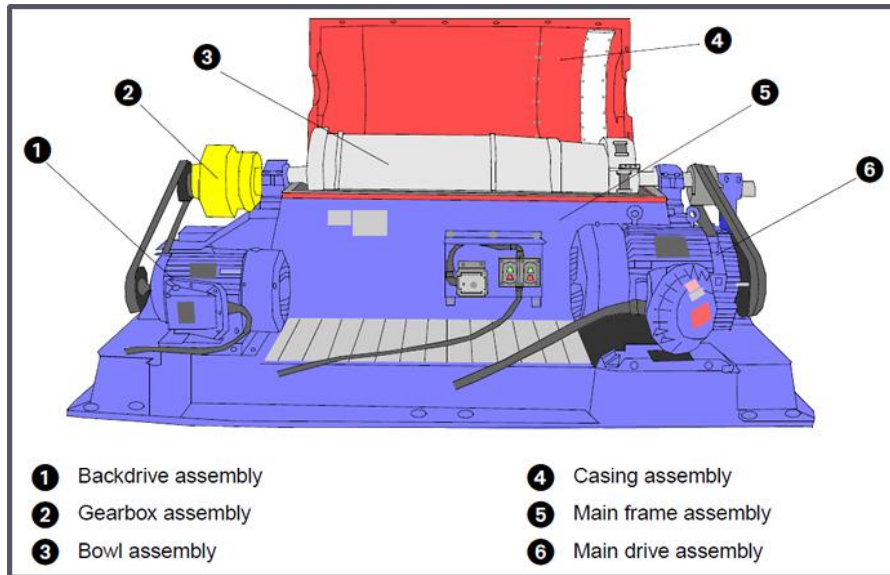
- 1) El separador centrífugo de rotor perforado, conocido como separador de fluidos de rotaria.

2) centrífuga encantadora de tazón sólido, son conocida como de decantadora.

La centrífuga de rotor perforado consiste en un tambor cilíndrico perforado con numerosos orificios de media pulgada uniformemente distribuidos. Este tambor rota entre una cámara cilíndrica estacionaria en posición horizontal. La cámara tiene empaques o retenes en cada extremo para permitir el paso de los ejes al rotor. Este tipo de centrífuga casi ha desaparecido y ya no está más en uso, debido a que ahorra menos material densificante que la centrífuga decantadora, aún que presentaba con una única ventaja que es de muy fácil transporte y que puede colocarse en cualquier sitio accesible al taladro.

Con la utilización de la centrífuga de decantación aumenta la velocidad de sedimentación de los sólidos mediante el reemplazo de la fuerza de gravedad, la cual es más débil, por la fuerza de la centrífuga. La centrífuga de decantación consiste en una cámara cónica horizontal de acero, que rota a alta velocidad, con un doble transportador de tipo tornillo es inferior o tornillo sin fin. Este transportador rota en misma dirección que la cámara externa pero a una velocidad menor. El fluido es inyectado en el eje hueco el transportador, pasando al espacio comprendido entre la cámara cónica y el tornillo y mediante el movimiento de rotación a alta velocidad de la cámara y la acción de las hojas del tornillo transportador, se logra que los sólidos de mayor gravedad específica se adhieran a las paredes de la Cámara, y a medida que en ella se sedimentan los mismos van siendo transportados hacia la zona denominada playa o estanque de la cual los sólidos secos son descartados. A medida que se remueve los sólidos, el líquido es empujado hacia la zona de líquido para ser recuperado y reincorporado al sistema del lodo (Figura 26). El nivel de este estanque es determinado por la altura de la compuerta de salida del líquido en el extremo mayor.

Figura 26. Estructura Interna de una Centrifuga.



Fuente: Selección del Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé Pág. 84

3.17 Desempeño de las Centrifugas de Decantadoras.

El desempeño óptimo de las centrifugas decantadoras depende de factores tales como las dimensiones del equipo, la velocidad de rotación, viscosidad del fluido y el tipo de sólido alimentación a la máquina. Dependiendo estos parámetros se

tendrá un punto de corte alto según los requerimientos de cada caso, y por lo tanto una remoción eficiente de los sólidos.

El tamaño de dimensión de la centrífuga determina la capacidad procesamiento del fluido por parte de la unidad, ya que mientras más grande sea la centrífuga mayor será su capacidad de manejo volumétrico. Por otro lado, la velocidad de rotación, es proporcional a la fuerza G aplicada sobre el fluido lo cual según la ley de Stoke, indica que a mayor fuerza G, mayor será la velocidad de asentamiento de las partículas, generando así mayor eficiencia de separación, sin embargo, la velocidad de asentamiento también es proporcional al tamaño o diámetro de la partícula, y a la densidad de la misma, en consecuencia mientras mayores sean el diámetro y la gravedad específica de un sólido en particular se favorecerá el asentamiento del mismo. Caso contrario se presenta con la viscosidad del fluido que entra la centrífuga, ya que mientras mayor sea la viscosidad del fluido, se tendrá una mayor velocidad de asentamiento, por esto se hace necesaria la dilución del fluido a medida que entra en la centrífuga.

El aspecto más importante en el desempeño de las centrífugas es la dilución de la lechada o fluido que entra la máquina. Mediante esta dilución se busca reducir la viscosidad del fluido que entra en la centrífuga para lograr una eficiencia alta de separación de las partículas. Mientras mayor sea la viscosidad del fluido mayor será de dilución necesaria generalmente de dos a cuatro galones por minuto.

El punto de referencia a seguir es que la viscosidad Marsh del fluido entre la centrífuga no debe ser mayor a 37 seg/qt, ya que hay menor velocidad de asentamiento de las partículas, pero tampoco debe ser menor a 35 segundos por cuarto de galón ya que se están midiendo agua en exceso, causando turbulencia en la Cámara por exceso de velocidad de la fuente. Si se está fuera del rango disminuye la eficiencia remoción, por lo tanto se debe estar atento a la recomendación de los fabricantes.

3.18 Aplicaciones de las Centrífugas.

La acumulación de sólidos finos de perforación incrementará la viscosidad de la fuerza de gel en el fluido, lo cual indica la necesidad de una centrífuga. Sin embargo el uso una centrífuga descargara algunos aditivos sólidos necesarios para el fluido, como la bentonita y los lignitos. Por lo tanto se debe realizar tratamientos al fluido para compensar la pérdida de dichos materiales y mantener unas óptimas propiedades del fluido de perforación, ya que de no hacerlo se generarán problemas como pega diferencial de la tubería, además de una formación inadecuada del revoque en las paredes del pozo. De esta manera se recomienda la utilización de tratamientos químicos y dilución luego de que el fluido haya pasado por los equipos de separación para mantener las propiedades del mismo. El hecho utilizar una centrífuga no quiere decir que se debe eliminar la opción de dilución en el sistema de fluidos en un 100% según la situación y el tipo de fluido las centrífugas tienen diferentes aplicaciones:

- 1) En fluidos densificados la centrífuga utilizada para la recuperación de barita, removiendo la mayor cantidad posible y luego devolviéndolo al sistema, mientras se descarga la fase líquida remanente conteniendo el resto de los sólidos finos y de tamaño coloidal. La porción líquida reemplazada por líquido de dilución o nuevo volumen. Debido a la baja capacidad de las centrífugas, sólo una pequeña porción del volumen en circulación es procesada, así que se deberá usar las propiedades del fluido mediante dilución y tratamientos químicos.
- 2) En los fluidos poco densificados, la centrífuga es normalmente utilizadas para la recuperación del líquido, ya que es ajustada para separar y descargar partículas del tamaño limo y retomar la fase líquida al sistema de fluido. De este modo la descarga de las centrífugas son sólidos secos con un pequeño porcentaje de agua libre. La fase líquida limpia aun contiene algunos sólidos ultra finos y coloidales, que no representan grandes daños para el sistema. La aplicación de las

centrífugas en este caso incluye: fluidos con una fase líquida muy costosa (base aceite, sintéticos, sales saturadas, etc,) y en donde la exposición de desperdicios es costosa, como las zonas de cero descarga de perforación.

- 3) La centrífuga igualmente utilizada para procesar la descarga proveniente de los Hidrociclones. De esta manera se secan aún más los sólidos descargados por los y los Hidrociclones y el líquido recuperado es retornado al sistema de fluido. Esto es particularmente beneficioso cuando la fase líquida del fluido es muy costosa, o se debe tener especial cuidado con la descarga de los ripsos de perforación.

✚ Fluido no densificado (Bajo Volumen).....	800 a 1200 G
✚ Fluido no densificado (Alto Volumen).....	1000 a 2100 G
✚ Fluido densificado (Bajo Volumen).....	600 a 800 G

Al utilizar centrífugas decantadoras que afectan separaciones de hasta 2 o 3 micrones (D_{50}) para barita regresándola al sistema de fluidos mientras se desecha el remanente, los sólidos de baja gravedad, junto con la barita que es menor de tres micrones es desechada. Pero en el caso de las centrífugas, debido a sus bajas capacidades sólo una porción del fluido es tratada por las mismas. Típicamente sólo de cinco a 10% del volumen de circulación total se procesan en el sistema de centrífugas. La selección de estos equipos debe basarse en su comportamiento, eficiencia, costo y tipo de servicio para el cual está diseñada.

En la actualidad es común la utilización del sistema de doble centrífugas, las cuales son diseñadas para eliminar las partículas coloidales en la primera etapa donde la descarga inferior que consiste mayormente de barita, es retornada al sistema activo y el afluyente es recolectado en un tanque y es bombeado a la centrífuga secundaria, generalmente operando a mayores velocidades y

produciendo elevadas fuerzas G (de 2000G) donde los sólidos finos son removidos y la fase líquida removida el sistema activo. La centrífuga secundaria recupera la fase líquida del fluido.

En el caso de que el fluido sea base agua, las fuerzas G disponibles en la industria no son suficientes para remover todos los sólidos suspendidos en el fluido, por lo cual se deben añadir coagulantes y floculantes al fluido de manera de encapsular las partículas más pequeñas y así remover los sólidos suspendidos en el fluido. Estos sistemas son conocidos como unidades floculantes o desaguadoras y se utilizan para evitar la contaminación del afluyente que se retorna al sistema activo, sin embargo estos químicos pueden llegar a ser algo costosos. En caso de que los fluidos sean base aceite o sintéticos, la centrífuga secundaria remueve los sólidos suspendidos estrictamente mediante las fuerzas G generadas en el tazón centrífugo. En ambos casos la eficiencia de separación de los sistemas, es mayormente afectada por la velocidad alimentación del fluido a la centrífuga, debido a que el tiempo de estancia del fluido de la misma es crítico para la eficiencia del proceso.

3.19 Otros métodos de Separación de Sólidos.

3.19.1 Dilución. Un método conocido para el tratamiento de los sólidos de perforación es la adición de más fluido, esto es conocido como dilución, el cual no reduce los cortes, pero reduce considerablemente su concentración en el fluido de perforación, reduciendo el porcentaje total de los sólidos en el lodo de perforación. Adicionalmente es de vital importancia tener en cuenta que el proceso de dilución es muy costoso, debido a que por cada barril de agua diluida o aceite, requiere de una cantidad de química adicional, sea barita u otros materiales necesarios para mantener las propiedades del fluido de perforación deseado.

3.19.2 Desplazamiento. Este método consiste en la remoción o descarte de grandes cantidades de lodo por lodo nuevo con óptimas propiedades reológicas.

3.19.3 Piscinas de asentamiento. Consiste básicamente en la separación de las partículas sólidas por efecto de la gravedad, debido a la diferencia en la gravedad específica entre el sólido y el fluido, donde su eficiencia se ve directamente afectada por el tamaño de las partículas, su gravedad específica y la viscosidad del fluido.

⁹ Para el posterior análisis y desarrollo del presente trabajo, se basó primordialmente en el libro *The Handbook On Solids And Drilling Waste Management* (6th Edition), además de toda la información recolectada y analizada durante la etapa de consulta bibliográfica.

4. GENERALIDADES DEL POZO

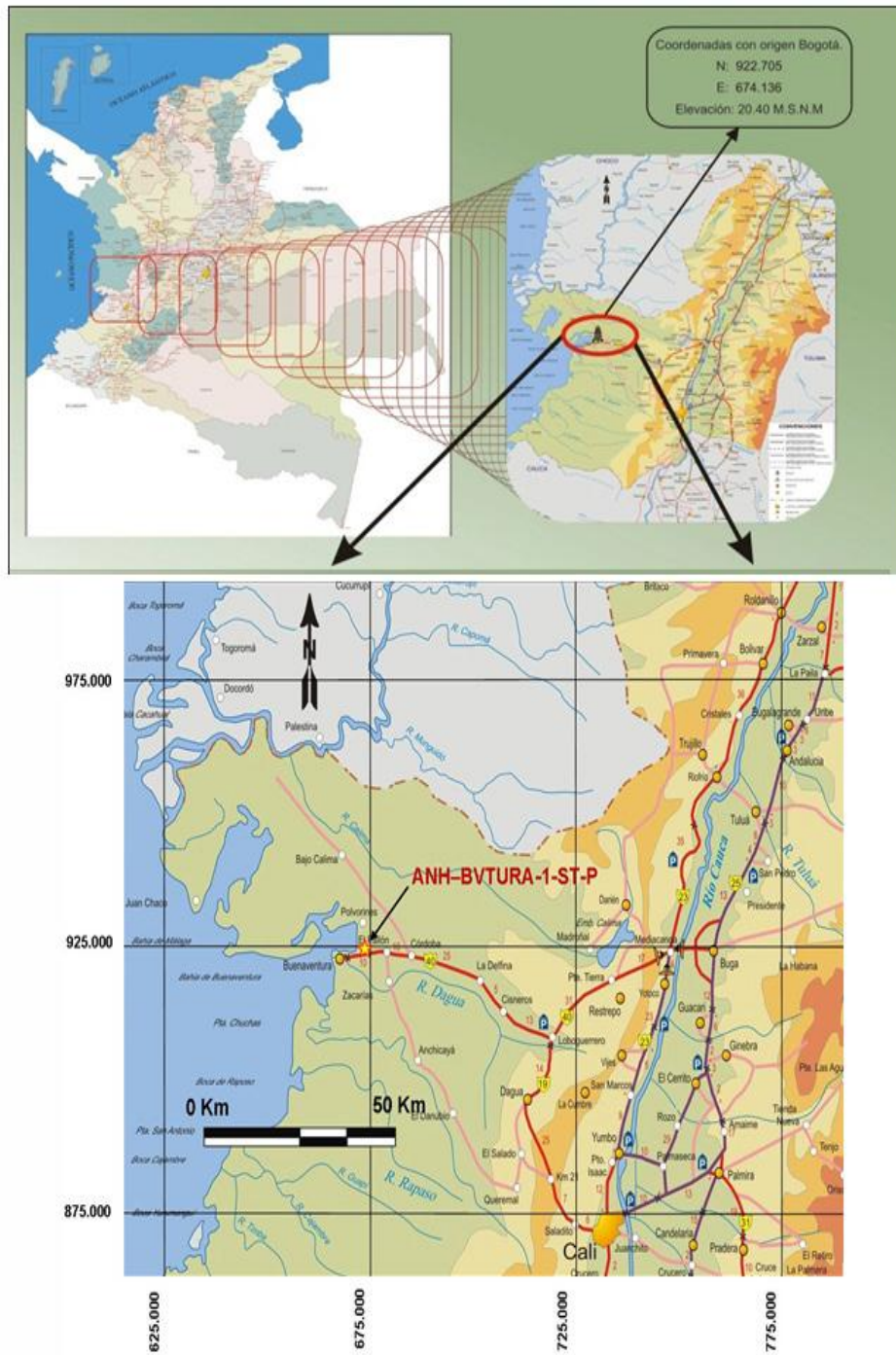
La toma de datos y el posterior análisis de los mismos, para el desarrollo del presente proyecto se llevó a cabo en el pozo estratigráfico ANH BVTURA 1 ST-P, que según la resolución 18 1495 del 02 de septiembre de 2009 del ministerio de Minas y Energía, la definición de un pozo estratigráfico es “aquel que se perfora con propósitos de reconocimiento y muestreo de la columna estratigráfica, sin objetivo hidrocarburífero”. Cabe mencionar que con la perforación de pozos estratigráficos se pretende obtener información directa, precisa y de alta calidad de la cobertura sedimentaria, que define el sistema petrolífero potencial de una cuenca, mediante un conjunto de registros de pozo, cortes de perforación y corazones (núcleos continuos de roca).

Para la perforación de un pozo estratigráfico se realizan los mismos procesos que para perforar un pozo convencional, desde superficie hasta una profundidad planeada, de acuerdo con lo mencionado anteriormente se manejan los mismos parámetros o factores que un pozo convencional, como lo son, un equipo básico de perforación, herramientas especiales, cementación, herramientas de pesca, fluido de perforación, unidad de Mudloggin y equipos de Control de Sólidos, etc.

4.1 Ubicación del pozo.

El pozo estratigráfico ANH-BVTURA 1 ST-P se localiza aproximadamente a 6,5 kilómetros del casco urbano principal del municipio de Buenaventura, departamento del Valle del Cauca, en el barrio Isla de la Paz (Figura 27). El pozo se ubicó al margen izquierdo tomando la ruta que va de Buenaventura a Cali.

Figura 27. Ubicación del Pozo



Fuente: Suministrada por Grupo de Pozos Profundos UIS, Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Tabla 2. Ficha Técnica del Pozo.


FICHA TECNICA DEL POZO	
DATOS TÉCNICOS	ANH-BVENTURA-1-ST-P
Clasificación	Estratigráfico
Cuenca	Tumaco
Municipio (Departamento)	Buenaventura (Valle del Cauca)
Elevación del terreno	63 pies snm
Coordenadas Planas Magna Sirgas	N: 922.685
Origen Bogotá	E: 674.144
Coordenadas Geográficas	Latitud: 3° 53' 27,73" N
	Longitud: 77° 0' 40,37" W

Fuente: Suministrada por Grupo de Pozos Profundos UIS, Escuela de Ingeniería de Petróleos.

4.2 Metodología de Análisis de Datos.

Para el desarrollo del presente trabajo se usó como referencia la perforación del pozo estratigráfico ANH BVENTURA 1 ST-P, mencionado anteriormente, se basó básicamente en la pruebas de la laboratorio en campo, de densidad del lodo y del análisis de la retorta a la entrada, descarga y salida de cada uno de los equipos que componen el sistema de control de sólidos, además del cálculo de las propiedades del lodo, como viscosidad plástica, Yield Point y MBT, con el fin de analizar el efecto de los sólidos en las propiedades del lodo.

Para el cálculo de la eficiencia de cada uno de los equipos de control de sólidos se lleva a cabo teniendo en cuenta la metodología descrita a continuación, la cual depende de los datos medidos en campo y de los parámetros operacionales del pozo:

-  Cálculo de los sólidos generados por el pozo por cada pie perforado.

$$\text{Sólidos Generados} \left[\frac{\text{Lbs}}{\text{FT}} \right] = (\text{Diametro del Pozo} + \text{Washout})^2 * 0.00097 \quad \text{Ecuación N° 18}$$

$$\text{Sólidos Generados} \left[\frac{\text{Lbs}}{\text{FT}} \right] = \text{Sólidos Generados} * 910.7 \quad \text{Ecuación N° 19}$$

Para determinar la cantidad de sólidos descargados, por cada uno de los equipos que componen el sistema de control de sólidos, se toma como referencia un recipiente de ¼ de galón y posteriormente se mide el tiempo (R) en segundos por cuarto de galón, que tarda en llenarse en la descarga de un hidrociclón o de una zaranda, etc.

$$\text{Total Sólidos Removidos} \frac{\text{Lbs}}{\text{Hora}} = \frac{(\rho - 8.34)}{R} * 1450 \quad \text{Ecuación N° 20}$$

Para el cálculo de la eficiencia aportada por el equipo de separación analizado, se lleva a cabo como la relación entre los sólidos descargados y los sólidos generados por el pozo.

$$\% \text{Eficiencia} = \frac{\text{Sólidos Descargados}}{\text{Sólidos Generados}} * 100 \quad \text{Ecuación N° 21}$$

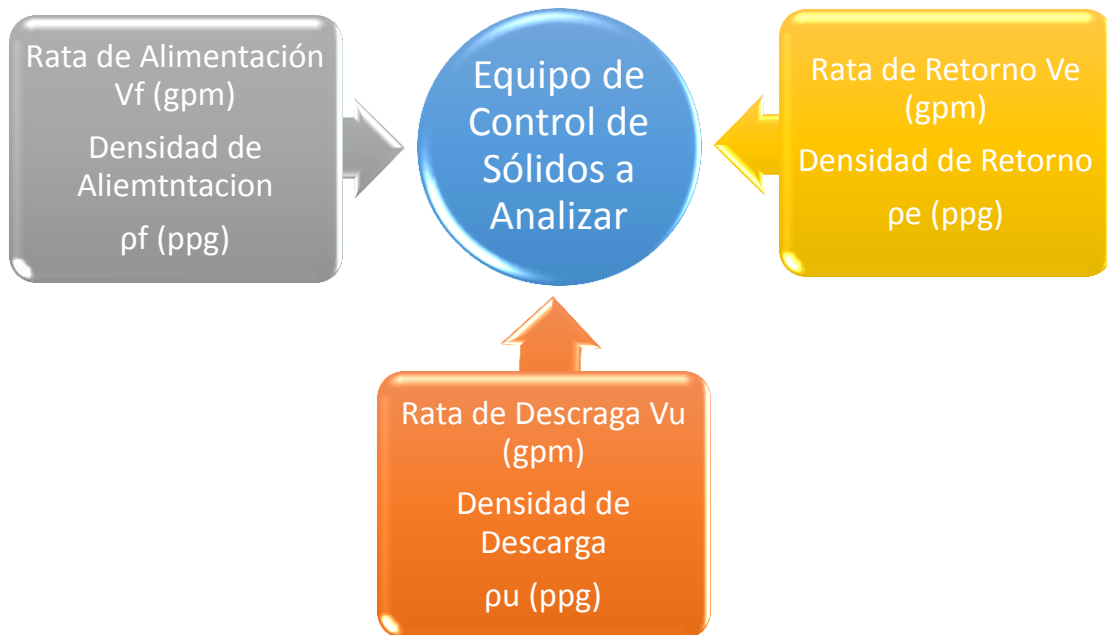
$$\text{Eficiencia Total del sistema} = \text{Efic}_{\text{Zarandas}} + \text{Efic}_{\text{Mud Cleaner o 3 en 1}} + \text{Efic}_{\text{Centrifug}}$$

Ecuación N° 22

Como se explicó en los capítulos anteriores, el objetivo de usar un equipo de control de sólidos, es disminuir considerablemente los costos operacionales, comparando los costos por dilución Vs los costos de llevar a cabo una separación

mecánica. Para ellos se realiza un balance en el lodo, teniendo en cuenta los parámetros de entrada, descarga y salida del equipo que se esté analizando, como se muestra en el siguiente (Figura 28):

Figura 28. Balance Equipos de Control de Sólidos.



Fuente: Autores

Para el cálculo del balance, se determina las ratas de entrada y salida del sistema.

$$\rho_f * V_f = \rho_u * V_u + \rho_e * V_e \quad \text{Ecuación N° 23}$$

Dónde:

ρ_f = Densidad del lodo de Entrada , ppg

ρ_u =Densidad del lodo de Descarga , ppg

ρ_e =Densidad del lodo de Retorno , ppg

V_f = Rata de Entrada, gpm

V_u = Rata de Descarga, gpm

V_e = Rata de Retorno, gpm

Conociendo que la rata de alimentación es equivalente a la suma de las ratas de descarga y de salida, tenemos.

$$V_f = V_u + V_e \quad \text{Ecuación N° 24}$$

Despejando V_e , tenemos que

$$V_e = V_f - V_u$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la primera

$$\rho_f * V_f = V_u * \rho_u + \rho_e (V_f - V_u)$$

Por lo tanto:

$$V_u = \frac{\rho_f * V_f - V_f * \rho_e}{\rho_u - \rho_e} \quad \text{Ecuación N° 25}$$

Conociendo el porcentaje de sólidos en la descarga, mediante la prueba de la retorta, se puede calcular la cantidad de solidos removidos.

$$\text{Sólidos Removidos} = V_u * \% \text{ solidos de la descarga} \quad \text{Ecuación N° 26}$$

4.3 Cálculo de los Costos del Equipo de Control de Sólidos comparado con los gastos generados por Dilución.

4.3.1 Dilución. Conociendo la densidad del lodo deseado y el porcentaje de sólidos que tolera el sistema, podemos calcular el volumen necesario para diluir el lodo.

$$\text{Volumen de Dilución} \left[\frac{Bl}{\text{Hora}} \right] = \frac{\text{Sólidos Removidos}}{\% \text{ Sólidos tolera el sistema}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ Bl}}{42 \text{ gal}}$$

Ecuación N° 27

$$\text{Costo de Dilución} \frac{\$}{\text{Hora}} = \text{Volumen de Dilución} [\text{Costo del lodo} + \text{Costo por Disposición}]$$

Ecuación N° 28

4.3.2 Costos por separación mecánica de sólidos.

$$\text{Calculo Volum Liquido Perdido} = V_u * \% \text{ Liquido Perdido} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ Bl}}{42 \text{ gal}}$$

Ecuación N° 29

$$\begin{aligned} \text{Costo por Tratamiento Mecanico} [\$ / \text{Hora}] \\ = [\text{Vol liquido Perdido} (\text{Costo del lodo} + \text{Costo por Disposición}) \\ + \text{Costo alquiler por hora}] \end{aligned}$$

Ecuación N° 30

4.4 Análisis de Datos.

Como ya se había mencionado anteriormente para el desarrollo de este proyecto se tomó como base de análisis el pozo ANH BVTURA 1 ST-P, donde a continuación se describe la profundidad de cada fase perforada, y para el análisis de resultados se tienen en cuenta los datos medidos durante la tercera fase de 12 1/4", que está comprendida entre 2500' y 7280'. En esta fase se realizó el corazonamiento del pozo en cuatro intervalos así:

- ❖ Intervalo N°1: 2.600' – 3.320'
- ❖ Intervalo N°2: 4.500' – 4.628'
- ❖ Intervalo N°3: 4.928' – 5.522'
- ❖ Intervalo N°4: 7.060' – 7.272'.

Por lo tanto los datos analizados para esta fase, está comprendido por el intervalo de 5500' a 7060' de profundidad, debido a que no se encuentra en los intervalos corazonados.

Tabla 3. Pozo ANH-BVentura 1 ST-P.

POZO ANH-BVENTURA 1 ST-P			
Fases	Diámetro Hueco	WashOut	Profundidad Fase
Primera Fase	26"	0.2	510'
Segunda Fase	17 1/2"	0.2	2500'
Tercera Fase	12 1/4"	0.2	7280'
Cuarta Fase	8 1/2"	0.2	12100'

Fuente: Suministrada por Grupo de Pozos Profundos UIS, Escuela de Ingeniería de Petróleos

Como se podrá observar en los datos en las siguientes (Tabla 4-5), solo se observaron mediciones realizadas al equipo de zarandas debido a que los otros equipos de control de sólidos, no estaban operando, entre ellos el 3 en, el cual se encontraba averiado, donde los conos de los Hidrociclones de los desarenadores y desarcilladores presentaban fallas, ya fueran causadas por problemas de mantenimiento o porque sus conos se encontraban obstruidos. Además es importante mencionar que durante la perforación no se llevó a cabo el uso de centrifugas, aunque se encontraban en buen estado.

Tabla 4. Zaranda 1.

BROCA	PROFUNDIDAD (FT)	ZARANDA 1							MALLA	CAUDAL (GPM)
		DENSIDAD ENTRADA (PPG)	DENSIDAD DESCARGA (PPG)	%SOLIDOS DESCARGADOS	%AGUA DESECHADA	R (SEC/QTG)	DENSIDAD RETORNO (PPG)			
12 1/4	5500	10,5	14,5	81	18,84	8,30	10	4*240	445	
	5650	10,5	14,7	82	18,00	4,00	10		445	
	5900	10,6	14,6	83	17,00	5,50	10		445	
	6130	10,5	14,6	80	20,00	5,30	10		445	
	6370	10,5	14,6	80	20,00	6,20	10		445	
	6530	10,5	14,5	81	18,84	7,10	10,1		445	
	6710	10,6	14,6	82	18,09	5,50	10		445	
	6940	10,7	14,5	82	18,00	8,40	10,1		445	

Fuente: Autores

Tabla 5. Zaranda 2.

BROCA	PROFUNDIDAD (FT)	ZARANDA 2							MALLA	CAUDAL (GPM)
		DENSIDAD ENTRADA (PPG)	DENSIDAD DESCARGA (PPG)	%SOLIDOS DESCARGADOS	%AGUA DESECHADA	R (SEC/QTG)	DENSIDAD RETORNO (PPG)			
12 1/4	5500	10,5	14,4	80	20	8,30	10	4*240	445	
	5650	10,5	14,7	83	17	4,00	10		445	
	5900	10,6	14,6	82	18	5,50	10		445	
	6130	10,5	14,6	82	18	5,30	10		445	
	6370	10,5	14,6	82	18	6,20	10		445	
	6530	10,5	14,5	81	19	7,10	10,1		445	
	6710	10,6	12	62	38	5,50	10		445	
	6940	10,7	12,5	66	34	8,40	10,1		445	

Fuente: Autores

4.5 Determinar la Eficiencia de cada uno de los Equipos que componen el Sistema de Control de Sólidos.

Teniendo en cuenta los datos mostrados en la tabla anterior se procede al cálculo de la eficiencia del sistema de control de sólidos para cada una de las zarandas, de acuerdo a lo mencionado en **Metodología de Análisis de Datos**, llevando a cabo el cálculo de los sólidos generados por el hueco, seguido de los sólidos descargados por los equipos de zarandas (Tabla 6-7).

Tabla 6. Eficiencia de la Zaranda 1.

ZARANDA 1					
PROFUNDIDAD (FT)	ROP (Ft/Hora)	R (SEC/QTG)	SOLIDOS GENERADOS LBS/HORA	TOTAL SOLIDOS REMOVIDOS (LB/HORA)	% EFICIENCIA
5500	17	8,30	1164	538	46
5650	36	4,00	2465	1153	47
5900	26	5,50	1780	825	46
6130	27	5,30	1849	856	46
6370	23	6,20	1575	732	46
6530	20	7,10	1369	629	46
6710	26	5,50	1780	825	46
6940	17	8,40	1164	532	46

Fuente: Autores

Tabla 7. Eficiencia de la Zaranda 2.

ZARANDA 2					
PROFUNDIDAD (FT)	ROP (Ft/Hora)	R (SEC/QTG)	SOLIDOS GENERADOS LBS/HORA	TOTAL SOLIDOS REMOVIDOS (LB/HORA)	% EFICIENCIA
5500	17	8,30	1164	529	45
5650	36	4,00	2465	1153	47
5900	26	5,50	1780	825	46
6130	27	5,30	1849	856	46
6370	23	6,20	1575	732	46
6530	20	7,10	1369	629	46
6710	26	5,50	1780	482	27
6940	17	8,40	1164	359	31

Fuente: Autores

Como se puede observar la parte sombreada (Tabla 7) en la profundidad de 6710' se presenta una caída en la eficiencia en la zaranda 2 debido a que en este intervalo dos de las mallas presentan huecos provocados por el deterioro de las mismas (Figura 29), las cuales generaban que una mayor cantidad de sólidos retornara al sistema disminuyendo la eficiencia del mismo, para ello se tomaron medidas preventivas como el sellado de dichos orificios, lo cual evita el retorno de los sólidos y líquido al lodo a través de ellos, mejorando la eficiencia en un 5%, pero que al compararla con la eficiencia ofrecida por el sistema en óptimas condiciones, no es la opción más adecuada, teniendo en cuenta que el cambio de la malla sería la opción más recomendable.

Figura 29. Mallas Dañadas.



Fuente: Autores

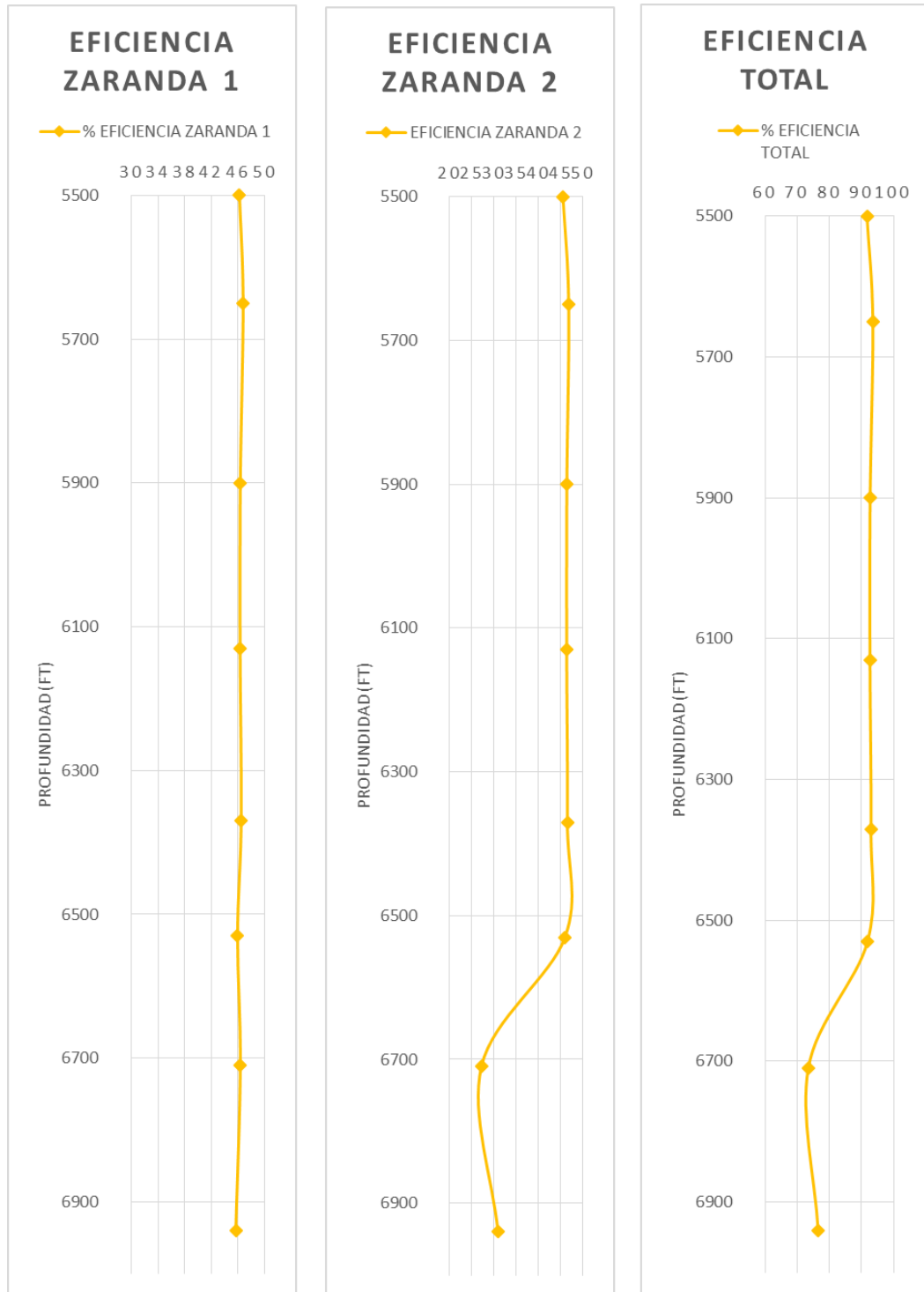
Como bien se sabe la eficiencia total del sistema es la suma de cada una de las eficiencias de los equipos que lo conforman, (Tabla 8).

Tabla 8. Eficiencia del Sistema de Control de Sólidos.

EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL DE SOLIDOS			
PROFUNDIDAD (FT)	% EFICIENCIA ZARANDA 1	% EFICIENCIA ZARANDA 2	% EFICIENCIA TOTAL
5500	46	45	92
5650	47	47	94
5900	46	46	93
6130	46	46	93
6370	46	46	93
6530	46	46	92
6710	46	27	73
6940	46	31	77

Fuente: Autores

Gráfica 9. Eficiencia de la Zaranda 1 y Zaranda 2.



Fuente: Graficada por Autores.

En la (Gráfica 9) se observa de nuevo el efecto que causa el mal estado de las mallas de la zaranda 2 sobre la eficiencia total del sistema, lo cual repercute directamente en las propiedades del lodo provocando que el volumen de dilución necesario para mantenerla en los rangos deseables aumente, provocando un aumento en los costos operacionales.

4.6 Optimizar la Eficiencia del Equipo de Control de Sólidos que lo requieran para su óptimo desempeño.

De acuerdo a lo observado en la (Tabla 8) y en la (Gráfica 9) se observa una caída en la eficiencia del sistema de control de sólidos causado por el deterioro de las mallas en la Zaranda 2 en el intervalo de 6710' a 6940', como se puede observar en la (Figura 29).

Debido al efecto directo que tiene el mal estado de las mallas de la zaranda en la eficiencia total del sistema presentando una caída del 19% comparado con el desempeño óptimo del equipo del 92%, provocando una mayor incorporación de sólidos al sistema del lodo, se proceden a dar las siguientes recomendaciones. Conociendo que las mallas no están en las condiciones óptimas de operación se debe proceder al remplazo inmediato de las mismas, para recuperar la eficiencia perdida causada por el deterioro. En caso tal de no contar con las mallas para ser remplazadas inmediatamente, se debe proceder al uso del equipo 3 en 1, para retirar los sólidos que se han incorporado al sistema del lodo a través las zonas dañadas de las mallas, evitando que se alteren las propiedades del lodo.

Con el fin de extender la vida útil de las mallas se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- ❖ Se deben remover los sólidos que se adhieren a las mallas constantemente.
- ❖ Lavar las mallas frecuentemente con agua a presión.

- ❖ Nunca se deben limpiar las mallas con un cepillo de alambre que pueda provocar la ruptura de las mismas.
- ❖ Si sufre un taponamiento, se debe retirar la malla y lavar con agua a presión por la parte posterior.

Como se había mencionado anteriormente el equipo de 3 en 1 compuesto por un desarenador, desarcillador y una zaranda, no se encontraba operando debido al taponamiento de los conos en los Hidrociclones y a la falta de mallas disponibles en las zarandas. Para evitar el taponamiento de los conos se recomienda realizar una limpieza general al iniciar cada pozo con el fin de retirar los materiales o desechos que puedan estar obstruyendo el flujo especialmente en los bushings y en la alimentación del cono. Por lo tanto se deben seguir las siguientes recomendaciones a la hora de inspeccionar el estado del equipo de desarenadores y desarcilladores:

1. Si el cono expulsa un chorro continuo de lodo, se debe a que la entrada del cono se encuentra obstruida, como se muestra en la (Figura 30).

Figura 30. Obstrucción salida de Lodo-Hidrociclón.



Fuente: Curso en mallas NOV (NATIONAL OILWELL VARCO)

2. Si no expulsa nada, este se encuentra tapado por saturación de sólidos.

3. El buen funcionamiento se evidencia, cuando por el extremo inferior del cono salen los sólidos y parte del lodo en spray como se evidencia a continuación (Figura 31).

Figura 31. Óptima salida de Lodo-Hidrociclón.



Fuente: Curso en mallas NOV (NATIONAL OILWELL VARCO)

4. Lavar los conos con agua limpia antes de apagar la bomba, para evitar que se entrapen los sólidos y los desechos.
5. Se recomienda revisar frecuentemente el estado de estos, con el fin de identificar los conos tapados y proceder con su limpieza, además no se debe permitir la acumulación de sólidos en la bandeja debido a que obstruirían la descarga de los conos:

Figura 32. Control de Limpieza.



Fuente: Curso en mallas NOV (NATIONAL OILWELL VARCO)

4.7 Análisis económico del mejoramiento del Sistema de Control de Sólidos.

Teniendo en cuenta que uno de los factores de mayor importancia durante la perforación de un pozo, son los costos operacionales, por lo tanto se procede al cálculo de dichos costos con el fin de evaluar la importancia del uso de un sistema mecánico de control de sólidos, comparándolo con los costos que se generarían por dilución como único método de control de sólidos, en el debido caso de no contar con un equipo de separación mecánica de los mismos. En la (Tabla 9) se pueden observar los costos asociados a la preparación del lodo, disposición y alquiler de un equipo de separación mecánica de sólidos.

Tabla 9. Costos Asociados al Lodo.

COSTOS ASOCIADOS AL LODO	
COSTOS	VALOR
Costo por barril de lodo (\$/Bl)	64
Costo por Disposición de lodo (\$/Bl)	8
Costo Alquiler Equipo (\$/Dia)	6500
% Sólidos en el sistema (%)	11

Fuente: Informe de Lodos 3° Fase Qmax

Aplicando el balance de masa y tomando el sistema como un todo, procedemos al cálculo de los caudales de las corrientes de descarga y de retorno del lodo (Tabla 10).

Tabla 10. Distribución de Caudales.

CAUDAL ENTRADA GPM	CAUDAL DESCARGA GPM	CAUDAL RETORNO GPM	%SOLIDOS DESCARGADOS	%AGUA DESECHADA	SÓLIDOS REMOVIDOS GPM
890	80,9	809	83	17	67

Fuente: Autores

Tabla 11. Costos por Dilución y Separación Mecánica.

	Volumen de dilución Bl/Hora	COSTO POR DILUCIÓN \$	VOL LIQUIDOS PERDIDOS Bls	COSTO POR SEPARACIÓN MECÁNICA \$	Beneficio Economicos \$
Hora	872	62794	8	829	61965
Día	20931	1507051	186	19900	1487151
Fase	127681	9193012	1135	121389	9071623

Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados mostrados en las anteriores (Tablas 10-11) se puede observar, la necesidad de tener un equipo de control de solidos adecuado debido al aporte económico que ofrece cercanos al 90% comparados con los costos que se generarían al usar la dilución como único método para controlar los sólidos en el lodo, llegando a un punto donde los volúmenes de fluido se vuelvan incontrolables, produciendo desbordamiento en los tanques de lodo, situación que lleva a un aumento en los costos operacionales, sin mencionar los posibles daños ambientales que se generarían al momento de la disposición del lodo.

4.8 Evaluar la Factibilidad del mejoramiento del sistema de Control de Sólidos y su efecto en los costos operacionales de la perforación.

Para evaluar la factibilidad del cambio de las 2 mallas averiadas en la Zaranda 2 por unas nuevas como propuesta del mejoramiento en la eficiencia del equipo de control de sólidos y su impacto en los costos operaciones; se procedió al cálculo de los costos que se generarían al seguir operando al 73% de eficiencia con las mallas dañadas comparado con valor del 92% que se lograría al ser remplazadas por unas nuevas (Tabla 12).

Tabla 12. Costos Operacionales.

Tiempo	Eficiencia	%Sólidos Descargados	%Agua Desechada	Vol Líquidos Perdidos Bls	Costo Por Separación Mecánica \$
Hora	92	83	17	8	829
	73	62	38	18	1567
Incremento Costos Operacionales \$					738

Fuente: Autores

Tabla 13. Beneficios Económicos.

Costo Por Unidad De Las Mallas \$	Mallas A Remplazar	Costo Total De Las Mallas \$	Costo Operación Mallas Dañadas (\$/HORA)	Beneficio Económico Remplazando Las Mallas (\$/HORA)
130	2	260	738	478

Fuente: Autores

Como se puede observar en la (Tabla 12). Al seguir operando el equipo con las mallas en mal estado los costos operaciones aumentan debido a que al incorporar una mayor cantidad de sólidos al sistema se disminuye en porcentaje de sólidos descargados, aumentando el volumen de fluido perdido, lo cual repercute en un

incremento en el volumen de lodo necesario para mantener controlados los sólidos que se añadieron al sistema. Al analizar económicamente la propuesta del remplazo de las mallas como se observa en la (Tabla 13), se puede visualizar el beneficio económico en 478 \$/hora que se lograría al remplazar las mallas por unas nuevas como propuesta del mejoramiento de la eficiencia del equipo de control de sólidos.

Como se sabe al momento de llevar a cabo la perforación de un pozo su equipo de control de sólidos se debe encontrar en perfecto estado, por si necesita ser usado en caso de que se presente una situación inesperada o si se requiera de su operación para mantener las condiciones adecuadas en el lodo. Como lo habíamos mencionado y de acuerdo al análisis de eficiencia presentado durante la perforación del pozo ANH-BVTURA 1ST-P, se le realizó el análisis solo al equipo de zarandas debido a que era el único equipo que se estaba usando como control de sólidos, aunque se contaba con equipo de 3 en 1 y dos centrifugas para el control de los mismos, del cual el equipo de 3 en 1 no se encontraba en las condiciones óptimas de funcionamiento en caso de que la operación requiriera de su uso inmediato, debido a que presentaba fallas en sus hidrociclones tanto de los desarenadores y de sus desarcilladores, además que su zaranda no tenía las mallas instaladas para su adecuado funcionamiento. Por lo mencionado anteriormente es obligación de la operadora del proyecto exigirle a la prestadora de servicios contratada para el control de sólidos, que mantenga el equipo en las condiciones adecuadas para cuando su uso sea requerido. Lo cual no acarrea gastos adicionales en la operación, debido a que por ellos se está pagando un alquiler del equipo completo, y el cual debe estar en óptimas condiciones de operación.

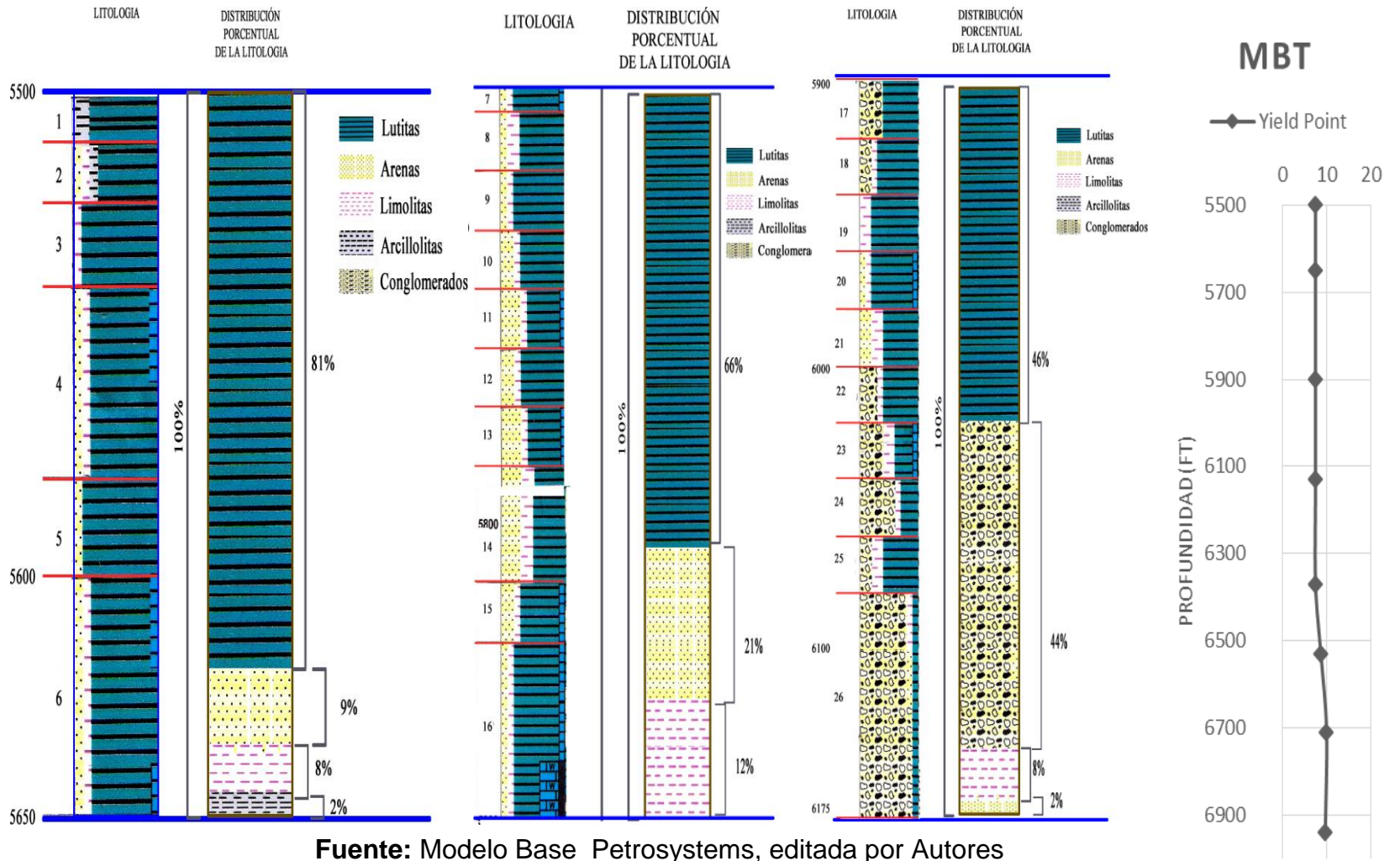
4.9 Análisis del Aporte del Inhibidor de Arcillas a la Eficiencia del Sistema.

En la (Figura 33) se observa la descripción litológica del intervalo analizado, pero para determinar el porcentaje de materiales que aporta la formación se llevó a

cabo una distribución porcentual de la litología, tomando el intervalo de interés como un 100% y posteriormente se lleva a cabo el cálculo porcentual de cada uno de los materiales presentes, es importante aclarar que la columna de distribución porcentual de la litología de la gráfica, no es una columna estratigráfica por que no está en función de la profundidad, solo se puede usar para analizar el porcentaje total de cada uno de los materiales que aporta la formación al intervalo analizado.

Se puede evidenciar que el aporte de la formación en sólidos que se incorporan al lodo, se forma en un 91% principalmente por arcillas (lutitas, limolitas, arcillolitas), y el 9 % restante por arenas, de aquí podemos evidenciar el gran aporte del inhibidor de arcillas usado debido a que la eficiencia del sistema de control de sólidos no se vio afectado por el contenido de arcillas generadas por la formación, material que no podría ser separado por una zaranda debido a que su tamaño ronda en el rango de 2 y 30 micrones, por lo tanto pasaría a través de los orificios de las mallas del mesh de 240, manteniéndose en el sistema del lodo, situación que es controlada debido a la capacidad del inhibidor de llevar a cabo el intercambio iónico de los minerales que conforman las arcillas de la formación, haciendo que se unan entre ellas y formen grumos más grandes que puedan ser descartados en el proceso de tamizado de las zarandas, evitando que se incorporaran al fluido manteniéndose siempre el MBT en rangos bajos (7.5-8 lbs/bl), para el intervalo analizado, motivo por el cual no se hizo estrictamente necesario el uso de los desarenadores, desarcilladores y centrifugas, que son los equipos encargados de separar las partículas más finas que se pueden incorporar al lodo. De acuerdo a los datos teóricos el equipo de zarandas puede lograr aportar el 60 % de la eficiencia total de un sistema de separación mecánica de sólidos, cuando se opera de manera adecuada, por lo tanto de acuerdo a los datos obtenidos de eficiencia promedio del sistema fue del 90%, por lo tanto, se puede observar el gran aporte a la eficiencia del sistema de control de sólidos por parte del inhibidor de arcillas.

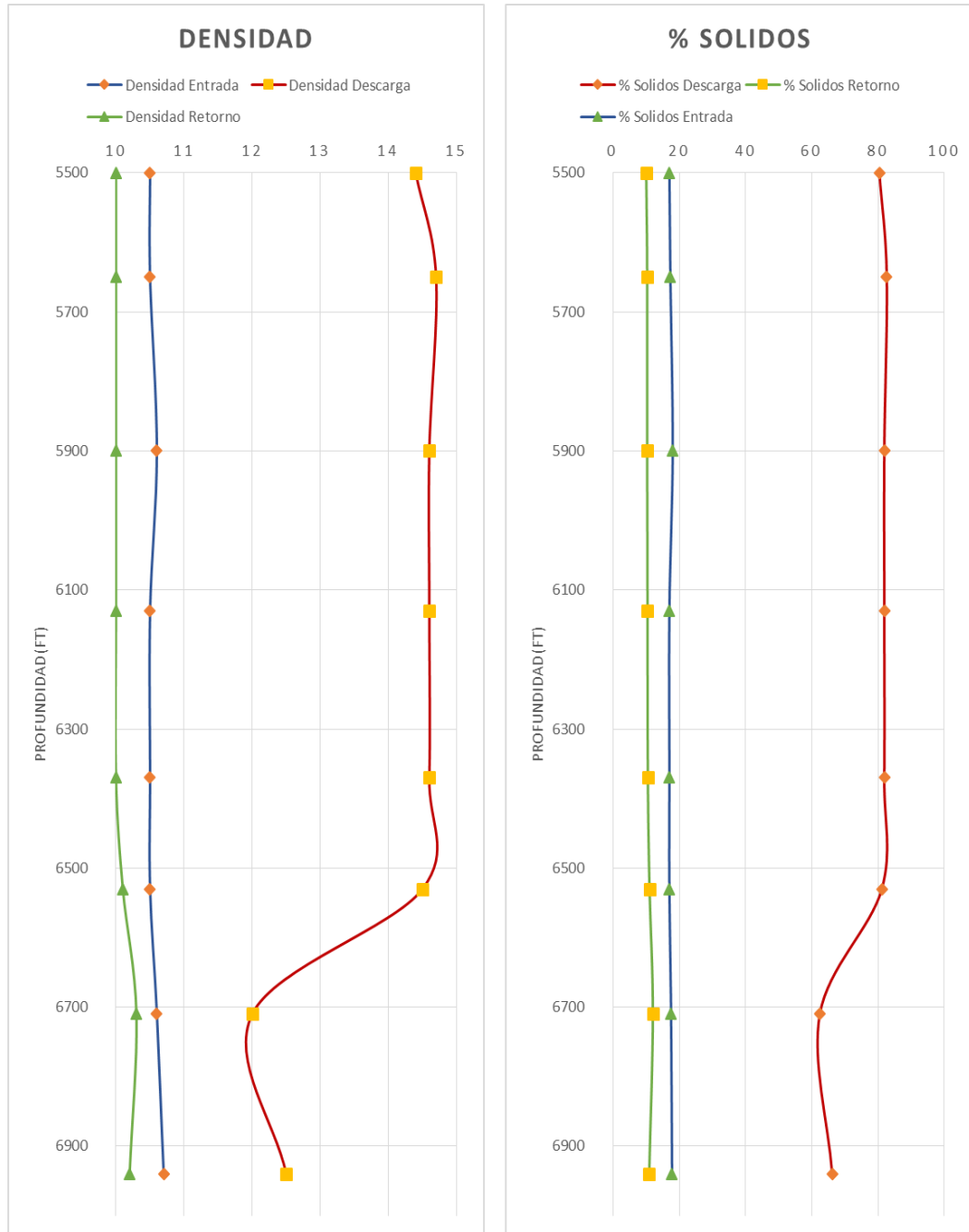
Figura 33. Descripción Litológica y Porcentual.



Fuente: Modelo Base Petrosystems, editada por Autores

4.10 Análisis del efecto de los Sólidos en las Propiedades del Lodo.

Gráfica 10. Análisis de la Densidad y el Lodo.



Fuente: Diseñada por Autores

De acuerdo a lo observado en la (Gráfica 10), podemos evidenciar que a medida que aumentan los sólidos en el sistema, repercuten en un incremento en la densidad, fenómeno que se puede observar en las curvas de descarga, a una profundidad de 6700' donde al disminuir la cantidad de sólidos separados por la zarandas, debido a los problemas en las mallas, mencionados anteriormente, lo cual provoca una mayor incorporación de sólidos al sistema de retorno del lodo, provocando un aumento en la densidad de retorno, como consecuencia de los sólidos que se incorporan al sistema debido al mal estado en las mallas.

En los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se procedió a graficar las propiedades de estudio del intervalo de la fase 3.

En la (Gráfica 11) se puede evidenciar el comportamiento de la densidad como una propiedad que se incrementa a medida que la cantidad de sólidos aumenta dentro del sistema de lodo, causando una alteración en el balance de materia sólido-liquido de la mezcla, fenómeno que se puede observar con más detalle en la profundidad comprendida entre 6710' y 6940' debido a una mayor incorporación de sólidos al sistema del lodo causada por el mal estado de las mallas.

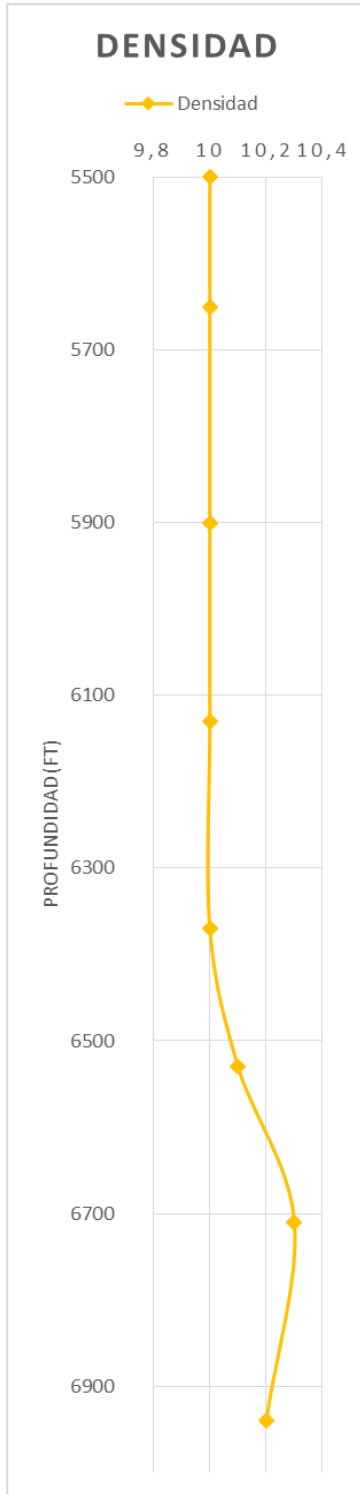
En la (Gráfica 12) se puede visualizar el comportamiento constante de la viscosidad plástica del lodo hasta llegar a la profundidad de 6710, debido al aumento de la fase sólida en el lodo causada por la incorporación de sólidos, lo cual aumenta considerablemente el área superficial de las partículas presentes en la mezcla reflejándose en el incremento de la viscosidad plástica.

En la (Gráfica 13) se detalla que el Yeild Point también presenta un leve incremento en el intervalo de interés debido que al aumentar la concentración de sólidos presentes en el lodo, se presenta un aumento en las cargas eléctricas

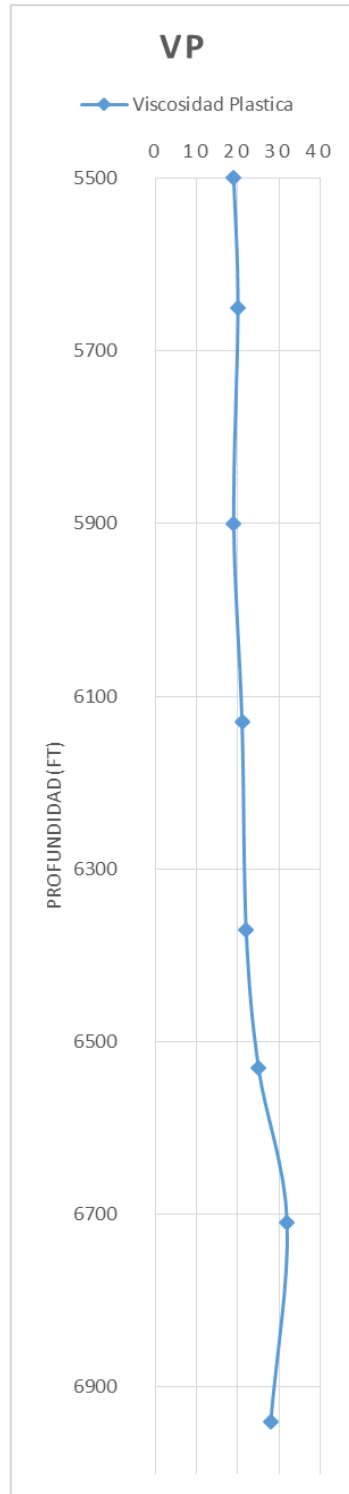
sobre la superficie de las partículas sólidas que se encuentran dispersas en la fase fluida.

El incremento en los valores de MBT a la profundidad de 6710' se ve evidenciado en la (Gráfica 14), la cual muestra que gran parte de los sólidos que se incorporaron al sistema del lodo a través de las zonas dañadas de las mallas fueron arcillas provenientes de la formación.

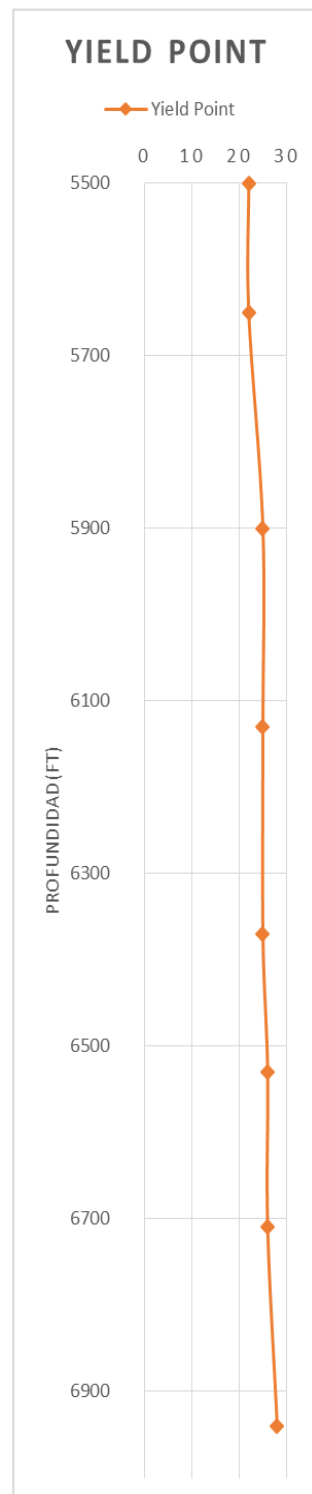
Gráfica 11. Densidad.



Gráfica 12. Vp.

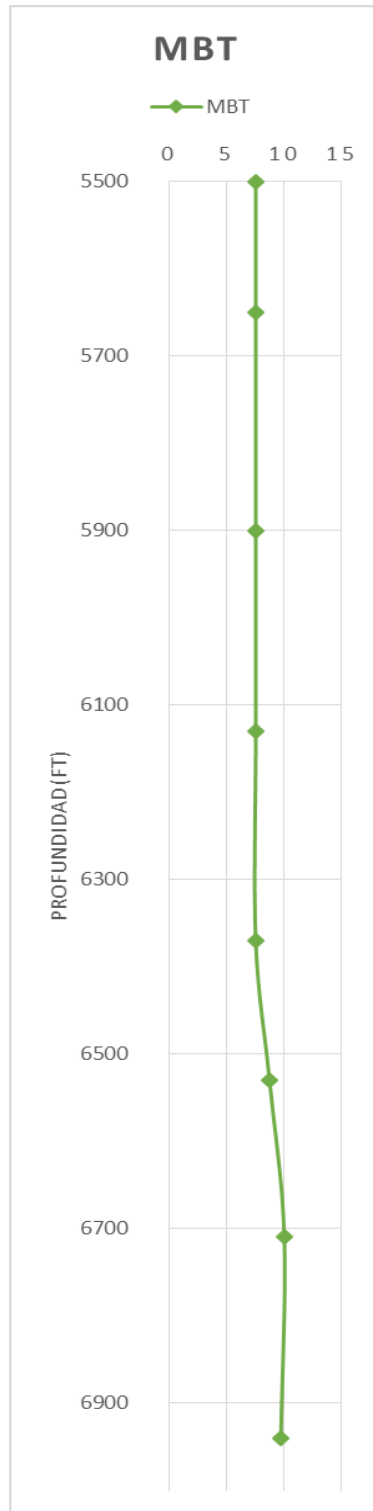


Grafica 13. Yp.



Fuente: Diseñada por Autores

Gráfica 14. MBT.



Fuente: Diseñadas por Autores

5. CONCLUSIONES

En un equipo de control de sólidos es importante controlar su eficiencia. La salida de operación de cualquiera de estos equipos, aumenta el porcentaje de sólidos que se incorporan al lodo, incrementando directamente los costos de químicos y volumen de dilución necesarios para mantener las propiedades reológicas del fluido de perforación.

El mal estado o averías en uno de los equipos de control de sólidos, conlleva a una incorporación de los mismos al sistema, provocando una alteración en las propiedades del lodo, ocasionando un aumento significativo en el volumen de dilución necesario para controlar el porcentaje de sólidos.

Realizar una inspección y un mantenimiento periódico a los equipos de control de sólidos, es de vital importancia debido que al observar una falla en cualquiera de ellos se debe proceder a tomar las decisiones necesarias para mantener el funcionamiento óptimo del equipo.

Al evaluar la factibilidad económica del mejoramiento de la eficiencia del equipo de control de sólidos, se pudo concluir que el remplazo de las mallas en mal estado por unas nuevas, aporta un beneficio económico de \$478 comparado con el aumento en los costos operacionales si se continuara con el uso de las mallas que se encontraban en mal estado.

Se determinó la importancia del aporte del inhibidor de arcillas en la perforación del pozo ANH BVENTURA 1 ST-P, a la eficiencia del sistema de control de sólidos, como único agente que favorece la separación de las arcillas en las zarandas debido a que no se contó con la operación de desarcilladores, desarenadores y centrifugas.

Se observó que cada una de las propiedades del lodo , se ven afectadas por el aumento en la concentración de los sólidos que se incorporan al fluido de perforación, causado por una disminución en la eficiencia del sistema como consecuencia de una avería del equipo o por la falta de mantenimiento del mismo.

6. RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de un próximo proyecto se debería realizar el análisis de la eficiencia del equipo de control de sólidos usado durante cada una de las fases de perforación programadas. Además, si se cuenta con la operación de todos los equipos como zarandas, 3 en 1 y centrifugas, calcular el aporte individual de cada uno de los mismos a la eficiencia total del sistema.

Es importante que la operadora del proyecto exija a la empresa prestadora de servicios de control de sólidos el buen estado de los equipos y el mantenimiento constante para garantizar el desempeño óptimo de los mismos, manteniendo las condiciones adecuadas del lodo.

Se recomienda que la UIS como operadora de la perforación de futuros pozos estratigráficos en la misma cuenca, correlacione los datos obtenidos de los equipos de control de sólidos utilizados en el pozo ANH-BVENTURA 1 ST-P, para alcanzar valores altos en la eficiencia del control de los sólidos y reducir los costos operacionales.

BIBLIOGRAFÍA

Trabajo Especial de Grado, Selección de un Sistema Adecuado de Control de Sólidos de descarga para el mejoramiento del proceso de Perforación de Pozos Horizontales en el Campo San Cristóbal, Distrito San Tomé. Universidad Central de Venezuela para Optar al Título de Ingeniero de Petróleo; Por la Br. García González, Verónica del Pilar.

QUIRÓZ L., Fermín A. Págs. 1 – 50. Elaboración de un método de evaluación del sistema de control de sólidos, basado en una nueva definición de los objetivos funcionales de los equipos y en un nuevo concepto de eficiencia. Trabajo Especial de Grado. UCV, Caracas junio 2002.

GIMENEZ, Jorge. Guía de laboratorio de fluidos de perforacion. UCV. Sección de Procedimientos. 2002

Manual de Fluidos de Perforación. Laboratorio de Fluidos de Perforación. UCV. Autor desconocido. Págs. 401- 452.

Solids Control Handbook. Schlumberger – Dowell. Versión CD-ROM. Secciones 100, 200, 300 y 1100. Enero 1998.

Curso de Control de Sólidos MI-SWACO

LUIS ALBERTO BAUTISTA PUENTE. Manejo de Desechos y Deshidratación (DEWATERING) de los fluidos de perforación base Agua, Tesis: para Optar el Título Profesional de Ingeniero de Petróleo; Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú 2010.

Curso de Fluidos y Sólidos de Perforación Sólidos MI-SWACO

“Recommended Practice for Drilling Fluid Processing Systems Evaluation”.
American Petroleum Institute (API). Washington. 1999.

“Método para el cálculo del porcentaje en peso de los sólidos en rípios”. PDVSA.
Maturín. 2002.

“Práctica y optimización del control de sólidos”. PDVSA. 1999.