

**ESTUDIO TÉCNICO Y ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE CÁLCULO  
PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO DE CIRCULACIÓN PARA LA  
PERFORACIÓN DE POZOS**

**FABIO ENRIQUE ARGÜELLO REY  
KATHERINE PRADA PALOMO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ESTUDIO TÉCNICO Y ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE CÁLCULO  
PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO DE CIRCULACIÓN PARA LA  
PERFORACIÓN DE POZOS**

**FABIO ENRIQUE ARGÜELLO REY**

**KATHERINE PRADA PALOMO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de:**

**INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**M. Sc. Emiliano Ariza León**

**DIRECTOR**

**Ing. Edgar Manuel Márquez Rodríguez**

**CO-DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2011**

## DEDICATORIA

Primero que todo a Dios por su infinito amor y por darme  
Cada día la oportunidad y las fuerzas para lograr mis metas,  
A mis padres por su apoyo incondicional y especial afecto,  
A mis hermanas por confiar en mis capacidades,  
Al profesor Emiliano Ariza por su guía durante el desarrollo del proyecto,  
A Katherine por brindarme tan especial amistad,  
A mis demás familiares y amigos por los buenos momentos compartidos.

*Fabio Enrique Argüello Rey*

## DEDICATORIA

A Dios por guiarme y darme fortaleza para alcanzar mis metas,  
A mi papá a quien siempre recordaré con amor y orgullo,  
A mi mamá por su entrega abnegada y su amor incondicional  
A mi hermana Jessica por estar siempre a mi lado  
Al profesor Elberto Carrillo por sus consejos e incondicional respaldo,  
Al profesor Emiliano Ariza por su orientación y apoyo,  
A Fabio por su compañía y comprensión.  
A mi amigo Pedro Miguel por su entrañable amistad.

*Katherine Prada Palomo*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al director del proyecto, ingeniero Emiliano Ariza León, por su guía y apoyo incondicional durante la elaboración del proyecto; por su confianza y motivación constante en esta etapa.

A los ingenieros Édgar Manuel Márquez, Luis José Abaunza y Julio César Pérez por sus contribuciones y recomendaciones a nuestro trabajo.

A la ingeniera Carolina Arámbula por su colaboración oportuna y a todos quienes hicieron posible alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo.

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	22
1. SISTEMA DE CIRCULACIÓN	23
1.1 Descripción.	24
1.1.1 Área de preparación del fluido de perforación.	24
1.1.2 Equipos de circulación.	25
1.1.3 Área de reacondicionamiento.	25
2. ESTUDIO TECNICO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE CIRCULACIÓN.	26
2.1 FLUIDO DE PERFORACIÓN.	26
2.1.1 Definición.	27
2.1.2 Funciones principales.	27
2.1.3 Clasificación.	29
2.1.4 Propiedades.	30
2.1.5 Tipos de lodos comerciales.	35
2.1.6 Criterios en la selección del fluido de perforación.	40
2.1.7 Características de un programa de lodos.	44
2.2 BROCAS DE PERFORACIÓN.	46
2.2.1 Definición.	46
2.2.2 Clasificación de las brocas de perforación.	47
2.2.3 Mecanismos de falla y tipo de roca.	48
2.2.4 Brocas de cortadores fijos.	49
2.2.5 Brocas de cortadores de rodillos.	52
2.2.6 Brocas corazonadoras.	54
2.2.7 Criterios en la selección de brocas.	56
2.2.7.1 Código IADC.	56
2.2.7.2 Aspectos importantes a considerar.	58

2.3	BOMBAS DE LODOS.	60
2.3.1	Tipos de bombas.	61
2.3.1.1	Dúplex.	62
2.3.1.2	Triplex.	62
2.3.2	Características y capacidad de operación.	63
2.4	TANQUES.	64
2.4.1	Tipos de tanques.	66
2.4.2	Capacidad de tubería y anulares.	67
2.5	EQUIPOS DE CONTROL DE SÓLIDOS.	69
2.5.1	Clasificación de los sólidos de perforación.	69
2.5.2	Clasificación del tamaño de partículas.	72
2.5.3	Método de control de sólidos.	72
2.5.4	Equipos de control de sólidos.	73
2.5.4.1	Zaranda o shale shaker.	74
2.5.4.2	Trampa de arena.	80
2.5.4.2.1	Desgasificadores.	80
2.5.4.2.2	Hidrociclones.	82
2.5.4.3	Desarenadores.	85
2.5.4.4	Deslimadores.	86
2.5.4.5	Limpiador de lodo.	88
2.5.4.6	Centrífuga decantadora.	89
2.5.4.7	Unidad de deshidratación.	93
3.	CONSIDERACIONES DE LA SARTA DE PERFORACIÓN Y GEOMETRÍA DE POZO.	95
3.1	SARTA DE PERFORACIÓN.	95
3.1.1	Tubería de perforación o Drill Pipe.	95
3.1.2	Ensamble de fondo o Bottom Hole Assembly. (BHA).	95
3.1.2.1	Configuraciones estándar para el ensamble de fondo.	97
3.2	GEOMETRÍAS DE POZO.	99

3.2.1	Pozos verticales.	99
3.2.2	Pozos desviados.	100
4.	HIDRÁULICA DE PERFORACIÓN Y OPTIMIZACIÓN.	101
4.1	CONSIDERACIONES PARA PLANEAR LA HIDRÁULICA	101
4.2	Factores que afectan la hidráulica.	103
4.3	Modelos reológicos.	106
4.3.1	Modelo de plástico de Bingham.	107
4.3.2	Modelo de ley de exponencial	108
4.3.3	Modelo de ley de exponencial modificada o Herschel Bulkley.	110
4.4	Ecuaciones prácticas de hidráulica.	111
4.4.1	Pérdidas de presión en el sistema de circulación.	112
4.4.2	Hidráulica en la broca de perforación.	118
4.5	DISEÑO HIDRÁULICO.	123
4.5.1	Factores limitantes.	123
4.6	MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE HIDRÁULICA EN LA BROCA.	127
4.6.1	Método de potencia hidráulica.	129
4.6.2	Método de fuerza de impacto.	130
4.7	HIDRÁULICA DE CORAZONAMIENTO.	133
4.8	Presión de surgencia y succión.	136
4.9	Capacidad de levantamiento y limpieza de pozos.	139
5.	METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE UN PROGRAMA HIDRÁULICO.	151
6.	HERRAMIENTA DE CÁLCULO PLANNING HYDRAULICS.	157
6.1	DESCRIPCIÓN.	157
6.2	MÓDULOS.	157
6.2.1	MÓDULO 1: Información general.	158
6.2.2	MÓDULO 2: Geometría del pozo.	158

6.2.3	MÓDULO 3: Broca.	158
6.2.4	MÓDULO 4: Lodo.	159
6.2.5	MÓDULO 5: Hidráulica.	159
6.2.5.1	Cálculos de diseño.	159
6.2.5.2	Optimización de la hidráulica.	159
6.2.5.3	Hidráulica de corazonamiento.	159
6.2.6	MÓDULO 6: Bombas de lodo.	159
6.2.7	MÓDULO 7: Cálculos de ingeniería.	159
6.2.7.1	Parámetros del proyecto.	159
6.2.7.2	Capacidades y desplazamiento.	160
6.2.7.3	Selección de tanques.	160
6.2.8	MÓDULO 8: Control de sólidos.	160
6.2.9	MÓDULO 9: Síntesis.	160
6.2.9.1	Reporte gráfico del sistema.	160
6.2.9.2	Registro Hidráulico.	160
6.2.9.3	Diagnóstico de problemas.	160
7.	GUÍA DE USO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO PLANNING HYDRAULICS.	161
8.	APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO EN POZO ESTRATIGRÁFICO PROFUNDO.	223
8.1	Pozo Mercaderes.	223
8.2	Pozo Buenaventura.	231
	<b>CONCLUSIONES</b>	239
	<b>RECOMENDACIONES</b>	241
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	242
	<b>ANEXOS</b>	246

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Componentes del sistema de circulación en perforación rotaria.	23
<b>Figura 2:</b> Clasificación de los lodos de perforación.	30
<b>Figura 3:</b> Rango de densidades de los fluidos de perforación.	42
<b>Figura 4:</b> Criterios de selección del fluido de perforación.	44
<b>Figura 5:</b> Clasificación de las brocas de perforación.	47
<b>Figura 6:</b> Tipos de brocas de perforación.	48
<b>Figura 7:</b> El esfuerzo por compresión equivale al doble del esfuerzo cortante.	49
<b>Figura 8:</b> Vista lateral y frontal de los tipos de broca de diamante.	50
<b>Figura 9:</b> Partes generales de la broca PDC.	51
<b>Figura 10:</b> Perfiles de brocas PDC.	51
<b>Figura 11:</b> Partes externas de una broca de conos de rodillos.	53
<b>Figura 12:</b> Brocas de conos de rodillos.	53
<b>Figura 13:</b> Tamaños de cortadores.	54
<b>Figura 14:</b> Cojinetes principales.	54
<b>Figura 15:</b> Brocas corazonadoras.	55
<b>Figura 16:</b> Tipos de bombas de lodos.	62
<b>Figura 17:</b> Operación bombas dúplex.	63
<b>Figura 18:</b> Operación bombas triplex.	64
<b>Figura 19:</b> Sistema de circulación en superficie.	65
<b>Figura 20:</b> Clasificación API del tamaño de los sólidos	70
<b>Figura 21:</b> Clasificación de los sólidos según su reactividad.	71
<b>Figura 22:</b> Efecto del tamaño de las partículas sobre el área superficial.	71
<b>Figura 23:</b> Componentes básico de una zaranda	74
<b>Figura 24:</b> Tramados comunes de mallas.	77

<b>Figura 25:</b> Selección del número de zarandas.	79
<b>Figura 26:</b> Tipos de desgasificadores.	81
<b>Figura 27:</b> Hidrociclones.	82
<b>Figura 28:</b> Limpiador de lodo o mud cleaner.	88
<b>Figura 29:</b> Centrifuga decantadora.	90
<b>Figura 30:</b> Disposición de los equipos de remoción de sólidos.	92
<b>Figura 31:</b> Tamaño de partículas y puntos de corte.	94
<b>Figura 32:</b> Drill pipe o tubería de perforación.	96
<b>Figura 33:</b> Componentes del BHA.	97
<b>Figura 34:</b> Otros componentes del BHA.	98
<b>Figura 35:</b> Esquemas de diseño de pozos verticales.	99
<b>Figura 36:</b> Esquemas de diseño de pozos desviados.	100
<b>Figura 37:</b> Ensamblajes de fondo típicos.	100
<b>Figura 38:</b> Comparación de los modelos reológicos.	111
<b>Figura 39:</b> Procedimiento para cálculo de pérdidas de presión.	112
<b>Figura 40:</b> Brocas corazonadoras.	134
<b>Figura 41:</b> Descarga de la bomba por tamaño de broca.	135
<b>Figura 42:</b> Carta de velocidad de deslizamiento según Hopkins.	143
<b>Figura 43:</b> Deslizamiento de una partícula en pozo vertical y desviado.	143
<b>Figura 44:</b> Cama de recortes presente al apagar la bomba.	147
<b>Figura 45:</b> Mecanismos de transporte de ripios en pozos de diferente ángulo de inclinación.	150
<b>Figura 46:</b> Metodología del plan de actividades del sistema de circulación.	152
<b>Figura 47:</b> Árbol de decisión para diagnóstico de problemas durante la perforación.	156
<b>Figura 48:</b> Inicio de la herramienta Planning Hydraulics.	157
<b>Figura 49:</b> Módulos de trabajo de Planning Hydraulics.	158

<b>Figura 50:</b> Estado mecánico pozo Mercaderes.	223
<b>Figura 51:</b> Estado mecánico pozo Buenaventura.	231

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Densidades comunes de los componentes presentes en el lodo.	31
<b>Tabla 2:</b> Funciones y propiedades físicas del fluido de perforación .	35
<b>Tabla 3:</b> Características del programa de un fluido de perforación.	45
<b>Tabla 4:</b> Mecanismos de falla y estructura de corte.	48
<b>Tabla 5:</b> Guía general de brocas corazonadoras.	55
<b>Tabla 6:</b> Clasificación de los sólidos de acuerdo al tamaño de las partículas.	70
<b>Tabla 7:</b> Tamaño de sólidos removidos por equipos de control de sólidos.	93
<b>Tabla 8:</b> Consideraciones para planear la hidráulica.	102
<b>Tabla 9:</b> Factores que afectan la hidráulica de perforación.	103
<b>Tabla 10:</b> Casos de equipo de superficie.	113
<b>Tabla 11:</b> Cálculo de pérdidas de presión en equipos de superficie.	113
<b>Tabla 12:</b> Cálculos de hidráulica en tubería y anular modelo reológico plástico de Bingham.	115
<b>Tabla 13:</b> Cálculos de hidráulica en tubería y anular modelo reológico de ley exponencial.	116
<b>Tabla 14:</b> Cálculos de hidráulica en tubería y anular modelo de ley exponencial modificada.	117
<b>Tabla 15:</b> Cálculos de hidráulica en la broca de perforación.	119
<b>Tabla 16:</b> Comparación de los métodos de optimización de hidráulica de la broca de perforación.	133
<b>Tabla 17:</b> Razón de transporte $RT$ .	141
<b>Tabla 18:</b> Parámetros críticos de limpieza en pozos desviados.	149
<b>Tabla 19:</b> Registro Hidráulico formato API para pozo stratigráfico profundo Mercaderes.	230

**Tabla 20:** Registro Hidráulico formato API para pozo estratigráfico profundo Buenaventura. 238

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A:</b> Tablas de tuberías.	247
<b>Anexo B:</b> Código de clasificación IADC.	256
<b>Anexo C:</b> Guía de cortadores.	258
<b>Anexo D:</b> Especificación de brocas.	259
<b>Anexo E:</b> Especificación de motores.	262
<b>Anexo F:</b> Rangos de propiedades reológicas para los lodos base agua.	264
<b>Anexo G:</b> Especificación de bombas.	265
<b>Anexo H:</b> Clasificación del tamaño de partículas.	268

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO TÉCNICO Y ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA INTEGRADO DE CIRCULACIÓN PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS<sup>\*</sup>

**AUTORES:** FABIO ENRIQUE ARGÜELLO REY  
KATHERINE PRADA PALOMO<sup>\*\*</sup>

**PALABRAS CLAVES:** sistema de circulación, hidráulica, reología, optimización, boquillas.

### DESCRIPCIÓN:

La única forma de verificar la existencia de hidrocarburos en el subsuelo, aún después de hacer todos los estudios para determinar su probable existencia, es realizar una perforación hasta la zona objetivo, en esta operación el fluido o lodo de perforación es fundamental y se acondiciona mediante un sistema de circulación y tratamiento. El presente trabajo muestra un estudio técnico de cada uno de los componentes del sistema integrado de circulación que hacen parte del programa de perforación de pozos, tales como la selección del lodo, selección de la broca, selección de parámetros de operación de las bombas de lodo, diseño hidráulico y la optimización del sistema, así como de los parámetros para la selección de los equipos de control de sólidos.

Para llevar a cabo el diseño del sistema integrado de circulación mencionado anteriormente e implementar una metodología y los cálculos que permita integrar cada uno de los componentes del sistema, se construyó la herramienta "Planning Hydraulics" en la plataforma de programación Visual Basic 2010, con el propósito de efectuar los cálculos de hidráulica y demás operaciones implicadas en el diseño de una forma ágil, sistematizada y con una interfaz agradable al usuario, además se presenta un diagnóstico de algunos de los posibles problemas que se pueden presentar durante la perforación junto con algunos indicadores o acciones preventivas; obteniéndose así como resultado un paquete de soporte completo para la hidráulica de perforación.

Una vez mostrado el estudio técnico, se presenta la descripción de la herramienta, el caso de aplicación bajo condiciones típicas de un pozo estratigráfico profundo y finalmente el manual de uso de la herramienta diseñada para que pueda ser implementada con fines comerciales o académicos.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Emiliano Ariza León. Co-director: Ing. Edgar Manuel Márquez Rodríguez.

## ABSTRACT

**TITLE:** TECHNICAL STUDY AND ELABORATION OF A CALCULUS TOOL FOR THE DESIGN OF AN INTEGRATED CIRCULATING SYSTEM FOR DRILLING WELLS\*

**AUTHORS:** FABIO ENRIQUE ARGÜELLO REY  
KATHERINE PRADA PALOMO\*\*

**KEY WORDS:** Circulating system, hydraulics, rheology, optimization, nozzles.

### DESCRIPTION:

The unique way to verify the existence of hydrocarbons into the subsoil, even after all studies to determine its probably existence are made, is to perform a drilling down to the target zone, in this operation the drilling fluid or mud is essential and is conditioned through a circulating and treatment system. The present work shows a technical study of each one of the components of the integrated circulating system that are part of the well drilling program, such as the mud selection, bit selection, mud pumps operation parameters selection, hydraulic design, and system optimization, as the solids control equipment selection parameters.

To perform the integrated circulating system design mentioned before implementing calculus and a methodology that allows to integrate each one of the components of the system, it was built the tool "Planning Hydraulics" on the Visual Basic 2010 programming platform, with the purpose of making all hydraulics calculus and the other operations involved in the design on a quickly way, systematized and with an agreeable interface for the user; furthermore a diagnostic of some of the possible problems that can be faced during the drilling is shown along with some indicators or preventive actions; obtaining like that as result a complete support package for drilling hydraulics.

Once the technical study is shown, the tool description, the application case down typical deep stratigraphic well conditions, and finally the user's manual of the designed tool is presented to it can be implemented with academic and commercial purposes.

---

\* Grade project

\*\* Physical-chemistry engineering faculty. Petroleum Engineering School. Director: M.Sc. Emiliano Ariza León. Co-director: Eng. Edgar Manuel Márquez Rodríguez.

## INTRODUCCIÓN

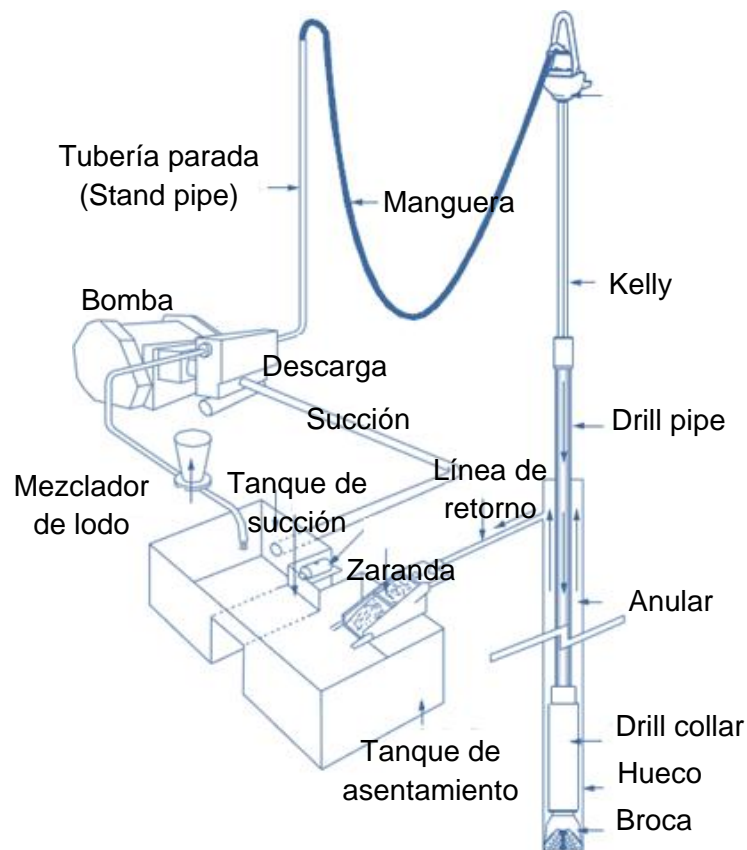
Ante la necesidad de contar con un diseño previo para determinar parámetros como el galonaje requerido y la configuración de equipos como las bombas de lodo y lograr una operación de perforación exitosa de un pozo productor o de un pozo exploratorio, ya sea con el propósito de extraer crudo o de obtener información geológica de las formaciones perforadas, se proporciona un estudio técnico con los fundamentos teóricos requeridos para diseñar e implementar una metodología completa que integre los diferentes componentes del sistema de circulación, y permita contar con información previa a la perforación, haciendo uso de una herramienta de cálculo denominada “Planning Hydraulics”, la cual fue diseñada en el presente trabajo para facilitar su integración y poder visualizar los resultados obtenidos.

El desarrollo del estudio técnico se inicia con la identificación de los componentes básicos del sistema integrado de circulación: definiciones, funciones principales, propiedades, clasificación y parámetros de selección entre otros, importantes para comprender la importancia del sistema de circulación en un programa de perforación; en cuanto a la herramienta de cálculo se parte básicamente de la selección del caso de diseño o estado mecánico propuestos tanto para pozos verticales como para desviados, posteriormente se diseña la metodología para cada uno de los procesos de selección y se establece un procedimiento para trabajar específicamente cada uno de los componentes del sistema. Corridas con diferentes geometrías de pozo y propiedades del fluido de perforación hace posible establecer la incidencia de las propiedades reológicas y la geometría del pozo en la hidráulica y posteriormente optimizarla para obtener los escenarios de operación que garantice mejores condiciones de perforación y que evite gastos innecesarios en equipos pero que avale el rendimiento de la operación. Finalmente se presenta una guía para identificar posibles problemas durante la perforación de pozos, con sus indicadores y algunas acciones preventivas.

## 1. SISTEMA DE CIRCULACIÓN

Para verificar la existencia de petróleo en el subsuelo, aún después de haber hecho todos los estudios para determinar su probable existencia, es necesario realizar una perforación hasta el objetivo<sup>1</sup>. En la perforación de pozos, el sistema de circulación presentado en la figura 1, es el encargado de transportar el fluido de perforación adecuado para cumplir funciones vitales para el avance y éxito de la operación, recuperar ese fluido en superficie, limpiarlo y tratarlo químicamente para de nuevo circularlo al pozo.

**Figura 1:** Componentes del sistema de circulación en perforación rotaria



Fuente: Heriot Watt University, Drilling Engineering.

<sup>1</sup> IAPG. Instituto Argentino del petróleo y gas. Buenos Aires, 2009. 18p.

## **1.1 DESCRIPCIÓN**

El sistema de circulación es un ciclo cerrado que arranca en el tanque de succión de lodo y continúa a través de la línea de succión de las bombas, las bombas descargan el fluido de perforación a los caudales requeridos y éste pasa a través de las líneas de superficie, tubería parada y manguera de perforación; luego ingresa a la unión giratoria y desciende por la sarta de perforación, continua su recorrido hasta la broca comienza a través del espacio anular. Después retorna por la línea de flujo en donde el fluido es sometido a limpieza a través de las zarandas, los sólidos más grandes son eliminados y el resto pasa a través de la trampa de arena, continuando su movimiento hacia los demás equipos de reacondicionamiento para eliminar los sólidos más finos para pasar al tanque de succión en donde se iniciará un nuevo recorrido.

Este sistema está conformado por 3 componentes básicamente.

### **1.1.1 ÁREA DE PREPARACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN**

En esta área se encuentran los tanques de agua, depósitos de materiales para el lodo, equipos mezcladores. Allí también se encuentran los tanques de lodo que permiten el almacenamiento y manejo del lodo en superficie, con forma generalmente rectangular y capacidades variables. Esta área consta en general de los siguientes equipos:

- Tanques de acero de succión.
- Tanques de agua.
- Depósitos de aditivos secos a granel.
- Depósitos de materiales químicos para lodo.
- Equipos mezcladores.

### **1.1.2 EQUIPOS DE CIRCULACIÓN**

El fluido de perforación comúnmente que se utiliza en una operación de perforación se utiliza en forma continua. El lodo se mezcla y se guarda en el tanque de succión del cual es succionado con una bomba y lo envía a presión por una tubería y una manguera hasta la unión giratoria, desde donde pasa por el interior de la kelly y la tubería de perforación hasta llegar a la broca, sale por las boquillas y se encuentra con los ripios que ha perforado la broca; entonces inicia su regreso por el anular hasta llegar a la superficie trayendo los ripios y limpiando el hueco.

### **1.1.3 ÁREA DE REACONDICIONAMIENTO**

El lodo en su ciclo de circulación cumple con su función de arrastrar los cortes y llevarlos a superficie por lo que el incremento de estos sólidos y algunas veces gases e hidrocarburos provenientes del yacimiento<sup>2</sup>, le alteran sus propiedades, por lo cual en superficie debe ser tratado. Los equipos que generalmente se usan en este tratamiento además de los tanques y bombas son:

- Tanques de sedimentación.
- Zarandas vibratorias (shale shaker).
- Desgasificador (degasser).
- Desarenador (desander).
- Deslimador (desilter).
- Limpiador de lodo (mud cleaner). Opcional.

Existen diferentes configuraciones del equipo de control de sólidos, de acuerdo a las necesidades y exigencias del tipo de lodo desde el punto de vista ambiental.

---

<sup>2</sup> ARIZA LEON, Emiliano. Fundamentos de Perforación de Pozos. Universidad Industrial de Santander, 2009. 35p.

## **2. ESTUDIO TÉCNICO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE CIRCULACIÓN**

Es importante para realizar un estudio detallado del sistema circulación de pozos, conocer cada uno de los de los componentes involucrados como el fluido de perforación, la broca de perforación, bombas de lodo, tanques, y los equipos de control de sólidos, que serán presentados a continuación.

### **2.1 FLUIDO DE PERFORACIÓN**

El fluido de perforación es un componente crítico en el proceso de perforación rotaria. La exitosa terminación de un pozo de petróleo y su costo depende de las propiedades del fluido de perforación. El costo del fluido de perforación es relativamente pequeño, puede ser del 10 al 15% del costo total del pozo<sup>3</sup>, pero su correcta selección y mantenimiento mientras que se perfora tienen una gran influencia en los costos totales del pozo. El número de días requeridos para perforar hasta una profundidad total depende de la tasa de penetración de la broca, de problemas de pozos que generan retrasos en el avance tales como derrumbes, pega de tubería, pérdidas de circulación entre otros, los cuales se encuentran directamente relacionados con las propiedades del fluido de perforación. Además los fluidos de perforación afectan la evaluación de formaciones<sup>4</sup>.

Se han desarrollado fluidos con alta tecnología a partir de aditivos especiales para satisfacer necesidades específicas bajo diversas condiciones de perforación, buscando que el fluido sea compatible con la formación.

---

<sup>3</sup> Heriot Watt University, Drilling Engineering.

<sup>4</sup> DARLEY. Henry. C.H, and GRAY, George R. Composition and properties of drilling and completions fluids, 1988. 5a Edición. 654p.

### **2.1.1 DEFINICIÓN**

Un lodo es en general una suspensión de sólidos y posiblemente de líquido o gases en un líquido. El líquido en el cual todos estos materiales están suspendidos es la fase continua del lodo. Las partículas sólidas o glóbulos líquidos constituyen la fase discontinua del lodo. Es importante distinguir estas fases ya que la fase continua se relaciona con la viscosidad del lodo y la discontinua con la formación de la torta. La fase continua de un lodo es siempre líquida, en cambio la fase discontinua puede ser constituida por sólidos, líquidos y/o gases.

### **2.1.2 FUNCIONES PRINCIPALES**

La función principal del fluido de perforación es ser un medio para remover los cortes de la perforación, sin embargo el lodo desarrolla una gran cantidad de funciones durante la perforación de un pozo. La densidad, la reología y las propiedades sellantes de los lodos son propiedades básicas para el cumplimiento de estas funciones.

En la perforación rotaria, las principales funciones del fluido de perforación son:

1. Transportar los ripios perforados por la broca, por el anular y permitir su separación en superficie.
2. Enfriamiento y lubricación de la broca y la sarta de perforación.
3. Mantener en suspensión los ripios en el espacio anular cuando se detiene la perforación.
4. Ayudar a sostener el peso de la tubería mediante empuje ascendente; Las tuberías están parcialmente sostenidas por el empuje ascendente del lodo, por aplicación del principio de Arquímedes:

*Peso de la tubería = Peso de la tubería<sub>en el aire</sub> \* Factor de flotación*

5. Mantener la estabilidad del pozo en secciones no revestidas; la presión hidrostática del fluido de perforación ayuda a soportar la pared del hueco, debe evitarse la interacción química entre el lodo y la formación mediante la elección del fluido de perforación con la mejor composición química.

$$P_{hidrostática} = 0,052 \left( \frac{psi}{ft * lpg} \right) * densidad_{lodo}(lpg) * Profundidad(ft)$$

6. Prevenir la entrada de fluidos como aceite, gas o agua de formaciones permeables penetradas; la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo debe exceder la de los fluidos de la formación, para lograr esto la densidad del lodo se debe variar cuando sea necesario durante la perforación.
7. Formar una capa delgada y de baja permeabilidad que selle los poros y otras aberturas en formaciones penetradas por la broca.
8. Ayudar en la toma e interpretación de información disponible por rípios, núcleos y registros eléctricos.
9. Transmitir potencia hidráulica a la broca.

También existen ciertas limitaciones que pueden interpretarse como requisitos:

1. No perjudicar al personal de perforación ni contaminar el medio ambiente.
2. No inducir a inusuales o costosos métodos para completar el pozo perforado.
3. Causar mínimo daño a la formación productora.
4. No corroer o causar desgaste excesivo en el equipo de perforación.

En resumen un adecuado fluido de perforación debe evitar daños en las formaciones por donde se hace el hueco y en especial sobre las productoras de hidrocarburos, no ser corrosivo, no ser abrasivo con las partes metálicas, resistente a la contaminación con otros fluidos, mantenerse estable a presiones y temperaturas elevadas y amigables al medio ambiente.

### 2.1.3 CLASIFICACIÓN

De acuerdo a la figura 2 básicamente existen tres tipos de fluidos de perforación, base agua, base aceite y neumáticos, de los cuales el más utilizado por factores económicos, tecnológicos y ambientales es el fluido de perforación base agua<sup>5</sup>. Se clasifican básicamente de acuerdo a su fluido base:

**Lodos base agua:** las partículas sólidas ya sea bentonita o atapulguita (fase dispersa) están suspendidas en agua o en salmuera (fase continua). Son los usados en la industria por sus componentes y su bajo costo. Se clasifican según los aditivos presentes.

**Lodos base aceite:** las partículas sólidas están suspendidas en el aceite (fase continua). Cuando se forma la emulsión, mezcla de dos fluidos inmiscibles, es decir, líquidos que no se mezclan bajo condiciones normales, uno de los fluidos se encuentra dispersas en el otro en forma de pequeñas gotitas. Pueden ser:

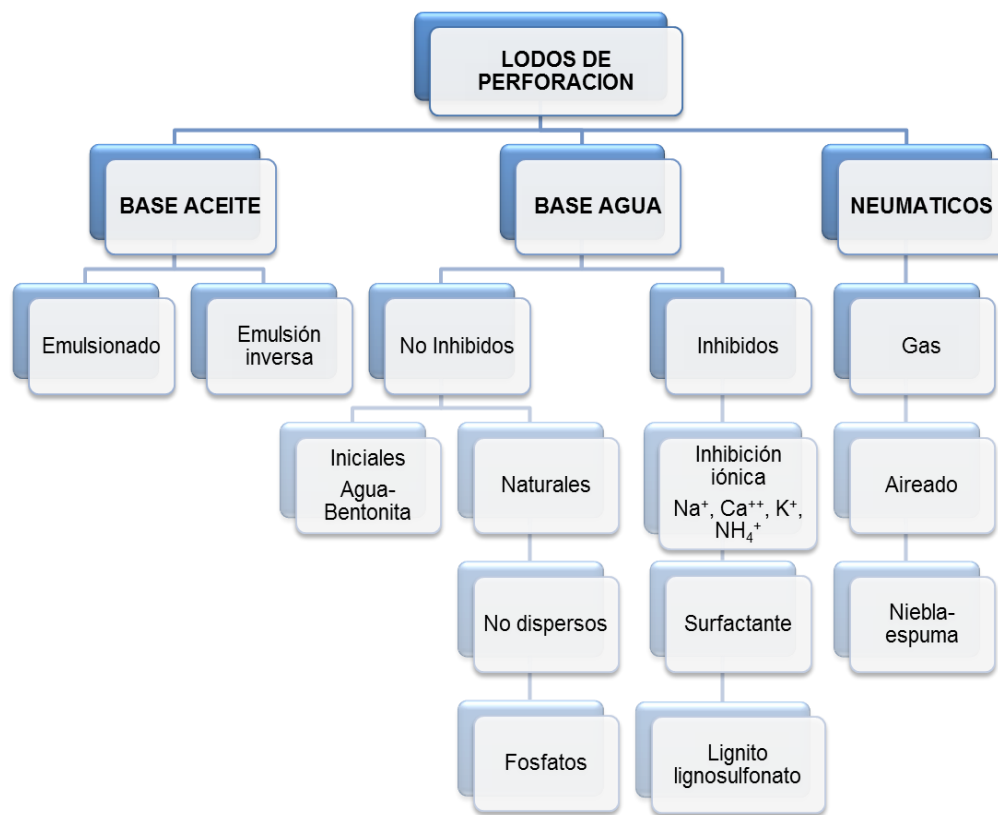
- Emulsión normal: el aceite (fase dispersa) en el agua (fase continua).
- Emulsión inversa: el aceite (fase continua) y el agua (fase dispersa). Usados para tomas de muestras representativas del yacimiento y para perforar zonas productoras de hidrocarburos.

---

<sup>5</sup> RODRIGUEZ BERMUDEZ, Eliserio y ARIZA LEON, Emiliano. Guía de laboratorio de lodos y cementos. Capítulo 2. 18p.

**Lodos neumáticos:** el fluido de perforación es el aire, niebla o espuma. Los ripsos de perforación son removidos por una corriente de alta velocidad ya sea de aire o de gas. La perforación con estos fluidos es común en rocas muy duras, también útil en zonas donde la pérdida de circulación es un gran problema, este tipo de perforación se denomina underbalance

**Figura 2:** Clasificación de los lodos de perforación.



Fuente: RODRIGUEZ BERMUDEZ, Eliserio y ARIZA LEON, Emiliano. Guía de laboratorio de lodos y cementos. Capítulo 2. Fundamentos sobre fluidos de perforación.

### 2.1.4 PROPIEDADES

El fluido de perforación permanentemente es controlado y debe tener ciertas propiedades que son medidas en el laboratorio entre las cuales están:

**Densidad:** capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes del hueco, controlando de este modo la presión en las formaciones perforadas, para obtener densidades mayores y que el lodo siga siendo bombeable, es preciso añadir aditivos, (que exceda la presión de formación en al menos 200 psi<sup>6</sup> y si se desea rebajar la densidad será preciso diluir el lodo mediante adición de agua. La relación entre varios sistemas de unidades se presenta en la tabla 1.

El lodo para cumplir sus funciones de transporte, sostenimiento de los ripios, limpieza del hueco debe tener propiedades reológicas adecuadas como viscosidad plástica, punto cedente, viscosidad aparente y fuerza de gel.

**Viscosidad aparente (VA):** se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Éste término es el que se usa para referirse a viscosidad para fluidos no newtonianos. Se calcula a partir de los datos del viscosímetro rotacional de lodo como:

$$VA (cP) = \frac{\theta_{600}}{2}$$

**Tabla 1:** Densidades comunes de los componentes presentes en el lodo.

<b>Material</b>	<b>lb/gal</b>	<b>lb/ft<sup>3</sup></b>	<b>lb/bbl</b>
<b>Agua</b>	<b>8.33</b>	62.4	350
<b>Aceite</b>	<b>6.666</b>	50	280
<b>Barita</b>	<b>35.8</b>	268	1500
<b>Arcilla</b>	<b>20.8</b>	156	874
<b>Limo</b>	<b>18.3</b>	137	770

Fuente: Composition and properties of drilling and completion fluids, Darley and Gray

<sup>6</sup> DARLEY. Henry. C.H, and GRAY, George R. Composition and properties of drilling and completions fluids, 1988. 5a Edición. 654p

**Viscosidad plástica (PV):** Se describe generalmente como la primera componente de la resistencia al flujo que es causada por fricción mecánica. La PV, se calcula a partir de los datos del viscosímetro rotacional del lodo como:

$$PV(cP) = \theta_{600} - \theta_{300}$$

La viscosidad plástica es afectada principalmente por:

- Concentración de sólidos
- Tamaño y la forma de los sólidos
- Viscosidad de la fase fluida.
- Presencia de polímeros de cadena larga
- Relaciones e aceite-agua, sintético-agua en emulsiones inversas.

La viscosidad plástica debe ser mantenida en el nivel más bajo posible en todos los casos, para aumentar la energía proporcionada a la broca, mejorar el flujo en el espacio anular para la limpieza del pozo y reducir el uso y desgaste de los equipos, así como el consumo de combustible. Un límite superior práctico es el doble del peso del fluido (*lb/gal*).

Aunque este valor parece restrictivo en lo que se refiere a los altos pesos de fluido, los sólidos se ven tan apretados por el material densificante, que estos fluidos tiene una tolerancia muy baja respecto a los sólidos de perforación.

**Punto de cedencia (Yield Point YP):** es la segunda componente de la resistencia al flujo de un fluido de perforación, es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción de un fluido, estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas ubicadas en o cerca de las superficies de las partículas. El punto cedente o Yield point YP, es una medida de estas fuerzas bajo condiciones de flujo. Se calcula a partir de los datos del viscosímetro rotacional de lodo como:

$$YP \left( \frac{lb}{100 ft^2} \right) = \theta_{300} - PV(cP)$$

La magnitud de estas fuerzas depende de:

1. Tipo de sólidos, sus cargas superficiales y polarisibilidad eléctrica de sus superficies.
2. Cantidad de sólidos presentes.
3. Concentración de iones de la fase líquida.

En el anexo F se presenta una guía para estimar los valores del punto de cedencia y viscosidad plástica para un lodo base agua basados en la densidad del lodo.

**Resistencia de gel:** El gel es una medida de las fuerzas atractivas estáticas mientras que el Yield point es una medida de las fuerzas atractivas dinámicas, cuando un lodo ha sido sometido a velocidades de corte de cero o vecinas a cero durante cierto tiempo, el fluido tiende a desarrollar una estructura de gel rígida o semirrígida. La magnitud de la gelificación, así como el tipo de resistencia de gel, son importantes para la suspensión de recortes y de material densificante. La gelificación no se debe dejar llegar a un punto más alto que el que se necesita para cumplir estas funciones. Las resistencias de geles excesivas pueden causar complicaciones como:

1. Retención de aire o de gas en el lodo.
2. Presiones excesivas cuando se rompe la circulación.
3. Reducción de la velocidad a la que se sedimentan la arena y los recortes en el tanque de sedimentación, de los que resulta una acumulación de sólidos.
4. Excesiva succión al sacar la tubería.
5. Excesiva sobrepresión al introducir la tubería.
6. Imposibilidad de hacer llegar las herramientas de toma de registros hasta el fondo.

**Pérdidas de filtrado:** la cantidad de filtrado que se pierde en las formaciones depende de la naturaleza de la formación a perforar. Las pérdidas de filtrado deben ser menores a 13 cc en 30 minutos según la prueba API de filtración. La

fase solida del líquido que se pierde crea una película alrededor del hueco llamada torta o cake, que ayuda a sostener las paredes del hueco, para que sea eficiente deber ser delgada, plástica y consistente. La pérdida de fluido es una de las propiedades del lodo con importancia fundamental en las operaciones de perforación o completamiento.

**pH:** El valor de pH del lodo depende de las características de las zonas a perforar y de los demás aditivos a usar, el lodo debe ser básico (mayor a 7) para evitar corrosión en las partes metálicas por donde circule. El controlador de pH más utilizado es la soda cáustica, esta propiedad se mide con el peachímetro.

**Contenido de sólidos:** para controlar y optimizar el contenido de sólidos en los lodos se realiza la prueba de retorta donde se determina el porcentaje en volumen de sólidos totales y de líquido.

Las propiedades del lodo se miden y evalúan permanentemente y durante toda la perforación de un pozo, los aditivos de un lodo base agua son principalmente: agua, viscosificantes, materiales pesantes, controladores de pH, controladores de pérdidas de filtrado, dispersantes, surfactantes, antiespumantes, inhibidores de corrosión, bactericidas entre otros.

**Efecto del contenido de sólidos:**

- La inestabilidad de un lodo aumenta a medida que el porcentaje de sólidos en volumen se eleva.
- El tratamiento químico puede incrementar la capacidad de un lodo para tolerar sólidos pero hasta cierto punto.
- Muchos problemas de los lodos son causados por el fracaso en controlar los sólidos en forma adecuada.
- Un sólido es deseable solo en el caso de que contribuya a las propiedades del lodo en gran proporción para que se justifique su presencia.

- A menor concentración de sólidos en el lodo, mayor es la velocidad de penetración
- Las partículas de arcilla y los sólidos perforados del tamaño de arcilla parecen ser particularmente perjudiciales para la velocidad de penetración.

En la tabla 2, se muestra la relación entre algunas de las funciones del fluido de perforación y las propiedades físicas.

**Tabla 2:** Funciones y propiedades físicas del fluido de perforación.

Función	Propiedad físico/química
Transporte de ripios del pozo	Punto de cedencia, viscosidad aparente, velocidad, esfuerzo de gel
Prevenir la entra de fluidos fluyendo en el pozo	Densidad
Mantener la estabilidad del pozo	Densidad, reactividad con arcillas
Enfriar y lubricar la broca	Densidad, velocidad
Transmitir potencia hidráulica a la broca	Velocidad, densidad, viscosidad

Fuente: Heriot Watt University, Drilling Engineering.

### 2.1.5 TIPOS DE LODOS COMERCIALES

A continuación se presenta una breve descripción de los lodos más comunes y que puede ser muy útil en el momento de seleccionar el fluido de perforación durante la perforación de un pozo<sup>7</sup>:

**Lodos de bentonita:** Son básicamente una suspensión de arcilla hidratada (bentonita) en agua y el fluido base es agua fresca o salobre, resultan económicos debido a que la viscosidad y las pérdidas de fluido se obtienen por la entrada de arcillas y lutitas de la formación al lodo, como consecuencia de lo

<sup>7</sup> RODRIGUEZ BERMUDEZ, Eliserio y ARIZA LEON, Emiliano. Guía de laboratorio de lodos y cementos. Capítulo 8. 50p. y MUÑOZ, Samuel. Tecnología avanzada de fluidos de perforación, 1992. 286p.

anterior, y la aceptabilidad ambiental de sus componentes desechar el lodo no es normalmente ningún problema. Estos lodos son de tipo dispersos-no inhibidos, su desventaja está en su alta sensibilidad a los contaminantes y la rápida entrada de sólidos cuando se perforan secciones de arcillas y lutitas dispersas. Estos lodos se usan para perforar arenas o areniscas.

**Lodos de inicio:** Son una modificación de los lodos de bentonita se usan para perforar las primeras secciones del pozo, caracterizadas por una alta velocidad de perforación, grandes diámetros, formaciones débiles y no consolidadas y bajas velocidades anulares. Los lodos de inicio son lodos no densificados altamente viscosos para satisfacer estas condiciones.

**Lodos base agua salada:** Se clasifican de acuerdo a la cantidad de sal presente y/o a la fuente del agua de constitución, se considera lodos saturados de sal cuando la cantidad de sal presente es 315.000 ppm o más, y lodos salados más de 10.000 ppm de sal, pero no saturados. Estos lodos pueden ser preparados a propósito para cumplir operaciones específicas o ser el resultado de la sal que existe en un agua de constitución (donde no se tenga disponibilidad de agua), la perforación un acuífero o domo salino. Los efectos que la sal ejerce sobre un lodo dependen de la cantidad de sal en el lodo, del tipo y el porcentaje de sólidos.

**Lodos no dispersos:** Un lodo de sólidos mínimos implica un lodo no disperso. Un lodo típico no disperso, de baja densidad, posee una reología invertida, es decir, caracterizada porque el punto de cedencia es igual o excede a la viscosidad plástica. El incremento de sólidos pueden espesar los lodos no dispersos hasta el punto en que se hace necesario añadir dispersantes. Un control continuo y efectivo de los sólidos es absolutamente esencial si se quiere mantener un lodo no disperso.

**Lodos dispersos:** Se denominan dispersos puesto que usan materiales dispersantes para corregir las propiedades como viscosidad y pérdidas de filtrado debido a la contaminación del lodo durante la perforación, la cual no es posible controlar con tratamiento químico o este se hace muy costoso. Los dispersantes aumentan la tolerancia de los lodos a los sólidos perforados y aumenta la cantidad de sólidos coloidales en el lodo. Este tipo de lodo posee una reología normal donde la viscosidad plástica es el triple del punto de cedencia y es utilizado en las operaciones de perforación según lo requieran las condiciones del lodo

**Lodos de lignosulfonato:** Se cree también que en altas concentraciones, el lignosulfonato tiene un efecto bloqueante que minimiza la reacción de intercambio de bases, en consecuencia, los lodos tratados con altas concentraciones de lignosulfonato crómico poseen cualidades inhibitorias las cuales tienden a mantener las arcillas de la formación en su condición natural. Los tratamientos con lignosulfonato de cromo proveen un excelente control de la reología del lodo así como estabilidad de las paredes del pozo. Estos lodos mantienen bajo pH y baja concentración de iones de calcio.

**Lodos con fosfatos:** Los dos fosfatos principales usados en el lodo de perforación son Pirofosfato Ácido de Sodio (SAPP), pH de 4,8 y Tetrafosfato de Sodio (STP o PHOS), pH de 8,0, estos fosfatos son potentes dispersantes no iónicos y sólo un tratamiento pequeño puede producir la máxima reducción de la viscosidad. La cantidad de producto de tratamiento para la simple dispersión casi nunca excede 0,2 *lb/bbl*. Los fosfatos son usados principalmente en lodos de bajo pH y lodos de perforación inicial. Los fosfatos reducen la viscosidad de dos maneras: neutralizan las fuerzas de atracción al ser adsorbidos en la superficie de los sólidos, y eliminan el calcio y el magnesio.

**Lodos de yeso-lignosulfonato:** Son una modificación de los lodos bentoníticos. La dispersión e hinchamiento de las arcillas son la base del lodo; los aditivos son

los mismos que los usados en los lodos de bentonita, este tipo de lodos exhibe alguna inhibición hacia los sólidos de arcilla perforados. Este lodo es relativamente insensible hacia los contaminantes, por ejemplo anhidrita, cemento y agua salina de formación. Estas características además de su bajo costo lo hacen ideal para perforación exploratoria.

**Lodos de calcio:** Son aquellos en los que se usa como fuente de calcio, la cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Estos lodos son usados para reducir los efectos de los gases ácidos  $\text{CO}_2$  o  $\text{H}_2\text{S}$  y/o reducir la hidratación de las arcillas de la formación. Como la cal tiene un pH alto (12,4), el pH del sistema será alto. El pH del sistema depende de la concentración de cal y soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ). Debido a su tendencia de solidificar a altas temperaturas, son rara vez usados si las temperaturas del yacimiento superan los  $275^\circ\text{F}$

- *Lodos de yeso:* Los lodos de yeso están diseñados para perforar la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y/o proporcionar inhibición durante la perforación de lutitas sensibles al agua, mediante el uso de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como fuente de calcio. Para mantener una cantidad suficiente de calcio soluble, el pH del sistema de lodo de yeso debería ser mantenido bajo (9 a 10,5).
- *Lodos de cloruro de calcio:* Los lodos de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) se denominan también lodos controladores de arcilla. Se emplean principalmente para perforar zonas de lutitas y arcillas esquistosas. Estos lodos son altamente inhibidos, capaces de mantener un alto contenido de cloruro de calcio soluble en el lodo, además permiten la estabilización de las paredes del hueco.

**Lodo polímero-KCl:** Son lodos no dispersos cuyas principales propiedades se obtienen mediante la adición de polímeros y no mediante arcillas dispersas, son lodos inhibidos usados para la perforación masiva de arcillas reactivas.

Estos lodos son más costosos que los anteriores y los requerimientos de material son relativamente altos; el agua base debe tratarse con el fin de disminuir su dureza debido a que esta afecta el polímero, el desecho del lodo no es conveniente debido a altos costos y a las limitaciones ambientales en algunas regiones.

**Lodos base aceite:** Un lodo base aceite no es más que una mezcla de sustancias con determinadas propiedades que se agregan a una emulsión en donde la fase dispersa corresponde al agua y la fase continua al aceite (petróleo crudo o diesel). Este tipo de lodos pueden aprovecharse para aumentar la velocidad de penetración, disminución de la torsión en la sarta de perforación, lubricación entre la sarta que rota y las paredes del hueco y disminución en la pérdida de filtrado debido al taponamiento que hacen los glóbulos aceitosos en los espacios porosos de la torta. Entre otras ventajas secundarias se cuentan la uniformidad del diámetro del pozo y la protección de la zona productiva (gracias a la disminución de la tensión superficial y reducción del filtrado).

*Elaboración:* La fabricación de este tipo de lodos se realiza mediante la conversión de un lodo base agua inicial. Al sistema original, que se debe encontrar en buenas condiciones de dispersión, se debe agregar una cantidad predeterminada de aceite (entre 1 y 2 lb/bbl) que se deben mezclar teniendo en cuenta una buena agitación para garantizar su homogenización, una vez terminado el proceso se deben revisar las nuevas propiedades reológicas y fisicoquímicas y realizar las correcciones que sean necesarias. Lo más probable después de una conversión es que la densidad disminuya y la viscosidad aumente, factores que pueden corregirse fácilmente con la adición de barita y agua, respectivamente.

## 2.1.6 CRITERIOS EN LA SELECCIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

La selección del fluido de perforación óptimo, para un conjunto dado de condiciones, es siempre el resultado de un estudio de los diferentes factores que influyen en el proceso. Algunos factores obvios son la litología o el tipo de fluidos de formación, pero existen otros factores menos tangibles que tienen un papel también muy importante a la hora de seleccionar el tipo de fluido. Debe cumplir los objetivos básicos de la perforación:

1. Perforar y completar adecuadamente el pozo a un costo mínimo.
2. Facilitar la adquisición eficiente de todos los datos tomados con registros.
3. Lograr completamientos con el mínimo de problemas.

Debe considerarse también el impacto ambiental causado por el uso del fluido, el costo del fluido de perforación y el impacto del fluido de perforación en la zona productora de hidrocarburos.

La selección del mejor fluido deberá mantener anticipadas las condiciones y minimizar los costos del pozo y el riesgo de catástrofes tales como pega de tuberías, pérdida de circulación e influjo de fluidos de la formación, ser adecuado para la evaluación de la formación y maximizar la productividad. Las consideraciones que se tienen en cuenta para seleccionar el lodo son<sup>8</sup>:

- **Localización:** La disponibilidad de suministros se debe considerar, las regulaciones estatales diseñadas para proteger el medio ambiente restringen la selección de lodos en algunos lugares, tales regulaciones fueron hechas para que el mantenimiento del lodo base aceite sea más costoso particularmente para pozos costa afuera.

---

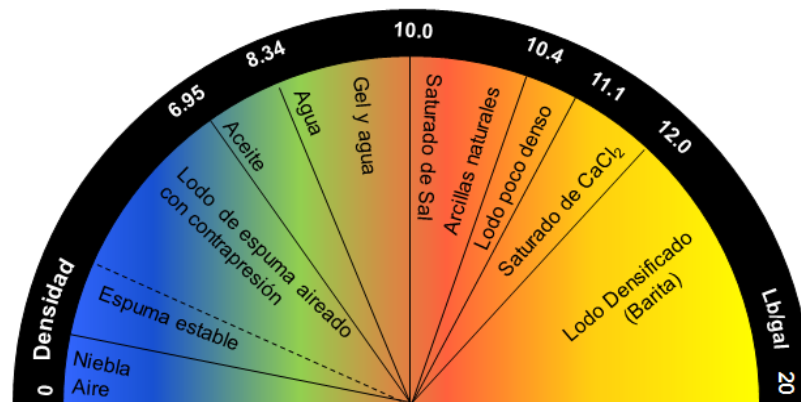
<sup>8</sup> DARLEY. Henry. C.H, and GRAY, George R. Composition and properties of drilling and completions fluids, 1988. 5a Edición. 654p.

- **Inhibición de arcillas:** secciones de shale que contengan arcillas reactivas o hinchables tales como montmorillonita causan rápidos incrementos en la viscosidad por incorporaciones de sólidos perforados en el lodo y además puede reducir el diámetro efectivo del hueco. Los sólidos perforados, pueden ser removidos mecánicamente pero la presencia de barita complica el proceso, un lodo inhibidor de arcillas es recomendado.
- **Formaciones geopresionadas:** Las formaciones someras son normalmente presionadas y pueden ser perforadas con lodos de baja densidad, cuando se encuentran formaciones geopresionadas la densidad del lodo debe incrementarse hasta que la presión de la columna de lodo exceda la presión de poro de la formación con un cierto margen de seguridad, evitando incrementar los costos, riesgo de pega de tubería y pérdidas de circulación y logrando que la viscosidad y el esfuerzo de gel se mantengan tan bajos como sean posibles para evitar suabeo del pozo cuando se saca la tubería. Cuando se usa un lodo de 14 *lpg* se recomienda que tolere un alto contenido de sólidos como un lodo inhibido o un lodo base aceite.
- **Altas temperaturas:** Los constituyentes de los lodos de perforación se degradan con el tiempo a elevadas temperaturas, a mayor temperatura mayor tasa de degradación. La temperatura crítica a la cual el costo de reemplazar el material degradado no es económico puede ser calculada.
- **Inestabilidad del hueco:** Existen dos formas básicas de inestabilidad del hueco son: *contracción del hueco*, si los esfuerzos laterales de la tierra que soportan las paredes del pozo exceden la resistencia al paso de la formación, el hueco poco a poco se contrae en casos severos se produce pega de tubería, únicamente puede prevenirse mediante el incremento de la densidad del lodo para balancear los esfuerzos de la formación. *Dilatación del hueco*, “sensibilidad al agua”. El ensanchamiento únicamente se previene por el uso de lodos inhibidos, los lodos de emulsiones invertidas de aceite son los mejores para la estabilización

del shale, además proporcionando salinidad a la fase acuosa lo bastante para balancear la presión de hinchamiento de los shales. Lodos de cal y de yeso o modificaciones de los mismos son alternativas disponibles.

- **Fluidos de perforación ligeros:** Las características de los fluidos de perforación ligeros son baja densidad y viscosidad y bajo contenido de sólidos. Salmueras limpias puede ser usada para perforar rocas fuertes, considerando su pobre capacidad de arrastre de recortes de perforación. Los lodos no dispersos y los lodos de potasio usan sales solubles como agentes densificantes para perforar en rocas duras y shales no dispersos, pero el contenido de sólidos debe estar mantenido por debajo del 10% mediante remoción mecánica. Debido a su alta viscosidad, los lodos base aceite estándar no permiten unas tasas de perforación altas. El rango de densidades de los fluidos de perforación se muestra en la figura 3:

**Figura 3:** Rango de densidades de los fluidos de perforación



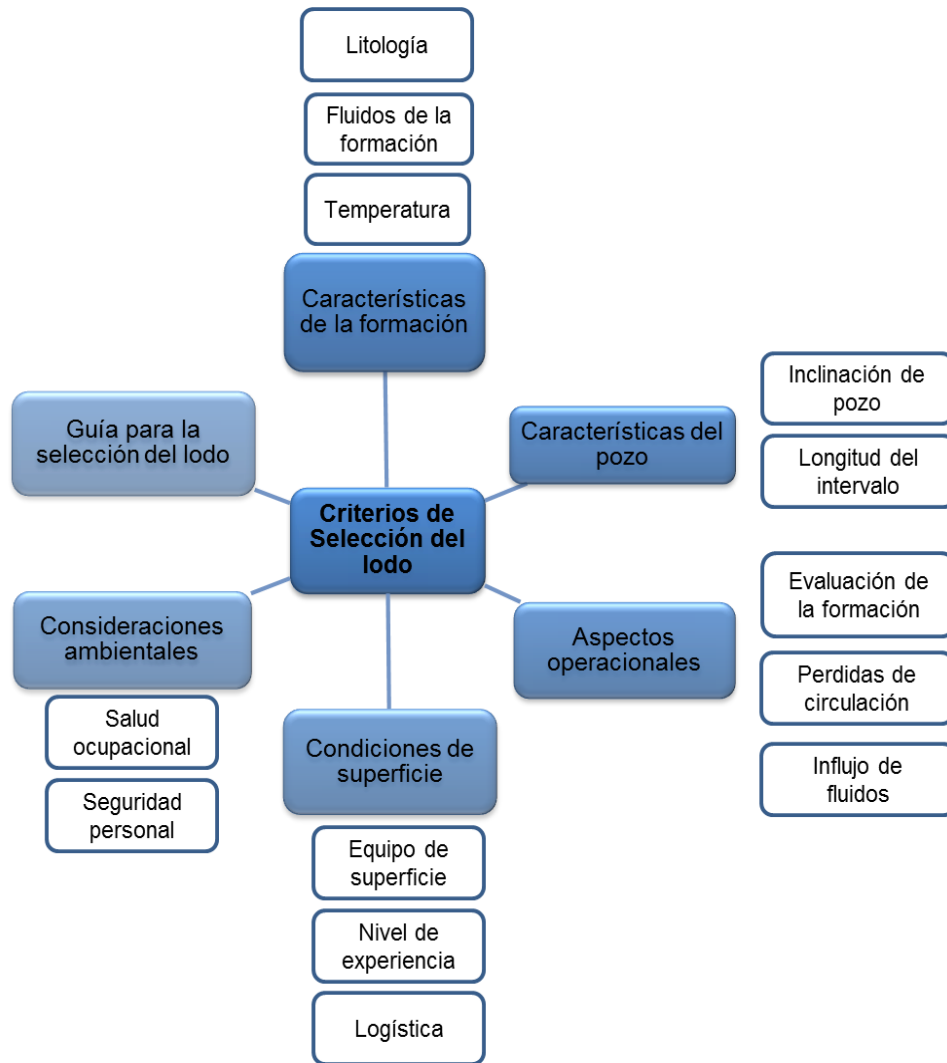
Fuente: Composition and properties of drilling and completion fluids, Darley and Gray.

- **Rocas de sal:** Para prevenir la disolución de la sal y en consecuencia el ensanchamiento del pozo, debe usarse un lodo base aceite o un lodo saturado de sal. La composición química de la salmuera debería ser aproximada a la del domo de sal. Como se mencionó previamente densidades altas son esenciales para domos de sal profundos.

- **Pozos de alto ángulo:** En pozos altamente desviados, tales como los perforados desde plataformas costa afuera, torque y arrastre son un problema porque la tubería tiende a irse a un lado del pozo y el riesgo de que ocurra pegue de tubería es alto, entonces el costo de un lodo base aceite puede ser justificado para estos pozos. Si se usa lodo base agua se requieren reductores de fricción para que se mantengas buenas propiedades de filtrado.
- La limpieza del hueco es un problema en pozos altamente desviados porque los ripios de perforar tienden a caer al lado bajo del pozo. Se recomienda un lodo con una relación YP/PV alta.
- **Evaluación de formación:** Algunas veces el lodo que resulta más apropiado para la perforación no es el mejor para tomar registros, los lodos base aceite son excelentes para mantener la estabilidad del pozo pero no son conductivos, este criterio no es problemas en pozos desarrollados pero si en pozos exploratorios donde no se tienen pozos previamente perforados disponibles para correlacionar.
- **Deterioro de la productividad:** La dispersión de arcillas deberá evitarse, deterioro por presencia de sólidos en el lodo es insignificante cuando la perforación a través del yacimiento es hecha con el mismo lodo que ha sido usado para perforar la parte superior del pozo, porque contendrá suficientes partículas para hacer puente entre los poros de la formación y establecer una película de filtrado rápidamente. Es necesario realizar pruebas de laboratorio en núcleos de un nuevo yacimiento para determinar sus características y el mejor completamiento para prevenir su deterioro.

En la figura 4 se presentan los criterios de selección generales del fluido de perforación.

**Figura 4:** Criterios de selección del fluido de perforación



Fuente: Composition and properties of drilling and completion fluids, Darley and Gray

### 2.1.7 CARACTERÍSTICAS DE UN PROGRAMA DE LODOS

En la tabla 3 se presenta las características del programa del fluido de perforación de acuerdo a la fase ya sea inicial, intermedia o final.

**Tabla 3:** Características del programa de un fluido de perforación.

Características	Fase		
	Inicial	Intermedia	Final
<b>Principales Problemas</b>	Limpieza del pozo Pérdidas	Gradientes Reactividad	Daño a la formación
<b>Densidad</b>	Mínima para evitar pérdidas	Mayor que la del gradiente de poro y/o de colapso y menor que el de fractura	Tan baja como sea posible y compatible con el gradiente de poro y/o colapso y menor que el de fractura
<b>Viscosidad Plástica</b>	Este valor depende de la densidad y el tipo de fluido. Mantener la densidad tan baja como sea posible (en términos económicos y técnicos)		
<b>Punto de cedencia</b>	Suficientemente alto para garantizar la limpieza del pozo, pero no tan alto para limitar la remoción de sólidos.	Los mismos parámetros de la fase inicial.	Los mismos parámetros de la fase inicial.
<b>Torta</b>	Adecuada para sostener formaciones no consolidadas	Lo más bajo posible	En lo posible que evite menores daños
<b>% de sólidos</b>	Depende del sistema escogido	Depende del sistema escogido cada uno tiene su propio valor de tolerancia	
<b>pH</b>	8 < pH < 12+. Valor mínimo de 8 reduce la corrosión, otros valores dependen del sistema de fluido seleccionado.		
<b>Características Químicas</b>		Depende del fluido de perforación escogido.	Compatible con los fluidos y shales de la formación.

Fuente: Modificado. Tecnología avanzada de fluidos de perforación. MUÑOZ, Samuel Fernando, 1992. 286p.

## **2.2 BROCAS DE PERFORACIÓN**

Perforar un pozo de gas o aceite persigue un objetivo principal que será suministrar un conducto, del yacimiento a superficie que permita retirar con carácter comercial los fluidos del yacimiento, todos los pozos perforados deberán proporcionar información geológica con el propósito de explotar racionalmente el yacimiento y evaluar y descubrir nuevos recursos.

### **2.2.1 DEFINICIÓN**

La broca es la herramienta de corte que se localiza en el extremo inferior de la sarta de perforación (enganchada en el extremo inferior del drill collar) y se utiliza para cortar o triturar la formación durante la perforación, su correcta selección y las condiciones óptimas de operación son las dos premisas esenciales para lograr el éxito en el proceso de perforación. El tipo de broca que deberá usarse en cualquier momento se rige principalmente por las características de la roca que se va a perforar y las condiciones bajo las cuales esto debe hacerse.

La selección de las brocas de perforación es un aspecto crucial para la operación de todos los proyectos de perforación, entender los diferentes tipos de brocas y sus respectivas aplicaciones es un pre requisito para hacer la selección de brocas; dado que la tecnología de brocas sigue mejorando a un paso rápido, los supervisores de pozos deben estar actualizados acerca de los últimos avances para asegurar que hacen la selección óptima de brocas.

#### **Efecto de las propiedades de las rocas:**

La dureza de la roca es un factor que determina la velocidad de desgaste en los dientes de la broca y las partículas de roca perforada pueden entrar a los cojinetes afectando la velocidad de desgaste de estos. La dureza de las pequeñas

partículas de roca en el lodo, junto con el peso que debe ejercerse en la broca afecta el tiempo que la broca podrá girarse en el fondo.

Las brocas se pueden correr hasta que el desgaste de los dientes sea liso al perforar rocas como calizas duras y la velocidad de perforación puede continuar siendo satisfactoria cuando la broca está en esta condición si se le aplica peso suficiente, la broca deberá sacarse y reponerse antes de que ocurran fallas por cojinetes, porque esa falla dejaría parte de los cortadores y de los cojinetes en el fondo originando la necesidad de realizar un trabajo de pesca.

### 2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN

En la figura 5 se presenta un esquema con la clasificación general de las brocas de perforación <sup>9</sup> y en la figura 6 los tipos de brocas disponibles en el mercado <sup>10</sup>.

**Figura 5:** Clasificación de las brocas de perforación



Fuente: Selección de barrenas en el proceso de construcción de pozos. Schlumberger.

<sup>9</sup> OILWELL DRILLING. Volume 4. Mud circulation and treating Equipment

<sup>10</sup> SCHLUMBERGER. Manual 04. Sistema circulante de fluidos. 26p

**Figura 6:** Tipos de brocas de perforación



- |                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1. Diamante natural.    | 4. PDC.                       |
| 2. Diamante impregnado. | 5. Conos de rodillos-Insertos |
| 3. TSP.                 | 6. Conos de rodillos-Dentados |

Fuente: Drilling & Measurements. Drill Bits Schlumberger.

### 2.2.3 MECANISMOS DE FALLA Y TIPO DE BROCA

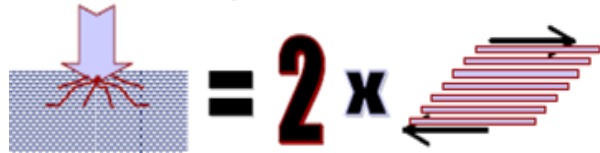
**Tabla 4:** Mecanismos de falla y estructura de corte.

Mecanismo	Esfuerzos	Estructura de corte
Rayado y raspado		-Cono dentado
Cinzelado y triturado	 Esfuerzo de compresión	-Inserto
Cizallamiento	 Esfuerzo cortante	-PDC
Surcos	 Esfuerzo cortante/compresión	-Diamante Natural
Molienda	Trituramiento y abrasión continuos	-Diamante Impregnado -Diamante TSP

Fuente: Modificado de selección de barrenas en el proceso de construcción de pozos. Schlumberger

**Resistencia de la roca:** presenta resistencia a los esfuerzos cortantes y a los esfuerzos de compresión, cuya relación se presenta en la figura 7.

**Figura 7:** El esfuerzo por compresión equivale al doble del esfuerzo cortante



Fuente: Selección de barrenas en el proceso de construcción de pozos. Bits Schlumberger

#### 2.2.4 BROCAS DE CORTADORES FIJOS

**Mecanismo de corte:** Para realizar la perforación, las brocas de cortadores fijos funcionan con base en dos principios: fallar la roca venciendo sus esfuerzos de corte y de compresión. El principio de ataque se realiza mediante la incrustación de sus dientes en la formación y posteriormente en el corte de la roca al desplazarse dentro de ella. La forma de ataque dependerá del tipo y características de la roca, principalmente su dureza.

**Características principales:** Tienen un diseño muy elemental, carecen de partes móviles, normalmente el cuerpo puede ser de acero o de carburo de tungsteno (matriz) o de una combinación. El diamante utilizado puede ser natural o sintético, según el tipo y características de la misma. La dureza extrema y la alta conductividad térmica del diamante lo hacen un material con alta resistencia para perforar en formación duras y semiduras. Las brocas de diamante excepto las PDC, no usan toberas para circular el fluido de perforación, su diseño es tal que el fluido de perforación puede pasar a través del centro de la misma, alrededor de la cara de la broca y entre los diamantes por unos canales llamados vías de agua o de circulación.

1. **Brocas de diamante natural:** El tipo de flujo es radial y el tipo de cortadores es de diamante natural incrustado en el cuerpo de la broca con diferentes diseños. El mecanismo de corte es por fricción y arrastre. Se usa para casos especiales de formaciones duras, cortar núcleos de formación o como brocas desviadoras en pozos con formaciones muy duras y abrasivas, entre más dura y abrasiva es la formación más pequeño será el diamante.
  
2. **Brocas de diamante impregnado:** Perforan formaciones de mayor dureza, la acción cortante es igual a las PDC, pero el tamaño de los diamantes permite que pequeñas cantidades de roca sean removidas por cada diamante.
  
3. **Brocas de diamante térmicamente estables (TSP):** Son más utilizadas para perforar rocas duras como caliza dura, basalto y arenas finas. Son más usadas que las de diamante natural. Se caracteriza por usar un diamante sintético de forma triangular, la densidad, el tamaño y la forma del grano son característicos de cada fabricante.

**Figura 8:** Vista lateral y frontal de los tipos de broca de diamante



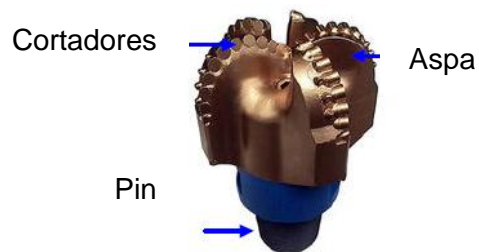
Fuente: Drilling & Measurements. Drill Bits Schlumberger.

4. **Brocas de compacto de diamante policristalino (PDC):** El diseño de los cortadores está hecho con diamante sintético en forma de pastillas (compacto de diamante). A diferencia de las brocas de diamante natural y TSP, su diseño hidráulico se realiza con sistemas de toberas de lodos, al igual que las brocas

tricónicas. Por su diseño y características las brocas PDC cuentan con una gran gama de tipos y fabricantes, especiales para cada formación, desde muy suaves hasta muy duras. Pueden ser rotadas a altas velocidades, utilizadas con turbinas y motores de fondo y con diferentes pesos sobre la broca. Por su versatilidad son muy utilizadas.

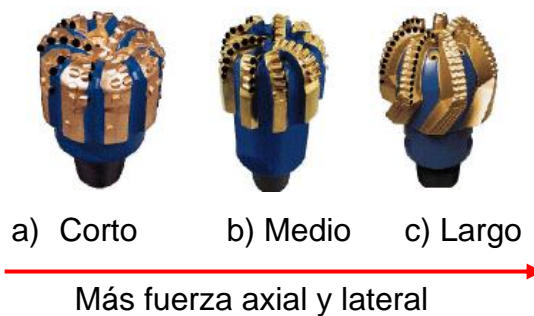
El compacto de diamante policristalino consiste en una capa de diamante fijado a un sustrato de carburo de tungsteno para formar el cortador completo.

**Figura 9:** Partes generales de la broca PDC



Fuente: Drilling & Measurements. Drill Bits Schlumberger

**Figura 10:** Perfiles de brocas PDC



Fuente: Drilling & Measurements. Drill Bits Schlumberger

Existen 5 tamaños de cortadores en brocas PDC que van desde 8 mm hasta 19 mm<sup>11</sup>, a mayor longitud aumenta la velocidad de perforación y RPM permitido y

<sup>11</sup> SCHLUMBERGER. Drilling and measurements 2001. Drill Bits. 89p.

disminuye la abrasividad de la roca, la longitud de la broca PDC es importante en el caso de que:

- Se planee un pozo de radio corto.
- Si se necesita un motor de fondo cercano a la broca.
- Si se necesita estabilizar la broca.
- Se planeen pozos horizontales y direccionales.

### **2.2.5 BROCAS DE CONOS DE RODILLOS**

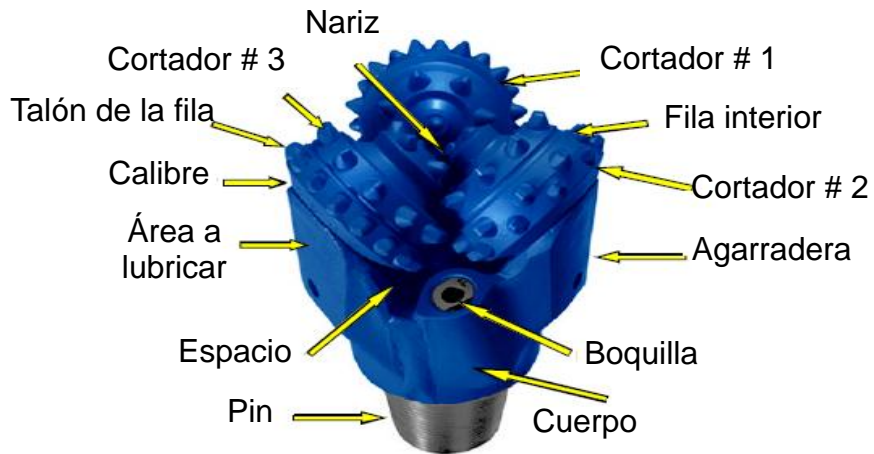
**Mecanismo de corte:** El principal mecanismo de ataque de este tipo de brocas es de trituración por impacto fallando la roca por compresión.

**Características principales:** Usualmente tienen 3 conos de igual tamaño y tres patas idénticas las cuales están unidas con un pin de conexión. Cada cono es montado en cojinetes los cuales forman parte de la pierna de la broca. Las 3 piernas son soldadas junto a sección de forma cilíndrica la cual es enroscada con una conexión pin, esta conexión constituye un medio de fijación con la sarta de perforación.

Cada pierna tiene una abertura para la circulación del fluido, el tamaño de esta puede ser reducido por la adición de las boquillas de diferentes tamaños. Las boquillas se encargan de estrangular el flujo para obtener a alta velocidad del chorro para un funcionamiento eficiente de la broca y limpieza del hueco.

El lodo bombeado a través de la sarta de perforación pasa a través del pin y a través de las 3 boquillas, cada una de estas con la tercera parte del fluido si son del mismo tamaño.

**Figura 11:** Partes externas de una broca de conos de rodillos



Fuente: Drilling & Measurements. Drill Bits Schlumberger

Existen dos tipos de brocas de conos de rodillos. Hay brocas con dientes y otros con insertos:

- 5. Insertos de carburo de tungsteno:** La estructura de corte es una serie de insertos apretados en los conos. Otras denominaciones: Carbide Bits.
- 6. Dientes maquinados:** La estructura de corte es elaborada del acero del cono. Otras denominaciones son: Tooth Bits, Steel Tooth Bits o Mill Tooth Bits.

**Figura 12:** Brocas de conos de rodillos



Fuente: Drilling & Measurements. Drill Bits Schlumberger

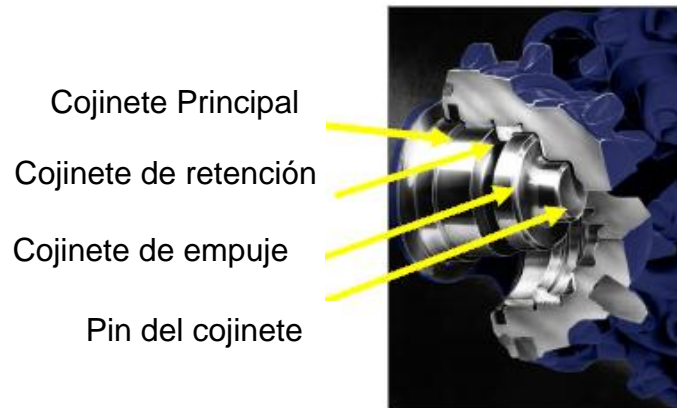
**Figura 13:** Tamaños de cortadores.



Fuente: Selección de barrenas en el proceso de construcción de pozos. Bits Schlumberger

En las brocas de conos de rodillo hay 4 cojinetes principales<sup>12</sup>:

**Figura 14:** Cojinetes principales



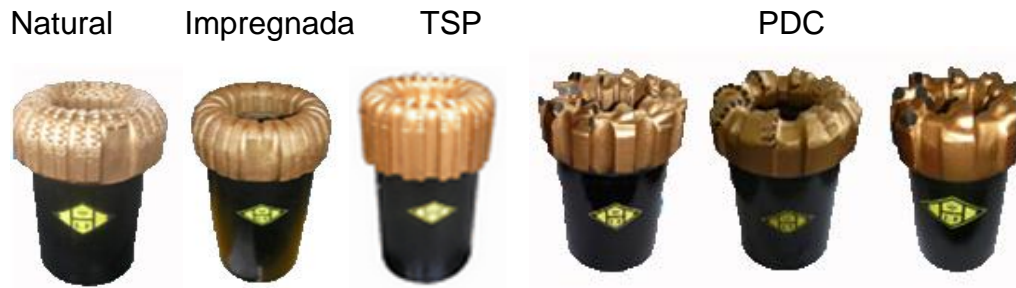
Fuente: Drilling and measurements. Drill Bits-Schlumberger.

## 2.2.6 BROCAS CORAZONADORAS

Se caracterizan por tener un agujero en la parte central, para adaptar el equipo que recolecte la muestra o corazón, de forma cilíndrica y poderlo traerlo a superficie.

<sup>12</sup> SCHLUMBERGER. Drilling and measurements 2001. Drill Bits. 89p

**Figura 15:** Brocas corazonadoras.



Fuente: Chengdu Huilingfeng Diamond Bit Co. Ltd.

En la tabla 5 se presenta una guía general de brocas corazonadoras según el tipo de roca que se va a perforar.

**Tabla 5:** Guía general de brocas corazonadoras.

Propiedad de la roca	Tipo de roca	Tipo de broca corazonadora
<b>Ultra-dura</b>	Rocas Ígneas-Cuarcita	Diamante Natural Impregnado
<b>Dura abrasiva</b>	Arenisca-Esquisto- Aluvión	Dia. naturales en cortadores -TSP
<b>Dura no abrasiva</b>	Caliza-Dolomita-Anhidrita	TSP
<b>Medio dura</b>	Arenisca –Caliza- Esquisto	Dia. naturales en cortadores -TSP
<b>Blanda a mediana</b>	Arenisca-Yeso-Esquisto	PDC
<b>Blanda no pegajosa</b>	Sal-Anhidrita-Esquisto	PDC ó Conos giratorios
<b>Blanda pegajosa</b>	Suelo Arcilloso	PDC (descarga frontal)

Fuente: Tomado de la Norma API R40. Planeación de un programa de corazonamiento.

Normalmente una broca corazonadora es una broca de cortadores fijos de PDC o de diamante. Tiene un hueco en el medio. Esta abertura permite que la broca

obtenga el corazón. Los diamantes y cortadores se encuentran alrededor de la abertura y a los lados de la broca.

## **2.2.7 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE BROCAS**

### **2.2.7.1 CODIGO IADC**

#### **CODIGO IADC PARA BROCAS DE CONOS DE RODILLOS**

Para evitar confusión entre los diferentes tipos de brocas equivalentes con relación a sus distintos fabricantes, la Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC) ha desarrollado un sistema estandarizado para clasificar las brocas de conos de rodillos de acuerdo a:

- Tipo de diente (acero o inserto)
- El tipo de formación (en términos de serie y tipo)
- La características mecánicas
- Características disponibles.

El sistema de clasificación permite hacer comparaciones entre los tipos de brocas que ofrecen los fabricantes. Este sistema consta de un código que tiene 3 dígitos.

**Primer dígito:** Identifica el tipo de estructura de corte y también el diseño de la estructura de corte con respecto al tipo de formación.

**Segundo dígito:** Identifica el grado de dureza de la formación en la cual se usará la broca y varía de suave a dura dentro de la misma serie como se indica:

1. Para formación suave.
2. Para formación media suave.

3. Para media dura.
4. Para formación dura.

**Tercer dígito:** Identifica el sistema de rodamiento y lubricación de la broca.

**Letra:** Es opcional se refiere a las características disponibles.

*Ejemplo:* 517G (Broca de conos de rodillos de insertos de tungsteno para formaciones suaves a medias (dentro de ésta la más blanda), con sello de fricción y calibre protegido, característica opcional: protección del cuerpo de la broca o del calibre).

## **CODIGO IADC PARA BROCAS DE CORTADORES FIJOS**

La IADC desarrolló el código para las brocas de cortadores fijos que consta de 4 caracteres (una letra y 3 números) que describen las siete características básicas:

**Letra:** Material del cuerpo de la broca (Acero o matriz).

**Primer dígito:** Densidad del cortador

**Segundo dígito:** tipo y tamaño del cortador

**Tercer dígito:** Perfil de la broca

*Ejemplo:* M432 (Broca de cortadores fijos, material del cuerpo: matriz, según la densidad del cortador es una broca PDC, de 8 a 14mm el tamaño del cortador y con perfil plano).

El código IADC para cortadores de conos de rodillos y de cortadores fijos se encuentra en el anexo B, una guía completa de cortadores según el tipo de broca y la dureza de la formación se presenta en el anexo C. Algunas especificaciones de brocas (ventajas y desventajas) se presentan en el anexo D.

### 2.2.7.2 ASPECTOS IMPORTANTES A CONSIDERAR

La selección de la broca comienza con un examen detallado de los registros de brocas obtenidos como datos de otros pozos. Los desempeños de éstas y la clasificación de las formaciones deben ser considerados en el diseño examinando y analizando para determinar las mejores características de las brocas para obtener buenos resultados. Debe considerarse detalles de la broca, como la falla prematura, razones por las cuales se han sacado de uso, las características de los insertos: si los insertos están desgastados o rotos, etc. Una broca con sus insertos rotos indica que la formación debe haber sido perforada con una broca mucho más fuerte.

Para el proceso de selección de brocas es fundamental conocer los objetivos de la perforación. Los principales aspectos que se deben tomar en cuenta para la selección de brocas son<sup>13</sup>:

- **Rendimiento de la broca:** Significa perforar el pozo en el menor tiempo posible (mayor cantidad de pies en un tiempo de rotación aceptable).
- **Trayectoria del pozo (vertical o direccional):** En pozos direccionales las brocas de diamante tiene una ventaja específica sobre las tricónicas debido a su gran alcance y sus posibilidades de perforar en sentido horizontal.
- **Economía:** el factor económico es fundamental para la selección de las brocas.
- **Litología:** La información geológica para determinar la mejor selección de brocas. Tipo de roca, dureza, homogeneidad, fracturas etc.

---

<sup>13</sup> LOPEZ VALDEZ, Israel. Elementos de perforación

- **Registro de Brocas:** Un análisis objetivo de los pozos de correlación ofrece la oportunidad de comprender las condiciones en el fondo del pozo, las limitaciones de su perforación y en muchos casos la adecuada selección de brocas.
- **Fluidos de perforación:** el tipo y la calidad del fluido de perforación utilizado tiene un importante efecto en el rendimiento de la broca. Lodos base aceite mejoran el rendimiento (PDC).
- **Hidráulica:** La hidráulica proporciona el enfriamiento y limpieza de la broca. El análisis histórico mostrará los parámetros utilizados y que oportunidades existen para una mejor utilización.
- **Coefficiente de penetración:** Indicador de la dureza de la roca, una selección inadecuada de la broca puede ocultar las características reales de la dureza.
- **Costos:** la broca de tener las cuales que satisfagan las necesidades de aplicación al menor costo.
- **Límites de peso sobre la broca:** las brocas PDC tiene posibilidades de ofrecer un mayor ritmo de penetración que una de conos de rodillos.
- **Escala RPM:** cuando se aplica alta velocidad de rotación a la broca, la broca de diamantes no ofrece mayor resistencia que la de conos de rodillos.
- **Formaciones nodulares:** en formaciones como pirita y conglomerados las brocas de conos de rodillos son más efectivas que las de diamantes.
- **Ampliación:** cuando se requiere la ampliación de un intervalo cuya duración es mayor de 2 horas se deben considerar brocas de conos de rodillos.

- **Pozos profundos:** se debe considerar una broca de diamante que ofrezca mayor duración (menos viajes).
- **Motor de fondo:** Los motores de fondo funcionan con altas RPM por lo que se recomienda utilizar brocas de diamante.

### 2.3 BOMBAS DE LODOS

La función principal las bombas de circulación es enviar determinado volumen del fluido a presión, hasta el fondo del hueco, vía el circuito descendente formado por tubería de descarga de la bomba, tubo vertical, manguera, junta rotatoria, junta Kelly, sarta de perforación y broca para ascender a la superficie por el espacio anular creado por la pared del hueco y perímetro exterior de la sarta de perforación.

Generalmente, dos bombas de lodo están instaladas en el taladro. Para los grandes diámetros de hueco utilizados en las porciones someras del hueco, ambas bombas pueden ser operadas en paralelo para suministrar los altos caudales requeridos. En las porciones más profundas, sólo se necesita una bomba, y la otra sirve de apoyo cuando se realice mantenimiento a una.

El producto de las pérdidas de la presión de circulación y la tasa de flujo a través del sistema es igual a la potencia hidráulica que las bombas de lodo deben entregar las unidades en que se reporta es en caballos de fuerza o horse power, se calcula así:

$$HHP_{sup}(hp) = \frac{P_{sup}(psi) * Q(gpm)}{1714}$$

Donde:

$HHP_{sup}$ : Potencia hidráulica en superficie.

$P_{sup}$ : Es la presión total de descarga la cual es algunas veces limitada por razones operacionales y arara vez excede los 3500 psi.

$Q$ : Es la tasa de flujo determinada por el cilindro de la bomba y la velocidad de bombeo.

Potencia de la bomba triplex o dúplex:

$$HHP_{bomba}(hp) = \frac{HHP_{sup}(hp)}{0,95 \text{ ó } 0,85}$$

Eficiencia volumétrica para bombas triplex es de 97 a 98%<sup>14</sup>. Especificaciones de bombas se encuentran en el anexo G. La potencia requerida de los motores para garantizar que se cumpla con la potencia hidráulica en superficie, se usa una eficiencia de 0,85 y como factor de seguridad 0,85 por servicio continuo así<sup>15</sup>:

$$HHP_{motor}(hp) = \frac{HHP_{bomba}(hp)}{0,85 * 0,85}$$

Las bombas de lodo están clasificadas en términos de potencia hidráulica que son capaces de generar las de 1600  $hp$  son las más comunes en los taladros de perforación modernos. Altas presiones y tasas de flujo requieren más potencia y por lo tanto se incrementan los costos.

### 2.3.1 TIPOS DE BOMBAS

Hay dos tipos de bombas de lodo la tipo dúplex y triplex<sup>16</sup>:

---

<sup>14</sup> SCHLUMBERGER. Manual 04. Sistema circulante de fluidos. 26p

<sup>15</sup> MOLERO, Jairo. Planificación de la perforación de pozos y selección de taladro, 2009

<sup>16</sup> OILWELL DRILLING. Volume 4. Mud circulation and treating Equipment.

**2.3.1.1 Dúplex:** dos pistones de doble acción. Son aquellas que poseen dos cilindros y envían fluido a gran presión en dos sentidos tanto de ida y vuelta.

Rendimiento: 
$$Q(\text{gal/stroke}) = 0,0068 * (2D^2 - d^2) * L$$

**2.3.1.2 Triplex:** tres pistones de acción simple. Son bombas que tienen 3 cilindros y evacuan el fluido a gran presión en un solo sentido. Son más ligeras y compactas y más fáciles de operar.

Rendimiento: 
$$Q(\text{gal/stroke}) = 0,0102 * D^2 * L$$

$Q$  : Tasa de flujo o gasto por Stroke.

$D$ : Diámetro de la camisa (*in*)

$d$ : Diámetro del vástago (*in*)

$L$ : Longitud de la embolada (*in*)

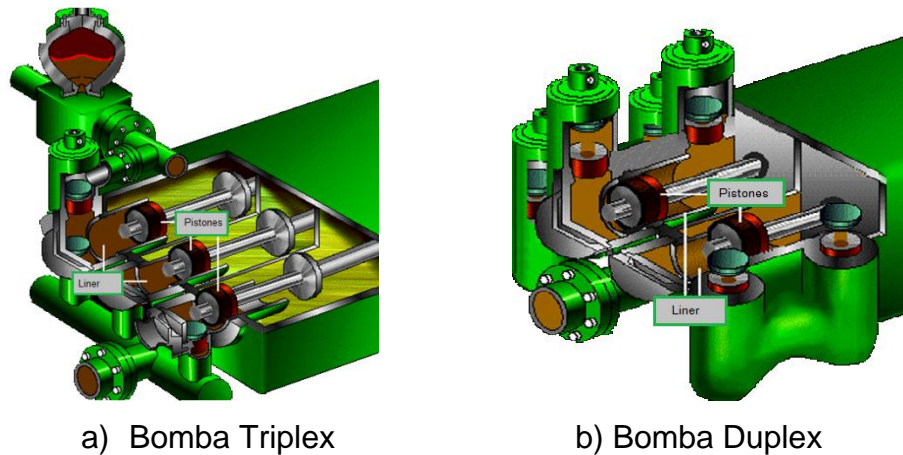
$EB$ : Eficiencia de la bomba.

Galonaje entregado por la bomba:

$$Q(\text{gal/min}) = Q(\text{gal/stroke}) * SPM * Ef_{volumetrica}$$

En la figura 16 se presentan los esquemas de los tipos de bombas.

**Figura 16:** Tipos de bombas de lodos.



Fuente: Tomado de Oil Well-Mud circulation and treating Equipment

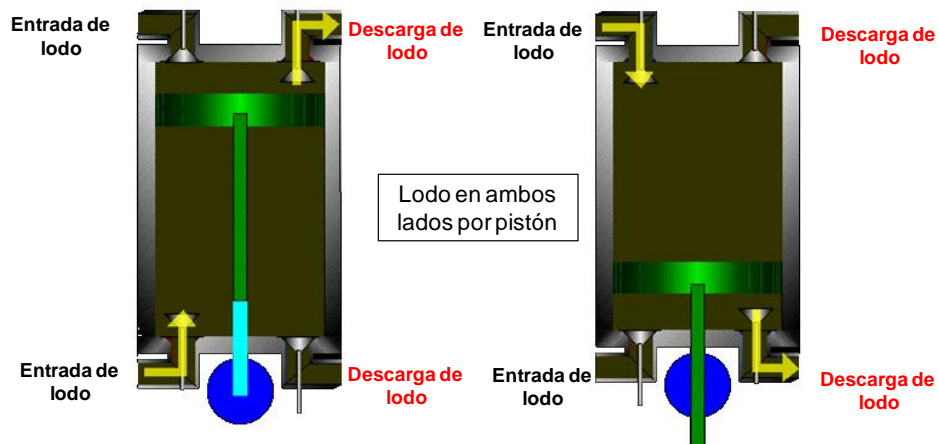
### 2.3.2 CARACTERÍSTICAS Y CAPACIDAD DE OPERACIÓN

Las bombas se identifican por sus características y su capacidad de operación. De cada bomba se debe conocer:

- Potencia máxima de operación  $HHP_t máx$  (hp)
- Presión de descarga:  $P_t$  (psi)
- Longitud de la embolada:  $L$  (in)
- Emboladas por unidad de tiempo:  $spm$
- Diámetro máximo de la camisa:  $D_{máx}$  (in)
- Diámetro del vástago para bombas dúplex:  $d$  (in)

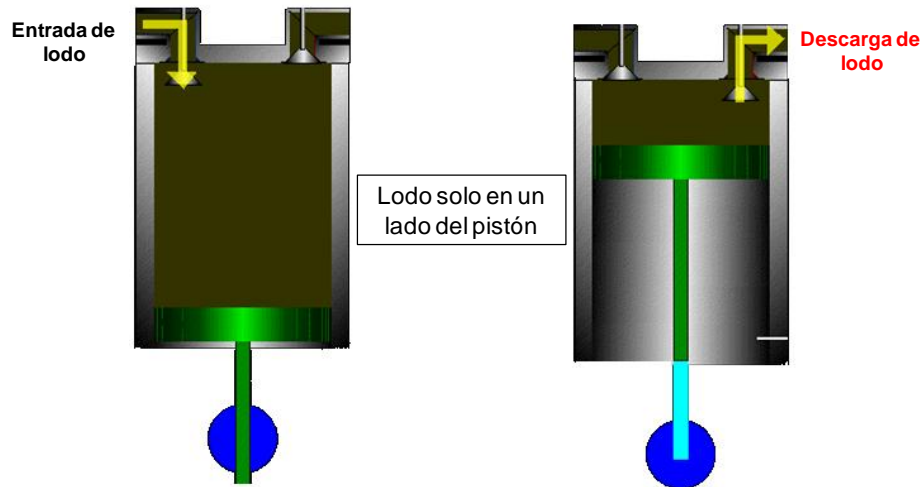
En la figura 17 se presenta el principio de operación de la bomba dúplex y en la figura 18 el de la bomba triplex, indicando la entrada de lodo y la descarga de lodo. En el caso de la bomba dúplex por ambos lados del pistón y en el de la bomba triplex por un solo lado del pistón.

**Figura 17:** Operación de la bomba dúplex



Fuente: Tomado de Taranaki Drilling School. Oil well Drilling 4. Mud Circulation and Treating Equipment:

**Figura 18:** Operación de la bomba triplex



Fuente: Tomado de Oil Well-Mud circulation and treating Equipment

El rendimiento o caudal de la bomba (volumen que puede impulsar la bomba por unidad de tiempo, en gpm), es ajustable a los requerimientos del pozo, variando:

- Emboladas por minuto. *spm*
- Diámetro de la camisa:  $D$  (in)
- Longitud de la embolada:  $L$ (in).

Durante la perforación se trabajará con un gasto óptimo, diseñado para alcanzar la mejor efectividad de penetración de la barrena. Limitado por:

- Caudal mínimo, función de velocidad min. de ascenso del fluido.
- Caudal máximo, dado por condiciones de operación de la bomba.

## 2.4 TANQUES

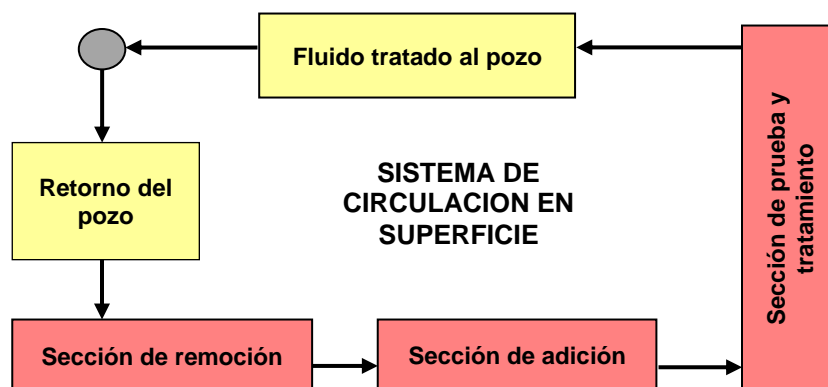
El propósito del equipo de perforación de superficie en el procesamiento del fluido de perforación es proveer un volumen apropiado y suficiente para el tratar el fluido

de perforación y las operaciones implicadas en la perforación de un pozo. El sistema activo deberá tener un volumen suficiente por encima del de succión y el de las líneas de ecualización para mantener el pozo lleno de fluido durante los viajes. El sistema de superficie necesita tener la capacidad de mantener el volumen apropiado de fluido durante la perforación, por otro lado la planificación anticipada y reserva de lodo premezclado debe ser considerada. El sistema de superficie consiste en 3 secciones claramente identificables<sup>17</sup>:

1. Sección de prueba y succión.
2. Sección de aditivos.
3. Sección de remoción.

La función del sistema de tanques interconectados es mantener, tratar o mezclar fluidos para circulación, almacenamiento o bombeo. Se debe determinar el volumen de los tanques para cada trabajo en particular y se debe contar con suficientes tanques de reserva. En la figura 19 se presenta un esquema que presenta en superficie las secciones de tratamiento necesarias para enviar el fluido tratado al pozo.

**Figura 19:** Sistema de circulación en superficie



Fuente: ELSEVIER. Drilling Fluids Processing Handbook

<sup>17</sup> ELSEVIER. Drilling Fluids Processing Handbook. 2005. 693p.

### 2.4.1 Tipos de tanques

En esta sección básicamente se presentan las geometrías de los tanques más comunes, el concepto de capacidad, de desplazamiento y tiempos de circulación son presentados<sup>18</sup>. De acuerdo a su geometría pueden ser:

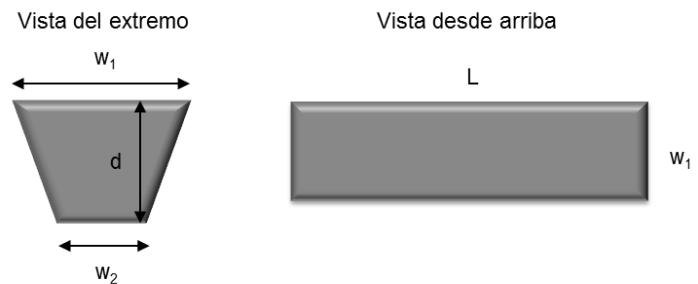
a) Rectangular con fondo plano:

$$C \left( \frac{bbl}{ft} \right) = \frac{W * d}{5,615}$$



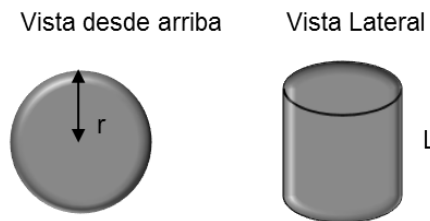
b) Rectangular con paredes inclinadas:

$$C \left( \frac{bbl}{ft} \right) = \frac{[W_1 + W_2] * d}{5,615}$$



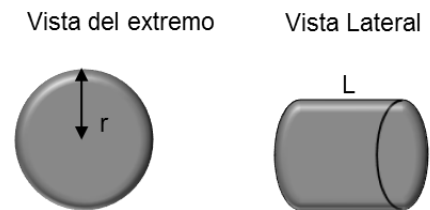
c) Cilíndrico circular vertical:

$$C \left( \frac{bbl}{ft} \right) = \frac{\pi * r^2}{5,615}$$



d) Cilíndrico horizontal: Se determina mediante cartas

$$C \left( \frac{bbl}{ft} \right) = \frac{\pi * r^2}{5,615}$$



<sup>18</sup> MANUAL MI 2001. Capítulo 9. Cálculos de ingeniería. 44p

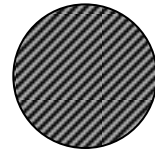
## 2.4.2 Capacidad de tubería y anulares

La capacidad está definida como:

$$\text{Capacidad} \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{\text{Volumen}}{L}$$

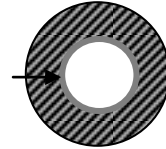
**Hueco:**

$$C \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{D_h^2}{1029,4}$$



**Anular:**

$$C \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{D_h^2 - D_e^2}{1029,4}$$



**Tubería:**

$$C \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{D_i^2}{1029,4}$$



$D_h$ : Diámetro del hueco (*in*).

$D_e$ : Diámetro externo de la tubería (*in*).

$D_i$ : Diámetro interno de la tubería (*in*).

**Desplazamiento:** Es el volumen de lodo por unidad de longitud que se desplaza cuando se mete tubería.

$$V_{desp} \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{D_e^2 - D_i^2}{1029,4}$$

**Tiempo de circulación:** El caudal se mantiene constante solo cambia el área transversal de flujo.  $Q$  Es el rendimiento de la bomba.

$$t(\text{min}) = \frac{\text{Vol}(\text{bbl})}{Q \left( \frac{\text{bbl}}{\text{min}} \right)}$$

Puede ser de circulación de superficie hasta la broca, fondo a superficie, ciclo de pozo o circulación total así:

*Tiempo de circulación de superficie hasta la broca:*

$$t(\text{min}) = \frac{\text{Vol sarta de perforacion} (\text{bbl})}{Q \left( \frac{\text{bbl}}{\text{min}} \right)}$$

*Tiempo de fondo a superficie:*

$$t(\text{min}) = \frac{\text{Vol anular}(\text{bbl})}{Q \left( \frac{\text{bbl}}{\text{min}} \right)}$$

*Tiempo de ciclo de pozo:* El tiempo de ciclo en el pozo es el tiempo requerido para que el lodo circule a partir de la succión de la bomba, bajando por la columna de perforación, saliendo por la broca, subiendo de nuevo por el espacio anular hasta la superficie, calculado de la siguiente manera:

$$t(\text{min}) = \frac{\text{Vol (sarta + anular)}(\text{bbl})}{Q \left( \frac{\text{bbl}}{\text{min}} \right)}$$

*Tiempo de circulación total:* pasando a través de los tanques, y finalmente, regresando de nuevo a la succión de la bomba.

$$t(\text{min}) = \frac{\text{Vol (sarta + anular + tanques *)} (\text{bbl})}{Q \left( \frac{\text{bbl}}{\text{min}} \right)}$$

\*Depende de las dimensiones de cada uno de los tanques y el nivel del lodo en ellos.

## 2.5 EQUIPOS DE CONTROL DE SÓLIDOS

La remoción de sólidos es uno de los más importantes aspectos del control del sistema de lodo por su impacto directo sobre la eficiencia de la perforación. No es posible eliminar todos los sólidos perforados ya sea mecánicamente o por otros medios, por lo que deben ser considerados como contaminantes constantes de un sistema de lodo.

Los sólidos y sus volúmenes afectan los costos del lodo y del pozo, incluyendo la velocidad de perforación, la hidráulica, las tasas de dilución, el torque y el arrastre, las presiones de surgencia y pistoneo, la pega por presión diferencial, la pérdida de circulación, la estabilidad del pozo y el embolamiento de la broca y el conjunto de fondo. A su vez estos factores afectan la vida útil de las brocas, las bombas y otros equipos mecánicos.

### 2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE PERFORACIÓN

Básicamente se pueden separar en dos categorías<sup>19</sup> sólidos de baja gravedad específica y alta gravedad específica así:

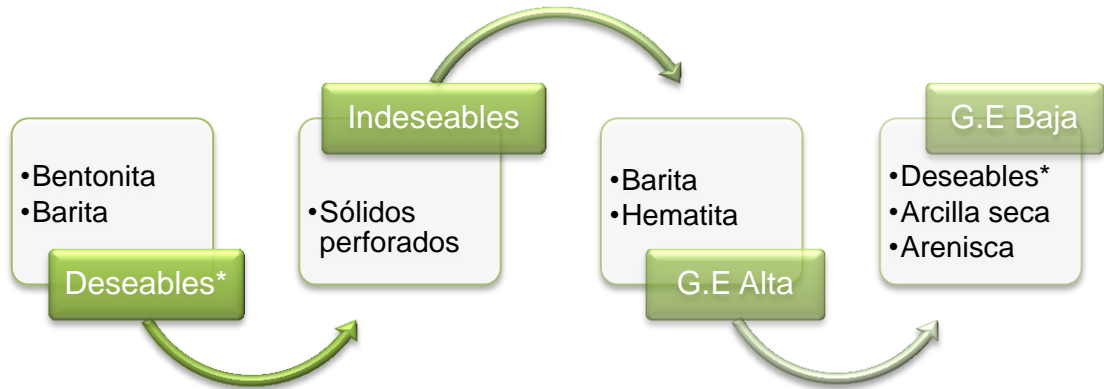
- *Sólidos de Baja Gravedad Específica (LGS)*, SG comprendida entre 2,3 a 2,8. Los sólidos perforados y la mayoría de los demás aditivos de lodo están incluidos en la categoría LGS, y son frecuentemente usados para obtener densidades hasta de 10 lb/gal (SG del lodo <1,2).
- *Sólidos de Alta Gravedad Específica (HGS)*, SG de 4,2 o más. Los materiales densificantes como la barita o la hematita componen la categoría de HGS y se usan para lograr densidades superiores a 10 Lb/gal (SG del lodo >1,2).

La figura 20 presenta la clasificación API del tamaño de sólidos

---

<sup>19</sup> MANUAL MI 2001. Capítulo 8. Control de sólidos. 25p.

**Figura 20:** Clasificación API del tamaño de los sólidos



Fuente: Modificado del Manual de MI. Capítulo 8. Control de sólidos.

**Tabla 6:** Clasificación de los sólidos de acuerdo al tamaño de las partículas.

Categoría	Tamaño	Ejemplo
<b>Coloidal</b>	2 $\mu$ o menos	Bentonita, arcillas y solidos perforados ultrafinos
<b>Limo</b>	2-74 $\mu$ (< malla 200)	Barita, limo y solidos perforados mínimos
<b>Arena</b>	74-2000 $\mu$ (malla 200-10)	Arena y solidos perforados
<b>Más de 2000</b>	Más de 2000 $\mu$ (> malla 10)	Sólidos perforados, grava y cantos rodado

Fuente: Modificado del Manual de MI. Capítulo 8. Control de sólidos.

La figura 21 presenta la clasificación de los sólidos según su reactividad y la figura 22 el efecto del tamaño de las partículas sobre el área superficial en un lodo de perforación, la viscosidad aumenta proporcionalmente al área superficial de los sólidos. Los sólidos coloidales producen la mayoría de la viscosidad en los lodos de perforación, debido a este aumento del área superficial, por este motivo, el

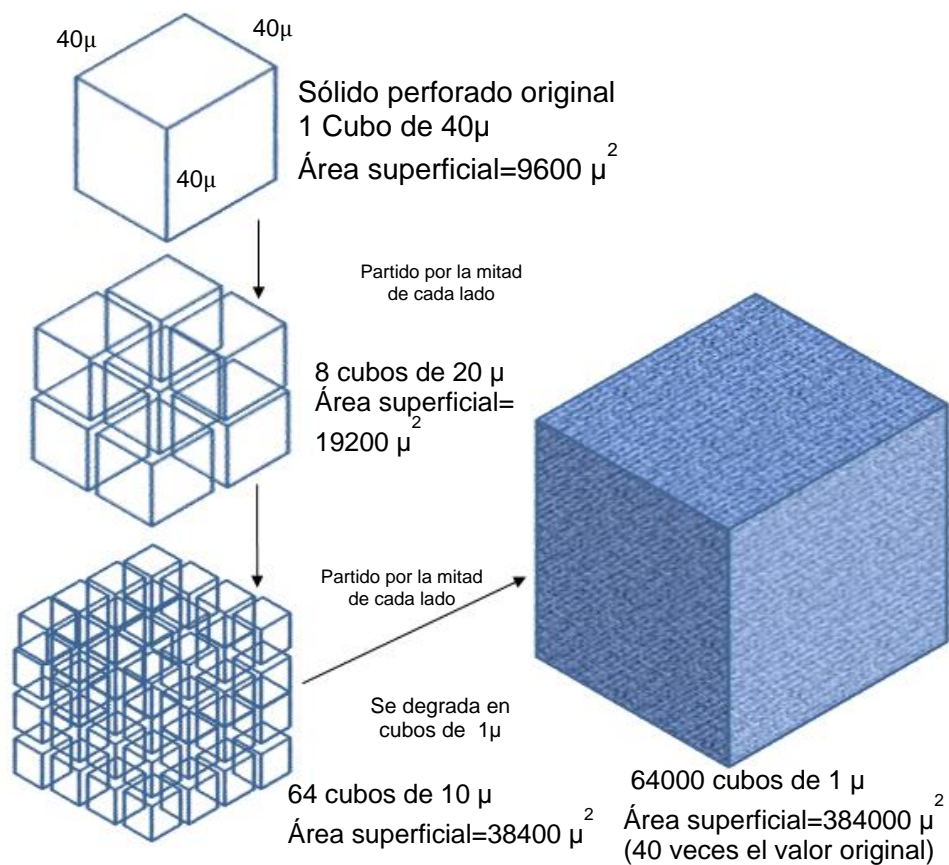
volumen de los sólidos coloidales contenidos en el lodo de perforación debe ser controlado por razones de economía y eficacia.

**Figura 21:** Clasificación de los sólidos según su reactividad.



Fuente: Modificado del Manual de MI. Capítulo 8. Control de sólidos.

**Figura 22:** Efecto del tamaño de las partículas sobre el área superficial



Fuente: Modificado del Manual de MI. Capítulo 8. Control de sólidos.

## 2.5.2 CLASIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Relación entre el tamaño de las partículas, los puntos de corte y los equipos de control de sólidos se presenta en el anexo H.

## 2.5.3 MÉTODOS DE CONTROL DE SÓLIDOS

- **Dilución:** Reduce la concentración de sólidos perforados adicionando un volumen de fluido de perforación.
- **Desplazamiento:** Es la remoción o descarte de grandes cantidades de fluido por fluido nuevo con óptimas propiedades reológicas.
- **Piscinas de asentamiento (gravedad):** Es la separación de partículas sólidas por efecto de la gravedad, debido a la diferencia en la gravedad específica de los sólidos y el líquido. Depende del tamaño de las partículas, gravedad específica y viscosidad del fluido.
- **Trampa de arena:** La trampa de arena básicamente es un compartimiento de asentamiento que está localizado directamente debajo de las zarandas. La trampa de arena recibe el fluido y lo entrega al siguiente tanque por rebose. La trampa de arena actúa como un aparato de asentamiento para remover los sólidos grandes que pueden ocasionar taponamientos en los hidrociclones. Estos grandes sólidos llegan a la trampa cuando hay mallas rotas o se ha hecho bypass en las zarandas.
- **Separación mecánica:** Separación selectiva de los sólidos perforados del fluido por diferencias de tamaño y masa. Hay varios tipos de equipos los cuales son diseñados para operar eficientemente bajo condiciones específicas.

## 2.5.4 EQUIPOS DE CONTROL DE SÓLIDOS

El objetivo de diseño de cualquier equipo de control de sólidos es alcanzar la remoción progresiva de los sólidos perforados. Esto permite que cada equipo optimice el desempeño del siguiente equipo. Además, el sistema debe tener la habilidad para diferenciar entre los sólidos perforados y el valioso material presente.

El control de sólidos se logra usando uno o varios de los métodos básicos de separación de sólidos:

1. Trampa de arena.
2. Zaranda o shale shaker
3. Desgasificadores
4. Hidrociclones (desarenador y deslimador)
5. Limpiador de lodo.
6. Centrifugas.
7. Unidad de deshidratación.

La información obtenida para la descripción y operación de cada uno de los equipos es referencia del manual de MI SWACO del módulo de soluciones de perforación<sup>20</sup>. Ninguno de los equipos de control de sólidos usados en la perforación podrá eliminar el 100% de los sólidos generados. Para comparar la eficiencia de los equipos de control de sólidos, se usa una clasificación de los tamaños de partículas basada en el punto de corte. Los puntos de corte siempre den estar indicados por la letra "D", con un subíndice que indique el porcentaje eliminado. Sin este porcentaje será imposible comparar dos tamaños de punto de corte.

---

<sup>20</sup> LENIS, Efraín. MI SWACO. Curso control de sólidos. 2004

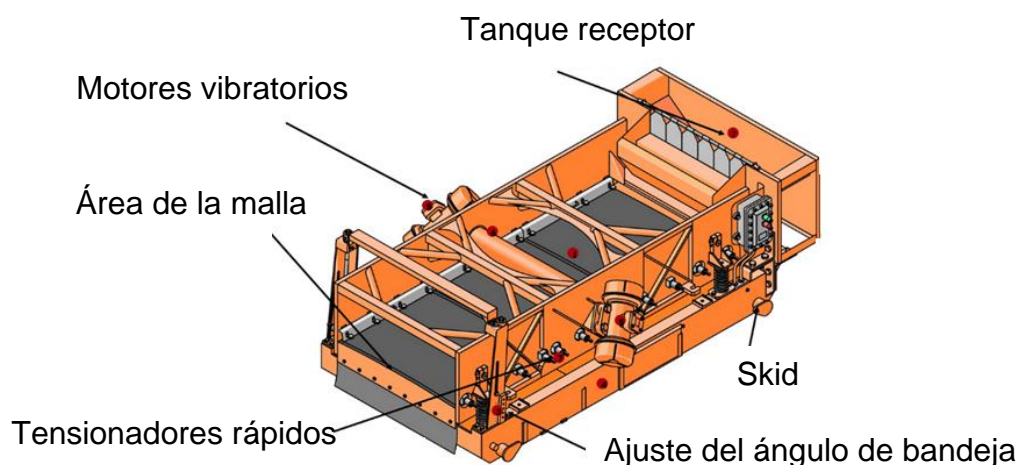
### 2.5.4.1 ZARANDA O SHALE SHAKER

Es un tamiz vibratorio usado para la filtración de sólidos del fluido de perforación circulante eliminar los recortes de lodo. Es el único aparato removedor de sólidos que hace una separación basada en el tamaño físico de las partículas. Como primera etapa de la cadena de limpieza de lodo/remoción de sólidos, las zarandas constituyen la primera línea de defensa contra la acumulación de sólidos, muchos problemas potenciales pueden ser evitados observando y ajustando las zarandas para lograr la eficiencia máxima de remoción en base a la capacidad de manejo.

Las zarandas pueden eliminar hasta el 90% de los sólidos generados, no pueden eliminar los sólidos que tienen tamaños de limo y coloidales, por lo tanto resulta necesario usar la dilución y otros equipos para los sólidos perforados ultrafinos. El uso de mallas con los entramados más finos para eliminar la mayor cantidad posible de sólidos durante la primera circulación del pozo constituye el método más eficaz de control de sólidos.

#### Componentes básicos

**Figura 23:** Componentes básico de una zaranda



Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

**Principio de operación:** La operación de la zaranda es función de:

1. Norma de la vibración
2. Dinámica de la vibración
3. Tamaño de la cubierta y su configuración
4. Características de las mallas (mesh y condición de superficie)
5. Reología del fluido (especialmente densidad y viscosidad)
6. Ritmo de carga de sólidos (ROP, GPM y Diámetro del hueco).

**1. Normas de vibración:** La posición de los vibradores determina el patrón de vibración, hay tres tipos comunes de movimiento que pueden ser usados.

**Circular:** La zaranda de movimiento circular es el tipo de zaranda más antiguo y produce generalmente la fuerza centrífuga G más baja. Con un patrón de vibración balanceado y una capacidad limitada, pero tiene un transporte rápido y fuerzas G's bajas, es eficaz con los sólidos pegajosos tipo arcilloso, al reducir el impacto que estos sólidos tienen sobre la superficie de la malla.

**Lineal:** Utiliza dos motores de movimiento circular montados en la misma cubierta, es la más versátil, sus motores están configurados para rotaciones contrarias para producir una fuerza G descendente y una fuerza G ascendente cuando las rotaciones son complementarias, pero ninguna fuerza cuando las rotaciones son contrarias. La fuerza G varía aproximadamente de 3 a 6, de buen transporte y gran capacidad de manejo de fluidos Recomendadas para todo tipo de operación que requiera el uso de malas finas.

**Elíptico:** Tiene una fuerza G moderadamente alta y un transporte lento en comparación con las circulares o lineales, esta zaranda produce el mayor secado y por lo tanto puede usarse en lodo densificado o como limpiador de lodo para secar el fluido que sale por abajo de un deslimador.

- **Movimiento desbalanceado:** Recomendados para remover solidos gruesos o pegajosos.
- **Movimiento balanceado:** Recomendados para ser usado en cualquier tipo de operación en especial con fluidos base aceite.

2. **Dinámica de vibración:** La masa de los contrapesos y la frecuencia determina la dinámica de la vibración.

$$G's = \frac{Stroke(in) * RPM^2}{70300}$$

- La mayoría de las zarandas operan con fuerzas G's entre 2.5 a 5.0
- Frecuencia (rpm): Los vibradores de las zarandas giran normalmente con RPM's entre 6500 a 6800 a 40Hz.

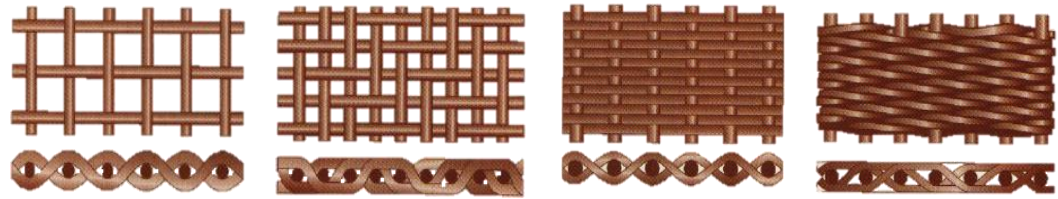
3. **Configuración de la cubierta:** La cubierta de ángulo ajustable se creó para optimizar el procesamiento de fluido y variar la acción de transporte y secado de los cortes. Al usar ángulos mayores a 3° se deben considerar los cortes o sólidos acumulados en la región liquida. La acción vibratoria y la residencia extendida generan más sólidos.

4. **Mallas:** Consisten en alambres entretejidos con un tamizado a un cierto tamaño de apertura. Esto define el punto de corte de la malla o el tamaño de solidos que la malla puede remover. Actualmente hay muchos tipos de mallas disponibles, cuyos rendimientos son variables. *Mesh*, se define como el número de aperturas por pulgada lineal. Existe variedad en la forma del tejido.

El tamaño de la abertura es la distancia entre alambres de una malla y se mide en pulgadas o micrones.

$$d = \frac{1 - (mesh * D)}{mesh}, \quad D: \text{Diametro del alambre en pulgadas.}$$

**Figura 24:** Tramados comunes de mallas



Plano cuadrado simple, Rectangular simple, Cruzado cuadrado, Rectangular cruzado

Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

Existen diferentes grados de alambre: Grado extra fuerte-fuerte o medio y Grado comercial (MG), comúnmente usado, proporciona buena combinación entre el área abierta y la resistencia. Los tambores para el tamiz son frecuentemente menos usados debido al reducido espesor del alambre.

**Designación de la malla:** Según el APIR13 ha recomendado que todas las mallas sean identificadas con la siguiente información:

- Designación del nombre y mesh de la malla.
- Potencial de separación o punto de corte (D50, D16, D84).
- Capacidad de flujo o conductancia (conducción área total no vacía).
- Área libre o reutilizable.

#### **Parámetros de selección**

- Tamaño promedio de apertura: Depende del tipo de tejido y el calibre del alambre
- Capacidad: Depende del tejido y la textura, forma de la apertura y el refuerzo de la malla: usualmente en las mallas pre-tensionadas

#### **Parámetros de desempeño:**

- Cantidad de sólidos de descarga.
- Tiempo de vida útil
- Caudal de procesamiento: Conductancia de la malla y área neta libre

Los diferentes tamaños de malla darán diferentes tamaños en sólidos perforados.

- Mallas para las zarandas scalper (para tamaño cuarzo)
- Mallas para las zarandas primarias (para tamaño fino)

**Sistemas de zarandas:** Varios tipos diferentes de zarandas puede ser combinados “en cascada” para producir un mejor eficiencia de remoción de sólidos. Las zarandas de movimiento circular a veces son usadas como zarandas de separación preliminar “Scalping Shakers” para eliminar solidos pegajosos. Luego el fluido pasa por una zaranda elíptica o lineal que produce una fuerza G más alta para eliminar los sólidos más finos. Esta combinación maximiza la remoción.

### **Reglas y cuidados operacionales**

1. Nunca haga Bypass en las tuberías
2. En lo posible use siempre mallas de tamizado fino
3. Regule el flujo y monitóreelas continuamente
4. Ajuste el ángulo para cubrir el 75% de la longitud
5. Lleve el inventario y control de las horas que se usan.
6. En standby limpie las mallas y repárelas.
7. Cerciórese que los motores y el ajuste de los contrapesos en los vibradores a cero y use los seguros en los resortes

### **Selección del número de zarandas**

Número aproximado de agitadores de alto rendimiento de movimiento lineal. La figura 25 permite conocer el número de zarandas requeridas para un caudal de flujo determinado y un valor de viscosidad máxima.

**Figura 25:** Selección del número de zarandas

Q(gpm)	Viscosidad Máxima (cP)								
	5	10	15	20	25	30	40	50	60
300	1	1	1	1	1	1	2	2	2
400	1	1	1	2	2	2	2	2	2
500	1	1	2	2	2	2	3	3	3
600	1	2	2	2	2	3	3	3	3
700	2	2	2	2	3	3	3	3	4
800	2	2	2	3	3	3	4	4	4
900	2	2	3	3	3	4	4	4	
1000	2	2	3	3	4	4	4		
1100	2	3	3	4	4	4			
1200	2	3	3	4	4				
1300	2	3	4	4					
1400	2	3	4						

Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

### Ventajas

- Simple para operar.
- Disponibilidad.
- Si el tamizado de la malla es conocido, el punto de corte es predecible.
- Capaz de procesar el volumen total del fluido circulado
- Fácil de inspeccionar.
- Los sólidos pueden ser removidos antes de cualquier degradación mecánica.

### Desventajas

- Son costosas (compra y operación).
- Su montaje necesita gran espacio.
- La inspección de mallas del fondo en zarandas dobles son difíciles de inspeccionar.
- Produce sólidos húmedos en su descarga.

#### **2.5.4.2 TRAMPA DE ARENA**

Los tanques de asentamiento o trampas de arena casi nunca son usados en las operaciones modernas de perforación: sin embargo, pueden ser usados si se requieren. La proporción de sólidos que se depositan en los tanques de asentamiento o las trampas de arena depende de:

- El tamaño, la forma y la gravedad especifican de las partículas.
- La densidad y viscosidad del fluido de perforación.
- El tipo de régimen de flujo del fluido.
- Tiempo de estancia en el tanque.

De acuerdo con la ley de Stokes, la sedimentación eficaz de los sólidos solo puede lograrse cuando el fluido tiene un flujo laminar. Bajo condiciones flujo turbulento, la sedimentación es muy mínima. La mayoría de las zarandas modernas eliminarán los sólidos de tamaño arena y más grandes sin necesitar el uso de trampas de arena y/o tanques de asentamiento

#### **2.5.4.3 DESGASIFICADORES**

La figura 26 presenta los dos tipos de desgasificadores.

La presencia de gas en el fluido puede ser.

- Perjudicial para los equipos del taladro (corrosivo)
- Un problema potencial de control de pozo
- Peligroso si es tóxico o inflamable ( $H_2S$ ,  $CO_2$ )
- Bombas centrífugas, hidrociclones y bombas del taladro pierden eficiencia si el fluido contiene gas.

#### **Tipos**

- Desgasificadores atmosféricos: aceptable en fluidos sin peso y baja viscosidad.

- Desgasificadores de aspiración (vacío): son superiores a los atmosféricos y muy usados en fluidos pesados y alta viscosidad.
- El desgasificador debe ser instalado entre la trampa de arena y los primeros hidrociclones (Desarenadores).
- Chequee la succión del desgasificador, no está exenta de taponamientos.
- Siempre probar el desgasificador antes de cualquier operación de perforación.

La figura 26 presenta los tipos de desgasificadores:

**Figura 26:** Tipos de desgasificadores



Tipo Vacío



Tipo Atmosférico

Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

### Instalación y operación

- Los desgasificadores atmosféricos, deben descargar horizontalmente a través de la superficie del tanque para que permita el rompimiento de las burbujas de gas, el tipo vacío deben descargar debajo de la superficie del fluido.
- Para la operación de los desgasificadores se usan, por lo general, bombas centrifugas (más comerciales).
- La bomba centrifuga debe suministrar la cabeza alimentadora necesaria. La ubicación de la succión de esta centrifuga deber ser lo más lejos de la sección del desgasificador

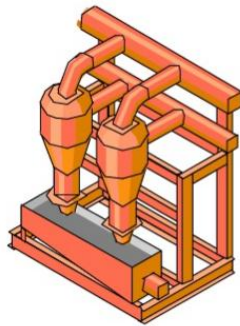
- Instalar un manómetro para controlar la cabeza alimentadora en el eductor.
- Proveer suficiente capacidad al desgasificador para tratar al menos el total del volumen de la tasa de circulación.
- Los desgasificadores deben estar ubicados debajo de las zarandas y corriente arriba de cualquier equipo que requiera bomba centrífuga.

#### 2.5.4.4 HIDROCICLONES

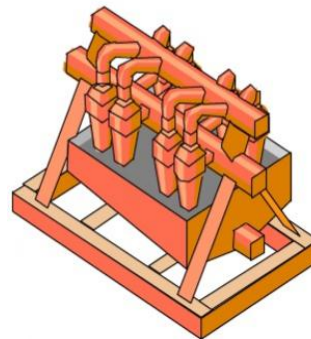
Son recipientes de forma cónica en los cuales la energía de presión es transformada en fuerza centrífuga, como se presenta en la figura 27.

**Figura 27:** Hidrociclones

Desarenador



Deslimador



Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

**Principio de operación:** El fluido se alimenta por una bomba centrífuga, a través de una entrada que lo envía tangencialmente en la cámara de alimentación. Una corta tubería llamada tubería del vórtice fuerza la corriente en forma de remolino a dirigirse hacia abajo en dirección del vértice (parte delgada del cono). La fuerza centrífuga creada por este movimiento del fluido en el cono forzan las partículas más pesadas hacia afuera contra la pared del cono. Las partículas más livianas se dirigen hacia adentro y arriba como un vórtice espiralado que las lleva hacia el orificio de la descarga o del efluente. La descarga en el extremo inferior es en forma de spray con una ligera succión en el centro.

**Teoría del hidrociclón:** Todos los hidrociclones utilizan la ley de Stokes para alcanzar la separación de sólidos del fluido:

$$V_s = \frac{K * G * D_p * (\rho_s - \rho_l)}{\mu_l}$$

$V_s$ : Velocidad de separación

$\rho_s$ : Densidad de sólidos.

$K$ : Constante de Stokes

$\rho_l$ : Densidad del líquido.

$G$ : Fuerza de aceleración

$\mu_l$ : Viscosidad del líquido

$D_p$ : Diámetro de la partícula

**Características de diseño:** Las variables de diseño que controlan el desempeño de un hidrociclón son:

- **Diámetro del cono:** Los conos con diámetros grandes permiten manejar altos galonajes, sin embargo la eficiencia de separación y rendimiento es baja.
- **Ángulo del cono:** Un pequeño ángulo del cono generará una reducida zona de arrastre, esto significa que pocas partículas pequeñas serán arrastradas por el vórtice generado obteniéndose mejor punto de corte. Sin embargo largos conos tienen a taparse fácilmente.
- **Diámetro de entrada:** La eficiencia del cono es inversamente proporcional al diámetro de entrada de la alimentación, por tanto un pequeño diámetro mejorará el punto de corte, pero debe ser lo suficiente para manejar el flujo al cono.
- **Diámetro del vértice:** El diámetro del vértice determinará la humedad de los sólidos descargadas, muy grande implica mucho líquido descargado y muy pequeño puede implicar taponamientos, se busca una descarga en spray.
- **Vórtice generado:** Este tendrá que tener un diámetro lo suficientemente pequeño para facilitar una entrada suave de fluido al cono será suficientemente

grande para manejar la cantidad líquida, un vórtice demasiado pequeño genera sólidos muy húmedos

**Parámetros de flujo:** Los parámetros de flujo que afectan la eficiencia del hidrociclón son: galonaje, velocidad tangencial y cabeza de alimentación.

Estos parámetros son controlados por la bomba centrífuga que alimenta el hidrociclón, una óptima cabeza de alimentación es uno de los factores para una óptima descarga del cono. Lo óptimo es una descarga en spray, lo cual implica que hay una buena remoción de sólidos con mínima pérdida de fluido.

**Eficiencia de separación:** La eficiencia de separación del hidrociclón depende de 4 factores:

1. Parámetros de diseño del hidrociclón: diámetro/longitud/entrada/vértice etc.
2. Parámetros de flujo: cabeza de alimentación. Las propiedades del fluido más influyentes son la viscosidad y la densidad
3. Propiedades del fluido: viscosidad
4. Propiedades de las partículas: densidad.

**Cabeza de alimentación:** Se calcula como:

$$P(\text{psi}) = 0,052 * \rho_{\text{lodo}} * H$$

*P*: Presión de alimentación a la entrada del cono (*psi*).

*H*: Cabeza de alimentación (*ft*). Normalmente 75ft de cabeza

Una deficiencia de *P* cabeza reduce la velocidad del fluido dentro del cono y afecta la eficiencia de separación (descarga de cuerda), un exceso de *P* cabeza puede causar desgaste prematuro y aumentará los costos de mantenimiento (cortes muy secos taponamientos). Manipulando el diámetro del cono se puede remediar el exceso o deficiencia de cabeza.

**Tamaño y forma de las partículas:** Las características de las partículas juegan un papel importante en la eficiencia de separación. Estas incluyen:

- Tamaño y forma de las partículas.
- Densidad de las partículas.
- Concentración de sólidos.
- La forma influye en el comportamiento de asentamiento. Partículas con altos coeficientes de fricción se asentaran más despacio que partículas cilíndricas.
- La concentración volumétrica de solidos generan varios problemas de asentamiento como: Incremento de viscosidad, interferencia de partículas y saturación de sólidos.

**Parámetros ajustables:** Solo el diámetro del vértice del cono puede ser ajustado para obtener una descarga en forma de spray. Si el hidrociclón está en buenas condiciones y la operación es aún muy pobre entonces puede existir problemas en la bomba centrífuga designada para el hidrociclón.

#### **2.5.4.4.1 DESARENADORES**

Los desarenadores son usados en fluidos con poco peso para separar partículas tamaño arena de 74 micrones o más grandes. Los hidrociclones separan solidos de acuerdo a su densidad. El punto de corte de estos hidrociclones es aproximadamente entre 50 y 0 micrones. En fluidos pesados no es muy recomendable usar este equipo debido a que la densidad de la barita es sustancialmente más alta que la de los sólidos perforados.

**Función:** La función principal del desarenador es eliminar sólidos que a los equipos siguientes les podría causar taponamientos o mal desempeño

(deslimadores y centrífugas), es por ello que su capacidad de procesamiento (tamaño y número de conos) deber ser 30a 50% más que la circulación usada.

La descarga de este equipo es muy seca y abrasiva, por lo cual debe ser desechada, sin embargo, en fluidos costosos (base aceite, polímeros entre otros) cuando es necesario recuperar la fase líquida esta descarga debe ser dirigida hacia una zaranda con una malla mínima 200 (punto de corte 74 micrones). Este equipo deber ser instalado después del desgasificador y antes del deslimador. El fluido de alimentación debe ser tomado del tanque de descargue del desgasificador, su descarga debe ser en el tanque contiguo de succión.

Debe existir una ecualización entre los tanques del desarenador, por esto no es recomendable contar con una válvula que comunice ambos tanques. Se necesita usar un desarenador para impedir la sobrecarga de los deslimadores. En general se usa un hidrociclón de 6 pulgadas de diámetro interior o más grande con una unidad compuesta de dos hidrociclones de 12 pulgadas, cada uno de los cuales suele tener una capacidad de 500 gpm.

#### **2.5.4.4.2 DESLIMADORES**

Los conos deslimadores son fabricados en una gran variedad de tamaños, en un rango de 2 a 6 pulgadas, son usados para separar solidos perforados en un rango de 12 a 4 micrones. El deslimador difiere del desarenador en el tamaño de los conos y el punto de corte pero su funcionamiento es igual.

Gran cantidad del tamaño de partícula de la barita se encuentra en el rango de limo, es por esta razón que en fluidos densificados no es muy recomendable su uso. Los deslimadores son usados en fluidos densificados cuando su desagüe underflow posteriormente pueda ser procesada por las centrifugas o por una zaranda. La operación de este equipo igualmente depende de la bomba

centrífuga. El fluido debe ser succionado del tanque que descarga el desarenador y su descarga procesada en el tanque contiguo.

Debe existir una ecualización entre los tanques del deslimador, por ellos es recomendable contar con una válvula que comunique ambos tanques, nunca el fluido para alimentar el deslimador deber ser del tanque donde se adicionan los químicos del fluido.

### **Ventajas**

- Operación simple-fácil mantenimiento y económico.
- No tiene partes móviles
- Su operación permite reducir costos, pues es reducido el desecho del fluido.
- Incrementan la vida de la broca y aumentan las ratas de perforación

### **Desventajas**

- Las propiedades del fluido afectan su desempeño.
- Su operación genera degradación de los sólidos.
- Uso de bomba centrífuga.
- Voluminoso
- Los puntos de corte generados se pueden obtener con óptimas zarandas
- La descarga sólida es bastante húmeda
- No puede usarse en fluidos con fase líquida costosa.
- Requieren correctos tamaños de bomba.
- Sus conos fácilmente se tapan.
- El mal funcionamiento de sus conos generan excesivas pérdidas de fluido

### **Reglas operacionales:**

- En número de conos debe ser el suficiente para manejar la totalidad de la circulación.

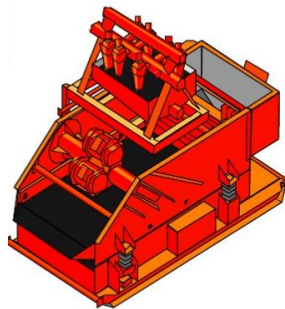
- Use el desarenador cuando las zarandas no puedan usar mallas superiores a 140 (punto de corte de 100 micrones).
- Cada unidad debe tener su propia bomba.
- Las centrifugas o los limpiadores de lodo pueden ser usados para procesar el desagüe de los hidrociclones.
- Cheque continuamente el funcionamiento de los conos. Los conos de los desarcilladores se tapan más fácilmente que el de los desarenadores.
- La descarga de las bombas centrifugas deben tener una longitud máxima de 75´ evitando usar la menos cantidad de accesorios posibles para evitar muchas pérdidas por fricción.
- Ubique un medidor de presión en la línea de alimentación de los manifolds, para determinar si a la cabeza suministrada por la bomba es la correcta.

#### 2.5.4.5 LIMPIADOR DE LODO

El limpiador de lodo o mud cleaner es básicamente una combinación de un deslimador colocado encima de una zaranda de malla fina y de alta vibración. Es una adaptación de tres equipos en uno (zaranda, deslimador y desarenador), se usa cuando hay poca disponibilidad de espacio. La figura 28 presenta el mud cleaner o limpiador del lodo.

Es básicamente un deslimador montado sobre una zaranda de malla vibratoria

**Figura 28:** Limpiador de lodo o mud cleaner



Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

**Principio de operación:** El proceso remueve los sólidos perforados tamaño arena aplicando primero el hidrociclón al fluido y posteriormente procesando el desagüe de los conos en una zaranda de malla fina. Según especificaciones API el 97% del tamaño de la barita es inferior a 74 micrones y gran parte de esta es descargada por los hidrociclones (deslimador/desarenador). El recuperar la barita y desarenar un fluido densificado es la principal función de un limpiador de fluidos o limpia fluidos.

### **Ventajas**

- Recuperar la fase líquida costosa (por ejemplo diesel) y algo de la barita descartada por los hidrociclones.
- Produce relativamente cortes más secos.
- Fácil de operar.
- En unidad compacta.

### **Desventajas**

- Recicla sólidos finos a través de sus mallas.
- Descarga barita con los recortes.
- Capacidad limitada.
- Degradación de sólidos producidos en la succión y entrega de la bomba centrífuga usada para su alimentación.
- Separación en parte depende de los conos.
- Requiere para su operación de una bomba centrífuga.

#### **2.5.4.6 CENTRÍFUGA DECANTADORA**

Se usan para la separación de los sólidos de la fase líquida, que no han sido removidos por las zarandas ni por los hidrociclones. Consiste de un recipiente en

forma cónica o bowl, rotando sobre su eje a diferente velocidad (entre 1900 y 3200 rpm), un sinfín o conveyor ubicado dentro del bowl gira en la misma dirección del bowl generando una velocidad diferencial respecto al mismo entre 33 y 56 rpm.

La velocidad diferencial permite el transporte de los sólidos por las paredes del bowl en donde los sólidos han sido decantados por la fuerza centrífuga. El éxito de la operación depende de su trabajo continuo, la capacidad para descargar sólidos relativamente secos y alcanzar una alta eficiencia de separación.

La figura 29 presenta una imagen de la centrífuga decantadora.

**Figura 29:** Centrífuga decantadora



Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

**Separación centrífuga:** Basado en el principio de aceleración centrífuga para aumentar la fuerza de gravedad o fuerza G.

$$\text{Fuerza G} = D * \text{rpm}^2 * 0,000142$$

*D*: Diámetro del bowl (*in*)

*rpm*: Velocidad del bowl

Por tanto los sólidos que necesitan horas o días para separarse por sedimentación, pueden separarse en segundos con una centrífuga y el punto de corte en la separación centrífuga depende de la fuerza G y del tiempo.

**Desempeño de las centrifugas:** Los siguientes son los parámetros que determinan el desempeño de las centrifugas:

- La fuerza G la cual depende del diámetro y la velocidad del bowl.
- La viscosidad del fluido.
- La rata de procesamiento.
- La profundidad del depósito.
- La velocidad diferencial entre el bowl y el conveyor
- La posición del tubo de alimentación de la centrifuga.

**Variables de operación:**

- Formas de ajustar el funcionamiento de las centrífugas.
- La velocidad del bowl.
- La velocidad diferencial entre el bowl y el conveyor.
- La profundidad del depósito.
- La posición del tubo de alimentación.
- La rata de procesamiento.

Los cambios de velocidad se alcanzan al cambiar las correas y la posición de las poleas.

**Velocidad de transporte de los sólidos:** Hace referencia a la velocidad a la cual se extraen los sólidos de la centrifuga. Esta depende de: la velocidad relativa del bowl y la distancia de separación de sólidos.

Los hidrociclones y las centrífugas usan la fuerza centrífuga para lograr tasas de separación más altas que las que se pueden obtener mediante la sedimentación gravitacional. Estos métodos son similares a la sedimentación y están gobernados por las leyes de la física. Si se mantiene el lodo en circulación para romper los esfuerzos de gel, entonces la sedimentación de las partículas está gobernada por la ley de Stokes.

**Reglas operacionales de presión de trabajo:**

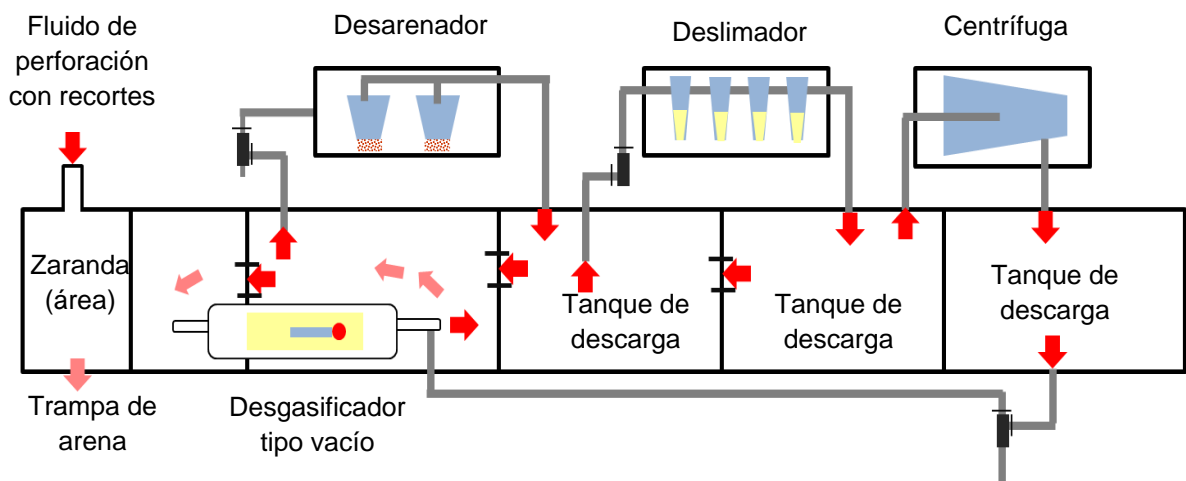
- Desarenador: 35 psi o 4 veces la densidad del fluido

- Deslimador: 40 psi o 4.5 veces la densidad del fluido

El fluido de perforación con los recortes proveniente de la línea de retorno del lodo, primero ingresa a la zaranda y en algunos sistemas el fluido es recibido por la trampa de arena que pasa su contenido por rebose al siguiente equipo; el desarenador succiona el fluido del tanque de descarga del desgasificador y lo descarga en el tanque contiguo de este; el deslimador succiona el fluido de este tanque y lo descarga en el siguiente compartimiento, de éste la centrífuga lo succiona y su descarga es recibida por otro compartimiento y una línea lo conduce al tanque de succión del desarenador.

Respecto a la disposición básica de los equipos de control de sólidos, como se presenta en la figura 30.

**Figura 30:** Disposición de los equipos de remoción de sólidos.



Fuente: Modificado curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín

En la tabla 7 se presenta por cada equipo de remoción el tamaño API de la malla y el tamaño medio de la partícula removida en micrones.

**Tabla 7:** Tamaño de sólidos removidos por equipos de control de sólidos

<b>Equipo</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Tamaño medio removido <i>micrones</i></b>
<b>Zarandas</b>	API malla 80	177
	API malla 120	105
	API malla 200	74
<b>Hidrociclones</b>	8 in	70
	4 in	25
	3 in	20
<b>Centrífuga *Lodo densificado</b>		>5
<b>Centrífuga *Lodo no densificado</b>		<5

Fuente: ELSEVIER. Drilling Fluids Processing Handbook.

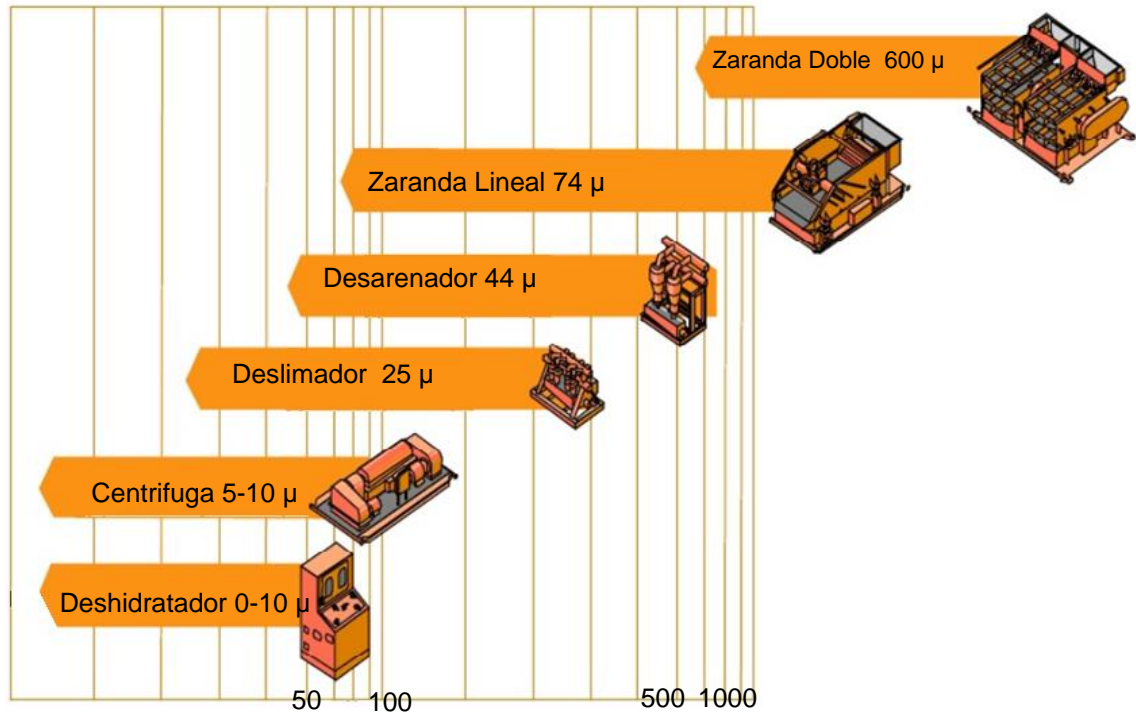
#### **2.5.4.7 UNIDAD DE DESHIDRATACIÓN**

Este tratamiento se realizará cuando el lodo base agua no se pueda continuar reciclando, el lodo desechado será tratado en la unidad de deshidratación, que consiste básicamente en flocular todos los sólidos suspendidos en el lodo y decantarlos en su totalidad por medio de una centrífuga decantadora. Acorde con el objetivo principal de minimización de desechos se debe considerar:

- Realizar el dewatering a lodos previamente centrifugados.
- Entrenar al personal en la dilución y adición de los polímeros para evitar excesos en la dosificación.
- Reutilizar el agua del dewatering en la preparación del polímero y en las diluciones del lodo cuando se requiera.
- Evitar el exceso de polímero para evitar floculación en el lodo.

En la figura 31 se presenta un esquema que permite visualizar según el quipo seleccionado el tamaño de partículas que remueve y sus respectivos puntos de corte.

**Figura 31:** Tamaño de partículas y puntos de corte



Fuente: Curso de control de sólidos. MI Swaco. Lenis Efraín.

### **3. CONSIDERACIONES DE LA SARTA DE PERFORACIÓN Y GEOMETRÍAS DE POZO**

En esta sección se describe brevemente los componentes de la sarta de perforación, del ensamble de fondo y las distintas geometrías de pozo para pozos verticales y desviados importantes al momento de planear la hidráulica del pozo.

#### **3.1 SARTA DE PERFORACIÓN**

Es el enlace mecánico que conecta la broca de perforación con el sistema de superficie. En cuanto a diseño hidráulico permite la circulación de fluidos para limpiar el pozo y enfriar la broca. La geometría interna y externa de la sarta de perforación influencia sobre las pérdidas friccionales en un sistema circulante de fluidos, las especificaciones se encuentran en el anexo A. Los componentes básicos son<sup>21</sup>:

1. La tubería de perforación, drill pipe.
2. El collar de perforación o drill collar.

##### **3.1.1 Tubería de perforación o drill pipe**

Trasmite potencia y permite la circulación del lodo, está sometida a tensión. Se encuentran disponibles en distintos grados que describe la resistencia mínima a los esfuerzos de cedencia, para corresponder a distintos requisitos del pozo siendo los más comunes el grado G y S. Ver figura 32, las especificaciones se encuentra en el anexo A.

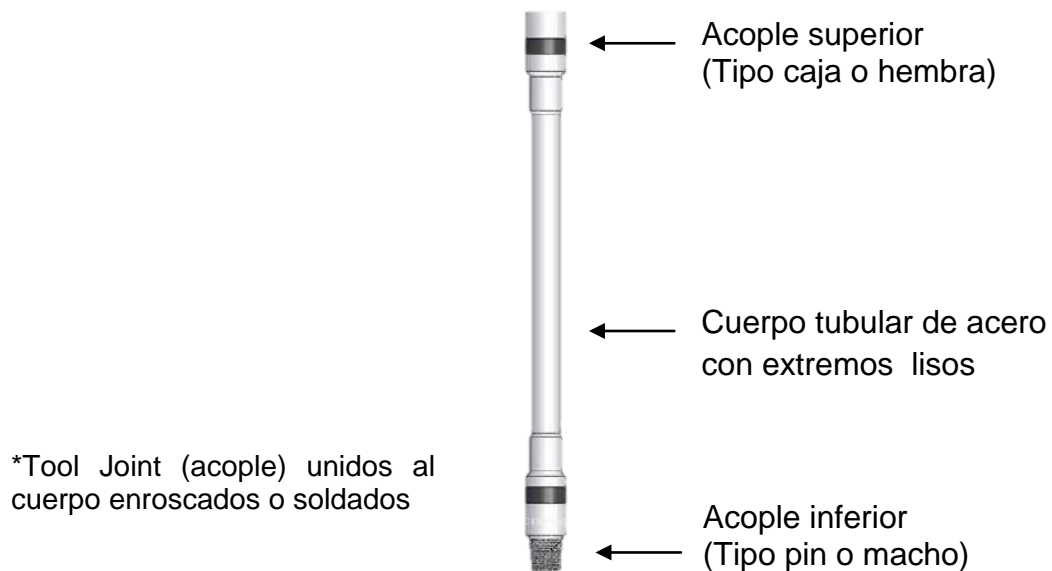
##### **3.1.2 Ensamble de fondo o Bottom Hole Assembly (BHA)**

Constituido por el drill collar, tubería pesa o heavy weight si se requiere junto con otros componentes

---

<sup>21</sup> SCHLUMBERGER. Manual 14. Diseño de sarts de perforación y herramientas de fondo. 162p

**Figura 32:** Drill pipe o tubería de perforación.



Fuente: Diseño de sartas de perforación y de herramientas de fondo. Schlumberger

**Collar de perforación o drill collar.** Utilizados para aplicar peso sobre la broca, su parte baja está sometida a compresión. Existen dos tipos de drill collar liso y espiralado como se muestra en la figura 33. En áreas con posibilidad de pega diferencial se usan el espiralado en su superficie exterior para reducir el área de contacto con la formación. Las especificaciones se encuentran en el anexo A.

**Tubería pesada o heavy weight:** Tiene el mismo diámetro externo que el drill pipe normal pero el diámetro interno es mucho más reducido y un refuerzo en la mitad del cuerpo tubular del tamaño de los acoples para resistir el desgaste por abrasivo contra la pared del hueco. Se usa entre la tubería de perforación normal y los drill collar.

Existen dos tipos liso y espiralado. Las especificaciones se encuentran en el anexo A.

**Figura 33:** Componentes del BHA



Fuente: Diseño de sartas de perforación y de herramientas de fondo. Schlumberger

### 3.1.2.1 Configuraciones estándar de herramienta de fondo

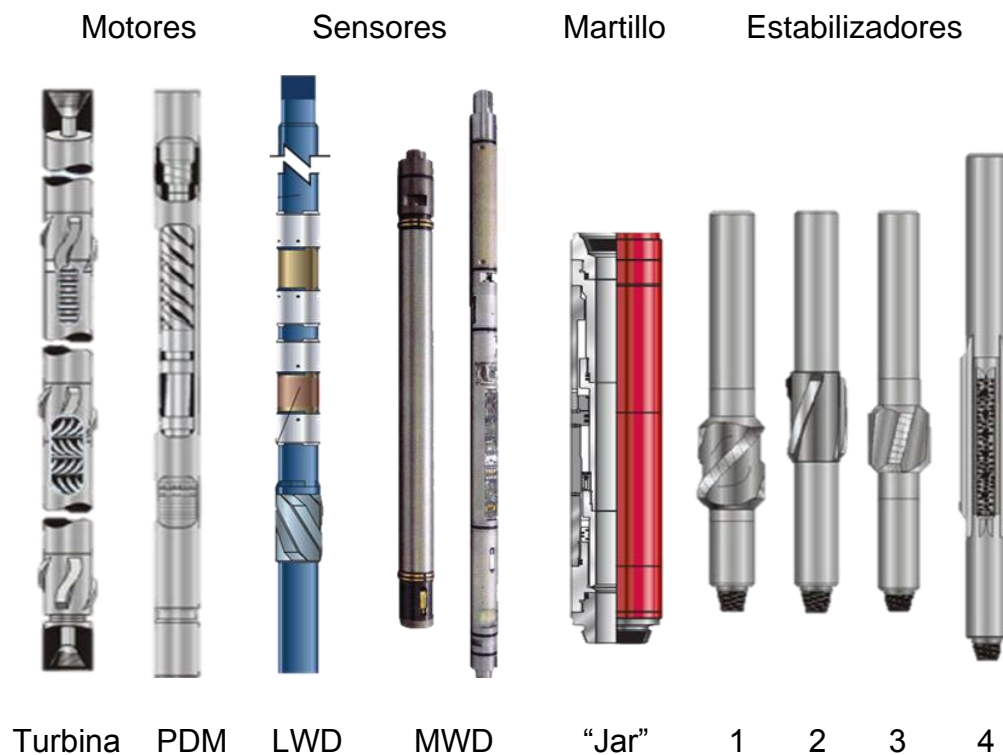
Todos los pozos verticales o desviados requieren un buen diseño de la herramienta de fondo para controlar la dirección del pozo y lograr los objetivos propuestos. La mayoría de los sistemas hidráulicos incluirán un ensamble de herramientas de fondo, tales como motores de lodo ya sean de desplazamiento positivo PDM o turbinas, sensores registradores MWD (mediciones durante la perforación) y LWD (registro durante la perforación) y martillos o “Jar” el cual es un dispositivo mecánico que se usa en el fondo del pozo para entregar una carga de impacto a otro componente, que deberán considerarse en el proceso de optimización de hidráulica<sup>22</sup>. En la figura 34 se presenta los diferentes componentes.

<sup>22</sup> SCHLUMBERGER. Tecnología de perforación. Sección 4, 306p.

El posicionamiento efectivo de estabilizadores mantiene un control de la dirección, entre los tipos de estabilizadores están:

1. Camisa integral: útil cuando la logística es un problema.
2. Camisa soldada: para pozos de diámetro grande y formaciones blandas.
3. Camisa reemplazable: durabilidad máxima cuando hay formaciones duras.
4. Patines reemplazables: para formaciones duras o abrasivas.
5. Escariador de rodillos: para formaciones duras.

**Figura 34:** Otros componentes del BHA



Fuente: Diseño de sarta de perforación. PDVSA CIED

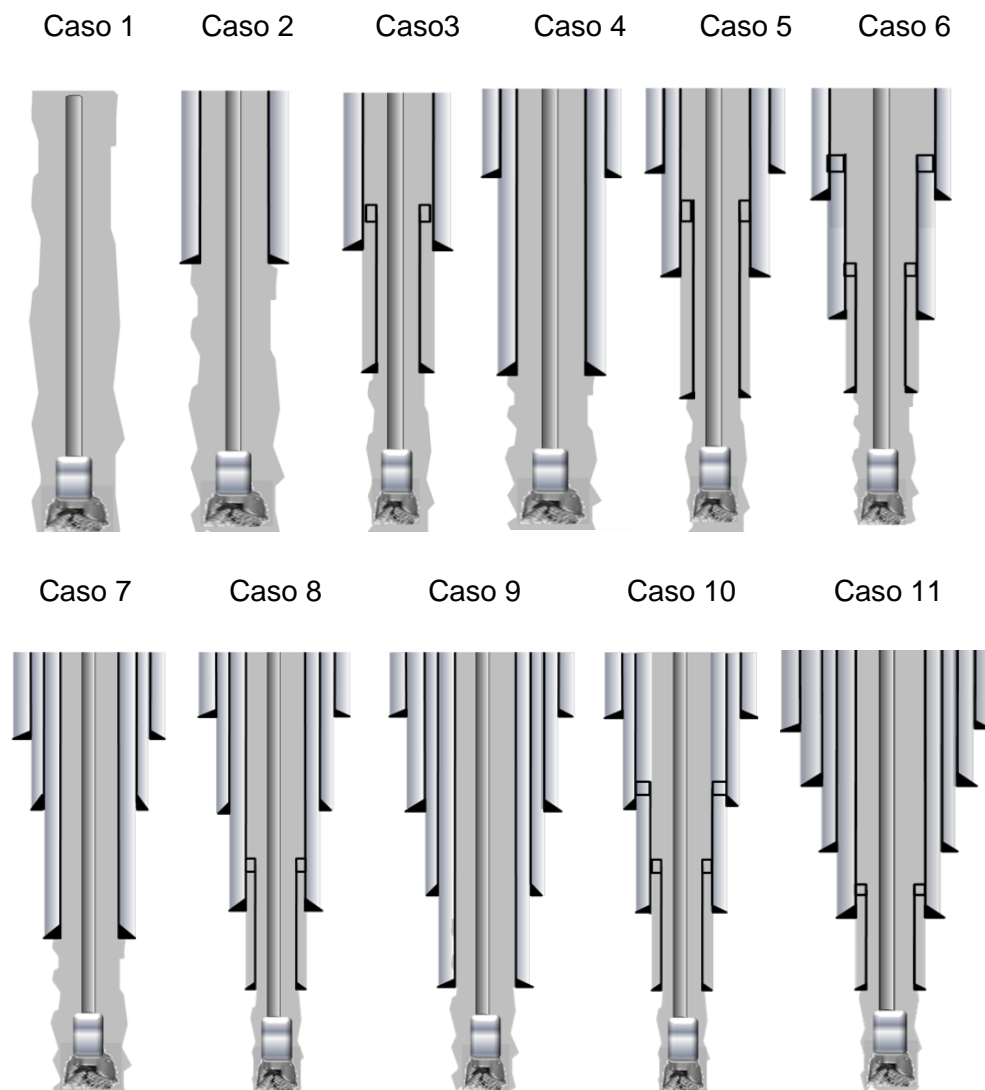
En el anexo E se presenta una especificación de motores de fondo y Slim hole para con el objetivo de brindar una guía de referencia de los motores disponibles.

## 3.2 GEOMETRÍAS DE POZO

### 3.2.1 Pozos verticales

En la figura se muestran distintas geometrías de pozo (con la sarta de perforación básica) propuestas para abarcar la mayoría de los estados mecánicos de los pozos incluyendo los pozos estratigráficos. Básicamente indican las secciones revestidas (cantidad de revestimientos o liner si lo tienen) y la sección de hueco abierto.

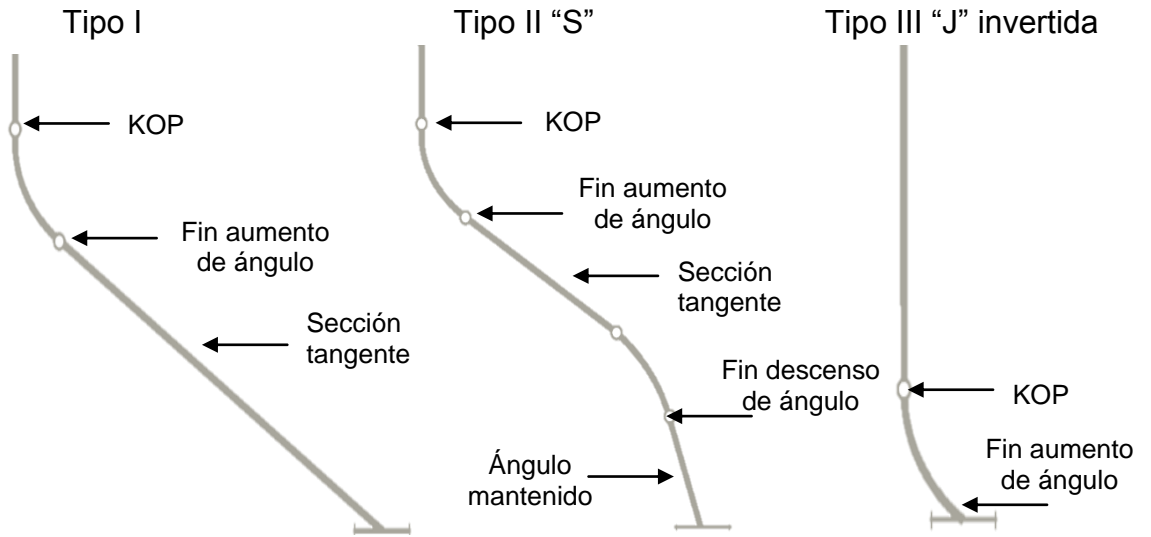
**Figura 35:** Esquemas de diseño de pozos verticales



### 3.2.2 Pozos desviados

Los perfiles de pozos desviados se presentarán en la figura 36 y ensambles de fondo típicos según la desviación deseada en la figura 37.

**Figura 36:** Esquemas de diseño de pozos desviados



Fuente: Drilling Engineering Workbook. Baker Hughes. INTEQ

**Figura 37:** Ensambles de fondo típicos



Fuente: Diseño de sarta de perforación. PDVSA CIED

## 4. HIDRÁULICA DE PERFORACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

Las propiedades físicas de un fluido de perforación, la densidad y las propiedades reológicas son monitoreadas para facilitar la optimización del proceso de perforación. Estas propiedades físicas contribuyen a varios aspectos importantes para la perforación exitosa de un pozo. La reología y la hidráulica son estudios del comportamiento del fluido que están relacionados entre sí. La *reología* es el estudio de la manera en que la materia se deforma y fluye. Se trata de una disciplina que analiza principalmente la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, y el impacto que éstos tienen sobre las características de flujo dentro de los materiales tubulares y los espacios anulares. La *hidráulica* describe la manera en que el flujo de fluido crea y utiliza las presiones. En los fluidos de perforación, el comportamiento de flujo del fluido debe ser descrito usando modelos reológicos y ecuaciones, antes de poder aplicar las ecuaciones de hidráulica.

La planeación de la hidráulica es parte del proceso general de optimización de la perforación. Esto incluye un balance calculado de los distintos componentes de sistema de circulación para hacer máxima la tasa de penetración (ROP) y mantener limpios la broca y el pozo.

### 4.1 CONSIDERACIONES PARA PLANEAR LA HIDRÁULICA

Algunos factores a considerar para planear la hidráulica son los siguientes<sup>23</sup>:

- **Máxima velocidad de perforación:** La remoción de los recortes de perforación se relaciona con la energía del fluido disipada en la broca. La potencia hidráulica en la broca está optimizada cuando la presión diferencial a través de la broca, es dos tercios de la presión del sistema.

---

<sup>23</sup> SCHLUMBERGER. Tecnología de perforación. Sección 4, 306p

- **Limpieza del pozo:** En formaciones blandas o pozos desviados, la limpieza del fondo del pozo es un factor predominante. Maximizar la velocidad de perforación por algún método de optimización es inútil, si la tasa de flujo resultante es insuficiente para levantar los recortes de perforación. A una tasa de flujo adecuada es mejor optimizar.
- **Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular:** Si es demasiado alta, la caída de presión por fricción en el espacio anular incrementará la densidad equivalente de circulación (*ECD*) y puede llevar a pérdida de circulación, atrapamiento diferencial o inestabilidad del pozo.
- **Erosión:** Las formaciones blandas y no-consolidadas son propensas a la erosión, si la velocidad en el espacio anular y por lo tanto la tasa de flujo son muy altas o si el espacio anular es demasiado pequeño se tiene la posibilidad de flujo turbulento.
- **Pérdida de circulación:** En caso de que se anticipe una gran pérdida de circulación y grandes cantidades de fluido podrían ser bombeadas, tal vez sea necesario instalar boquillas más grandes en la barrena para así minimizar el riesgo de taponar la barrena.

En la tabla 8 se presentan los factores a considerar en la hidráulica y las respectivas consideraciones.

**Tabla 8:** Consideraciones para planear la hidráulica

Factor	Consideraciones
<b>Maximizar la rata de penetración</b>	En formaciones medias a duras se maximiza la potencia hidráulica para incrementar la tasa de penetración.
<b>Maximizar la limpieza del pozo</b>	En formaciones blandas y en pozos con alta desviación se debe maximizar la tasa de flujo para garantizar la limpieza.

<b>Fricción en el anular</b>	En pozos pequeños o profundos, el límite de la tasa de flujo para minimizar la fricción en el anular y reducir el potencial para se presente perdida de circulación, pega diferencial e inestabilidad del pozo.
<b>Erosión hidráulica</b>	En formaciones blandas y poco consolidadas, el límite de la tasa de flujo para minimizar la turbulencia en el anular si existen problemas de Washout o derrumbes.
<b>Efecto en la broca</b>	Mayores tamaños de boquillas podrán ser requeridas si hay problemas potenciales de pérdidas de circulación

Fuente: Amoco Production Company. Training to reduce unschedule events. Third edition 1996. 149p.

## 4.2 FACTORES QUE AFECTAN LA HIDRÁULICA

Los equipos instalados en la unidad de perforación, la sarta de perforación, las herramientas de fondo, la geometría del pozo, el tipo de lodo y sus propiedades, son factores que pueden afectar la hidráulica<sup>24</sup>

**Tabla 9:** Factores que afectan la hidráulica de perforación.

<b>Equipo</b>	<b>Pozo</b>
Presión y caudal de bombeo	Profundidad, tamaño del hueco
Sarta de perforación ( <i>OD, ID, L</i> )	Tipo de lodo y densidad del lodo
Equipos de fondo y restricciones	Reología
Tipo de broca y boquillas	Presión de fricción en el anular y problemas potencial es en el pozo.

Fuente: Amoco Production Company. Training to reduce unschedule events. Third edition 1996. 149p

<sup>24</sup> SCHLUMBERGER. Tecnología de perforación. Sección 4, 306p

- **Equipos instalados:** Su mayor limitación es la presión de bombeo y el rendimiento de las bombas de lodo en uso. Incrementando el rendimiento en volumen se disminuirá la máxima presión de bombeo permitida. Las líneas de alta presión desde las bombas de lodo hasta el “Kelly”/”Top Drive” se diseñan para presiones de trabajo superiores.
- **Sarta de perforación y herramientas de fondo:** Su efecto principal es la caída de presión por fricción o pérdidas de presión parásita, que ocurre dentro de la tubería de perforación y los drill collar. Para una tasa de flujo y una profundidad dadas, una sarta de perforación, con un ID más pequeño, tendrá pérdidas de presión parásitas, más altas.

Por lo tanto al usar una tubería de 5 ½’’ OD en vez de una de 5’’ OD, a la misma tasa de flujo existe más presión disponible en la broca para optimizar el tamaño de las boquillas, o para la misma pérdida de presión parásita en la sarta de perforación, habrá más tasa de flujo disponible. La adición de herramientas de fondo puede tener un efecto en la caída de presión disponible o permisible a través de la broca.

- **Geometría del pozo:** A mayor profundidad del pozo, más alta será la pérdida de presión parásita dentro de la sarta de perforación y menor será la presión disponible para ser consumida en la broca y optimizar el tamaño de las boquillas. Mientras más grande sea el diámetro del hueco, más baja será la velocidad en el espacio anular para una tasa de flujo dada y más difícil será la remoción efectiva de recortes y mientras más pequeño sea el diámetro del pozo, más alta será la presión por fricción dentro del espacio anular y más grande será el efecto sobre la ECD.
- **Tipo de lodo y sus propiedades:** La densidad y reología del lodo afectan directamente las pérdidas de presión junto con el sistema de circulación.

Para optimizar la hidráulica en la broca y por lo tanto el desempeño la misma, se debe considerar la totalidad del sistema hidráulico. Desde que la tasa de flujo se mantenga constante a través de todo el sistema, las pérdidas de presión se concentran en cada uno de los componentes del sistema; la presión requerida para circular el fluido a través de la sarta de perforación y en el anular son llamadas pérdidas parásitas, y no podrán ser evitadas si el fluido de perforación está en circulación y no contribuyen al proceso de perforación. La expulsión del fluido a través de la boquilla de la broca resulta en una pérdida de presión significativa pero desempeña una función ya que limpiar los ripios perforados, entonces es deseable optimizar las pérdidas de presión a través de las boquillas y minimizar las pérdidas parásitas en la sarta de perforación y en el anular.

#### **Principios generales:**

- Con tuberías del mismo diámetro, la pérdida de presión debido a la fricción es proporcional a la longitud de la tubería y ligeramente proporcional a la velocidad de flujo.
- La pérdida de presión en tuberías de gran diámetro es menor que en las tuberías de menor diámetro a la misma velocidad de flujo.
- A una presión dada, proporcionada por la bomba de lodo, habrá pérdidas de presión a través de todo el sistema de circulación, desde la succión de la bomba hasta la línea de descarga.
- A mayores profundidades, habrá mayores pérdidas de presión, debido al aumento de la distancia con la fuente de presión (bombas de lodos), lo que requeriría de bombas de mayor potencia.

- La pérdida de presión a través de las tuberías de perforación y drillcollars varían de acuerdo a sus diámetros internos y su longitud, así como por la velocidad del fluido.
- En la pérdida de presión alrededor del drillcollar, tuberías de perforación dependerá del diámetro interior del hueco y del diámetro exterior y longitud de la sarta.
- En el caso de las brocas, al disminuir el tamaño de los orificios de salida, habrá mayor pérdida de presión, pero habrá mayor velocidad de chorro.

Para determinar la pérdida de presión en el sistema de circulación se utilizan en la práctica las pérdidas de presión en cada uno de los elementos por donde hace su recorrido el lodo como en los equipos de superficie, al interior de las tuberías, en los espacios anulares y en la salida de la broca.

### **4.3 MODELOS REOLÓGICOS**

Un modelo reológico es una descripción de la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte. La ley de viscosidad de Newton es el modelo reológico que describe el comportamiento de flujo de los fluidos newtoniano, los fluidos de perforación son fluidos no newtonianos, este modelo no describe su comportamiento de flujo. En realidad, como no existe ningún modelo reológico específico que pueda describir con precisión las características de flujo de todos los fluidos de perforación, los modelos reológicos a tratar son:

- Flujo plástico de Bingham
- Ley exponencial
- Ley exponencial modificada o modelo de Herschell Bulkley.

El uso de estos modelos requiere medidas del esfuerzo de corte a dos o más velocidades de corte. A partir de estas medidas, se puede calcular el esfuerzo de corte a cualquier otra velocidad de corte.

#### 4.3.1 MODELO DE PLÁSTICO DE BINGHAM

El modelo de flujo plástico de Bingham ha sido usado más frecuentemente para describir las características de flujo de los fluidos de perforación. Éste es uno de los más antiguos modelos reológicos, que describe un fluido que requiere una fuerza finita para iniciar el flujo (punto cedente) y luego demuestra una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta (viscosidad plástica). La ecuación para el modelo de flujo plástico de Bingham es la siguiente:

$$\tau = \tau_0 + (PV * \gamma)$$

$\tau$ : Esfuerzo de corte ( $lb/100ft^2$ )

$\tau_0$ : Esfuerzo de cedencia en  $lb/100ft^2$  a una tasa de corte igual a cero.

$PV$ : Viscosidad plástica ( $cP$ )

$\gamma$ : Tasa de corte ( $sec^{-1}$ )

A partir de las lecturas del viscosímetro los valores de  $YP$  y  $PV$  pueden ser calculados con las siguientes ecuaciones:

$$PV (cP) = \theta 600 - \theta 300$$

$$YP \left( \frac{lb}{100ft^2} \right) = \theta 300 - PV(cP)$$

La mayor divergencia está a velocidades de corte más bajas. Si un lodo es un verdadero fluido Plástico de Bingham, entonces el esfuerzo de gel inicial y el punto

cedente serán iguales, como en el caso de numerosos fluidos base agua de arcilla floculada.

#### 4.3.2 MODELO DE LEY EXPONENCIAL

El modelo de ley exponencial procura superar las deficiencias del modelo de Flujo Plástico de Bingham a bajas velocidades de corte. Es más complejo porque no supone que existe una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, como lo indica la figura 38. Sin embargo, las curvas de esfuerzo de corte vs. Velocidad de corte para los fluidos que obedecen a la Ley Exponencial pasan por el punto de origen. Este modelo describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte aumenta según la velocidad de corte elevada matemáticamente a una potencia determinada. El modelo de ley de exponencial asume que todos los fluidos son pseudoplásticos y la ecuación de flujo es definida como:

$$\tau = K * (\gamma)^n$$

$\tau$ : Esfuerzo de corte medido en  $dina/cm^2$

$K$ : Índice de consistencia

$\gamma$ : Tasa de corte en  $sec^{-1}$

$n$ : Índice de ley de exponencial.

$$n = \frac{\log \frac{\theta_2}{\theta_1}}{\log \frac{\omega_2}{\omega_1}} \quad K = \frac{\theta_1}{\omega_1^n}$$

Donde

$n$ : Índice de ley exponencial o exponente

$K$ : Índice de consistencia o índice de fluido de la ley exponencial.

$\theta_1$ : Indicación del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más baja.

$\theta_2$ : Indicación del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más alta.

$\omega_1$ : RPM del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más baja.

$\omega_2$ : RPM del viscosímetro de lodo a una velocidad de corte más alta.

Los valores de viscosidad plástica y punto de cedencia se calculan como en el anterior modelo a partir de lecturas de viscosímetro. Se utiliza la siguiente ecuación que es la fórmula de hidráulica anular de API en el caso de no tener el viscosímetro de 6 velocidades y tomar el registro de 100 RPM:

$$\theta_{100} = \theta_{300} - \frac{2 * PV}{3}$$

Se toma como  $\theta_3$ : El mismo valor de Esfuerzo de gel.

El índice “n” de Ley Exponencial indica el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido sobre un rango determinado de velocidades de corte. Cuanto más bajo sea el valor de “n”, más el fluido disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte sobre dicho rango de velocidades de corte, y más curvada será la relación de esfuerzo de corte/velocidad de corte. Según el valor de “n”, existen tres tipos diferentes de perfiles de flujo y comportamientos del fluido<sup>25</sup>:

- $n < 1$ : El fluido es un fluido no newtoniano que disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte.
- $n = 1$ : El fluido es un fluido newtoniano.
- $n > 1$ : El fluido es un fluido dilatante que aumenta su viscosidad con el esfuerzo de corte (los lodos no están incluidos en esta categoría).

El índice de consistencia “K” es la viscosidad a una velocidad de corte de un segundo recíproco (seg-1). Este índice está relacionado con la viscosidad de un fluido a bajas velocidades de corte. La eficacia con la cual un fluido limpia el pozo y suspende los materiales densificantes y los recortes puede ser mejorada aumentando el valor de “K”. El índice de consistencia “K” está generalmente expresado en lb-seg-n/100 pies<sup>2</sup>, pero también se puede expresar en otras

---

<sup>25</sup> MANUAL MI 2001. Capítulo 5. Reología e Hidráulica. 36p.

unidades. Los valores de “K” y “n” pueden ser calculados a partir de los datos del viscosímetro.

### 4.3.3 MODELO DE LEY EXPONENCIAL MODIFICADA O DE HERSCHEL-BULKLEY

API ha seleccionado el modelo de ley exponencial como modelo estándar, pero este no describe totalmente a los fluidos de perforación, porque no tiene un esfuerzo de cedencia y calcula un valor demasiado bajo de la viscosidad a muy baja velocidad de corte. Puede ser utilizado para tomar en cuenta el esfuerzo requerido para iniciar el movimiento del fluido (esfuerzo de cedencia). Está claro que el modelo de ley exponencial modificada se parece más al perfil de flujo de un lodo de perforación típico. Se usa un viscosímetro FANN para obtener las indicaciones del cuadrante a velocidades de 600, 300 y 3 *RPM*.

Matemáticamente, el modelo de Herschel-Bulkley es el siguiente:

$$\tau = \tau_0 + K * (\gamma)^n$$

$\tau$ : Esfuerzo de corte medido en  $lb/100ft^2$ .

$\tau_0$ : Esfuerzo de cedencia en  $lb/100ft^2$ . a una tasa de corte igual a cero.

$K$ : Índice de consistencia en  $cP$  o  $lb/100ft^2$ .

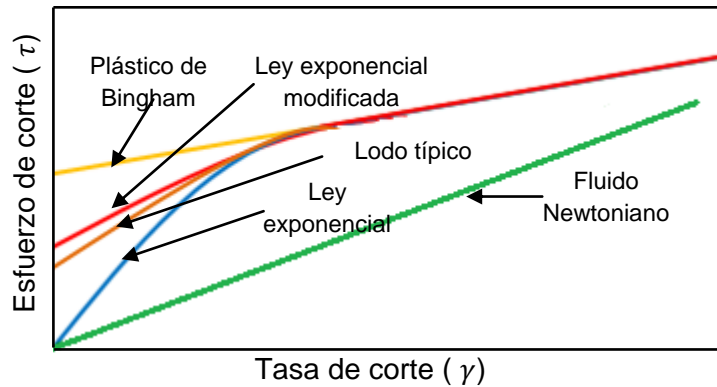
$\gamma$ : Tasa de corte en  $sec^{-1}$

$n$ : Índice de flujo de fluidos

Este modelo se reduce al modelo de plástico de Bingham cuando  $n = 1$  y se reduce al modelo de ley de exponencial cuando  $\tau_0=0$ . La solución de este modelo es más compleja y requiere como mínimo de 3 esfuerzos de corte/ tasas de corte.

La figura 38 ilustra las diferencias entre los modelos de expuestos; el modelo de ley exponencial modificada es ligeramente más complicado que el modelo de Flujo de Bingham o el modelo de ley exponencial.

**Figura 38:** Comparación de los modelos reológicos



Fuente: Modificado del Manual de MI. Capítulo 5. Reología e Hidráulica.

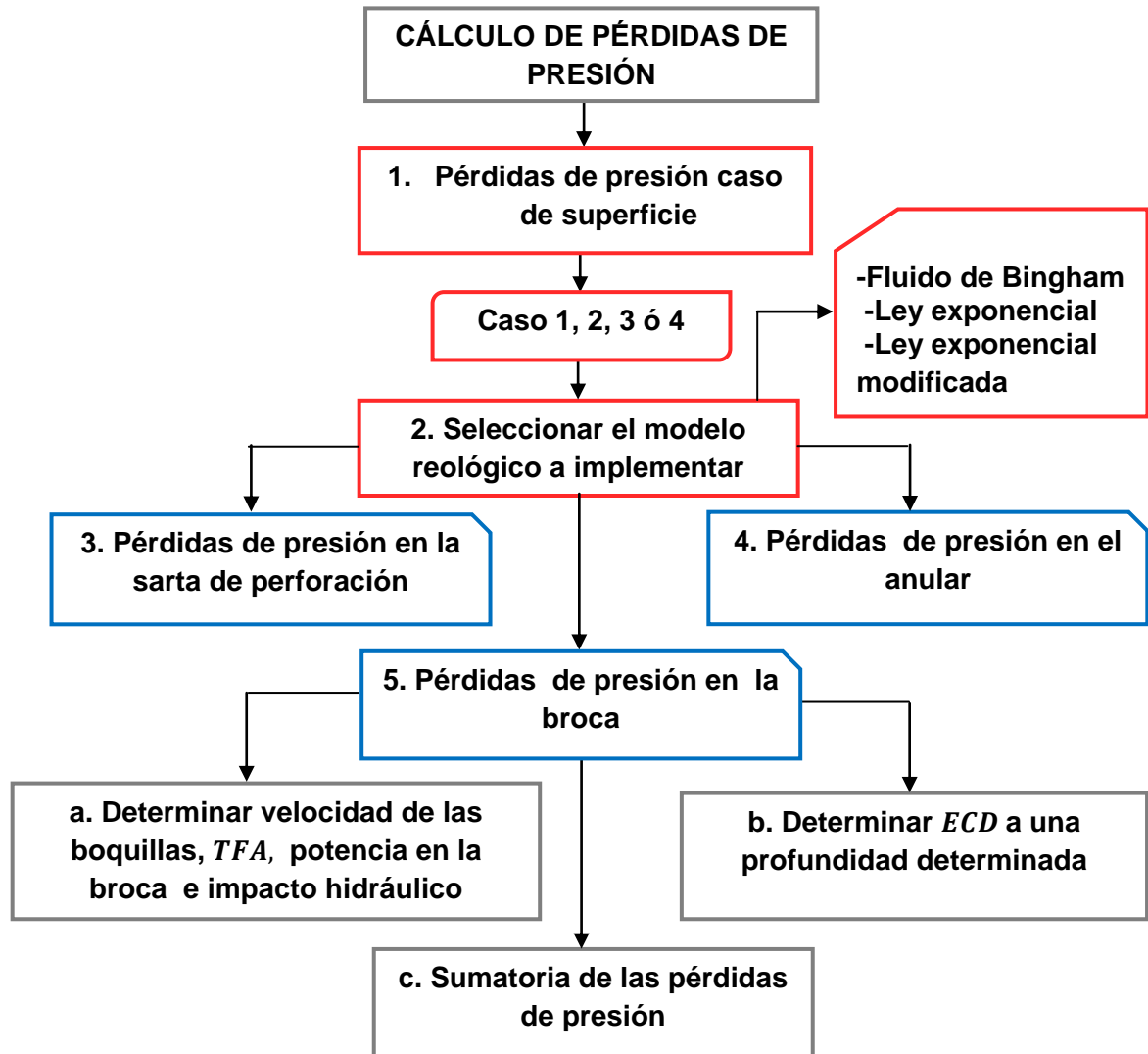
Sin embargo, este modelo puede aproximarse más al comportamiento reológico verdadero de la mayoría de los fluidos de perforación.

#### 4.4 ECUACIONES PRÁCTICAS DE HIDRÁULICA

El sistema de circulación de un pozo de perforación consta de varios componentes cada uno de los cuales está sujeto a una caída de presión específica. La suma de las caídas de presión de éstos es igual a la pérdida total de presión del sistema o a la presión medida del tubo vertical.

Una metodología sencilla es propuesta para calcular las pérdidas de presión y se presenta en la figura 39.

**Figura 39:** Procedimiento para cálculo de pérdidas de presión



Fuente: Autores.

#### 4.4.1 PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN EL SISTEMA DE CIRCULACIÓN

Los principales factores que influyen la magnitud de las pérdidas de presión en el sistema son:

- La geometría del sistema de circulación
- La tasa de flujo a través del sistema.

- El régimen de flujo en el cual el fluido fluye (laminar o turbulento).
- Las propiedades reológicas del fluido circulante.

**Equipos de superficie:** Las pérdidas de presión superficiales incluyen las pérdidas entre el manómetro del tubo vertical y la tubería de perforación. Para calcular la pérdida de presión en las conexiones superficiales, las geometrías comunes del equipo superficial están indicadas tabla 10.

**Tabla 10:** Casos de equipo superficial

CASO	TUBO VERTICAL	MANGUERA	UNION GIRATORIA	KELLY	$L_{equiv}$ 3,826 ID (in)	E	Csc
1	40 ft 3 in ID	45 ft 2 in ID	20ft 2 in ID	40 ft 2,25 in ID	2600 ft	$2.5 \cdot 10^{-4}$	1.00
2	40 ft 3,5 in ID	55 ft 2,5 in ID	25 ft 2,5 in ID	40 ft 3,25 in ID	946 ft	$9.6 \cdot 10^{-5}$	0.36
3	45 ft 4 in ID	55 ft 3 in ID	25 ft 2,5 in ID	40 ft 3,25 in ID	610 ft	$5.3 \cdot 10^{-5}$	0.22
4	45 ft 4 in ID	55 ft 3 in ID	30 ft 3 in ID	40 ft 4 in ID	424 ft	$4.2 \cdot 10^{-5}$	0.15

ID: Diámetro Interno (Internal Diameter)

Fuente: Modificado del Manual MI de lodos. Capítulo 5. Reología e Hidráulica

En la tabla 11 se indica como calcular las pérdidas de presión en el equipo de superficie según el modelo reológico seleccionado.

**Tabla 11:** Cálculo de pérdidas de presión en equipos de superficie.

Modelo Reológico	Pérdidas de presión	Constante
<b>Bingham</b>	$P_{equipos\ sup} = E * \rho^{0.8} * Q^{1.8} * Vp^{0.2}$	E

<b>Ley exponencial</b>	$P_{\text{equipo de sup}} = \frac{f_p * PV^2 * \rho}{92916 * D} * L_{\text{equivalente}}$	$L_{\text{equivalente}}$
<b>Herschel-Bulkley</b>	$P_{\text{equipo de sup}} = C_{sc} * \rho * \left(\frac{Q}{100}\right)^{1.86}$	$C_{sc}$

Fuente: Well Engineering & Construction, Rabia, Hussain y Manual MI de lodos. Capítulo 5. Reología e Hidráulica

La geometría del sistema es determinada por el diseño del pozo y consideraciones operacionales de perforación, la tasa de flujo mínima es dictada primariamente por la velocidad anular requerida para limpiar los ripios y máxima por la máxima potencia de salida de las bombas de lodo y la máxima presión que puede ser tolerada por el sistema de bombeo.

**Selección del modelo reológico a utilizar:** Variables implicadas:

$Q$  Tasa de flujo en ( $gpm$ )

$D$ : Diámetro externo ( $in$ )

$d$ : Diámetro interno ( $in$ )

$\rho$ : Densidad del lodo ( $lpg$ )

$L$ : Longitud ( $ft$ )

$PV$ : Viscosidad plástica ( $cP$ )

$YP$ : Punto de cedencia ( $lb/100ft^2$ ).

### **Cálculo de pérdidas en tubería y espacio anular**

En la tablas 12 a 14 se presentan los cálculos de hidráulica requeridos para determinar las pérdidas de presión en tubería y en anulares para cada modelo reológico.

**Tabla 12:** Cálculos de hidráulica en tubería y anular modelo plástico de Bingham.

	<b>Dentro de la tubería (superficie, drill pipe y drill collar)</b>	<b>En el espacio Anular</b>
<b>Velocidad de flujo promedio (ft/min)</b>	$V_p' = \frac{24,5 * Q}{d^2}$	$V_a' = \frac{24,5 * Q}{D^2 - d^2}$  $De = D - d$
<b>Velocidad crítica de flujo (ft/min)</b>	$V_{c_p}' = \frac{(97 * PV) + 97\sqrt{PV + (8.2 * \rho * d^2 * YP)}}{\rho * d}$	$V_{c_a}' = \frac{(97 * PV) + 97\sqrt{PV^2 + (6.2 * \rho * De^2 * YP)}}{\rho * D}$
<b>Pérdidas de presión (psi)</b>	Si $V_p' > V_{c_p}'$ es flujo <b>turbulento</b>  $P_p = \frac{8.91 * 10^{-5} * \rho^{0.8} * Q^{1.8} * PV^{0.2}}{d^{4.8}} * L$	Si $V_a' > V_{c_a}'$ es flujo <b>turbulento</b>  $P_a = \frac{8.91 * 10^{-5} * \rho^{0.8} * Q^{1.8} * PV^{0.2}}{De^3 * (D + d)^{1.8}} * L$
	Si $V_p' < V_{c_p}'$ , es flujo <b>laminar.</b>  $P_p = \frac{L * PV * V_p'}{90000 * d^2} + \frac{L * YP}{225 * d}$	Si $V_a' < V_{c_a}'$ , es flujo <b>laminar.</b>  $P_a = \frac{L * PV * V_a'}{60000 * De^2} + \frac{L * YP}{225 * De}$

Fuente: Tomado de Well Engineering & Construction, Rabia, Hussain capítulo Practical Rig Hydraulics

**Tabla 13:** Cálculos de hidráulica en tubería y anular modelo de ley exponencial

	<b>Dentro de la tubería (superficie, drill pipe y drill collar)</b>	<b>En el espacio Anular</b>
<b>Cálculo de "n" y "K"</b>	Ley exponencial "n" en tuberías:  $n_p = 3,32 \log \frac{\theta 600}{\theta 300}$ Índice a velocidades medias.	Ley exponencial "n" en anulares:  $n_a = 0,657 \log \frac{\theta 100}{\theta 3}$ Índice a velocidades bajas.
	Índice de consistencia en tuberías:  $K_p = \frac{5,11 * \theta 600}{1022^{n_p}}$	Índice de consistencia en anulares:  $K_a = \frac{5,11 * \theta 3}{5,11^{n_a}}$
<b>Velocidad de flujo (ft/min)</b>	$V_p = \frac{24,48 * Q}{d^2}$	$V_a = \frac{24,48 * Q}{D^2 - d^2}$
<b>Viscosidad efectiva en (cP)</b>	$\mu_{ep}$ $= 100 * K_p \left( \frac{1,6 * V_p}{d} \right)^{n_p - 1} * \left( \frac{3n_p + 1}{4n_p} \right)^{n_p}$	$\mu_{ea}$ $= 100 * K_a * \left( \frac{2,4 * V_a}{D - d} \right)^{n_a - 1} * \left( \frac{2n_a + 1}{3n_a} \right)^{n_a}$
<b>Número de Reynolds</b>	$N_{Rep} = \frac{15,467 * V_p * d * \rho_{lodo}}{\mu_{ep}}$	$N_{Rea} = \frac{15,467 * V_a * (D - d) * \rho_{lodo}}{\mu_{ea}}$
<b>Factor de fricción "f"</b>	Si $N_{Rep} > 2100$ , es flujo <b>turbulento.</b>  $f_p = \frac{\left( \frac{\log n_p + 3,93}{50} \right)}{N_{Rep}^{\left[ \frac{1,75 - \log n_p}{7} \right]}}$	Si $N_{Rea} > 2100$ , es flujo <b>turbulento.</b>  $f_a = \frac{\left( \frac{\log n_a + 3,93}{50} \right)}{N_{Rea}^{\left[ \frac{1,75 - \log n_a}{7} \right]}}$
	Si $N_{Rep} < 2100$ , es flujo <b>laminar.</b>	Si $N_{Rea} < 2100$ , es flujo <b>laminar.</b>

	$f_p = \frac{16}{N_{Rep}}$	$f_a = \frac{24}{N_{Rea}}$
<b>Pérdidas de presión (psia)</b>	$P_p = \frac{f_p * V_p^2 * \rho}{92916 * d} * L$	$P_a = \frac{f_a * V_a^2 * \rho}{92916 * (D - d)} * L$

Fuente: Método API de cálculos básicos de hidráulica. Practica 13D Recomendada por API, 3ra edición, 1 de junio de 1995

**Tabla 14:** Cálculos de hidráulica en tubería y anular modelo de ley exponencial modificada.

	<b>Dentro de la tubería (superficie, drill pipe y drill collar)</b>	<b>En el espacio Anular</b>
<b>Cálculo de “n” y “K”</b>	En función de valores de viscosímetro:	
	$n = 3.32 * \log \frac{\theta 600 - \tau_y}{\theta 300 - \tau_y} \quad k = \frac{\theta 300 - \tau_y}{511^n}$ $\tau_y = (2 * \theta 3) - \theta 6$	
<b>Velocidad de flujo (ft/min)</b>	En función de datos de reología del fluido.	
	$n = 3.32 * \log \frac{2V_p + Y_p - \tau_y}{V_p + Y_p - \tau_y} \quad k = \frac{V_p + Y_p - \tau_y}{511^n}$ $\tau_y = (2 * \theta 3) - \theta 6$	
<b>Corrección por geometría del pozo</b>	$Ba = \left[ \frac{(3 - \alpha) * n + 1}{(4 - \alpha) * n} \right] * \left[ 1 + \frac{\alpha}{2} \right]$ $\alpha = 0$	$Ba = \left[ \frac{(3 - \alpha) * n + 1}{(4 - \alpha) * n} \right] * \left[ 1 + \frac{\alpha}{2} \right]$ $\alpha = 1$
<b>Velocidad de</b>		

<b>corte en la pared</b>	$\gamma_w = \frac{1.6 * V * Ba}{D_{hidraulico}}$ $D_{hidraulico} = D$	$\gamma_w = \frac{1.6 * V * Ba}{D_{hidraulico}}$ $D_{hidraulico} = D - d$
<b>Esfuerzo de corte en la pared</b>	$\tau_f = \left(\frac{4 - \alpha}{3 - \alpha}\right)^n * \tau_y + k * \gamma_w^n$ $\tau_w = 1.066 * \tau_f$	$\tau_f = \left(\frac{4 - \alpha}{3 - \alpha}\right)^n * \tau_y + k * \gamma_w^n$ $\tau_w = 1.066 * \tau_f$
<b>Número de Reynolds</b>	$N_{ReG}$ : Número de Reynolds generalizado. $N_{ReG} = \frac{\rho * V^2}{19.36 * \tau_w}$ $N_{Re}$ : Número de Reynolds crítico. $N_{Cre} = 3470 - 1370 * n$	
<b>Factor de fricción "f"</b>	Flujo laminar:	
	$f = \frac{16}{N_{ReG}}$	
	Flujo turbulento:	
	$f = \frac{a}{N_{ReG}^b}$ $a = \frac{\log(n) + 3.93}{50} \quad y \quad b = \frac{1.75 - \log(n)}{7}$	
<b>Pérdidas de presión (psia)</b>	$Pp = \frac{1.076 * \rho * f * V_p^2}{10^5 * d} * L$	$Pa = \frac{1.076 * \rho * f * V_a^2}{10^5 * (D - d)} * L$

Fuente: Tomado de API Recommended Practice 13D – Rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids

#### 4.4.2 HIDRÁULICA EN LA BROCA DE PERFORACIÓN

En la tabla 15 se presenta los principales cálculos relacionados con la hidráulica de la broca.

**Tabla 15:** Cálculos de hidráulica en la broca de perforación.

<p><b>Pérdida de presión en la broca</b> (<i>psi</i>)</p>	$P_b = \frac{156 * \rho * Q^2}{(D_{n1}^2 + D_{n2}^2 + D_{n3}^2)^2}$ $P_b = \frac{Q^2 * \rho_{lodo}}{10846 * TFA}$
<p><b>TFA</b> <b>Área de las boquillas</b> (<i>in</i><sup>2</sup>)</p>	$TFA = \frac{\pi}{4} \left( \left[ \frac{D_{n1}}{32} \right]^2 + \left[ \frac{D_{n2}}{32} \right]^2 + \left[ \frac{D_{n3}}{32} \right]^2 + \dots + \left[ \frac{D_{ni}}{32} \right]^2 \right)$ $D_n = \sqrt{\frac{1304 * TFA}{N_n}}$ <p><i>D<sub>n</sub></i>: Tamaño de las boquillas en múltiplos de 32 de pulgada. <i>N<sub>n</sub></i>: Número de boquillas.</p>
<p><b>Porcentaje de pérdida de presión en la broca</b></p>	$\% \Delta P_b = \frac{P_b}{P_{total}} * 100$
<p><b>Potencia hidráulica en la broca</b> (<i>hp</i>)</p>	$HHP_b = \frac{Q * P_b}{1714}$
<p><b>Potencia hidráulica en la broca por pulgada cuadrada</b> (<i>hp/in</i><sup>2</sup>)</p>	$HSI = \frac{HHP_b}{A_b}; A_b = \frac{\pi}{4} * D_b^2$
<p><b>Velocidad en las boquillas</b> (<i>ft/s</i>)</p>	$V_n = \frac{417,2 * Q}{D_{n1}^2 + D_{n2}^2 + D_{n3}^2}$
<p><b>Impacto hidráulico</b> (<i>lb</i>)</p>	$IF = \frac{V_n * Q * \rho_{lodo}}{1930}$
<p><b>Impacto hidráulico por</b></p>	$IF(psi) = \frac{1,27 * IF(lb)}{D_b^2}$

<p><b>pulgada cuadrada</b> <i>(lb/in<sup>2</sup>)</i></p>	
---	--

Fuente: Método API de cálculos básicos de hidráulica. Práctica 13D Recomendada por API, 3ra edición, 1 de junio de 1995

**Reglas empíricas generales:** Se proporcionan ciertos lineamientos para interpretar los datos resultantes. Dichas “reglas” no son absolutas y tampoco se aplican a todos los casos. Cada vez que se excedan *los valores máximos*, existe la posibilidad de reducir la vida útil de la broca<sup>26</sup>.

1.  **$Q$** , la tasa de flujo deberá ser mantenida a 30-60 *gpm* por pulgada de diámetro de la broca. No se debe reducir la tasa de flujo para lograr mayor potencia. Una tasa de flujo demasiado baja reducirá la limpieza efectiva de pozo.
  - El *caudal mínimo* para limpiar el pozo es de 30 *gpm* por pulgada de diámetro del pozo es decir, un pozo de 8 ½ “requiere 255 *gpm*.
  - El *caudal máximo* es de 50 *gpm* por pulgada de diámetro del pozo.
  
2.  **$P_b$** , permite obtener la presión circulante total que se consume en la broca. En general, cuando se utiliza entre el 50% y el 65% de la presión superficial en la broca, se obtiene normalmente una hidráulica adecuada. Si las pérdidas de presión parásita se incrementan es necesario realizar una optimización.
  
3.  **$HHP_b$** . Calcula el total de caballos de fuerza hidráulica disponibles a lo largo de la cara de la broca. Los caballos de fuerza hidráulica son una medida del trabajo que se realiza para mover ese fluido.

---

<sup>26</sup> BAKER HUGHES INTEQ. Manual de Ingeniería de Fluidos, 1998. 568p.

4.  $HSI = HHP_b / A_b$ , convierte el total de los caballos de fuerza hidráulica en la broca a caballos de fuerza hidráulica disponibles por pulgada cuadrada de la cara de la broca. Un intervalo general para la perforación optimizada es 2,5 a 5,0.
5.  $V_n$ , calcula la velocidad a la cual se mueve el fluido a través de las boquillas de la broca a la tasa existente de flujo. La velocidad de las boquillas varía entre 250 y 450 pies/seg para la mayoría de las operaciones de perforación.
6.  $IF$ , proporciona el total de la fuerza en libras que se ejerce en la cara de la formación al hacer circular el fluido a través de las boquillas de la broca. En la mayoría de las operaciones de perforación se maximiza la fuerza de Impacto cuando el 50% de la presión superficial se consume en la broca.
7.  $IF/in^2$ , convierte la Fuerza total de Impacto en la fuerza disponible por pulgada cuadrada del área de la cara de la broca.
8.  $\% \Delta P_b$ , proporciona el porcentaje de la presión total superficial que se consume en la broca. Este es el parámetro complementario del ítem 1.
9.  $HHP_{sup}$ , permite calcular la potencia hidráulica total que se consume en todo el sistema. Se utiliza como criterio de comparación de la eficiencia del programa hidráulico.

**Sistema con herramientas de fondo:** Existen dos formas de optimizar un sistema con herramientas de fondo. El método más directo es restar las pérdidas de presión esperadas para las herramientas de fondo de la presión de bombeo<sup>27</sup>. Esta información deberá ser provista por los fabricantes o proveedores de los componentes de la herramienta. El resto del sistema, es entonces optimizado,

---

<sup>27</sup> SCHLUMBERGER. Tecnología de perforación. Sección 4, 306p

utilizando el valor menor de la presión de bombeo. Una de las desventajas de éste método, es que es difícil de predecir cuál será la pérdida de presión a través de las herramientas, ya que la tasa de flujo aún no se ha determinado.

El segundo método es el de optimizar el sistema como si no hubiera herramientas en la sarta de perforación. La presión requerida para las herramientas es entonces restada de la presión disponible en broca. Los resultados de éste método dan una tasa de flujo más alta, con un área de boquilla mayor que las del método 1. Debido a que ya conocemos la tasa de flujo, éste método dará una caída de presión exacta para las herramientas de fondo. Ambos métodos, sin embargo, proveen limpieza máxima de pozo.

**Pérdidas de presión total en el sistema:** Mediante la ecuación expresada como sumatoria se pueden calcular las pérdidas por fricción en el sistema

$$P_{total\ sistema} = P_{conexión\ superf} + \sum P_p + \sum P_a + P_{broca}$$

**Calculo densidad equivalente de circulación ECD:** En todo pozo petrolero, cualquiera que sea su profundidad, si el fluido no está circulando, ejerce una presión hidrostática, al iniciarse la circulación se presenta la presión hidrostática y la necesaria para hacer circular el fluido por el espacio anular hacia la superficie la suma de estas dos presiones representa el valor de la presión de circulación en fondo. A esta resultante, que siempre será mayor a la original se le llama densidad equivalente de circulación.

A la profundidad total:

$$ECD = \rho_{lodo} + \frac{\sum P_a}{0,052 * TVD}$$

*TVD*: Profundidad vertical total de evaluación *ft*

Presión de circulación en fondo:  $P_{cf} = 0,052 * ECD * TVD$

Afectan la densidad equivalente de circulación el punto de cedencia y la viscosidad plástica, a mayor *ECD* habrá mayor consumo de potencia por parte de la bomba, siendo más factible la pérdida de fluido hacia la formación especialmente en zonas de alta permeabilidad.

### **Importancia de una buena hidráulica para perforar**

- Remover los recortes en el espacio anular
- Calcular la *ECD* (Densidad Equivalente de Circulación),
- Calcular presiones de surgencia / succión durante los viajes de entrada y salida de la sarta en el pozo
- Optimizar del proceso de perforación.

## **4.5 DISEÑO HIDRÁULICO**

### **4.5.1 FACTORES LIMITANTES**

**Velocidad anular:** Es importante evitar la retención de sólidos en el espacio anular, debido a que el incremento en la densidad del lodo que podría causar pérdidas de fluido hacia las formaciones. Un valor óptimo para la velocidad anular es seleccionado entre el límite alto y bajo permisible. Para un tamaño dado de tubería de perforación y pozo, la velocidad anular sólo podrá ser cambiada, variando la tasa de flujo entregado por la bomba.

1. *Q<sub>min</sub>*: Objetivo limpieza del pozo: La velocidad del fluido en el espacio anular está en su punto más bajo en sitios en donde el área seccional anular sea mayor.

Debido a que el espacio anular alrededor de la tubería de perforación tiene la mayor área seccional dentro del agujero, la velocidad anular llega a su punto más bajo en dicho espacio. La velocidad anular mínima es determinada por medio de la capacidad de transporte de los recortes del fluido de perforación. En los pozos desviados, se podrían desarrollar camas de recortes lo que conlleva a su vez al riesgo incrementado de atrapamiento de la tubería por empacado de recortes.

Otro factor que gobierna el límite inferior de la velocidad anular, es la velocidad de asentamiento de los ripios en el espacio anular. Si la velocidad de asentamiento excede la velocidad anular, entonces se desarrollarán camas de recortes, la capacidad de transporte de los recortes de un sistema de lodos, está altamente influenciado por su viscosidad y fuerza del gel.

- Para *Brocas tricónicas*:

$$V_{a_{min}} = 210 - 12 * D_h ; \quad D_h < 9\frac{7}{8}''$$

$$Q_{min} = V_{a_{min}} * \left( \frac{D_h^2 - D_e^2}{24,5} \right)$$

$$Q_{min} = 30 * D_h ; \quad D_h > 9\frac{7}{8}''$$

- Para *Brocas PDC*:

$$Q_{min} = 12,72 * D_h^{1,47}$$

2. *Q<sub>crit</sub>*: Objetivo evitar lavado del pozo. La velocidad del espacio anular estará en su punto más alto alrededor de los drill collar.

Es importante evitar erosionar formaciones sueltas, que podrían resultar en grandes ensanchamientos, es deseable tener flujo laminar alrededor de la tubería. Una vez que los límites operativos para la velocidad anular han sido determinados, es posible seleccionar la presión de bombeo y la tasa de flujo, basados en las

limitaciones del equipo en superficie y en el deseo de mantener el flujo laminar en el espacio anular o limitar la densidad equivalente de circulación.

Para el modelo reológico de ley exponencial está dado por:

$$Q_{crit} = V_{crit} * \left( \frac{D_h^2 - D_e^2}{24,5} \right)$$

$$V_{crit} = \left[ \frac{7589 * K_a}{\rho_{lodo}} \right]^{\frac{1}{2-n_a}} * \left[ \frac{2,4}{D_h - D_e} * \frac{2n_a + 1}{3n_a} \right]^{\frac{n_a}{2-n_a}}$$

Para el modelo reológico de Bingham el cálculo de la velocidad crítico está por:

$$Q_{crit} = \frac{V_{crit} * (D_h^2 - OD^2)}{24,51}$$

$$V_{crit} = \frac{97 * PV + 97 \sqrt{PV^2 + 8,2\rho(D_h - OD)^2 YP}}{\rho D}$$

$V_{crit}$ : Velocidad crítica (*ft/min*).

$\rho$ : Densidad del lodo (*lpg*).

$PV$ : Viscosidad plástica en (*cP*).

$D_h$ : Diámetro del hueco (*in*).

$YP$ : Punto de cedencia (*lb/100ft<sup>2</sup>*).

$Q_c$ : Caudal crítico (*gpm*).

Para determinar el caudal crítico en el método de potencia modificado es necesario realizar cálculos iterativos en la sección anular entre el hueco y el drillcollar, para esto se debe seguir la siguiente metodología<sup>28</sup>:

### Metodología propuesta:

1. Calcular el número de Reynolds crítico:

$$N_{CRe} = 3470 - 1370 * n$$

<sup>28</sup> API Recommended Practice 13D 2009. Rheology and Hydraulics of oil Well Drilling Fluids.

2. Calcular el factor de corrección geométrico:

$$Ba = \left[ \frac{(2) * n + 1}{(3) * n} \right] * \left[ 1 + \frac{1}{2} \right]$$

3. Suponer un valor de velocidad crítica  $V_{crit}$  inicial.

4. Calcular la velocidad de corte en la pared:

$$\gamma_w = \frac{1.6 * V_{crit} * Ba}{D_h - D_e}$$

5. Calcular el esfuerzo de corte en la pared:

$$\tau_f = \left( \frac{3}{2} \right)^n * \tau_y + k * \gamma_w^n$$

$$\tau_w = 1.066 * \tau_f$$

6. Calcular una nueva  $V_{crit}$  despejando la ecuación de número de Reynolds generalizada y utilizando el valor de  $N_{CRe}$  calculado en el paso 1:

$$V_{crit} = \sqrt{\frac{N_{CRe} * 19.36 * \tau_w}{\rho}}$$

7. Comparar los valores de  $V_{crit}$  asumido con el calculado en el paso 6, si no son iguales o la diferencia no se encuentra en un valor de tolerancia definido, utilizar el  $V_{crit}$  calculado y repetir los pasos 4 a 6 has que se encuentre la convergencia.

8. Calcular  $Q_{crit}$  con la  $V_{crit}$  encontrada en la iteración:

$$Q_{crit} = V_{a_{crit}} * \left( \frac{D_h^2 - D_e^2}{24,5} \right)$$

$Q_{m\acute{a}x}$ : Objetivo máxima capacidad de la bomba. (Rendimiento de las bombas)

$$Q \left( \frac{gal}{min} \right) = Q \left( \frac{gal}{stroke} \right) * N \left( \frac{strokes}{min} \right) * EB$$

*EB*: Eficiencia de la bomba.

La tasa de flujo óptima dependerá de todas las pérdidas de presión del sistema y de si la hidráulica de la broca será optimizada con base en la potencia hidráulica o en el modelo de fuerza de impacto del chorro.

#### 4.6 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA HIDRÁULICA

Básicamente la optimización de la hidráulica del sistema de circulación busca dos objetivos principales:

1. Limpiar el pozo de manera eficiente.
2. Hacer un mayor uso de la potencia disponible para perforar el pozo.

**Optimización de la hidráulica del sistema:** Independiente del proceso de optimización es importante mencionar que las condiciones de máxima fuerza de impacto del chorro y potencia hidráulica, sólo son válidas para una profundidad dada. Desviaciones del 20% de la ideal de 65% o del 48% <sup>29</sup> de la presión total de superficie no cambiarán significativamente la potencia hidráulica consumida o fuerza de impacto en la broca. Esto permite tener fuerzas de impacto del chorro o potencias hidráulicas cercanas al máximo óptimo, a lo largo de un gran intervalo de profundidad, sin tener que cambiar el diámetro de las boquillas.

**Optimización de la hidráulica en la broca:** El propósito de optimizar la hidráulica de la broca es el de proveer máxima limpieza del pozo y velocidades óptimas de perforación, con un mínimo de potencia. La hidráulica de la broca será

---

<sup>29</sup> SCHLUMBERGER. Tecnología de perforación. Sección 4, 306p

normalmente optimizada bien sea basada en la fuerza de impacto del chorro en el fondo o en la potencia hidráulica consumida en broca. Lo adecuado para cada método y para una corrida de broca en particular, dependerá altamente de experiencias previas en el área, la longitud o profundidad del pozo y las condiciones de fondo. En caso de que los datos de desempeño de broca sean limitados, la hidráulica se deberá ser optimizada al comienzo, por medio de la potencia hidráulica consumida en la broca.

Sin embargo, y como regla general, en las secciones poco profundas y de mayor diámetro de pozo, en donde la velocidad de perforación es alta y son generados altos volúmenes de recortes, los caudales de flujo más altos son beneficiosos para la limpieza efectiva de pozo. Optimizar la hidráulica con base en la fuerza de impacto de chorro, proveerá tasas de flujo en un 19.5% más altas que las calculadas con el método de potencia hidráulica.

En las secciones más profundas y de menor diámetro, en donde la velocidad de perforación es menor y las fuerzas estáticas y de cortes dinámicos de atrape hacia abajo se convierten la mayor preocupación hidráulica, las velocidades más altas de chorro y la presión de fondo, se vuelven críticas. Bajo estas condiciones, maximizar la potencia hidráulica, provee un 14.3% más de velocidades de chorro y un 34.7% más de presiones, que con el método de máxima fuerza de impacto del chorro sobre el fondo. Las pérdidas de circulación son denominadas perdidas por fricción o pérdidas parásitas y corresponden a la caída de presión en cada componente del sistema:

$$P_{circulacion} = \Delta P_{equipos\ sup} + \Delta P_{drill\ pipe} + \Delta P_{drill\ collar} + \Delta P_{a\ drill\ collar} + \Delta P_{a\ dril\ pipe}$$

También se representan como:  $P_c \propto Q^m$  ;  $P_c = cQ^m$

La presión de superficie o la presión de bombeo estarán dadas por la suma de las pérdidas de circulación más las pérdidas de presión en la broca.

$$P_s = P_c + P_b$$

#### 4.6.1 MÉTODO DE POTENCIA HIDRÁULICA

Este método supone que la remoción de recortes depende de la cantidad de energía disipada producida por el fluido, en la broca. Debido a esto, las velocidades óptimas de perforación serán alcanzadas cuando la potencia hidráulica por pulgada cuadrada o *HSI* consumida en la broca, sea maximizada.

La *HSI* provee una medida de la potencia hidráulica consumida en la broca y es una función del caudal o tasa de flujo y de la caída de presión en broca, así como del diámetro del pozo y, por lo tanto, incrementará a medida que la tasa de flujo sea incrementada. Sin embargo, y medida que el caudal flujo incrementa, el *TFA* necesitará eventualmente ser incrementado para mantener una caída de presión adecuada, en cuyo caso la *HSI* caerá una vez más.

La potencia hidráulica en la broca queda expresada así:

$$HHP_b(\text{hp}) = \frac{Q * P_b}{1714}$$

$$HHP_b(\text{hp}) = \frac{Q * (P_s - P_c)}{1714}$$

Reemplazando:

$$HHP_b = \frac{Q * (P_s - cQ^m)}{1714} = \frac{QP_s - cQ^{m+1}}{1714}$$

$$\frac{dHHP_b}{dQ} = \frac{P_s - c(m + 1)Q^m}{1714}$$

Para hallar la expresión correspondiente a la máxima potencia hidráulica en la broca se deriva  $HHP_b$  en función de la tasa de flujo  $Q$  y se iguala a la cero así:

$$\frac{dHHP_b}{dQ} = 0$$

$$\frac{P_s - (m + 1)cQ^m}{1714} = 0$$

$$\frac{P_s - (m + 1)P_c}{1714} = 0$$

$$P_s - (m + 1)(P_s - P_b) = 0$$

Resolviendo para  $P_b$  finalmente se obtiene:

$$P_b = \frac{m}{(m + 1)} P_s$$

El  $HSI$  está en su punto máximo cuando la caída de presión a través de la broca es de un 65% de la presión total disponible en superficie (presión de bombeo), para un valor teórico de  $m = 1,86$  ( $m =$  índice de turbulencia).

#### 4.6.2 MÉTODO DE FUERZA DE IMPACTO

Este método de optimización supone que la limpieza de pozo es máxima cuando el fluido de perforación impacta la formación, con fuerza máxima. Es aplicable para optimizar la hidráulica en las secciones de mayor diámetro y superficiales del pozo, en donde las formaciones son más blandas y la remoción de recortes se beneficia de la acción de chorro.

La fuerza de impacto de chorro es la fuerza ejercida por el fluido al salir por las boquillas, cuando la broca está en el fondo. Es una función de la velocidad de chorro, la densidad del lodo y la tasa de flujo. La velocidad de chorro es el parámetro que gobierna éste método de optimización de la hidráulica de la broca.

A mayor velocidad de chorro, mayor será el efecto de limpieza de pozo. El valor mínimo aceptado de velocidad del chorro para una limpieza de fondo optimizada, es aproximadamente de 350 *ft/s*. Partiendo de la caída de presión a través de la broca:

$$P_b = \frac{156 * \rho * Q^2}{(D^2_{n1} + D^2_{n2} + D^2_{n3})^2}$$

La cual puede escribirse así:

$$P_b = \frac{96,23 * \rho * Q^2}{\left[\frac{\pi}{4}(D^2_{n1} + D^2_{n2} + D^2_{n3})\right]^2}$$

$$P_b = \frac{96,23 * \rho * Q^2}{[A_t]^2}$$

Despejando la tasa de flujo:

$$Q = \sqrt{\frac{P_b * [A_t]^2}{96,23 * \rho}}$$

La velocidad de las boquillas en función de la caída de presión a través de la broca:

$$V_n = \frac{Q}{A_t} = \frac{\sqrt{\frac{P_b * [A_t]^2}{96,23 * \rho}}}{A_t}$$

$$V_n = \sqrt{\frac{P_b}{96,23 * \rho}}$$

El impacto hidráulico:

$$IF(lb) = \frac{V_n * Q * \rho}{1930}$$

Sustituyendo la ecuación en la ecuación se obtiene:

Realizando las respectivas sustituciones:

$$IF = \frac{1}{1930 * \sqrt{96,23}} * \sqrt{\rho Q^2 P_s - \rho c Q^{m+2}}$$

Para hallar la expresión correspondiente a la máxima potencia hidráulica en la broca se deriva  $IF$  en función de la tasa de flujo  $Q$  y se iguala a la cero así:

$$\frac{dIF}{dQ} = 0$$

$$\frac{dIF}{dQ} = \frac{1}{1930 * \sqrt{96,23} * \sqrt{\rho Q^2 P_s - \rho c Q^{m+2}}} * (2\rho Q P_s - (m + 2)\rho c Q^{m+1}) = 0$$

$$2\rho Q P_s - (m + 2)\rho c Q^m = 0$$

Recordando  $P_c = cQ^m$

$$2P_s - (m + 2)(P_s - P_b) = 0$$

$$2P_s - 2P_s - mP_s + (m + 2)P_b = 0$$

Resolviendo para  $P_b$  finalmente se obtiene:

$$P_b = \frac{m}{(m + 2)} P_s$$

La fuerza de impacto de chorro se hace máxima cuando la caída de presión a través de la broca es de un 48% del total de la presión disponible en superficie, para un valor de  $m = 1,86$  tomado de la literatura. ( $m =$  índice de turbulencia).

En la tabla 16 se muestra la comparación de los dos métodos de optimización hidráulica presentados.

**Tabla 16:** Comparación de los métodos de optimización de hidráulica de la broca.

	<b>Máxima potencia hidráulica</b>	<b>Máximo impacto hidráulico</b>
<b>Fundamento</b>	La limpieza del fondo del pozo es efectiva gastando la máxima energía disponible en el fondo.	Los ripios son removidos efectivamente cuando la fuerza del impacto del fluido que sale de los chorros de la broca golpeando el fondo del pozo.
<b>Representa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayores presiones de superficie</li> <li>• Formaciones duras y semiduras</li> <li>• Menores caudales</li> <li>• Menores tamaños de boquillas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas tasas de bombeo</li> <li>• Formaciones blandas y semi blandas</li> <li>• Menores presiones de superficie</li> <li>• Mayores tamaños de cortes</li> <li>• Mayores tamaños de boquillas</li> </ul>

Fuente: Autores

#### **4.7 HIDRÁULICA DE CORAZONAMIENTO**

Se realiza el corazonamiento de un pozo estratigráfico para obtener núcleos de buena calidad y toma de registros eléctricos que permitan establecer la secuencia estratigráfica de la región.

La extracción de muestras o corazonamiento es usado para recoger muestras con múltiples propósitos. El corazonamiento es un método de perforación que extrae de las formaciones perforadas muestras para que geólogos e ingenieros puedan observar y estudiar con mayor detalle. La hidráulica de corazonamiento es una técnica de perforación que ha existido por más de 100 años, siendo corto el periodo de tiempo en el cual los equipos y técnicas para obtener muestras de buena calidad y un recobro particular en rocas duras, ha avanzado considerablemente, aunque el método básico no ha cambiado mucho. Algunas de

las técnicas básicas involucradas en la hidráulica de corazonamiento son paralelas a las usadas en la hidráulica de perforación rotaria<sup>30</sup>.

El fluido de perforación es circulado para transportar los ripios de perforación fuera del pozo, enfriar la broca, lubricar la tubería de perforación; algunos de los principales componentes usados en la operación de corazonamiento tales como plataformas de perforación y bombas de lodo, son idénticas a las usadas en la perforación rotaria, sin embargo para muchas de las operaciones de corazonamiento, el equipo puede variar considerablemente.

La operación de corazonamiento no requiere la misma cantidad de potencia que es necesitada para la perforación estándar y no requiere la misma cantidad de fluido de perforación a bombear porque es menor el volumen de fluido necesitado en estas operaciones. Las brocas de perforación varían considerablemente de las usadas para la perforación estándar, debido a que no están diseñadas para cortar todo el material que es penetrado sino para cortar el perímetro de los materiales penetrados y permitir al material central permanecer intacto y entrar en el barril corazonador o “Core Barrel”.

**Figura 40:** Brocas corazonadoras



Fuente: BAKER HUGHES INTEQ. New Coring Handbook, 1999. 278p.

Se han encontrado varios problemas asociados a las técnicas usadas en operaciones de corazonamiento de formaciones no consolidadas y deben ser

---

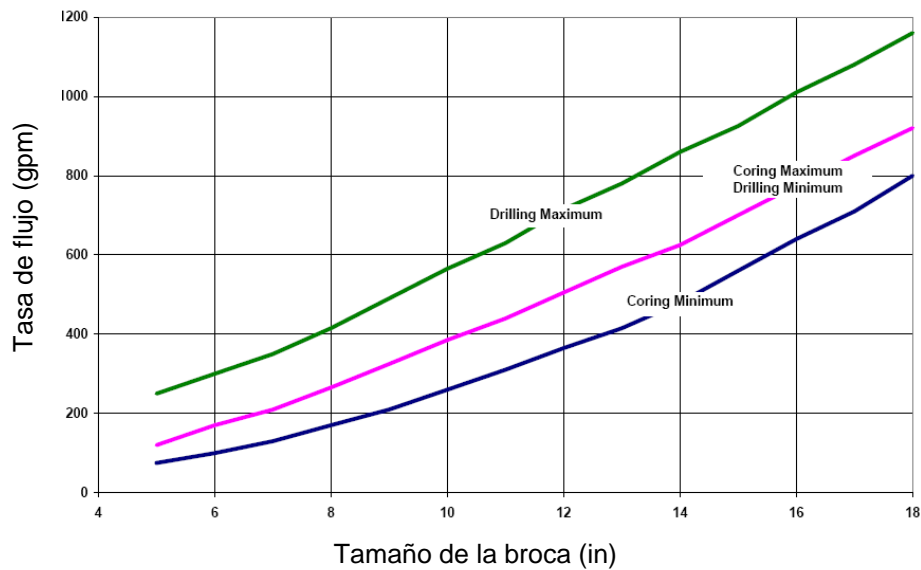
<sup>30</sup> USGS Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey. Application of Drilling, Coring, and Sampling Techniques to Test Holes and Wells. 36p

consideradas debido a que es el tipo de material que con frecuencia se encuentra en los estudios realizados, y dificulta la obtención de las muestras.

*Formaciones no consolidadas:* No se puede utilizar las bombas dúplex usadas en las operaciones de corazonamiento normales debido a la alta viscosidad del fluido a bombear requerido, la tubería de perforación y los barriles corazonadores pueden ser los mismos, sin embargo el uso de sistemas wireline asegura mayor estabilidad del hueco mientras se perfora y se corazona. Los cortadores de las brocas corazonadoras son diferentes debido a la naturaleza del material a corazonar. Como el material es friable las brocas corazonadoras son de descarga en la parte inferior, con el objetivo de que el fluido de perforación no tenga contacto con el material de formación y pueda erosionarse.

Mediante el uso de la figura 41, podrá obtenerse con el diámetro de la broca corazonadora empleada en la sección de la cual se desea extraer la muestra de la formación la descarga de la bomba es decir el galonaje o caudal en gpm.

**Figura 41:** Descarga de la bomba por tamaño de broca



Fuente: BAKER HUGHES INTEQ. New Coring Handbook, 1999. 278p.

#### 4.8 PRESIÓN DE SURGENCIA Y SUCCIÓN

Cuando la sarta de perforación se corre en el pozo, la fricción del fluido de perforación que se mueve contra la tubería hace que el fondo del pozo experimente un aumento de presión, el cual se denomina *presión de surgencia*. Al contrario, cuando la tubería se saca del pozo, el pozo experimenta una disminución en la presión total, la cual se denomina *presión de succión*. Ambas presiones son de especial importancia en pozos con un pequeño margen entre la presión de poro y la de fractura. Al correr con la tubería en el pozo de manera demasiado rápida, se pueden producir fracturas del pozo y pérdida de la circulación. Al salir del pozo demasiado rápidamente se puede ocasionar el influjo de los fluidos de la formación (arremetida), relleno excesivo en los viajes y otros problemas de inestabilidad del pozo.

Los cálculos de las presiones de surgencia y succión se llevan a cabo convirtiendo la velocidad de viaje de la tubería a una velocidad anular, la cual se utiliza para calcular la caída de presión anular. La caída total de presión anular que se experimenta al introducir la tubería se convierte en una densidad equivalente de fluido. Esta se puede comparar con el peso del fluido de fractura o el peso del fluido necesario para mantener el pozo abierto y controlar las presiones para determinar el efecto del movimiento de la tubería en el pozo.

**Velocidad promedio de movimiento de tubería:** Conociendo la longitud de la parada o de la junta  $L$  y el tiempo de cuña a cuña o tiempo de la unión  $t$  a través de la mesa rotaria  $t$ , se determina así:

$$V_{pm}(min) = \frac{60 * L}{t}$$

$V_{pm}$ : Velocidad promedio de la tubería ( $min$ ).

La velocidad equivalente del fluido en el anular se calcula así:

$$V_m(ft/min) = \left( 0,45 + \left[ \frac{OD^2}{D_h^2 - OD^2} \right] \right) * V_{pm} ; V_m(max)(ft/min) = 1,5 * V_m$$

$D_h$ : Diámetro del pozo (in)

$OD$ : Diámetro externo de la tubería de perforación (in)

Según las propiedades reológicas del fluido se calcula “n” (índice de comportamiento en el anular) y “K” (índice de consistencia en el anular), a partir de los valores del reómetro:

$$n_a = 0,5 \log \frac{\theta 300}{\theta 3}$$

$$K_a = \frac{5,11 * \theta 300}{5,11^{n_a}}$$

Cálculo de la nueva viscosidad efectiva en el anular usando  $V_m$  así:

$$\mu_{ea} = 100K_a * \left[ \frac{144V_m}{D - d} \right]^{n_a - 1}$$

Se determina el número de Reynolds en el anular:

$$Re_a = \frac{928 V_m (D - d) \rho}{\mu_{ea} \left[ \frac{2n_a + 1}{3n_a} \right]^{n_a}}$$

$$Re_{Laminar} = 3470 - 1370n_a \quad Re_{Turbulento} = 4270 - 1370n_a$$

El factor de fricción de Fanning en el anular se calcula según el régimen de flujo:

*Flujo laminar:*

$$f_a = \frac{24}{Re_a}$$

Flujo de transición:

$$f_a = \left[ \frac{Re_a - Re_{Laminar}}{800} \right] \left[ \frac{(\log n_a + 3,93)/50}{Re_a^{(1,75-\log n_a)}/7} - \frac{24}{Re_{Laminar}} \right]$$

Flujo turbulento:

$$f_a = \left[ \frac{(\log n_a + 3,93)/50}{Re_a^{(1,75-\log n_a)}/7} \right]$$

Para cada anular se calcula la presión:

$$P_a = \frac{f_a V_m^2 \rho}{25,81 (D - d)} * L$$

La pérdida de presión total en el anular se calcula como la suma de las caídas de presión individuales para cada intervalo  $\sum P_a$ .

$$EMW_{succión} = \rho - \frac{\sum P_a}{0,052TVD} \qquad EMW_{surgencia} = \rho + \frac{\sum P_a}{0,052TVD}$$

La presión equivalente se calcula como:  $Presion = 0,052 * TVD * EMW$

Así podrá calcularen las presiones surgencia y succión respectivamente.

(EMW: Equivalent mud weight o densidad equivalente en caso de presiones se surgencia o succión)

Si está entrando al pozo se calcula la densidad equivalente de fluido debido a la presión de surgencia, sumando la densidad equivalente de la pérdida total de presión anular a la densidad del fluido, si está saliendo del hoyo, calcule la densidad equivalente del fluido debido a la presión de succión, restando de la densidad del fluido la densidad equivalente de la caída de presión anular total<sup>31</sup>. Obtenido los resultados de las ecuaciones es posible determinar un rango de

---

<sup>31</sup> BAKER HUGHES INTEQ. Manual de Ingeniería de Fluidos, 1998. 568p.

densidad de fluido equivalente; es decir si hay surgencia es como si se tuviera una densidad de lodo adicional y su es succión es como si disminuyera la densidad.

#### 4.9 CAPACIDAD DE LEVANTAMIENTO Y LIMPIEZA DEL POZO

Los problemas relacionados con la limpieza ineficiente del pozo incluyen:

- Disminución de la vida útil de la broca.
- Velocidad de penetración más lenta resultante de moler recortes ya perforados.
- Aumento en la densidad del espacio anular, y a su vez en la presión hidrostática del lodo en el anular

En la práctica, una limpieza eficiente se obtiene proporcionando suficiente velocidad de circulación al de perforación en el anular y las propiedades deseables del fluido. La capacidad del fluido para limpiar el pozo depende de la reología y la densidad de ese fluido, su caudal y el tamaño de los ripios. Para una partícula de cualquier tamaño (ripio), el movimiento hacia arriba de esa partícula con el flujo del fluido será parcialmente negado por el efecto de la gravedad que favorece el asentamiento de las partículas. La tasa de asentamiento se suele denominar velocidad de deslizamiento  $V_s$ .

#### Velocidad de deslizamiento de una partícula

*En pozos verticales:* Se requiere conocer:

- Geometría del wellbore.
- Reología.
- Tasa de flujo.

La velocidad deslizamiento de se calcula mediante la ecuación:

$$V_s = 346,6 \left[ \frac{D_p^{1,6} * (\rho_p - \rho_f)}{\mu_e^{0,6} * \rho_f^{0,4}} \right]^{0,71}$$

Gravedad específica ( $GE$ ) es la relación entre el peso específico de los sólidos y del agua:

$$GE = \frac{\rho_{sólido}}{\rho_{agua}}; \rho_{partícula} = GE * \rho_{agua}$$

Esta relación se determina experimentalmente mediante los procedimientos descritos en las Normas ASTM D 854-92 (“Standard Test Method for Specific Gravity of Soils”) y ASTM C 127-88 (“Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate”)

$V_s$ : Velocidad de asentamiento de la partícula ( $ft/min$ )

$\mu_e$ : Viscosidad efectiva en el anular ( $cP$ )

$D_p$ : Densidad de la partícula ( $in$ )

$GE_p$ : Gravedad específica de la partícula.

$\rho_p$ : Densidad de la partícula ( $lpq$ )

$Re_p$ : Reynolds de la partícula.

$\rho_f$ : Densidad del fluido ( $lpq$ )

El Reynolds de la partícula se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re_p = \frac{15,46 * D_p * \rho_f * V_s}{\mu_e}$$

Si  $1 < Re_p < 500$

$$V_s = 346,6 \left[ \frac{D_p^{1,6} * (\rho_p - \rho_f)}{\mu_e^{0,6} * \rho_f^{0,4}} \right]^{0,71}$$

Si  $500 < Re_p < 200000$

$$V_s = 171 \left[ \frac{D_p * (\rho_p - \rho_f)}{\mu_e} \right]^{0,5}$$

### Metodología a evaluar:

1. Se evalúa la velocidad de asentamiento de la partícula considerando que  $1 < Re_p < 500$ .

2. Se verifica si  $Re_p$  se encuentra en el rango anterior.
3. Si no se cumple el paso 2, se calcula la velocidad de asentamiento para el rango de  $500 < Re_p < 200000$ .

La velocidad de la partícula se calcula mediante la siguiente expresión.

$$V_p = V_f - V_s$$

$V_p$ : Velocidad de la partícula.

$V_f$ : Velocidad del fluido en el espacio anular.

$V_s$ : Velocidad de asentamiento de la partícula.

Razón de transporte:

$$RT = \frac{\text{Velocidad de transporte}}{\text{Velocidad Anular}}$$

$$F_T = \frac{V_p}{V_a} = 1 - \frac{V_s}{V_a}$$

Índice de capacidad de limpieza:

$$ICL = \frac{V_a * \rho_f * K}{400000}$$

Un índice de limpieza bueno debe ser igual o mayor que 1, para cortes agudos y grandes en general, cuando su valor es 0,5 los sólidos son pequeños y redondeados y cuando es inferior a 0,3 los sólidos pueden ser de gran tamaño.

**Tabla 17:** Razón de transporte  $RT$

<b>Limpieza Efectiva</b>	$V_s = 0$	$RT = 1$
<b>Limpieza no Efectiva</b>	$V_s < V_f$	$RT < 0$
<b>Asentamiento</b>	$V_s > V_f$	$RT > 0$

Fuente: Teoría y procedimientos para la limpieza del agujero. Schlumberger

*En pozos desviados:* Estudio previos en el transporte de recortes o limpieza de pozo han determinado el efecto de variables importantes, los modelos generados predicen el fenómeno de transporte de recortes. La tasa de flujo critica para la limpieza del pozo estará determinada por la velocidad mínima en el anular requerida para mantener el movimiento ascendente de los ripios y que no se formen camas de recortes en el lado bajo del pozo. Para el cálculo de la velocidad de deslizamiento de las partículas en pozos desviados se usará el método de Hopkins<sup>32</sup>, En este método se calcula inicialmente el efecto del peso del lodo en la velocidad de deslizamiento como:

$$Fmw = 2,117 - 0,1648\rho_{lodo} + 0,003681\rho_{lodo}^2$$

La velocidad de deslizamiento para la condicion vertical  $V_{sv}(ft/min)$  es obtenida de la figura 42, ingresando con los datos de punto de cedencia asumiendo un tamaño promedio de solidos perforados. El valor ajustado de velocidad de deslizamiento considerando el efecto de la densidad del lodo y del punto de cedencia se calcula así:

$$V_s \left( \frac{ft}{min} \right) = Fmw * V_{sv}$$

La velocidad mínima en la sección desviada se calcula así:

$$V_{min} \left( \frac{ft}{min} \right) = (V_s \cos \theta) + (V_2 \sin \theta)$$

$$V_2 \left( \frac{ft}{min} \right) = C \left[ \left( \frac{\rho_{solido} - \rho_{lodo}}{\rho_{lodo}} \right) * g^3 * \left( \frac{D_h - D_p}{12} \right)^3 \right]^{\frac{1}{6}}$$

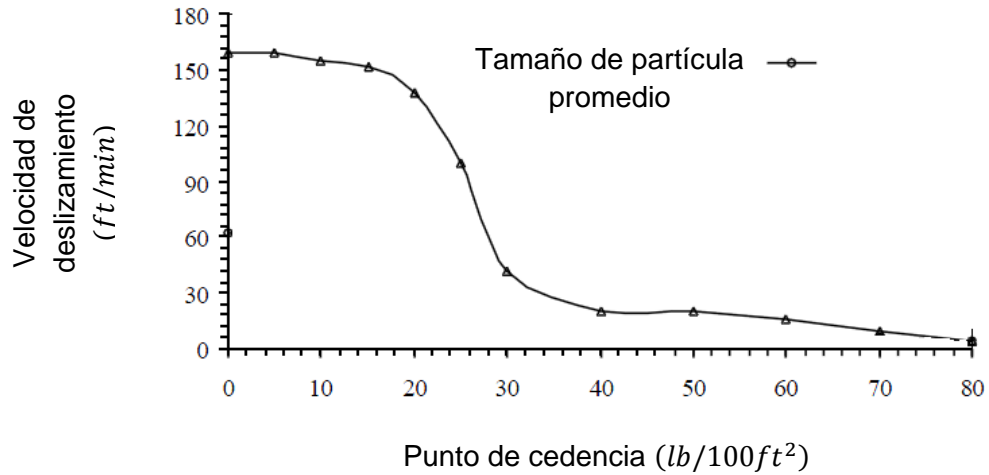
$C$ : Es una constante empírica basada en datos de laboratorio puede tomar valores de 40 a 60. A partir de la mínima tasa de flujo, se puede calcular el caudal crítico con la ecuación:

---

<sup>32</sup> BIZANTI, M.S and ALKAFEEF, S.F. A simplified Hole Cleaning to deviated and horizontal wells. SPE 81412. 2003. College of technological studies, Kuwait.

$$Q_{crit}(gpm) = 0,04079(D_h^2 - D_p^2) * V_{min}$$

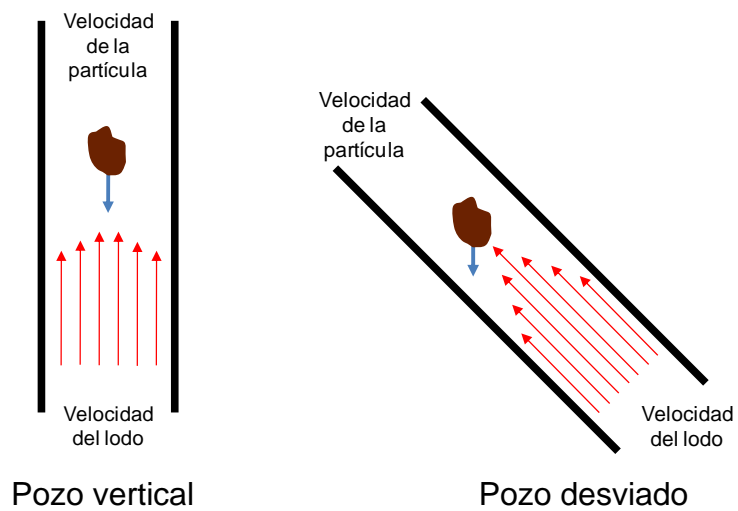
**Figura 42:** Carta de velocidad de deslizamiento según Hopkins



Fuente: BIZANTI, M.S and ALKAFEEF, S.F. A simplified Hole Cleaning to deviated and horizontal wells. SPE 81412. 2003. College of technological studies, Kuwait.

En la figura 43 se muestra de manera esquemática el deslizamiento de una partícula en pozos verticales y desviados, indicando las componentes presentes.

**Figura 43:** Deslizamiento de una partícula en pozo vertical y desviado.



Fuente: Tecnología de perforación. Drilling School. Sección 6.

**Limpieza del pozo:** La habilidad del fluido de perforación de levantar los recortes, es afectada por varios factores, incluyendo la densidad del fluido y la reología, tamaño y excentricidad del espacio anular, velocidad anular y régimen de flujo, rotación de la tubería, densidad de los recortes, tamaño y forma de las partículas. La relación entre los diferentes parámetros es complicada y ninguna teoría en particular puede combinar todos los fenómenos observados.

No obstante, el control de la generación y la velocidad de transporte de los recortes son factores imperativos para una operación de perforación exitosa. Algunos de los factores son:

- **Inclinación:** Pozos verticales y cercanos a vertical – dentro de los agujeros, con una inclinación menor a los 30 grados, los recortes son efectivamente suspendidos por la fuerza cortante del fluido y las camas de recortes no llegan a formarse. En este caso la limpieza del pozo no es por lo general problemática, suponiendo que la reología del lodo es la adecuada. Pozos desviados (inclinación mayor que 30 grados) – los recortes tienden a asentarse en el lado bajo del agujero formando camas de altura variable. Estas podrían ya sea migrar hacia arriba en el agujero o deslizarse hacia abajo, resultando en el empaquetado del espacio anular.
- **Reología:** Condiciones de flujo laminar – el incremento de viscosidad del lodo mejora la limpieza del pozo. Es particularmente efectivo si la reología es de fuerza cortante bajo y los valores YP y PV son altos. Condiciones de flujo turbulento – reducir la viscosidad ayudará a remover los recortes
- **Punto de Cedencia:** Es una medición de las propiedades del esfuerzo cortante bajo de un sistema de lodos. El Punto de cedencia, YP, gobierna el tamaño de los recortes que pueden ser dinámicamente suspendidas y transportadas en el fluido.

- **Densidad del lodo:** La densidad del lodo afecta la flotabilidad de los recortes perforados. Un sistema de lodos más pesado permite a los recortes “flotar” más fácilmente.
- **Tasa de flujo:** En pozos altamente desviados el gasto de flujo combinado con agitación mecánica son factores importantes para una limpieza efectiva del pozo. En los pozos verticales, la velocidad anular en incremento y/o las propiedades reológicas incrementadas, mejoraran la limpieza de pozo.

*En pozos verticales:* La reología es muy importante para el transporte de recortes en pozos verticales o desviados. En particular los pozos de gran diámetro que no se pueden limpiar sólo con velocidad. Suponiendo que la reología del lodo es correcta, la limpieza de éste tipo de pozos por lo general no representa un problema. Por lo general, la velocidad anular es mayor que la velocidad de caída de los recortes y de esta manera se pueden remover del pozo de manera efectiva.

Para asegurar que se logra una velocidad de caída baja, estos pozos son usualmente perforados con sistemas de lodo viscoso y con un alto punto de cedencia. La velocidad anular en pozos verticales es por lo general mucho más alta que la velocidad de caída de los recortes y ellos son removidos en forma efectiva del espacio anular<sup>33</sup>.

*En pozos desviados:* De acuerdo al ángulo de inclinación del pozo se presentan los siguientes problemas:

### **0° a 10°**

Debido a su poco inclinación son considerados como pozos verticales, bajo esta suposición de trabaja todo lo relacionado con la capacidad de limpieza.

---

<sup>33</sup> CARDEN, Richard S and GRACE, Robert D. Horizontal and Directional Drilling 2007. 409p.

### **10° a 30°**

A velocidades menores de 120 *ft/min*, los recortes se depositan en el lado bajo del pozo y luego se deslizan, en secciones de mayor velocidad serán llevados arriba del pozo, el fenómeno se repite continuamente hasta que son removidos todos los recortes del pozo. En general la capacidad de limpieza de lodo a este ángulo de inclinación no es tan eficiente como lo es para un pozo vertical, sin embargo es satisfactoria. Se asume que la capacidad de levantamiento del lodo es lo suficientemente alta para remover los recortes. A velocidades anulares mayores de 120 *ft/min*, los recortes no forman la cama de recortes en el lado bajo del pozo, pero serán removidos del pozo a lo largo de la sección baja en dunas. Si las velocidades exceden los 180 *ft/min* los recortes serán transportados suavemente a lo largo bajo del pozo

### **30° a 60°**

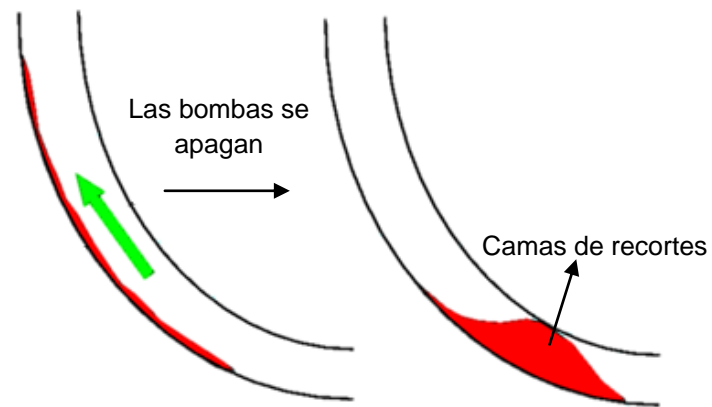
La limpieza del pozo es más crítica a estas inclinaciones, siendo las más complicadas entre 40° a 50°, puesto que la concentración de recortes es mayor. En general a estas inclinaciones no solo es rápida la formación de una cama de recortes si no que estos se deslizaran por la parte baja del pozo. Las fuerzas de arrastre asociadas con el fluido de perforación. Si las bombas están apagadas los recortes pueden empaquetarse alrededor de la sarta de perforación causando toque y arrastre excesivo o causando o pega de tubería, como se presenta en la figura 44. Cuando el ángulo de inclinación es mejor de 40°, los recortes caerán al fondo del pozo.

### **60° a 90°**

Por encima de una inclinación de 60 °, el desarrollo de camas de recortes es instantáneo y su espesor es dominado por la velocidad anular. En algunas

velocidades anulares bajas, el volumen de recortes en el pozo en realidad se reduce. Por encima de  $60^\circ$ , los cortes no se deslizan hacia abajo del pozo lo que reduce el volumen total en esta sección del pozo. A medida que aumenta la velocidad anular, el fluido de perforación erosionará más rápido la cama de recortes. En algún momento, el equilibrio se alcanzará entre el depósito y la erosión de la cama de recortes.

**Figura 44:** Cama de recortes presente al apagar la bomba



Fuente: GRACE, Robert. Horizontal and Directional Drilling. Grace, 2007. 409p.

### **Efectos del tipo de lodo sobre la eficiencia de limpieza de pozos desviados**

- En pozos altamente desviados y para valores de YP y de PV el desempeño de limpieza para ambos tipos de lodo es básicamente el mismo. Sin embargo, con valores más altos de YP y PV los lodos base agua proveerán una mejor limpieza.
- La observación general es que un incremento en el punto de cedencia del lodo y de la viscosidad plástica resultara en un incremento de concentración de recortes para ambos lodos.

- Como resultado de estas concentraciones más altas de los recortes, los requerimientos de torsión para ambos tipos de lodo se incrementarán al aumentar el *YP* y la *PV* en pozos de mayor inclinación.
- El desempeño de limpieza de pozos de lodos con base aceite a ángulos críticos (40 a 50 grados), es reducido por avalanchas severas de camas de recortes (debido a la reducción).

**Indicadores de una limpieza pobre del pozo:** Un número de indicadores en la superficie se pueden utilizar como guías de la efectividad en la limpieza de pozo. Estos incluyen:

- Forma y tamaño de los recortes en las zarandas, recortes pequeños de forma redonda bien definida, podrían indicar períodos extensos de remolienda en el fondo del pozo, una indicación de la formación de camas de recortes.
- Incremento en la torsión y arrastre de la sarta perforando o al hacer conexiones.
- Mayor peso que el normal al levantar la sarta.
- Pobre transferencia de peso sobre la broca. Se requiere de un peso mayor al normal en superficie para conseguir una respuesta de caída de presión del motor de lodos y avanzar el pozo.
- Dificultad para orientar el motor, debido al exceso de fricción entre los recortes y la sarta de perforación.

En la tabla 18 se presentan los parámetros críticos de acuerdo al ángulo de desviación y como inciden en mejorar la limpieza del pozo.

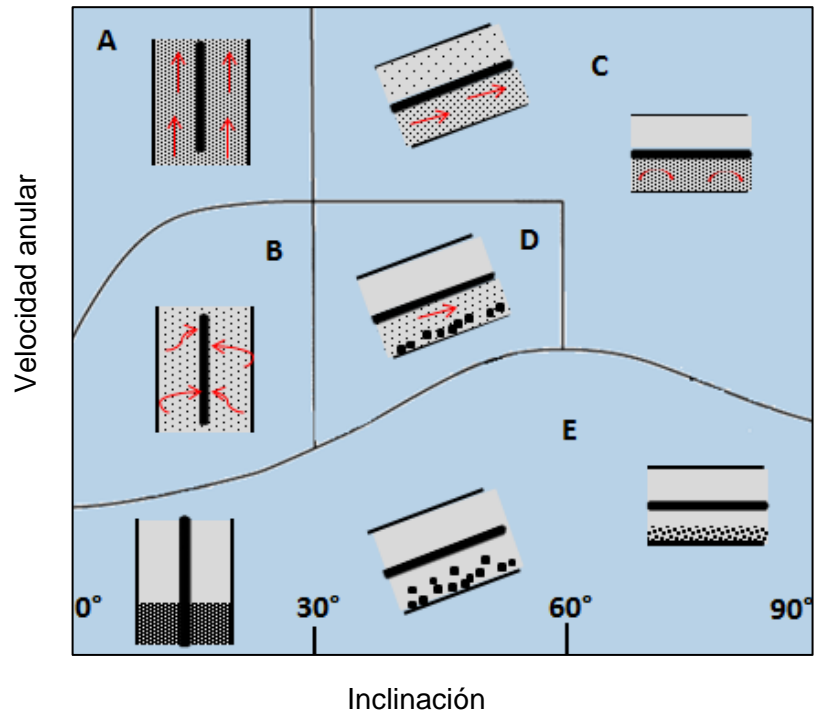
**Tabla 18:** Parámetros críticos de limpieza en pozos desviados

Angulo de desviación	Parámetros críticos (en orden de importancia)	Para mejorar la limpieza del pozo
<b>Zona 0°-35°</b>	1. Tasa de flujo/velocidad anular	Incrementar
	2. Reología (YP, K)	Incrementar
	3. ROP	Disminuir
<b>Zona 35°-65°</b>	1. Tasa de flujo/velocidad anular	Incrementar
	2. Tasa de rotación de la sarta	Incrementar
	3. Reología (6 RPM, PV)	Aplanar el perfil
	4. ROP	Disminuir
<b>Zona &gt;65°</b>	1. Tamaño de cortador PDC	Disminuir
	2. Tasa de rotación de la sarta	Incrementar
	3. Tasa de flujo/velocidad anular	Incrementar
	4. Reología (6 RPM, PV)	Aplanar el perfil
	5. ROP	Disminuir

Fuente: ELSEVIER. Drilling Fluids Processing Handbook.

En la figura 45 se presenta una representación esquemática de los mecanismos de transporte para un rango de inclinaciones de pozos desde 0° (pozos verticales) hasta 90° (pozos horizontales).

**Figura 45:** Mecanismos de transporte de ripios en pozos de diferente ángulo de inclinación.



**A-** Zona de limpieza eficiente.

**B-** Eliminación lenta de recortes.

**C-** Buena limpieza del pozo con cama de recortes.

**D-** Regular limpieza del pozo, formación de cama de recortes.

**E-** No hay limpieza del pozo.

Fuente: API Recommended Practice 13D – Rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids, 2009.

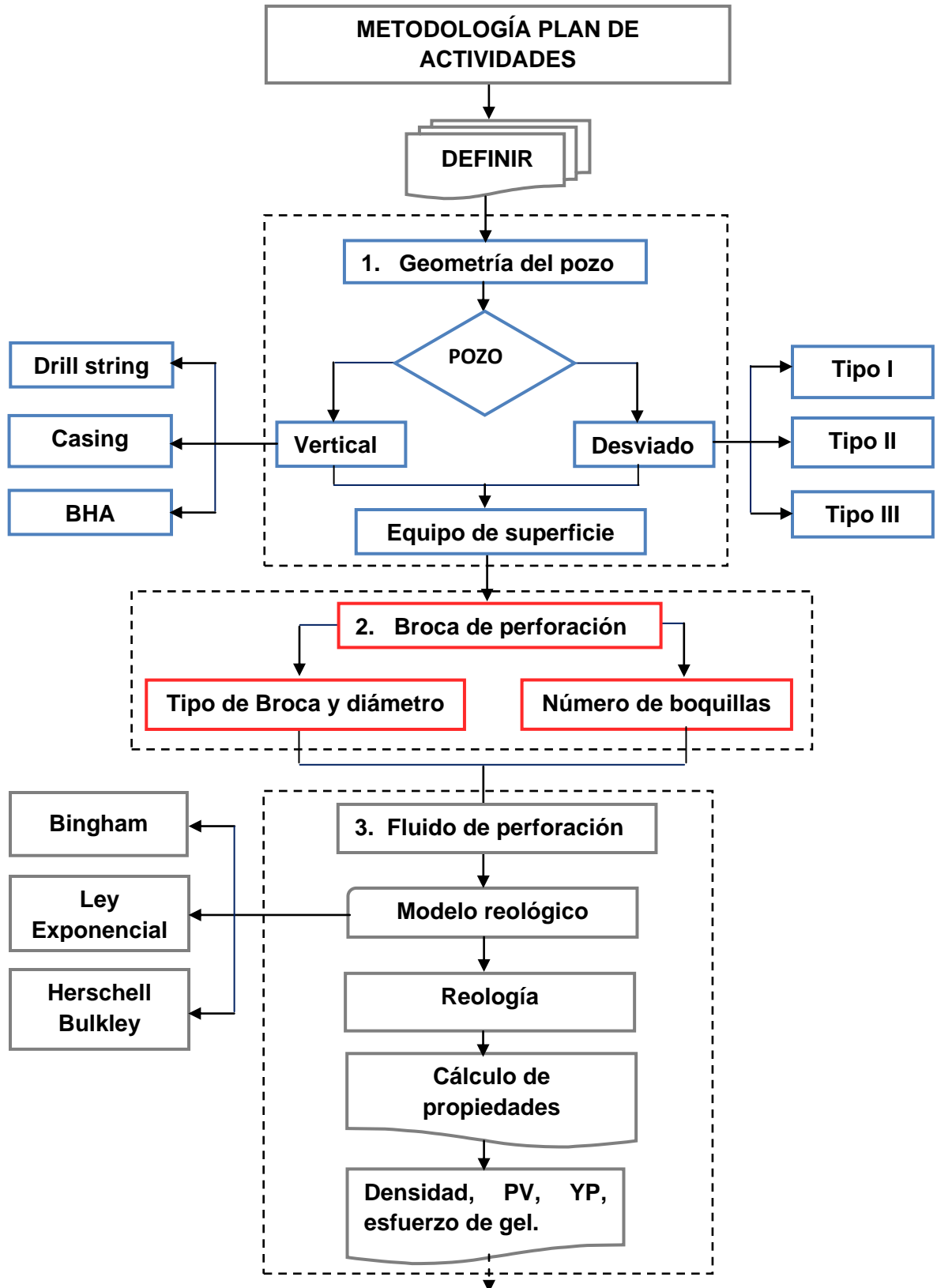
## 5. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DE UN PROGRAMA HIDRÁULICO

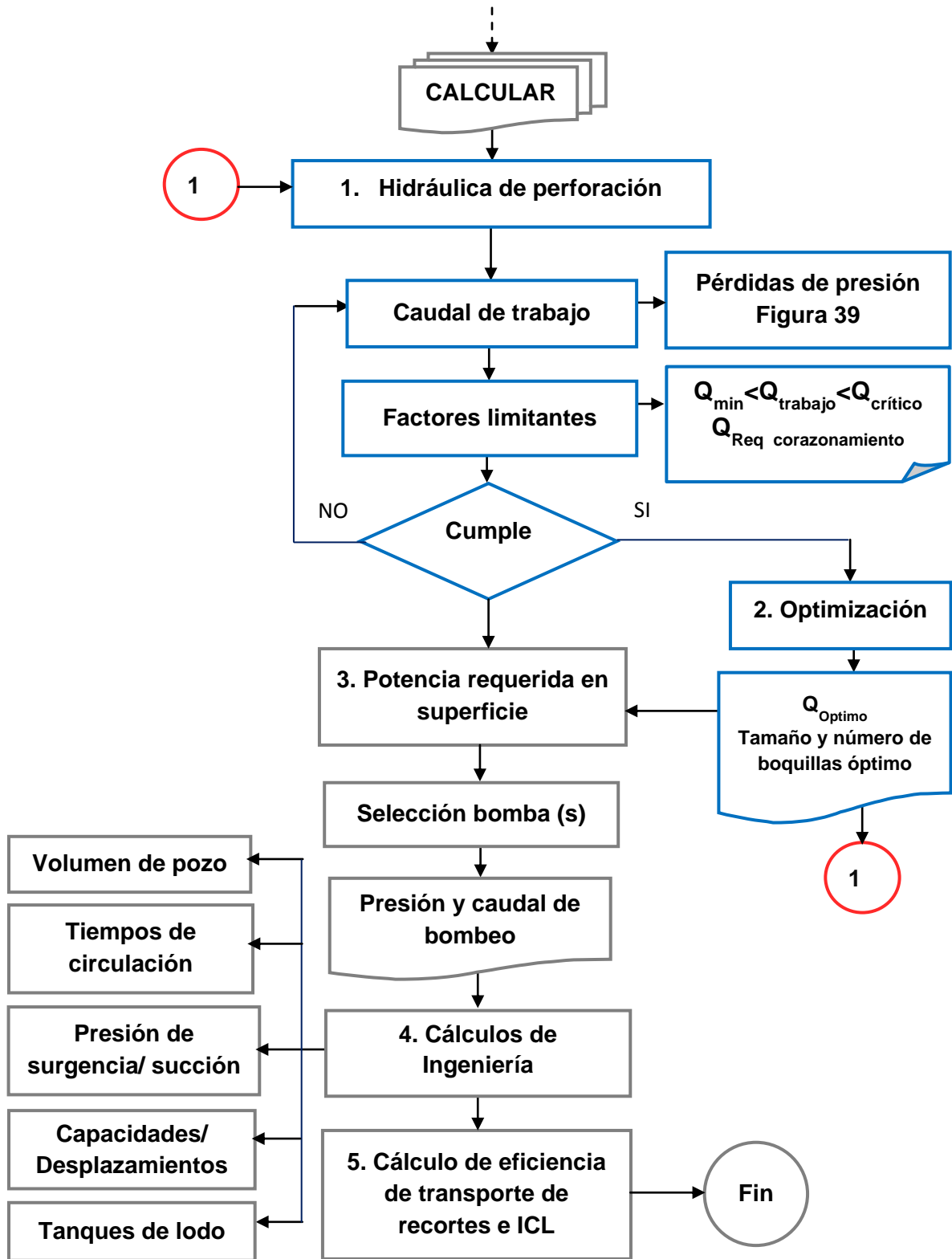
En la figura 46, se presenta el desarrollo lógico y ordenado de la metodología propuesta para el plan de actividades a seguir durante la etapa de diseño del sistema de circulación dentro de un programa de perforación. En ésta se incluyen las etapas fundamentales del programa como definir la geometría del pozo, seleccionar la broca de perforación y el fluido de perforación o lodo, y posteriormente realizar los cálculos de hidráulica, la optimización, la selección de las bombas de lodo en superficie entre otros.

Esta metodología hace posible conocer el procedimiento a seguir para determinar el galonaje requerido en las diferentes secciones a perforar, el tamaño de las boquillas para obtener las pérdidas de presión deseadas en la broca, y poder seleccionar la potencia hidráulica en superficie capaz de garantizar una perforación eficiente. Así mismo constituye una herramienta versátil, rápida y sencilla que suministra un procedimiento eficaz cuando se requiere realizar los cálculos de hidráulica y conocer en general todo el proceso a seguir durante un programa hidráulico y los parámetros implicados. La importancia de analizar los factores que afectan la hidráulica del pozo radica en poder tener información previa de los parámetros de perforación y analizar los resultados obtenidos después de aplicarla. Según el siguiente esquema la metodología planteada se presenta en dos etapas:

1. Definir los parámetros del pozo (estado mecánico, broca, fluido de perforación).
2. Calcular el caudal de trabajo, las pérdidas de presión, y si se desea optimizar para obtener el caudal óptimo y el número y tamaño de las boquillas, las condiciones de operación de las bombas de lodo entre otros.

Figura 46: Metodología del plan de actividades del sistema de circulación.





Fuente: autores

## **Etapas de la metodología:**

**Primera etapa:** En su respectivo orden incluye:

1. Definir la geometría del pozo (estado mecánico) para el pozo vertical determinar la sarta de perforación, el revestimiento y el BHA o ensamble de fondo, en caso de pozo desviado seleccionar el tipo de pozo si es tipo "I", "S" o "J" invertido.
2. Seleccionar el tipo de broca de perforación a utilizar según el tamaño del pozo establecido en el diseño e indicar el número de boquillas y su tamaño.
3. Seleccionar el modelo reológico e ingresar los valores reológicos en función de la densidad del lodo y calcular las propiedades reológicas para el fluido.

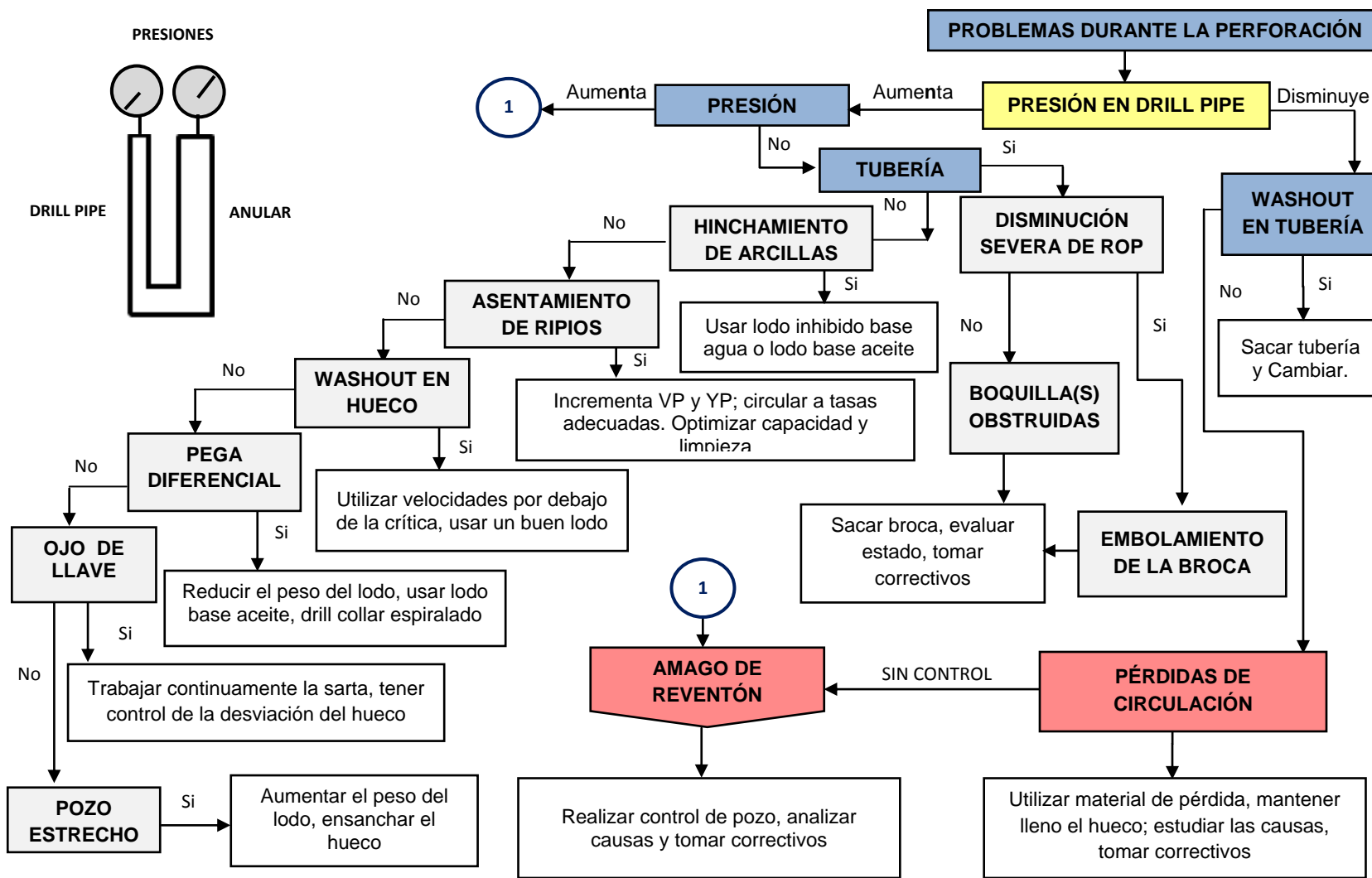
**Segunda etapa:** Calcular los parámetros de hidráulica y otros cálculos de ingeniería.

1. Con un valor de tasa de flujo en el sistema se realizan los cálculos de pérdidas de presión se verifica si cumple con los factores limitantes de diseño, (tasa mínima y máxima de circulación entre otros), si no cumple deberá cambiarse la tasa.
2. Si cumple se realiza la optimización de la hidráulica obteniendo el caudal óptimo de trabajo que garantice la potencia hidráulica para la perforación, finalmente se calculan los valores de pérdidas de presión y otros parámetros hidráulicos.
3. Con las pérdidas de presión en el sistema y el caudal de trabajo se determina la potencia hidráulica a entregar por las bombas de lodo, y determinar si es necesario usar sistema de bombas en paralelo en secciones de mayor diámetro.

4. En cálculos de ingeniería se puede calcular el volumen del pozo, tiempos de circulación, presión de surgencia y succión, seleccionar tanques entre otros.
5. Realizar el cálculo de la eficiencia de transporte de partículas e índice de capacidad de limpieza del pozo en función del diámetro del tamaño de las partículas.

En la figura 47 se presenta un árbol de decisiones para identificar algunos de los problemas más frecuentes que ocurren durante la perforación de un pozo con sus respectivos indicadores y medidas preventivas.

Figura 47: Árbol de decisión para diagnóstico de problemas durante la perforación.

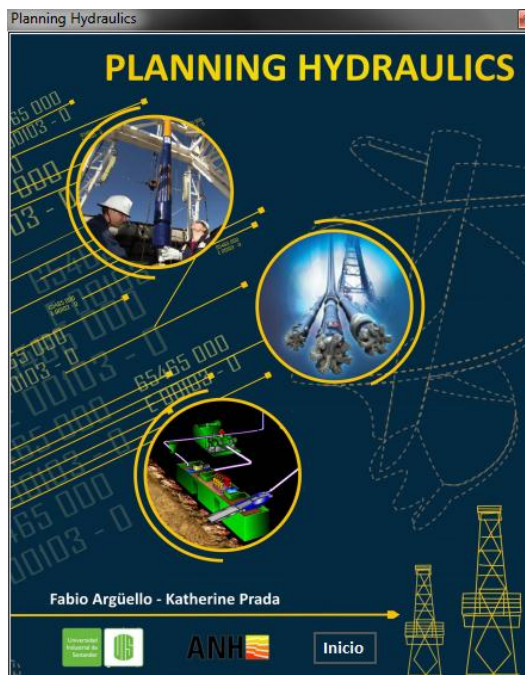


## 6. HERRAMIENTA DE CÁLCULO PLANNING HYDRAULICS

### 6.1 DESCRIPCIÓN

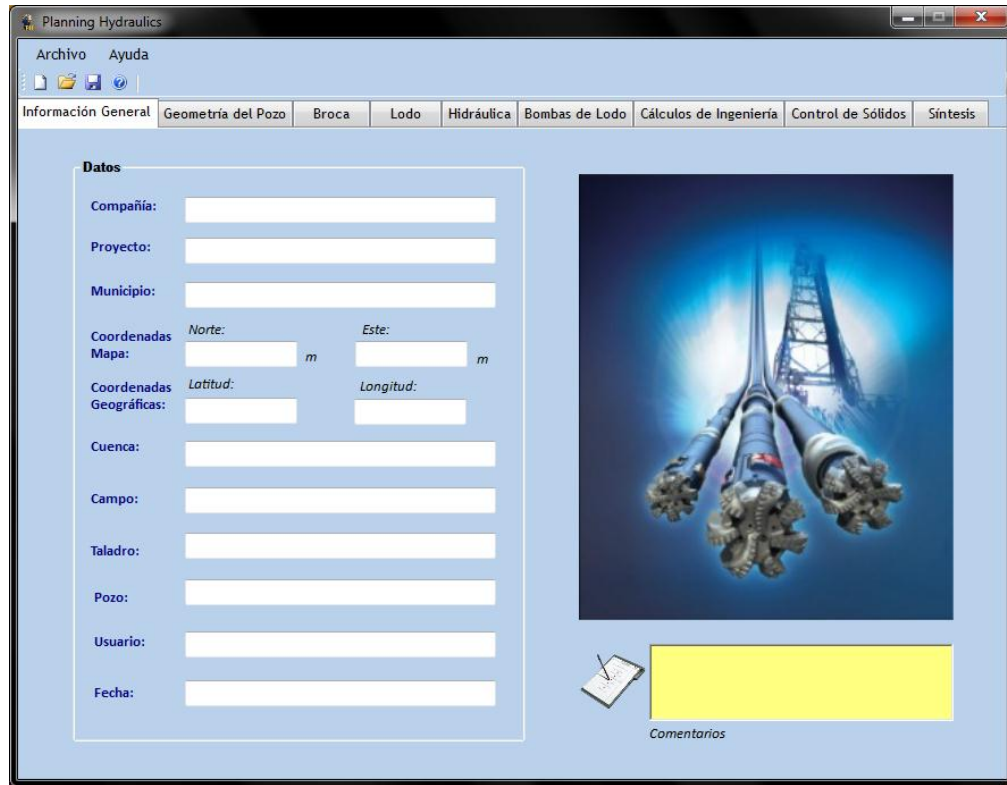
La herramienta Planning Hydraulics es un programa diseñado en el presente trabajo de grado para facilitar los cálculos de parámetros importantes para el diseño integrado del sistema de circulación dentro de un programa de perforación de pozos como lo son los caudales requeridos, las presiones de bombeo, hidráulica requerida, optimización de la hidráulica para geometría de pozo dada, así como para realizar otros cálculos de ingeniería y también los equipos de control de sólidos, en el cual se aplica la metodología planteada en el capítulo 5 en la figura 46. En la figura 48 y 49 se presenta la interfaz inicial de la herramienta y los módulos de trabajo respectivamente.

**Figura 48:** Inicio de la herramienta Planning Hydraulics



**6.2 MÓDULOS:** El programa está estructurado en 9 módulos de trabajo que serán descritos a continuación:

**Figura 49:** Módulos de trabajo de Planning Hydraulics



**6.2.1 MÓDULO 1: Información general:** Básicamente es la hoja de datos para la identificación del caso a trabajar incluye datos como la compañía, proyecto, cuenca, campo, usuario, fecha entre otros.

**6.2.2 MÓDULO 2: Geometría del pozo:** Define con la selección del caso de diseño el estado mecánico del pozo (ya sea de un pozo vertical o de un pozo desviado) así como el caso de superficie, una vez ingresado los datos, en la ventana principal puede observarse los parámetros de cada sección trabajada para el caso escogido por el usuario.

**6.2.3 MÓDULO 3: Broca:** Define el programa de brocas para cada una de las secciones definidas con la geometría del pozo seleccionada en el módulo anterior, incluye tipo de broca y número de boquillas así como guías de clasificación del tipo de brocas y tipo de cortadores.

**6.2.4 MÓDULO 4: Lodo:** Define el programa de lodos para cada sección, seleccionando el modelo reológico a implementar para calcular los valores de reología a partir ya sea del tipo de cálculo reológico u otros valores conocidos.

**6.2.5 MÓDULO 5: Hidráulica:** Presenta 3 sub módulos:

**6.2.5.1 Cálculos de diseño:** Permite calcular por cada sección las pérdidas de presión en el sistema, en superficie, en tubería, en espacios anulares y en la broca, como también otros factores como caudal mínimo y crítico, que permitirá redefinir el caudal de trabajo seleccionado entre otros parámetros.

**6.2.5.2 Optimización de la hidráulica:** Permite seleccionar el método de optimización, determinar el caudal óptimo que garantice las pérdidas de presión deseadas en la broca, redefine por sección el tamaño y número de boquillas, permitiendo actualizar los cambios en los cálculos de diseño.

**6.2.5.3 Hidráulica de corazonamiento:** Para las secciones que requieran esta operación define el caudal requerido, requiere el ingreso del tope y la base de la sección a corazonar propone número y tamaño de las boquillas de la broca corazonadora.

**6.2.6 MÓDULO 6: Bombas de lodo:** Diseñado para seleccionar el tipo de bomba, sus condiciones de operación y el número requerido en cada sección con la finalidad de calcular la presión de bombeo y el caudal de bombeo.

**6.2.7 MÓDULO 7: Cálculos de ingeniería:** Permite calcular:

**6.2.7.1 Parámetros del proyecto:** Volumen de pozo, tiempos de circulación, presiones de surgencia y succión, recomienda el volumen de los tanques de lodo.

**6.2.7.2 Capacidades y desplazamiento:** Permite realizar estos cálculos ya sea en casing, drill pipe y drill collar, ingresando las especificaciones respectivas.

**6.2.7.3 Selección tanque de lodos:** Según la geometría deseada especificando las dimensiones permite saber el número de tanques a usar

**6.2.8 MÓDULO 8: Control de sólidos:** Permite obtener mediante la aproximación del tamaño de partículas la eficiencia de transporte y el índice de capacidad de limpieza del pozo, incluye también guía de disposición de equipos en el sistema de superficie, ubicación de los equipos de control de sólidos y la clasificación del tamaño de partículas.

#### **6.2.9 MÓDULO 9: Síntesis:**

**6.2.9.1 Reporte gráfico:** Presenta un esquema gráfico señalando los principales componentes del sistema, y adjunto una tabla donde se muestran las principales pérdidas de presión junto con otros parámetros.

**6.2.9.2 Registro Hidráulico:** Siguiendo el formato API # D-10 A del Drilling Plan Analysis (DPA), se hace un registro de las necesidades hidráulicas presentes en un programa de perforación por cada sección planeada, se ofrece la opción de exportar el registro a un archivo de Excel, para que pueda ser visualizado en otro formato y trabajarse con mayor facilidad.

**6.2.9.3 Diagnóstico de problemas:** Presentan un árbol de decisión frente a posibles problemas durante la perforación, elaborado a manera de guía de uso.

La guía de uso o manual de la herramienta Planning Hydraulics se encuentra en el capítulo 7.

## 7. GUÍA DE USO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO PLANNING HYDRAULICS

### ¿Qué es Planning Hydraulics?

Es una herramienta de cálculo desarrollada en plataforma de programación Visual Basic 2010 diseñada para permitir un entorno amigable y confiable para el usuario al momento de diseñar un plan hidráulico para la perforación de determinado pozo.



Microsoft Visual Basic 2010

### ¿Cómo se accede al programa?

En la carpeta contenedora del paquete adquirido usted encontrará el acceso directo para el programa identificado a través del siguiente icono:



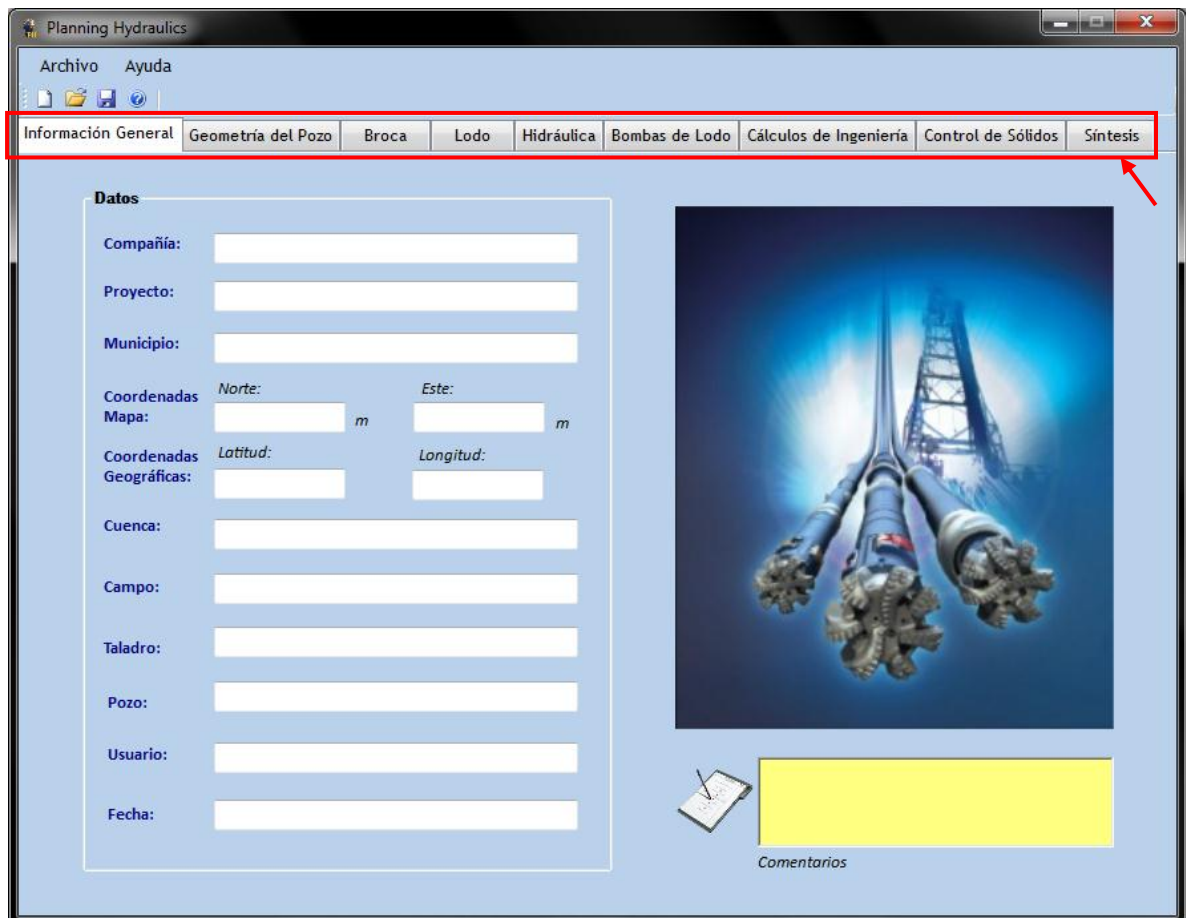
Planning Hydraulics

### ¿Qué requisitos existen para acceder al programa?

- Requerimientos del sistema.  
Sistema operativo Windows XP/Vista/7  
Net Framework 4.0 o superior
- Formas de adquisición.  
Adquirir el CD del programa

## Módulos Planning Hydraulics

1. Información general
2. Geometría del pozo
3. Broca
4. Lodo
5. Hidráulica
6. Bombas de lodo
7. Cálculos de Ingeniería
8. Control de sólidos
9. Síntesis



Se tienen las opciones de:

Archivo

- Abrir un caso nuevo.
- Abrir un archivo existe.
- Guardar un archivo.

Ayuda

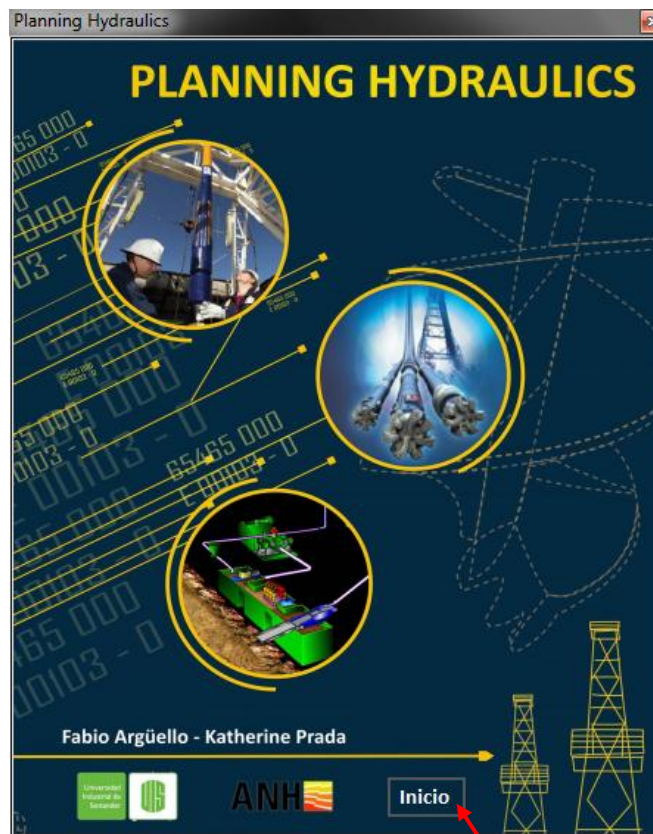
- Tutoriales (de cada módulo).
- Acerca de Planning Hydraulics.

Extensión de los archivos generados *.Hyd*

### Usando Planning Hydraulics

Presenta el procedimiento que se debe considerar para crear un plan hidráulico o proyecto en Planning Hydraulics. (Expone la metodología propuesta en el capítulo 5).

Para iniciar el programa dar click en inicio:



## MÓDULO 1: INFORMACIÓN GENERAL

Planning Hydraulics

Archivo Ayuda

Información General Geometría del Pozo Broca Lodo Hidráulica Bombas de Lodo Cálculos de Ingeniería Control de Sólidos Síntesis

**Datos**

Compañía:

Proyecto:

Municipio:

Coordenadas Norte:  m Este:  m  
Mapa:

Coordenadas Latitud:  Longitud:   
Geográficas:

Cuenca:


Campo:

Taladro:

Pozo:

Usuario:

Fecha:



Comentarios

Como se indica en la pestaña principal del módulo “Información General” en la parte inferior derecha se podrán colocar los respectivos comentarios del caso a trabajar, además de los datos de rutina que se deben diligenciar (izquierda).

**Datos**

Compañía a cargo de la operación.

Compañía:

Proyecto:  Nombre asignado.

Municipio:  Nombre del municipio.

Coordenadas Mapa: Norte:  m Este:  m

Coordenadas Geográficas: Latitud:  Longitud:

Cuenca:  Nombre cuenca.

Campo:  Nombre del campo.

Taladro:  Equipo a utilizar

Pozo:  Nombre del pozo a perforar

Usuario:  Persona(s) a cargo del plan hidráulico.

Fecha:  Fecha de elaboración del caso de diseño.

Las *coordenadas mapa* son las más conocidas y se toman a partir de un punto de referencia. *Ejemplo:* Norte: -754 m (al sur), Este: 434,36 m respecto a una ciudad.

Las *coordenadas geográficas* o coordenadas angulares son una forma de designar un punto sobre la superficie terrestre ejemplo, la latitud siempre es norte o sur, y la longitud este u oeste. *Ejemplo:* Latitud: 42°52'21''N, Longitud: 3°14'26''W

Combinando estos dos ángulos, se puede expresar la posición de cualquier punto de la superficie de la Tierra.

## MÓDULO 2: GEOMETRÍA DEL POZO

Parámetros Sección 1		
	OD (in)	Longitud (ft)
Casing 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 3:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Parámetros Sección 2		
	OD (in)	Longitud (ft)
Casing 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 3:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Parámetros Sección 3		
	OD (in)	Longitud (ft)
Casing 3:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 3:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Parámetros Sección 4		
	OD (in)	Longitud (ft)
Casing 4:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 3:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>

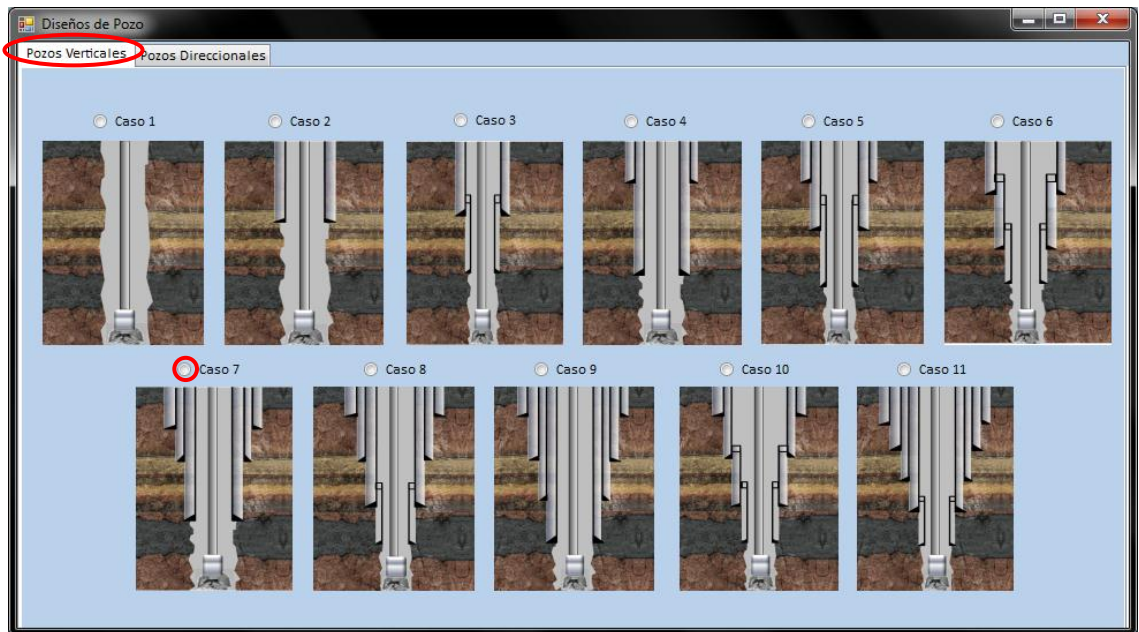
Parámetros Sección 5		
	OD (in)	Longitud (ft)
Liner 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 3:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Parámetros Sección 6		
	OD (in)	Longitud (ft)
Liner 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Pipe 3:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 1:	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Drill Collar 2:	<input type="text"/>	<input type="text"/>

En este módulo se determina la geometría del pozo definiendo la tubería de revestimiento y la sarta de perforación (incluyendo el BHA), así como asignando las profundidades de las secciones planeadas y el caso de superficie. En la pestaña principal se presenta un resumen de los parámetros seleccionados por sección de acuerdo al caso de diseño escogido. Opciones disponibles en el módulo:

Seleccionar caso de Diseño    Ver caso Seleccionado    Cambiar de Caso    Seleccionar Caso Superficie

Seleccionar caso de Diseño



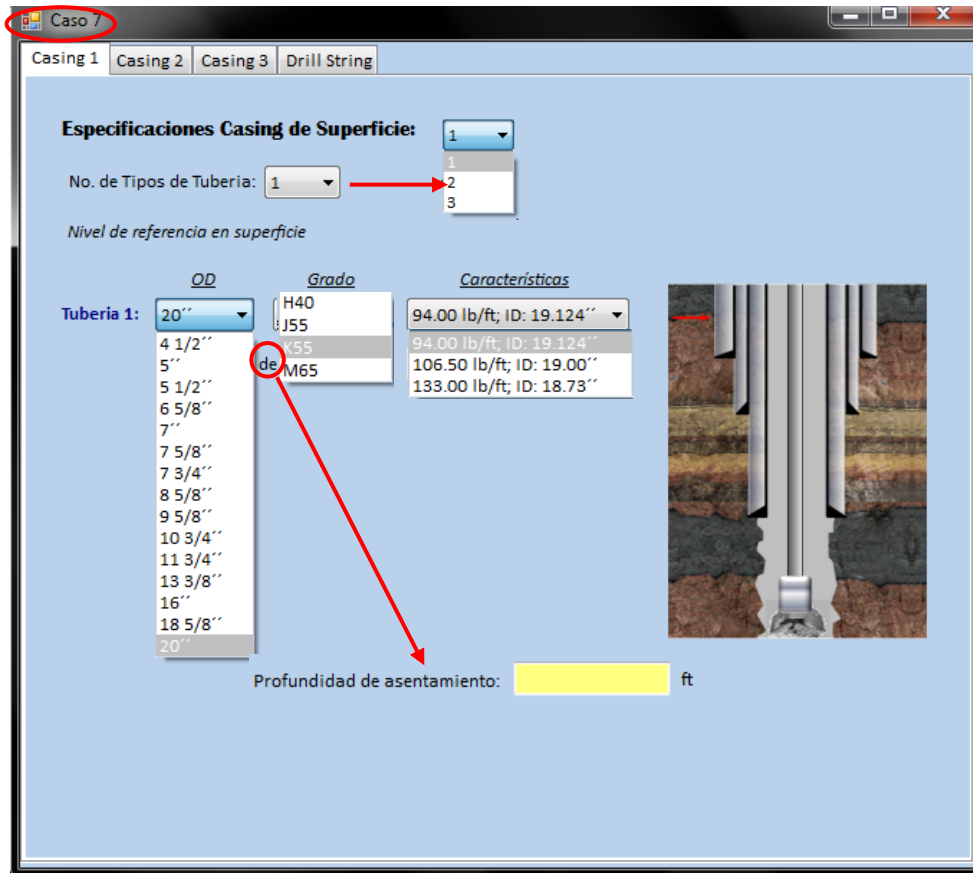
*Ejemplo:* Si selecciona el diseño de pozo 7 que corresponde a 4 revestimientos (casing) y hueco abierto en un pozo vertical, aparecerá la ventana con las secciones.



Dar click en aceptar.

Para la selección de los revestimientos (casing(s)) y la sarta de perforación (Drill String) el procedimiento es:

### Para la selección del revestimiento del pozo



- Se determina el número de tipos de tubería (en caso de que sea combinada puede ser 2 o 3).
- Para cada tipo de tubería o revestimiento, aparece para seleccionar el diámetro externo "OD" y según este los grados existentes, y de acuerdo al seleccionado las características disponibles.
- Finalmente se registra la profundidad de asentamiento del revestimiento.

En cada pestaña de trabajo se presenta la imagen de la geometría del pozo con el casing de revestimiento a seleccionar señalado. Para los demás revestimientos el

procedimiento a seguir es el mismo, en el último casing se registra la profundidad total del pozo, para delimitar la sección no revestida o hueco abierto.

Profundidad total del pozo:  ft

### Para la selección de la sarta de perforación:

En cada sección primero se seleccionan los componentes del ensamble de fondo que componen la sarta de perforación que incluye el BHA (Bottom Hole Assembly):

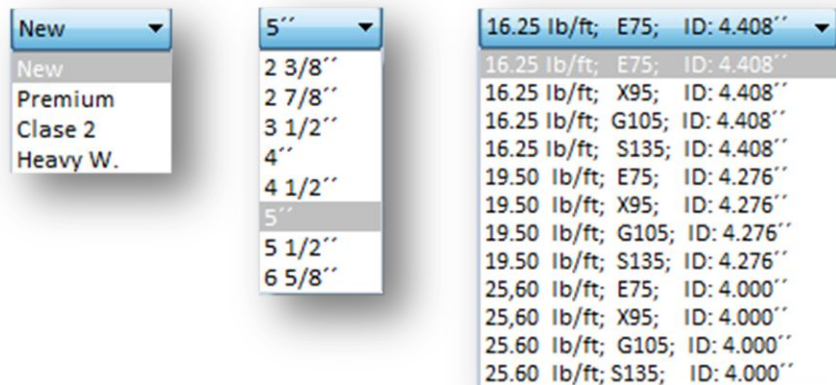
Seleccionar Componentes



Luego se determina los tipos de tubería de perforación (1, 2 o 3) ya sea porque se desea combinar tubería de perforación o porque se usará tubería pesada o heavy weight.

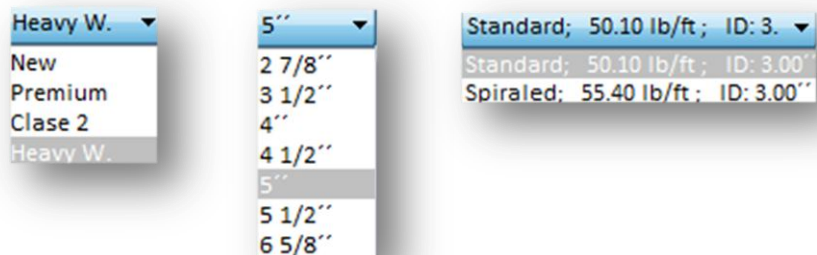
*Selección de tubería de perforación* (Grado, de acuerdo al porcentaje de uso New-Nueva, Premium 70% de uso y clase 2 80% de uso, OD, y características como el peso y el ID). Se ingresa para cada tubería su longitud.

## Drill Pipe



Selección de tubería pesada (OD y tipo estándar o espiralado con sus características respectivas de peso y diámetro interno). Se ingresa para cada tubería su longitud.

## Heavy Weight



Selección de los collares de perforación (tipo liso o acanalado, OD y sus características respectivas de peso y diámetro interno). Se ingresa por cada Drill Collar su longitud. En el ejemplo mostrado se seleccionan dos collares.

## Drill Collar



Para los otros componentes seleccionados se debe ingresar manualmente las pérdidas de presión (en este caso centralizador y motor).

Seleccionar Componentes

Componentes del BHA

Jar:	<input type="text"/>	psi	MWD:	<input type="text"/>	psi	Motor:	<input type="text" value="500"/>	psi
Cent.:	<input type="text" value="1"/>	psi	LWD:	<input type="text"/>	psi	Otros:	<input type="text"/>	psi

Caso 7

Casing 1 Casing 2 Casing 3 Drill String

Sección 1 Sección 2 Sección 3 Sección 4

Seleccionar Componentes

**Especificaciones Drill Pipe:**

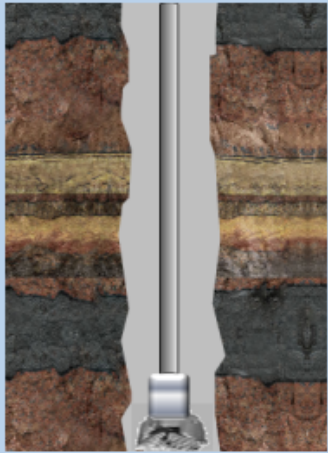
No. de Tipos de Tubería:

Nivel de referencia en superficie

	Clase	OD	Características	
Tubería 1:	<input type="text" value="New"/>	<input type="text" value="5''"/>	<input type="text" value="16.25 lb/ft; E75; ID: 4.408''"/>	
		Longitud:	<input type="text"/>	ft
Tubería 2:	<input type="text" value="Heavy W."/>	<input type="text" value="5''"/>	<input type="text" value="Standard; 50.10 lb/ft; ID: 3."/>	
		Longitud:	<input type="text"/>	ft

No. de Tipos de Collares:

DrillCollar 1:	<input type="text" value="Liso"/>	<input type="text" value="8''"/>	<input type="text" value="154 lb/ft; ID: 2 1/2''"/>	
		Longitud:	<input type="text"/>	ft
DrillCollar 2:	<input type="text" value="Acanaladc"/>	<input type="text" value="8''"/>	<input type="text" value="154 lb/ft; ID: 2 1/2''"/>	
		Longitud:	<input type="text"/>	ft



Ver Base de Datos de Motores

Cada pestaña dentro del Drill String corresponderá a cada una de las secciones de acuerdo al caso seleccionado, en cada una se debe seguir el procedimiento:

- Seleccionar los componentes del ensamble.
- Especificar las pérdidas de presión para componentes diferentes a tuberías (drill pipe, heavy weight y drill collar).
- Especificar la clase o tipo de tubería con su respectivo OD y sus características, como también registrar sus respectivas longitudes.

Para el caso del motor dar click en *Ver Base de Datos de Motores*.

Descripción del motor	OD (in)	Longitud (ft)	Máx ΔP	Descripción del motor	OD (in)	Longitud (ft)	Máx ΔP
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 3.0 STG	4,750	21,79	380	6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 2.0 STG	6,750	19,56	250
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	4,750	21,79	380	6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 3.0 STG	6,750	22,63	375
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 3.5 STG	4,750	19,54	500	6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 6.0 STG	6,750	35,88	750
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 6.3 STG	4,750	25,82	900	8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 3.0 STG	8,000	23,95	375
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 7.0 STG	4,750	31,04	1000	8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	8,000	27,33	500
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 2.2 STG	4,750	19,54	360	8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 3.6 STG	8,000	26,25	520
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 4.4 STG	4,750	31,04	720	8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 5.3 STG	8,000	31,92	760
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	6,250	25,05	500	8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 7.2 STG	8,000	42,25	1040
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 4.3 STG	6,250	21,95	625	8" SPERRYDRILL LOBE 6/7 - 4.0 STG	8,000	30,08	620
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 2.8 STG	6,250	21,95	460	8" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 3.0 STG	8,000	26,25	490
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 4.0 STG	6,250	23,05	625	8" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 6.0 STG	8,000	42,25	980
6-1/2" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	6,500	28,71	500	8" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 4.0 STG	8,000	27,08	550
6-1/2" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 4.8 STG	6,500	25,62	700	8" SPERRYDRILL LOBE 9/10 - 3.0 STG	8,000	22,91	375
6-1/2" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 3.0 STG	6,500	23,62	375	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	9,625	33,69	500
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 3.0 STG	6,750	23,3	375	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 5.0 STG	9,625	33,69	620
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	6,750	26,63	500	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 3/4 - 4.5 STG	9,625	30,78	620
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 4.8 STG	6,750	24,63	700	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 3/4 - 6.0 STG	9,625	34,95	820
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 7.0 STG	6,750	29,72	1010	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 3/4 - 9.0 STG	9,625	49,03	1240
6-3/2" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 9.6 STG	6,750	39,84	1400	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 5/6 - 3.0 STG	9,625	30,78	450
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 6/7 - 5.0 STG	6,750	28,92	775	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 5/6 - 6.0 STG	9,625	49,03	900
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 3.0 STG	6,750	22,63	500	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 6/7 - 5.0 STG	9,625	33,28	775
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 6.0 STG	6,750	35,88	1000				

Se presenta la opción de ver la base de datos para motores de fondo o motores Slim Hole (pozos estrechos).

En la última sección después de registraren los datos se da click en aceptar si corresponde al diseño seleccionado o cancelar.



Ver caso Seleccionado

Después de aceptar en el paso anterior y se encuentre otro modulo podrá ver las especificaciones de forma más detallada que la presentada en el resumen dando click en este botón.

Cambiar de Caso

Si se desea cambiar el caso, realizar la hidráulica a otra profundidad y no en las planeadas en el diseño o si se desea cambiar o corregir la geometría del pozo.

Seleccionar Caso Superficie

Selecciona el caso con las características de ID y de longitud de cada uno de los componentes.



Ejemplo: Para el caso de diseño se seleccionó el caso API N° 3

## Resumen

Seleccionar caso de Diseño Ver caso Seleccionado Cambiar de Caso Seleccionar Caso Superficie Profundidad Pozo: 12100 ft

Parámetros Sección 1		
	OD (in)	Longitud (ft)
Casing 1:	20	800
Drill Pipe 1:	5	420
Drill Pipe 2:	5	248
Drill Collar 1:	8	60
Drill Collar 2:	8	30

Parámetros Sección 2		
	OD (in)	Longitud (ft)
Casing 2:	13,375	3200
Drill Pipe 1:	5	2290
Drill Pipe 2:	5	620
Drill Collar 1:	8	150
Drill Collar 2:	8	90

Parámetros Sección 3		
	OD (in)	Longitud (ft)
Casing 3:	9,625	7900
Drill Pipe 1:	5	7267
Drill Pipe 2:	5	403
Drill Collar 1:	8	90
Drill Collar 2:	8	90

Parámetros Sección 4		
	OD (in)	Longitud (ft)
Drill Pipe 1:	5	11530
Drill Pipe 2:	5	341
Drill Collar 1:	6,5	90
Drill Collar 2:	6,5	90

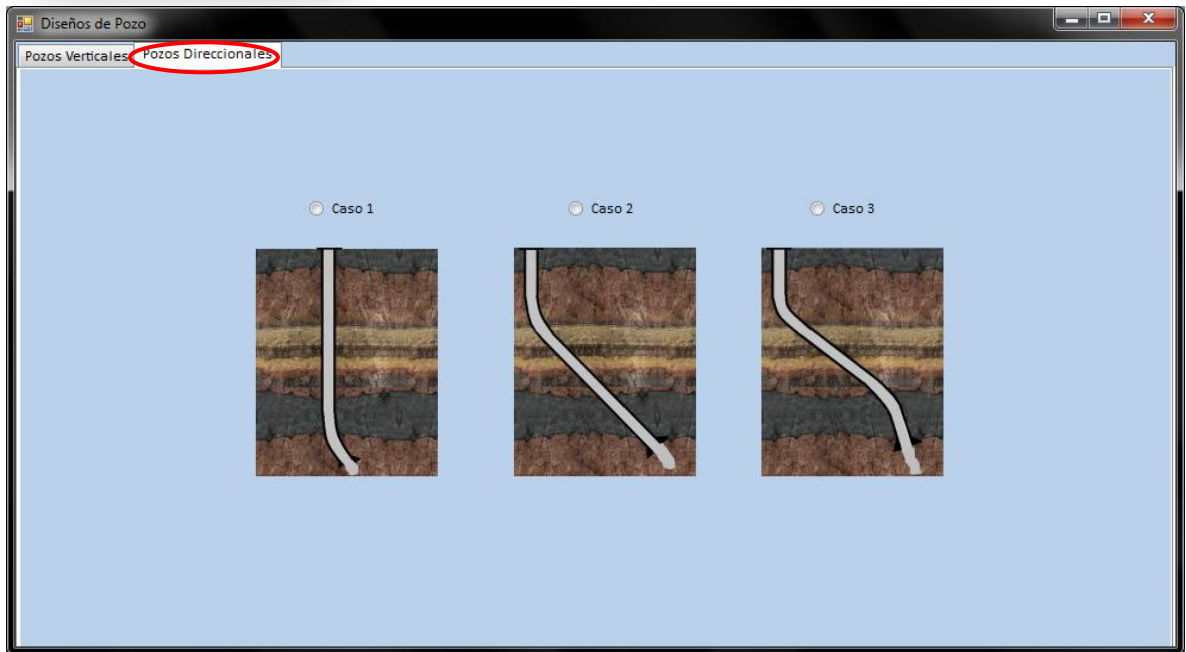
Para el caso del ejemplo presentado, se indica por cada sección los parámetros seleccionados.

## Referencias

Cada una de las bases de datos disponibles para la selección de la tubería revestimiento, tubería de perforación y collares de perforación están según la Norma API. En el caso de la tubería pesada se seleccionó de la siguiente base <http://www.johnlawrieoilfield.com>

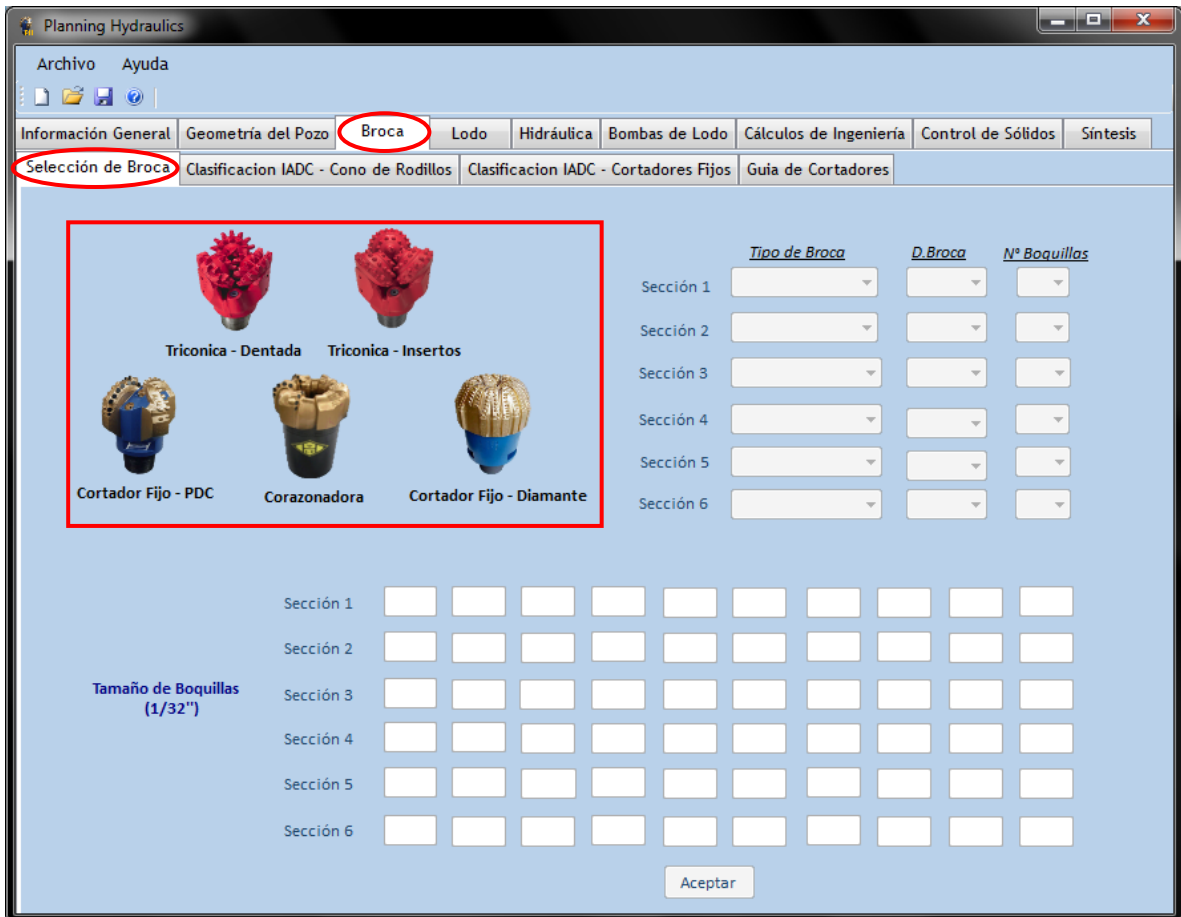
Si el caso de diseño corresponde a un pozo desviado

Seleccionar caso de Diseño



Se selecciona el tipo de pozo de acuerdo a la trayectoria de desviación.

## MÓDULO 3: BROCA



En este módulo se selecciona para cada sección de acuerdo al caso de diseño escogido el tipo de broca, su diámetro y número de boquillas; en la pestaña principal del módulo se presenta la imagen de cada tipo de broca (dentro del recuadro rojo).

### Broca>Selección de la broca

Para la selección del tipo de broca es necesario conocer el tipo de formación a perforar, Planning Hydraulics presenta una guía al finalizar sobre el tipo de broca más ideal dependiendo de la abrasividad y otras características de la formación.

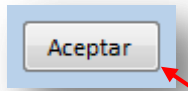
En cuanto al diámetro de la broca, estará determinada por el tamaño del hueco planeado a perforar en cada sección del diseño, el número de boquillas inicial será ingresado por el usuario.

*Ejemplo:*

	<u>Tipo de Broca</u>	<u>D. Broca</u>	<u>N° Boquillas</u>
Sección 1	C.F. - PDC	26"	3
Sección 2	C.F. - PDC	17 1/2	3
Sección 3	C.F. - PDC	12 1/4	3
Sección 4	C.F. - PDC	8 1/2"	3

El tamaño de cada una de las boquillas se registra por sección y varía de 7/32" a 24/32"; en el caso de broca tricónica el número de boquillas podrá ser hasta 3 y en para brocas PDC (de cortadores fijos) hasta 10. Para iniciar se puede asignar de a 2 boquillas de 11/32", luego se realiza la optimización.

	Sección 1	11	11	11
	Sección 2	11	11	11
<b>Tamaño de Boquillas (1/32")</b>	Sección 3	11	11	11
	Sección 4	11	11	11



Una vez se ha realizado la optimización de hidráulica y se ha determinado para cada sección el número y tamaño de las boquillas (ver módulo Hidráulica>Optimización de Hidráulica) posteriormente se aplican los cambios y se puede visualizar en el módulo de brocas así:

	<u>Tipo de Broca</u>	<u>D. Broca</u>	<u>Nº Boquillas</u>
Sección 1	C.F. - PDC	26''	10
Sección 2	C.F. - PDC	17 1/2	10
Sección 3	C.F. - PDC	12 1/4	6
Sección 4	C.F. - PDC	8 1/2''	4

El nuevo tamaño de las boquillas por sección aparecerá en la pestaña principal del módulo de brocas así:

	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13
Sección 1	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13
Sección 2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Tamaño de Boquillas (1/32")	9	9	9	9	8	8				
Sección 3	9	9	9	9	8	8				
Sección 4	9	9	8	8						

**Broca> Clasificación IADC para brocas de conos de rodillos (Anexo B)**

**Broca>Clasificación IADC para brocas de cortadores fijos (Anexo B)**

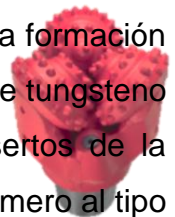
**Broca>Guía de cortadores (Anexo C)**

## **Acerca de la guía de cortadores**

La guía de cortadores constituye básicamente una representación gráfica de las estructuras de corte tanto para brocas de conos de rodillos o tricónicas con estructuras ya sea de dientes maquinados o de insertos como para brocas de cortadores fijos ya sean brocas de compactos cristalinos PDC, o brocas de diamante natural o impregnado, dependiendo de la dureza de la formación (columna izquierda tono claro blanda, y tono oscuro dura) así deberá ser las características de la estructura de corte.

### **En brocas de conos de rodillos:**

La estructura de corte varía de 1 a 8 aumentando según la dureza de la formación a perforar de 1 a 3 para dientes maquinados de 4 a 8 para insertos (en el esquema se muestra las características de los dientes e insertos de la broca), el primer número corresponde a la serie de corte el segundo número al tipo de estructura de corte.



### **En brocas de cortadores fijos:**

Para las formaciones de dureza blanda a medio dura puede usarse broca PDC o TSP (de mayor dureza que para la TSP), pero para formaciones duras a muy duras se usa las brocas diamante impregnado o natural. En la parte inferior de la guía se presenta de acuerdo al número que tan grande es el cortador



## **Referencias**

Las guías presentadas se encuentran basadas en el código IADC. "International Association of Drilling Contractors"

## MÓDULO 4: LODO

Planning Hydraulics

Archivo Ayuda

Información General Geometría del Pozo Broca **Lodo** Hidráulica Bombas de Lodo Cálculos de Ingeniería Control de Sólidos Síntesis

**Definición del Fluido** Guía de Reología

Seleccione el tipo de cálculo Reológico

Valores de Reometro

Datos de Reología

Modelo Reológico:

Seleccione el valor conocido

Gradiente de Presión

Densidad del Lodo

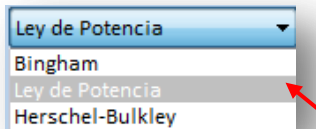
	Densidad (lb/gal)	Grad de Presion (psi/ft)	VA (cP)	VP (cP)	YP (lb/100 ft <sup>2</sup> )	ty (lb/100 ft <sup>2</sup> )	Esf. de Gel (lb/100 ft <sup>2</sup> )	Ø600	Ø300	Ø6	Ø3
Sección 1											
Sección 2											
Sección 3											
Sección 4											
Sección 5											
Sección 6											

Calcular Valores Definir tipo de Fluido

En la pestaña principal del módulo de lodo, se ingresa la información completa del programa del lodo por secciones (según el caso de diseño seleccionado), de acuerdo al modelo reológico y se define el tipo de fluido a utilizar en cada sección a perforar. En la sub pestaña siguiente se presenta una guía de reología para sistemas base agua.

### Lodo>Definición del fluido

Selección del modelo reológico a implementar en el caso:



**Modelo de Ley de Potencia o exponencial:** Usado para describir el flujo de fluidos pseudoplásticos, un gráfico log-log describe una línea recta. Es un modelo de dos parámetros para el cual la viscosidad absoluta disminuye a medida que la tasa de corte aumenta.



Si el usuario desea ingresar con datos de reología y datos de densidad del lodo, según las unidades respectivas:

- Densidad del lodo
- Viscosidad plástica, VP
- Punto de cedencia, YP
- Esfuerzo de gel

Calcular Valores

Los respectivos cálculos realizados son:

	Densidad (lb/gal)	Grad de Presion (psi/ft)	VA (cP)	VP (cP)	YP (lb/100 ft <sup>2</sup> )	$\tau_y$ (lb/100 ft <sup>2</sup> )	Esf. de Gel (lb/100 ft <sup>2</sup> )	$\theta_{600}$	$\theta_{300}$	$\theta_6$	$\theta_3$
Sección 1	9,8	0,51	13,0	5	16		4	26	21		4
Sección 2	10,2	0,53	13,0	6,5	14		4	26	20		4
Sección 3	11,4	0,59	16,0	10	12		4	32	22		4
Sección 4	12,6	0,66	19,5	14	11		4	39	25		4

$$\text{Gradiente de presión} = 0,052 * \rho_{lodo}$$

$$\theta_{300} = YP \left( \frac{lb}{100ft^2} \right) + PV(cP)$$

$$\theta_{600} = PV(cP) + \theta_{300}$$

$$VA(cP) = \theta_{600}/2$$

$\theta_3$ : Se toma como el mismo valor de Esfuerzo de gel.

Si el usuario desea ingresar con valores de reómetro y gradiente de presión, deberá ingresar:

- Gradiente de presión
- $\theta_{600}$
- $\theta_{300}$
- Esfuerzo de gel

Calcular Valores

Los demás datos serán calculados de acuerdo a las ecuaciones anteriores.

	Densidad (lb/gal)	Grad de Presion (psi/ft)	VA (cP)	VP (cP)	YP (lb/100 ft <sup>2</sup> )	$\tau_y$ (lb/100 ft <sup>2</sup> )	Esf. de Gel (lb/100 ft <sup>2</sup> )	$\theta_{600}$	$\theta_{300}$	$\theta_6$	$\theta_3$
Sección 1	9,8	0,51	13,0	5	16		4	26	21		4
Sección 2	10,2	0,53	13,0	6,5	14		4	26	20		4
Sección 3	11,4	0,59	16,0	10	12		4	32	22		4
Sección 4	12,6	0,66	19,5	14	11		4	39	25		4

**Modelo de Bingham:** Un fluido Plástico de Bingham no comienza a fluir hasta que el esfuerzo de corte aplicado exceda el valor mínimo. Si el usuario desea ingresar con datos de reología y datos de densidad del lodo, deberá ingresar según las unidades respectivas:

Si el usuario desea ingresar con datos de reología y datos de densidad del lodo, deberá ingresar según las unidades respectivas:

- Densidad del lodo
- Viscosidad plástica, VP
- Punto de cedencia, YP
- Esfuerzo de gel

Calcular Valores

Si el usuario desea ingresar con valores de reómetro y gradiente de presión, deberá ingresar:

- Gradiente de presión
- $\theta_{600}$
- $\theta_{300}$
- Esfuerzo de gel

Calcular Valores

Las ecuaciones implementadas son iguales a las presentadas para el modelo de ley de potencia.

**Modelo de Herschel-Bulkley:** Combina aspectos teóricos y prácticos de los modelos de ley de potencia y de Bingham, el modelo asume que los fluidos requerirán una cierta cantidad de esfuerzo aplicado antes de iniciar el movimiento. El valor de  $\tau_0$  es el valor del punto de cedencia a una tasa de corte de cero, teóricamente es similar al del modelo de Bingham.

Si el usuario desea ingresar con datos de reología y datos de densidad del lodo, deberá ingresar según las unidades respectivas:

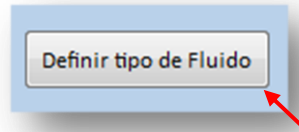
- Densidad del lodo
- Viscosidad plástica
- Punto de cedencia
- Esfuerzo de gel
- Esfuerzo de corte  $\tau_y$

Calcular Valores

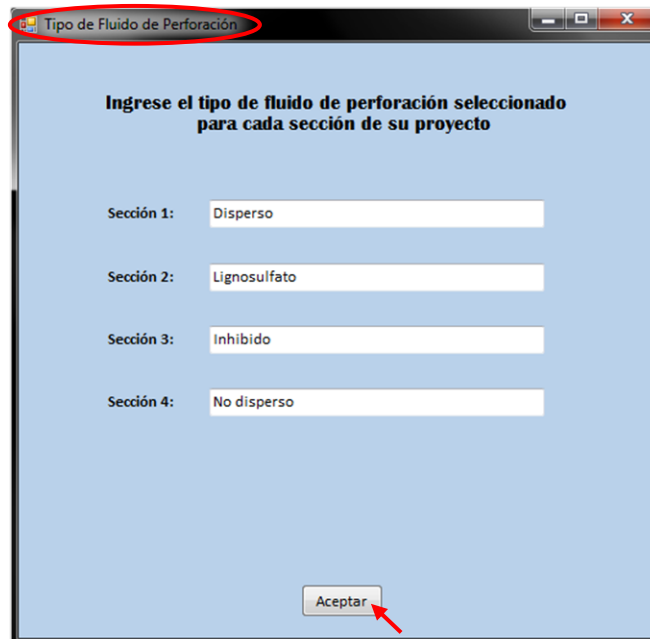
$\tau_y$ : Su valor deberá estar entre cero y el punto de cedencia de Bingham. Además de los cálculos realizados también se calcula  $\theta_6$  así:  $\theta_6 = 2\theta_3 - \tau_y$

	Densidad (lb/gal)	Grad de Presion (psi/ft)	VA (cP)	VP (cP)	YP (lb/100 ft <sup>2</sup> )	$\tau_y$ (lb/100 ft <sup>2</sup> )	Esf. de Gel (lb/100 ft <sup>2</sup> )	$\theta_{600}$	$\theta_{300}$	$\theta_6$	$\theta_3$
Sección 1	9,8	0,51	13,0	5	16	5	4	26	21	3	4
Sección 2	10,2	0,53	13,0	6	14	5	4	26	20	3	4
Sección 3	11,4	0,59	16,0	10	12	5	4	32	22	3	4
Sección 4	12,6	0,66	19,5	14	11	5	4	39	25	3	4

Una vez se ha seleccionado el modelo reológico y se han realizado los respectivos cálculos, se da click en:



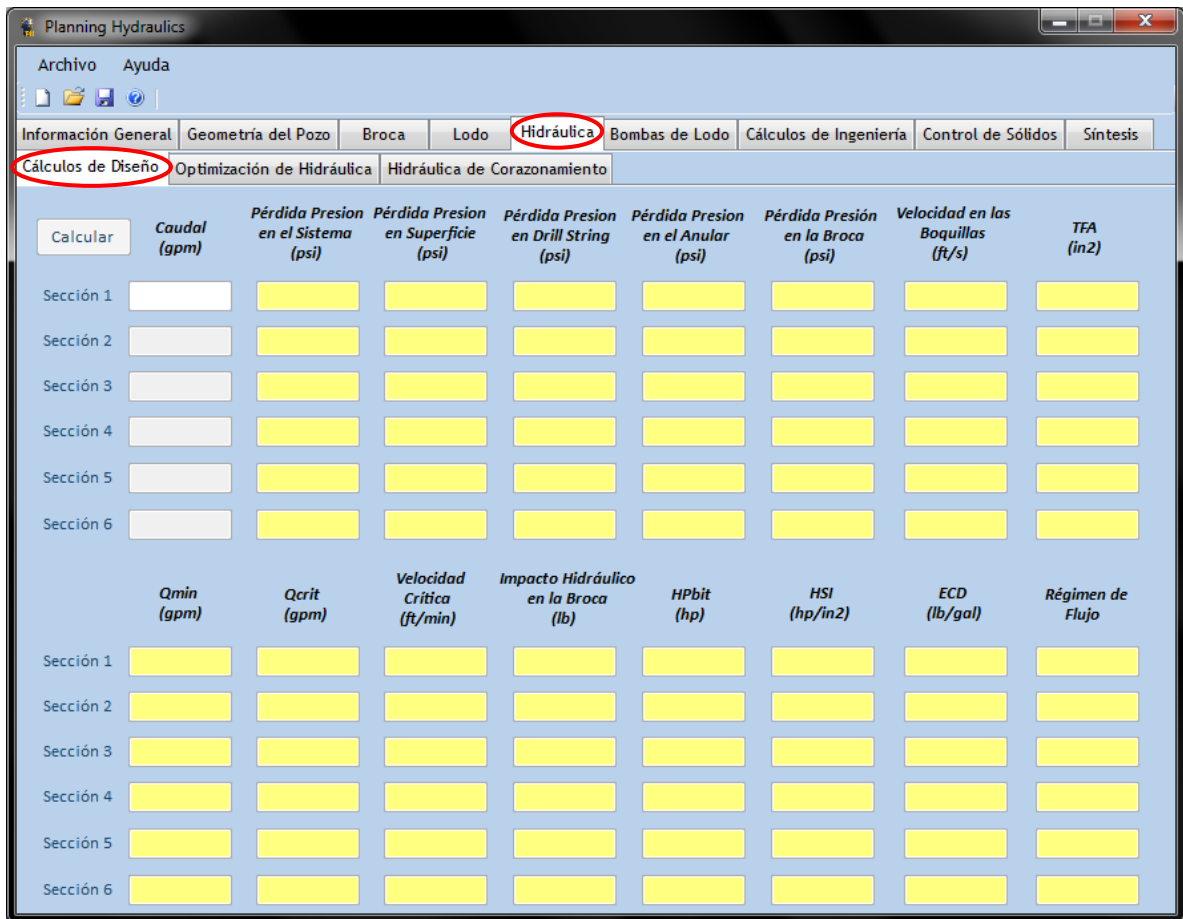
Para la selección del tipo de fluido de perforación por sección en este caso 4 tipos de fluidos de perforación diferentes si fuese necesario.



### **Lodo>Guía de reología (Presentado en el anexo F)**

Para sistemas base agua se presenta una guía de reología donde se puede ingresar con el valor de densidad del lodo (que puede ser proporcionado mediante un rango de valores de acuerdo a la sección a perforar) para determinar los valores máximos y mínimos de propiedades como la viscosidad plástica y el punto de cedencia. Esta guía resulta muy útil en el caso en que no se tenga información de las formaciones a perforar ni se disponga de los datos de la reología del lodo de perforación a utilizar.

## MÓDULO 5: HIDRÁULICA



En este módulo se efectúan todos los cálculos de hidráulica para las secciones planeadas en el diseño del pozo; a partir de un caudal de trabajo efectúa los cálculos de las pérdidas del presión en superficie, el sistema, la sarta de perforación, el espacio anular, la broca, y el sistema, posteriormente se realiza la optimización y se trabaja la hidráulica de las secciones corazonadas si las hay.

### Hidráulica>Cálculos de diseño

De acuerdo el caso de diseño seleccionado en el módulo de geometría de pozo y las especificaciones de revestimiento y sarta de perforación, junto las del programa de brocas y de lodos. En la pestaña de cálculo de diseño el procedimiento a seguir será:

- Ingresar los caudales de trabajo por sección en gpm (galones por minuto).
- Dar click en calcular.
- Planning Hydraulics efectúa todos los cálculos de pérdidas de presión, factores limitantes (rango de caudales), velocidad crítica, hidráulica de la broca entre otros.

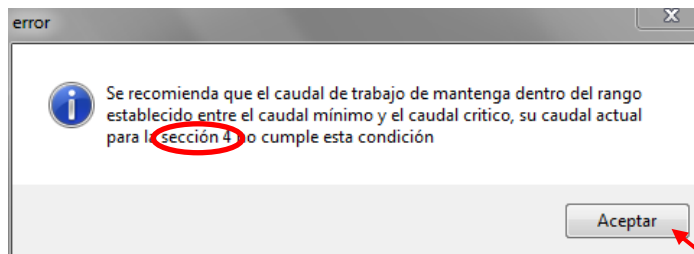
*Ejemplo:* Para el caso de diseño 7 (4 revestimientos y hueco abierto) pozo vertical.

	Caudal (gpm)	Pérdida Presion en el Sistema (psi)	Pérdida Presion en Superficie (psi)	Pérdida Presion en Drill String (psi)	Pérdida Presion en el Anular (psi)	Pérdida Presion en la Broca (psi)	Velocidad en las Boquillas (ft/s)	TFA (in2)
Sección 1	1530	2.089,19	180,92	922,46	0,69	985,12	334,90	1,462
Sección 2	867	2.496,44	94,39	1.199,61	6,36	1.196,09	361,71	0,767
Sección 3	516	3.597,37	61,19	1.180,80	37,71	2.317,67	476,27	0,347
Sección 4	270	2.826,58	26,60	903,55	192,60	1.703,83	388,43	0,222

	Q <sub>min</sub> (gpm)	Q <sub>crit</sub> (gpm)	Velocidad Crítica (ft/min)	Impacto Hidráulico en la Broca (lb)	HPbit (hp)	HSI (hp/in2)	ECD (lb/gal)	Régimen de Flujo
Sección 1	1529	4807	192,44	2.601,79	879,36	1,66	9,82	Laminar
Sección 2	855	2107	213,14	1.657,39	605,02	2,52	10,24	Laminar
Sección 3	506	822	233,97	1.451,62	697,74	5,92	11,49	Laminar
Sección 4	296	336	274,35	684,68	268,40	4,73	12,91	Laminar

Mensaje de error



Como indica el mensaje de error el caudal ingresado en la sección 4 no se encuentra en el rango rangos establecidos. Los factores limitantes para considerar en la selección del caudal de trabajo para este diseño en particular son:

	$Q_{min}$ (gpm)	$Q_{crit}$ (gpm)
Sección 1	1529	4807
Sección 2	855	2107
Sección 3	506	822
Sección 4	296	336

**Caudal mínimo:** para garantizar limpieza eficiente del pozo.

*Ejemplo:* Para broca PDC y diámetro de hueco 26'' el caudal mínimo será:

$$Q_{min} = 12,72 * 26^{1,47} = 1529,21 \text{ gpm}$$

**Caudal crítico:** para garantizar limpieza eficiente del pozo.

*Ejemplo:* Para los siguientes datos:  $D_h = 26''$ ,  $\rho_{lodo} = 9,8 \text{ lpg}$ , diámetro externo del drill collar 8'',  $VP = 5 \text{ cP}$ , y  $YP = 16 \text{ lb}/100\text{ft}^2$ . El caudal critico será:

$$V_{crit} = 192,44 \frac{\text{ft}}{\text{min}} ; Q_{crit} = 4807,14 \text{ gpm}$$

### Resultados de pérdidas de presión

En este caso para el modelo reológico seleccionado-Ley de potencia, cada modelo reológico presenta sus propias ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de presión en superficie, tubería y en el espacio anular:

**Caso de superficie:** Según la tabla 111. Para el modelo de ley de potencia caso 3, Longitud equivalente es 610 ft

$$P_{\text{equipo de sup}} = \frac{0,001643 * 5^2 * 9,8}{92916 * 3,826} * 610 = 180,92 \text{ psi}$$

El factor de fricción se toma como si se trabajara con tubería. Ver ejemplo de cálculos de pérdida de presión en la sarta de perforación.

**En la sarta de perforación:**

$$\theta_{600} = 26$$

$$300 = 21$$

Índice a velocidades bajas

$$n_p = 3,32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} = 0,3079$$

Índice de consistencia en tuberías:

$$K_p = \frac{5,11 * \theta_{600}}{1022^{n_p}} = 15,727$$

Para la tubería de perforación o *Drill pipe*

De 420 ft de *OD* = 5'':

$$V_p = \frac{24,48 * 1530}{4,276^2} = 2048,459 \text{ ft/min}$$

Viscosidad efectiva:

$$\mu_{ep} =$$

$$100 * K_p \left( \frac{1,6 * V_p}{4,276} \right)^{n_p - 1} * \left( \frac{3n_p + 1}{4n_p} \right)^{n_p} \\ = 18,198 \text{ cP}$$

$$PV = 5 \text{ cP}$$

$$Q = 1530 \text{ gpm}$$

$$\rho_{\text{lodo}} = 9,8 \text{ lpg}$$

Número de Reynolds

$$N_{Rep} = \frac{15,467 * V_p * d * \rho_{\text{lodo}}}{\mu_{ep}} \\ = 72955,614$$

Flujo turbulento ya que su valor es >2100.

Coefficiente de fricción:

$$f_p = \frac{\left( \frac{\log n_p + 3,93}{50} \right)}{N_{Rep}^{\left[ \frac{1,75 - \log n_p}{7} \right]}} = 0,001835$$

Si fuese flujo laminar <2100:

$$f_p = \frac{16}{N_{Rep}} = 0,000291$$

Pérdida de presión:

$$P_p = \frac{f_p * V_p^2 * \rho_{\text{lodo}}}{92916 * d} * 420 \\ = 79,786 \text{ psi}$$

### Pérdidas de Presión

En tubería de perforación o *Drill pipe* de 420 ft de  $OD = 5''$  e  $ID = 4,276''$ : 79,786 psi.

En tubería pesada o *Heavy Weight* de 248 ft de  $OD = 5''$  e  $ID = 3''$ : 194,87 psi

En los collares de perforación o *Drill Collar* de 90 ft de  $OD = 8''$  e  $ID = 2,5''$ : 146,82 psi

En el motor y centralizadores: 501 psi

Para una pérdida total de presión en la sarta de perforación de: 922,46 psi

### **En el anular:**

Con los mismos datos de reología de caudal, de densidad del lodo y especificaciones de tuberías. Se efectuarán los cálculos de presión en espacios anulares usando las ecuaciones de ley de potencia:

Índice a velocidades bajas:

$$\theta_{100} = \theta_{300} - \left( \frac{2 * PV}{3} \right) = 17,66$$

$$n_a = 0,657 \log \frac{\theta_{100}}{\theta_3} = 0,412$$

Índice de consistencia en anular:

$$K_a = \frac{5,11 * \theta_3}{5,11^{n_a}} = 10,423$$

Para el anular:

Hueco de 26''-tubería de 668 ft de  $OD = 5''$

(Drill Pipe y Heavy Weight)

$$V_a = \frac{24,48 * Q}{26^2 - 5^2} = 57,533 \text{ ft/min}$$

Viscosidad efectiva:

$$\begin{aligned} \mu_{e_a} \\ = 100 * K_a * \left( \frac{2,4 * V_a}{26 - 5} \right)^{n_a - 1} * \left( \frac{2n_a + 1}{3n_a} \right)^{n_a} = \\ 404,89 \text{ cP} \end{aligned}$$

Número de Reynolds

$$\begin{aligned} N_{Re_a} &= \frac{15,467 * V_a * (26 - 5) * \rho_{lodo}}{\mu_{e_a}} \\ &= 452,303 \end{aligned}$$

Flujo laminar ya que su valor es <2100.

$$f_a = \frac{24}{N_{Rea}} = 0,053$$

Si fuese flujo turbulento >2100:

$$f_a = \frac{\left(\frac{\log n_a + 3,93}{50}\right)}{N_{Rea}^{\left[\frac{1,75 - \log n_a}{7}\right]}} = 0,0109$$

Pérdida de presión:

$$P_a = \frac{f_a * V_a^2 * \rho}{92916 * (26 - 5)} * 668 = 0,589 \text{ psi}$$

### Pérdidas de Presión

En anular hueco-Tubería de perforación (drill pipe y heavy weight): 0,589 psi

En anular hueco-collares de perforación: 0,101psi

Para una pérdida total de presión en espacio anular de: 0,69 psi

**En la broca de perforación:**

$$P_b = \frac{156 * 9,8 * 1530^2}{(8 * (14^2) + 3 * (13^2))^2} = 985,12 \text{ psi}$$

Sección 1 broca PDC de 10 boquillas 8 de 14/32'' y 2 de 13/32''.

**Pérdidas de presión en el sistema:**

$$P_{total\ sistema} = P_{conexion\ superf} + \sum P_p + \sum P_a + P_{broca}$$

Es la sumatoria de las pérdidas del equipo de superficie, tubería, espacios anulares y la broca: 2089,18 psi.

Calcular	Caudal (gpm)	Pérdida Presion en el Sistema (psi)	Pérdida Presion en Superficie (psi)	Pérdida Presion en Drill String (psi)	Pérdida Presion en el Anular (psi)	Pérdida Presión en la Broca (psi)
Sección 1	1530	2.089,19	180,92	922,46	0,69	985,12

**TFA (Área total de flujo):**

$$TFA = \frac{\pi}{4} \left( 8 * \left[ \frac{14}{32} \right]^2 + 2 \left[ \frac{13}{32} \right]^2 \right) = 1,4618$$

**Velocidad en las boquillas:**

$$V_n = \frac{417,2 * 1530}{(8 * (14^2) + 2 * (13^2))^2} = 334,89 \text{ ft/s}$$

Velocidad en las Boquillas (ft/s)	TFA (in <sup>2</sup> )
334,90	1,462

**Porcentaje de pérdida en la broca:**

$$\% \Delta P_b = \frac{985,12}{2089,18} * 100 = 47,15\%$$

**Potencia Hidráulica en la broca:**

$$HHP_b = \frac{1530 * 985,12}{1714} = 879,36 \text{ hp}$$

**Potencia Hidráulica en la broca por pulgada cuadrada:**

$$HSI = \frac{HHP_b}{A_b}$$

$$A_b = \frac{\pi}{4} * 26^2 = 530,929 \text{ in}^2$$

$$HSI = \frac{879,36 \text{ hp}}{530,929 \text{ in}^2} = 1,656 \frac{\text{hp}}{\text{in}^2}$$

**Impacto hidráulico:**

$$IF = \frac{334,89 * 1530 * 9,8}{1930} = 2601,79 \text{ lb}$$

Ejemplo: Para la sección 1:

Velocidad Crítica (ft/min)	Impacto Hidráulico en la Broca (lb)	HPbit (hp)	HSI (hp/in <sup>2</sup> )	ECD (lb/gal)	Régimen de Flujo
192,44	2.601,79	879,36	1,66	9,82	Laminar

Densidad equivalente de circulación ECD:

Para  $\rho_{lodo} = 9,8 \text{ lpg}$ ,  $TVD = 800 \text{ ft}$  y  $P_a = 0,69 \text{ psi}$

$$ECD = 9,8 + \frac{0,69}{0,052 * 800} = 9,82 \text{ lpg}$$

Velocidad crítica: Calculada anteriormente para la primera sección

$$V_{crit} = 192,44 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

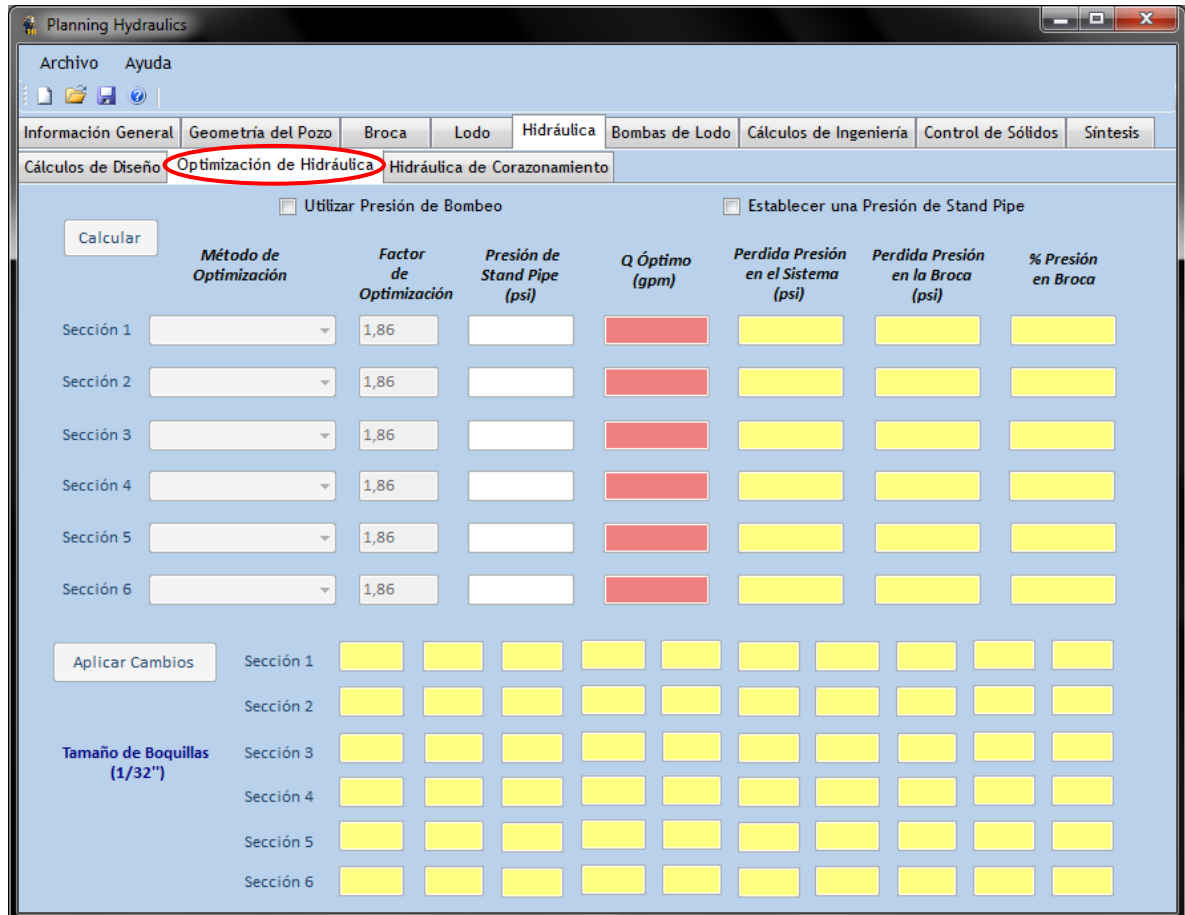
Régimen de flujo: La velocidad anular entre hueco y drill collar.

$$V_{anular} = 61,2 \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

Corresponde a régimen de flujo *laminar*.

## Hidráulica>Optimización de Hidráulica

Básicamente la optimización de la hidráulica del sistema de circulación buscar dos objetivos principales: limpiar el pozo de manera eficiente y hacer un mayor uso de la potencia disponible para perforar el pozo.



Para realizar la optimización se debe seguir este procedimiento para cada sección:

- Seleccionar el método de optimización por sección a perforar dependiendo del caso de diseño seleccionado. Ver tabla
- Ingresar un valor de índice de turbulencia “factor de optimización” (el programa por default asigna el valor de 1,86 propuesto en la literatura).

- Establezca una presión de stand pipe o de tubería parada o utilice la presión de bombeo (después de seleccionar las bombas en el módulo 6).
- Dar click en calcular.

	<i>Método de Optimización</i>	<i>Factor de Optimización</i>	<i>Presión de Stand Pipe (psi)</i>
Sección 1	Impacto Hidráulico	1,86	2150
Sección 2	Impacto Hidráulico	1,86	2500
Sección 3	Potencia Hidráulica	1,86	3600
Sección 4	Potencia Hidráulica	1,86	3600

Los resultados obtenidos se visualizan después de la optimización se visualizan:

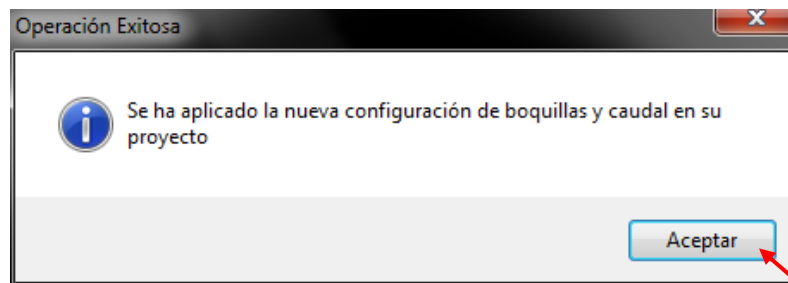
<i>Q Óptimo (gpm)</i>	<i>Pérdida Presión en el Sistema (psi)</i>	<i>Pérdida Presión en la Broca (psi)</i>	<i>% Presión en Broca</i>
1562	2.149,23	1.026,76	47,76
867	2.496,44	1.196,09	47,84
516	3.597,4	2.317,7	64,38
316	3.591,28	2.333,85	64,83

Si al aplicar los cambios aparece un mensaje alerta para alguna de las secciones deberá cambiarse la presión de stand pipe para que el caudal óptimo se encuentre

dentro del rango de caudal mínimo y máximo establecido en los cálculos de diseño.

Tamaño de Boquillas (1/32")	Sección 1	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13
	Sección 2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Sección 3	9	9	9	9	8	8				
	Sección 4	9	9	8	8						

Sino aparece ningún mensaje de error se aplicarán los cambios y se actualizará en el módulo de brocas el número y tamaño de las boquillas por cada sección.



Así en el módulo de brocas aparecerá la nueva configuración de boquillas para cada sección después de la optimización.

Brocas>Selección de broca

Tamaño de Boquillas (1/32")	Sección 1	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13
	Sección 2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Sección 3	9	9	9	9	8	8				
	Sección 4	9	9	8	8						

En *Hidráulica*>*Cálculos de diseño* se aplican los cambios reemplazando el caudal de trabajo por el caudal óptimo y se efectúan los cálculos.

Calcular	Caudal (gpm)	Pérdida Presion en el Sistema (psi)	Pérdida Presion en Superficie (psi)	Pérdida Presion en Drill String (psi)	Pérdida Presion en el Anular (psi)	Pérdida Presión en la Broca (psi)	Velocidad en las Boquillas (ft/s)	TFA (in2)
	1562	2.149,23	186,44	935,34	0,70	1.026,76	341,90	1,462
	867	2.496,44	94,39	1.199,61	6,36	1.196,09	361,71	0,767
	516	3.597,37	61,19	1.180,80	37,71	2.317,67	476,27	0,347
	316	3.591,28	34,33	1.020,63	202,46	2.333,85	454,60	0,222

	Qmin (gpm)	Qcrit (gpm)	Velocidad Crítica (ft/min)	Impacto Hidráulico en la Broca (lb)	HPbit (hp)	HSI (hp/in2)	ECD (lb/gal)	Régimen de Flujo
Sección 1	1529	4807	192,44	2.711,77	935,70	1,76	9,82	Laminar
Sección 2	855	2107	213,14	1.657,39	605,02	2,52	10,24	Laminar
Sección 3	506	822	233,97	1.451,62	697,74	5,92	11,49	Laminar
Sección 4	296	336	274,35	937,85	430,28	7,58	12,92	Laminar

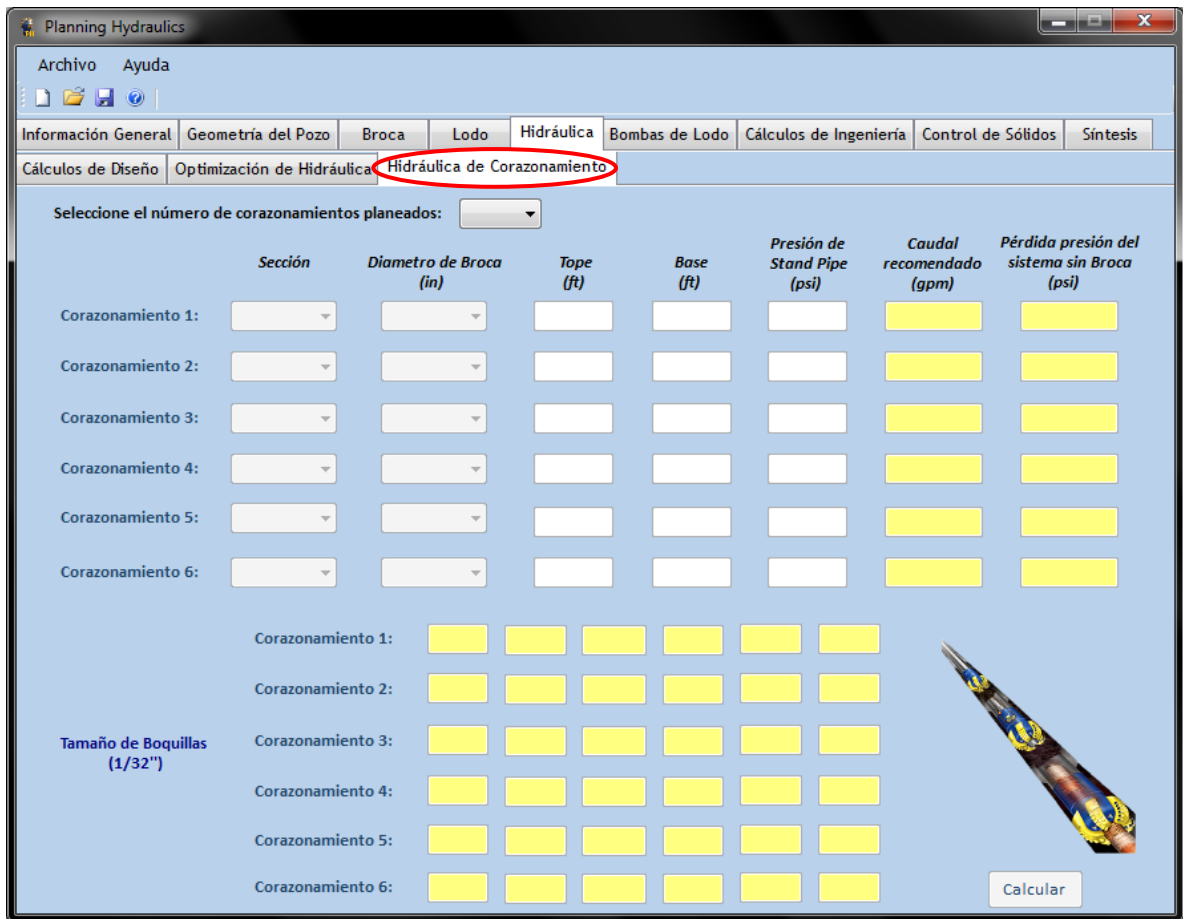
### Hidráulica>Hidráulica de corazonamiento

Para las zonas a corazonar se identifican las secciones planeadas a las cuales pertenece.

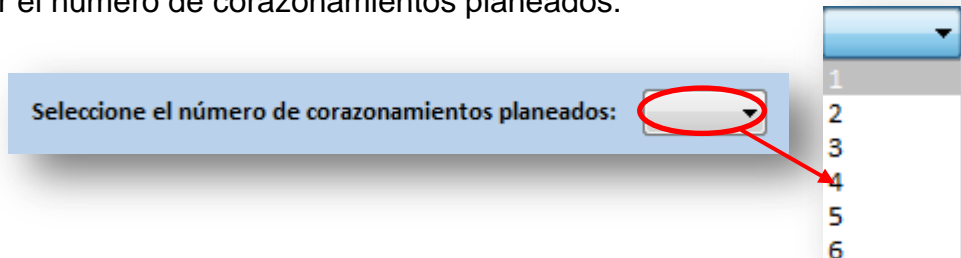
*Ejemplo:*

Diámetro del hueco	Intervalo corazonado (ft)
26''	-
17 ½''	2300 - 2700
12 ¼''	4500 - 4900
	7300 - 7700
8 ½''	9000 - 9400

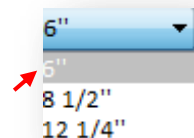
Se recomienda el siguiente procedimiento para obtener el caudal recomendado para las secciones a corazonar:



- Seleccionar el número de corazonamientos planeados:



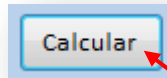
- Para el ejemplo el número de corazonamientos planeados es 4.
- Para cada corazonamiento se indica la sección planeada a la que pertenece.
- Se asigna el diámetro de la broca corazonadora.
- Se asigna el tope y la base del corazonamiento.



- Se registra la presión de stand pipe.

	Sección	Diametro de Broca (in)	Tope (ft)	Base (ft)	Presión de Stand Pipe (psi)
Corazonamiento 1:	Sección 2	8 1/2"	2800	3200	2150

- Finalmente se da click en calcular.



Los resultados obtenidos son básicamente:

- Caudal recomendado (gpm)
- Número y tamaño de las boquillas.
- Pérdida de presión del sistema sin broca.

Seleccione el número de corazonamientos planeados: 4

	Sección	Diametro de Broca (in)	Tope (ft)	Base (ft)	Presión de Stand Pipe (psi)	Caudal recomendado (gpm)	Pérdida presión del sistema sin Broca (psi)
Corazonamiento 1:	Sección 2	8 1/2"	2800	3200	2150	297	634,63
Corazonamiento 2:	Sección 3	8 1/2"	4000	4400	2500	297	690,46
Corazonamiento 3:	Sección 3	8 1/2"	7500	7900	3600	297	690,46
Corazonamiento 4:	Sección 4	6"	8500	8900	3500	166	756,46

Tamaño de Boquillas (1/32")	Corazonamiento 1:	Corazonamiento 2:	Corazonamiento 3:	Corazonamiento 4:
	8 8 8 8 7 0	7 7 7 7 7 7	8 8 7 7 0 0	7 7 7 0 0 0

Calcular

## MÓDULO 6: BOMBAS DE LODO

Utilizar Bombas de Catálogo

**Especificaciones**

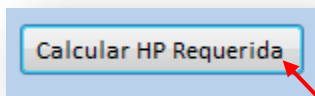
	HP Requerido en la Bomba (hp)	HP Requerido en el motor (hp)	Tipo de Bomba	SPM	Camisa	N° Bombas	Eficiencia Volumétrica (%)	Eficiencia Mecánica (%)	Presión de Bombeo (psi)	Caudal de Bombeo (gpm)
Sección 1							90	85		
Sección 2							90	85		
Sección 3							90	85		
Sección 4							90	85		
Sección 5							90	85		
Sección 6							90	85		

Calcular HP Requerida      Calcular HP de Motor      Crear Bomba      Calcular Presión y Caudal

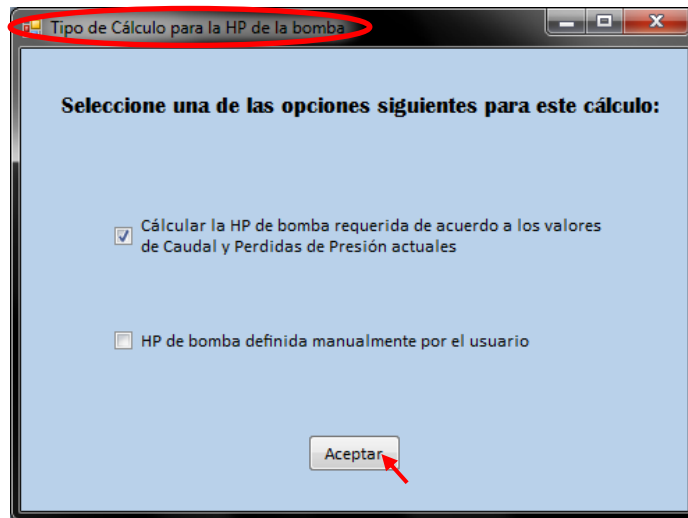
En este módulo se podrán seleccionar el tipo de bomba de lodo requerida para bombear el caudal y la presión deseada por sección (visualizar sus especificaciones), también se consideran las eficiencias volumétrica y mecánica en los cálculos efectuados como se mostrará más adelante.

Si se usan bombas de catálogo SUNNDA el procedimiento a seguir será:

- Calcular HP requerida. Dar click en el botón.



Aparecerá una ventana para determinar las opciones para realizar este cálculo



Si la opción seleccionada es *Calcular HP de la bomba requerida de acuerdo a los valores del caudal y presión actuales*.

- Se debe asignar el número de bombas (preliminarmente luego se podrá ajustar al número óptimo requerido según el caudal y la presión de bombeo).

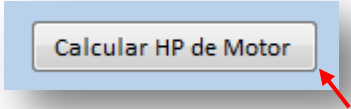
Se recomienda para:

*Las primeras secciones* del pozo que son las de mayor diámetro seleccionar de 2 a 4 bombas (4 será el máximo número de bombas admisible para que técnicamente sea viable),

*Las secciones más profundas* pueden ser 2 e incluso 1.

- Luego se calcula el HP del motor.





Calcular HP de Motor

- Planning Hydraulics dará como resultado recomendará por sección planeada la potencia requerida por la bomba y por el motor.

	<i>HP Requerido en la Bomba (hp)</i>	<i>HP Requerido en el motor (hp)</i>
Sección 1	687,24	951,20
Sección 2	443,08	613,26
Sección 3	569,99	788,92
Sección 4	663,46	918,29

- Los cálculos que se efectúan son:

*Ejemplo:* la primera sección las pérdidas de presión son 2149,23 psi y el caudal óptimo es de 1562 gpm. Profundidad 800 ft, diámetro de hueco 26''.

- Como se trata de una sección somera de gran diámetro se usaran 3 bombas. El caudal requerido por bomba (arreglo de 3 bombas dispuestas en paralelo) será aproximadamente de 520,66 gpm.

$$HHP_{sup}(hp) = \frac{2149,23 * 520,66}{1714} = 648,28 hp$$

- Por ser bomba triplex su eficiencia volumétrica se estima en 95%.

$$HHP_{bomba}(hp) = \frac{HHP_{sup}}{0,95} = \frac{627,74}{0,95} = 687,23 \text{ hp}$$

- Para garantizar que la potencia sea suministrada por los motores se ingresa una eficiencia mecánica en este caso 0,85 (que aparece por defecto) y otra (fija por el programa de 0,85) para considerar el deterioro por uso.

$$HHP_{motor}(hp) = \frac{687,23}{0,85 * 0,85} = 951,18 \text{ hp}$$

- De acuerdo a la mayor potencia requerida por el motor se selecciona el tipo de bomba de las disponibles en la base de datos que pueda cumplir el requisito de potencia nominal para todas las secciones.
- Para los resultados por sección de potencia de motor requerida se seleccionó la siguiente bomba triplex (las más utilizadas en campo) de 1300 HP, en la parte superior de la pestaña aparece las especificaciones de la bomba seleccionada así:

The image shows a software interface for pump selection. On the left, a dropdown menu lists several pump models: SDF-1300 TRIPL (selected), SDF-500 TRIPLEX, SDF-800 TRIPLEX, SDF-1000 TRIPLEX, SDF-1300 TRIPLEX, SDF-1600 TRIPLEX, and SDF-2200 TRIPLEX. A red arrow points from the selected 'SDF-1300 TRIPL' option to a 'Especificaciones' (Specifications) panel on the right. This panel displays the following details for the selected pump: Potencia: 1300 HP, Velocidad Nominal: 120 Stroke/min, Max. Tamaño Camisa: 7'', and Longitud de Carrera: 12''. The 'Longitud de Carrera' value is enclosed in a red rectangular box.

*Ejemplo:* para el caso de diseño 7 la selección de los strokes por minuto (spm), el diámetro de la camisa fue la siguiente:

Tipo de Bomba	SPM	Camisa	N° Bombas	Eficiencia Volumétrica (%)	Eficiencia Mecánica (%)
SDF-1300 TRIPL	120	6 1/2"	3	90	85
SDF-1300 TRIPL	90	5 1/2"	3	90	85
SDF-1300 TRIPL	80	5 1/2"	2	90	85
SDF-1300 TRIPL	100	5 1/2"	1	90	85

Aceptar

- Para la sección 1 el cálculo de la presión de bombeo y el caudal de bombeo está dado así:

$$Q(\text{gal/min}) = 0,0102 * 6,5^2 * 12 * 120 * 0,9 = 558,511 \text{ gpm}$$

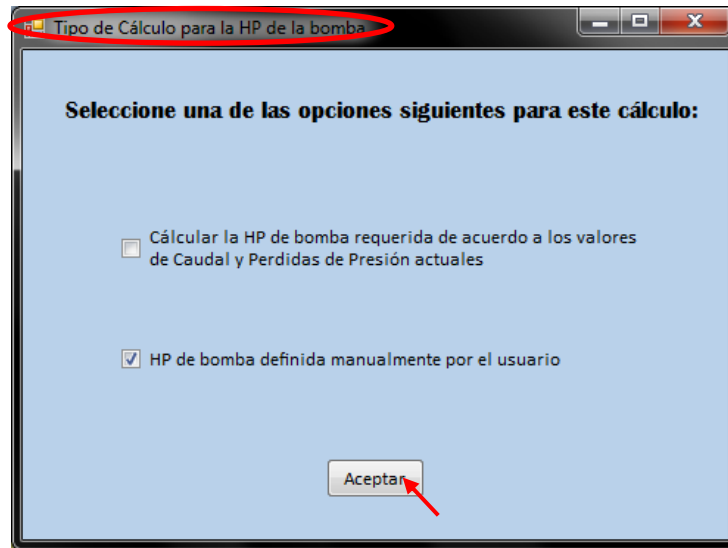
- La eficiencia volumétrica de 90% aparece por defecto pero puede ser cambiada por el usuario total bombeado aproximadamente es de 1675,53 gpm.

$$P(\text{psi}) = \frac{687,23 * 1714}{558,511} = 2109,02 \text{ psi}$$

La presión es la misma por la disposición de las bombas. Resultados obtenidos en todas las secciones:

	HP Requerido en la Bomba (hp)	HP Requerido en el motor (hp)	Tipo de Bomba	SPM	Camisa	N° Bombas	Eficiencia Volumétrica (%)	Eficiencia Mecánica (%)	Presión de Bombeo (psi)	Caudal de Bombeo (gpm)
Sección 1	687,24	951,20	SDF-1300 TRIPL	120	6 1/2"	3	90	85	2.107,21	1677
Sección 2	443,08	613,26	SDF-1300 TRIPL	90	5 1/2"	3	90	85	2.531,48	900
Sección 3	569,99	788,92	SDF-1300 TRIPL	80	5 1/2"	2	90	85	3.659,06	534
Sección 4	663,46	918,29	SDF-1300 TRIPL	100	5 1/2"	1	90	85	3.414,94	333

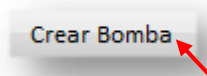
- Si la opción seleccionada es:



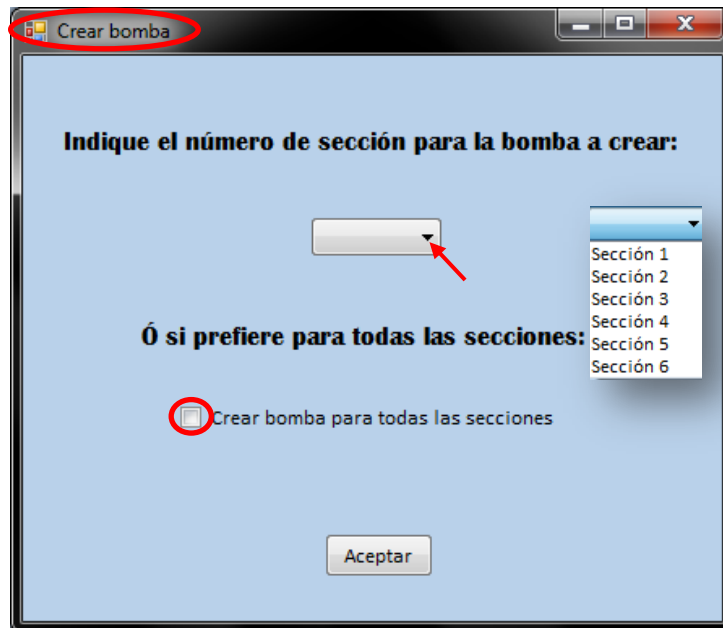
- Se debe ingresar el valor de potencia requerida en la bomba y posteriormente calcular la potencia requerida en el motor.

	<i>HP Requerido en la Bomba (hp)</i>	<i>HP Requerido en el motor (hp)</i>
Sección 1		

Si se desea crear bomba dar click en:



Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo el cual permite seleccionar a que secciones de diseño planeado se desea asignar una bomba diferente a las ofrecidas en el catálogo.



Si la opción seleccionada es *Crear bomba para todas las secciones*

	HP Requerido en la Bomba (hp)	HP Requerido en el motor (hp)	Longitud de Carrera SPM	Camisa	N° Bombas	Eficiencia Volumétrica (%)	Eficiencia Mecánica (%)
Sección 1					3	90	85
Sección 2					3	90	85
Sección 3					2	90	85
Sección 4					1	90	85

Una vez asignado se tendrán las mismas opciones al dar click en calcular HP requerido en la bomba y el procedimiento a seguir será le mismo. Si se desea cambiar de opción y utilizar las bombas del catálogo se da click en:

Utilizar Bombas de Catálogo

## MÓDULO 7: CÁLCULOS DE INGENIERÍA

**Parámetros del Proyecto**

	Volumen de Pozo (Bbl)	Tiempo Ciclo Circulación (min)	Vel. Prom. de Tubería (ft/min)	EMW Succión (lb/gal)	EMW Surgencia (lb/gal)	Presión Succión (psi)	Presión Surgencia (psi)
Sección 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Volumen recomendado para tanques de lodo (Bbl):

**Cálculo de Capacidad y Desplazamiento**

Casing  
OD:  Grado:  Características:

Drill pipe  
Clase:  OD:  Características:

Drill collar  
Tipo:  OD:  Características:

Capacidad:  Bbl/ft

Desplazamiento:  Bbl/ft

**Tanques de Lodo**

Vista del extremo: Vista desde arriba:

Geometría deseada:

Ancho [w]:  ft Alto [d]:  ft

Volumen deseado:  Bbl Largo [L]:  ft

Número de Tanques a Usar:

Este módulo fue desarrollado para realizar otros cálculos de ingeniería que resultan importantes a la hora de analizar la hidráulica del pozo, como se visualiza en la pestaña principal se divide en 3 secciones:

### Parámetros del proyecto

Permite calcular los parámetros que aparecen en las columnas para el cálculo de volúmenes y de tiempo de circulación por secciones se debe dar click en *calcular volúmenes*.

Para los cálculos de succión y surgencia se debe ingresar por cada sección del diseño planeado la velocidad promedio de tubería cuyo rango se encuentra entre 50 y 70 ft/min con un valor crítico de 100 ft/min.

**Parámetros del Proyecto**

	Volumen de Pozo (Bbl)	Tiempo Ciclo Circulación (min)	Vel. Prom. de Tubería (ft/min)	EMW Succión (lb/gal)	EMW Surgencia (lb/gal)	Presión Succión (psi)	Presión Surgencia (psi)
Sección 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sección 6	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Volumen recomendado para tanques de lodo (Bbl):

Calcular Volúmenes

Calcular Succión y Surgencia

Se recomienda un volumen para los tanques de lodo de acuerdo a la sección de mayor volumen por un factor de 2,5. Para el cálculo de volumen de pozo por cada sección se realiza básicamente con las capacidades y las longitudes de tuberías y anulares, para cada sección los valores de volumen de pozo obtenidos se reportan en la primera columna así:

El volumen recomendado está dado por:

$$\text{Volumen recomendado} = \text{Volumen de pozo crítico} * \text{Factor de seguridad}$$

El volumen de pozo crítico está dado por el mayor volumen de pozo de las secciones planeadas en el diseño. El factor de seguridad propuesto es 2,5.

$$\text{Volumen recomendado} = 1087,99 \text{ bbl} * 2,5 = 2719,975 \text{ bbl}$$

Tiempo de ciclo de o de pozo está determinado por:

*Ejemplo:* Para la sección 1 con un caudal de 1562 gpm.

$$\text{tiempo de pozo} = \frac{486,12 \text{ bbl} * 42 \text{ gal/bbl}}{1562 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 13,071 \text{ m in}$$

**Cálculo de la presión de surgencia y succión:**

Parámetros del Proyecto							
	Volumen de Pozo (Bbl)	Tiempo Ciclo Circulación (min)	Vel. Prom. de Tubería (ft/min)	EMW Succión (lb/gal)	EMW Surgencia (lb/gal)	Presión Succión (psi)	Presión Surgencia (psi)
Sección 1	486,13	13,34	70	9,78	9,82	407,02	408,34
Sección 2	933,73	43,38	70	10,17	10,23	1.691,68	1.702,88
Sección 3	1.087,99	88,56	70	11,32	11,48	4.650,69	4.715,55
Sección 4	750,55	99,76	50	12,36	12,84	7.777,85	8.077,99

Volumen recomendado para tanques de lodo (Bbl): 2.719,98

Calcular Volúmenes      Calcular Succión y Surgencia

Asignado un valor de velocidad promedio de tubería en este caso 70 ft/min para un diámetro de hueco de 26'' y de tubería de perforación de 5''x 668 ft (OD) y collares de perforación de 8''x90 ft (OD), TVD de 800 ft y densidad del lodo de 9,8 lpg. La velocidad máxima media del fluido anular es:

$$V_m(ft/min) = 1,5 * \left( 0,45 + \left[ \frac{OD^2}{D_h^2 - OD^2} \right] \right) * V_{pm}$$

Hueco – Tubería de perforación = 43,95 ft/min

Hueco – Collar de perforación = 49,91 ft/min

Siguiendo un procedimiento similar al de las pérdidas de presión en el anular (Ver MÓDULO 5) se obtiene que son: 0,618 psi aproximadamente.

$$EMW_{succión} = \rho - \frac{\sum P_a}{0,052TVD} = 9,78 \text{ lpg} , \quad EMW_{surgencia} = \rho + \frac{\sum P_a}{0,052TVD} = 9,82 \text{ lpg}$$

Como  $Presion = 0,052 * TVD * EMW$

$$Presion_{succión} = 407,02 \text{ psi} \quad Presion_{surgencia} = 408,34 \text{ psi}$$

## Cálculo de capacidad y desplazamiento

Planning Hydraulics presenta esta opción para realizar el cálculo de capacidades y desplazamientos en tuberías de revestimiento, perforación o collares.

Una vez seleccionado la tubería de interés con sus respectivas características. Se da click en calcular, el resultado aparecerá en la parte inferior así:

*Ejemplo:* Drill pipe de ID de 4,276'' por las características seleccionadas:

$$\text{Capacidad} \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{4,276^2}{1029,4} = 0,0177$$

$$\text{Volumen desplazado} \left( \frac{\text{bbl}}{\text{ft}} \right) = \frac{5^2 - 4,276^2}{1029,4} = 0,00652$$

**Cálculo de Capacidad y Desplazamiento**

Casing

OD Grado Características

Drill pipe

Clase OD Características

New 5'' 19.50 lb/ft; S135; ID: 4.:

Drill collar

Tipo OD Características

Capacidad: 0,0178 Bbl/ft

Desplazamiento: 0,0065 Bbl/ft

Calcular

## Tanques de lodo

En esta sección consiste en seleccionar de manera sencilla el o los tanques con sus dimensiones con el objetivo de garantizar el almacenamiento de un volumen deseado que deberá ingresarse.

**Tanques de Lodo**

Vista del extremo  $w$   $d$

Vista desde arriba  $L$   $w$

Geometría deseada:

Ancho [w]:  ft Alto [d]:  ft

Volumen deseado:  Bbl

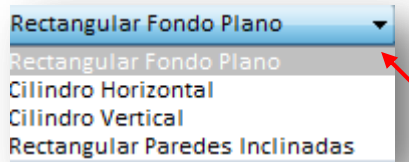
Largo [L]:  ft

Número de Tanques a Usar:

Calcular

El procedimiento a seguir será:

- Seleccionar la geometría deseada:



- Ingresar el volumen deseado puede ser el recomendado u otro.
- Se ingresa el valor de las dimensiones correspondientes a la geometría seleccionada.
- Finalmente se da click en calcular y el resultado obtenido será el número de tanques de una geometría determinada a usar para almacenar el volumen deseado de lodo que se registró.

*Ejemplo:* Geometría rectangular fondo plano, volumen deseado a almacenar 2720 Bbl de 10'x8'x50'. Cálculo de la capacidad de almacenamiento:

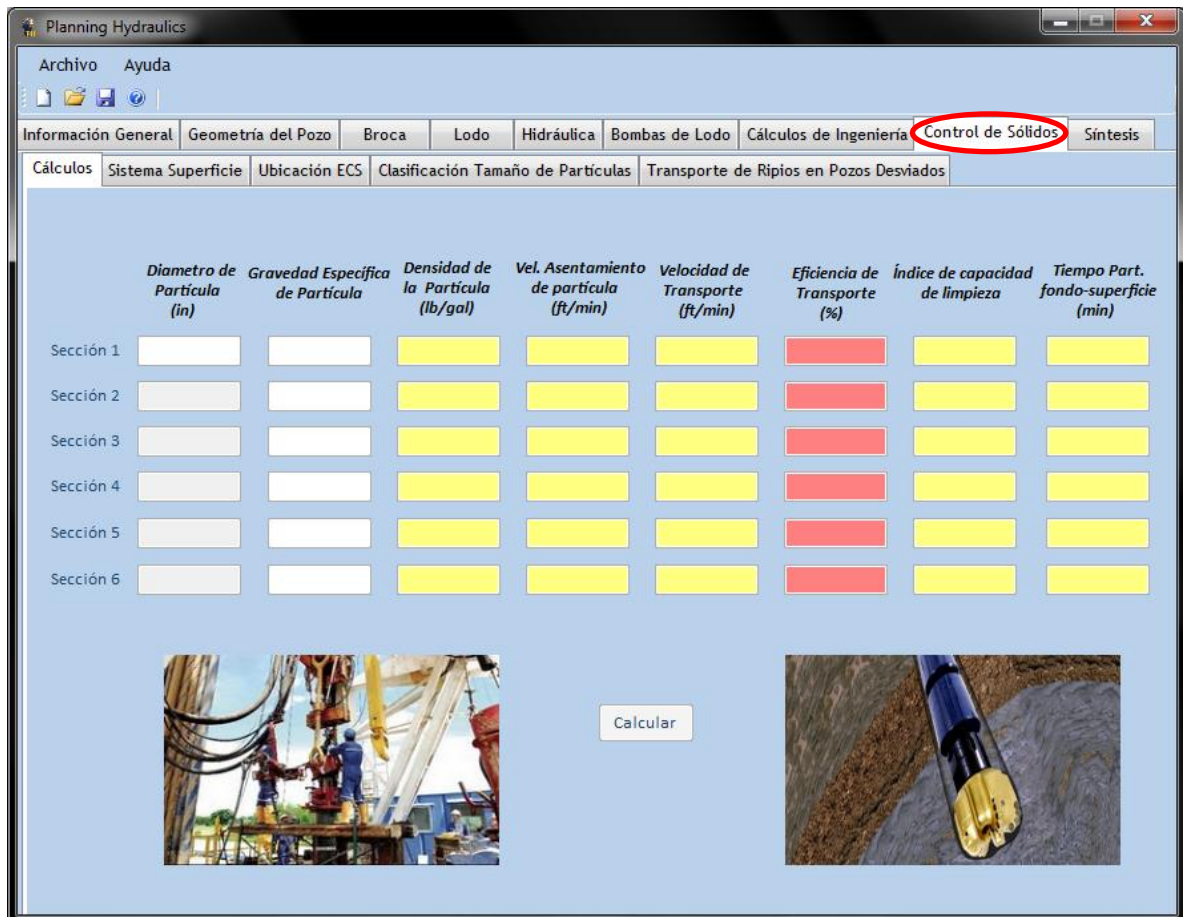
$$C \left( \frac{bbl}{ft} \right) = \frac{8 * 50}{5,615} = 71,237$$

Cálculo del volumen:

$$Volumen = Capacidad \left( \frac{bbl}{ft} \right) * L = 71,237 \frac{bbl}{ft} * 10 ft = 712,37 bbl$$

$$Numero de tanques fondo plano = \frac{Volumen deseado}{Volumen de un tanque} = \frac{2720 bbl}{712,37 bbl} \approx 4$$

## MÓDULO 8: CONTROL DE SÓLIDOS



Este módulo consiste básicamente en determinar de manera sencilla por cada sección planeada para perforar aspectos relacionados con la remoción de sólidos del pozo, presenta una pestaña de cálculos relacionadas con las partículas removidas y otros con guías para el usuario.

### Control de sólidos>cálculos

Los valores a ingresar son diámetro de la partícula en pulgada y gravedad específica de la partícula. Dando click en calcular se obtiene:

- Densidad de la partícula

$$GE = \frac{\rho_{sólido}}{\rho_{agua}}; \rho_{partícula} = GE * \rho_{agua}$$

- La velocidad asentamiento mediante:

$$V_s = 346,6 \left[ \frac{D_p^{1,6} * (\rho_p - \rho_f)}{\mu_e^{0,6} * \rho_f^{0,4}} \right]^{0,71}$$

Que depende del diámetro de la partícula, la densidad de la partícula y del fluido de perforación, la viscosidad efectiva da la partícula.

- La velocidad de transporte o velocidad de la partícula  $V_p$  se calcula mediante. Donde  $V_f$  es la velocidad del fluido.

$$V_p = V_f - V_s$$

- La eficiencia de transporte o razón de transporte :

$$RT = \frac{\text{Velocidad de transporte}}{\text{Velocidad Anular}}$$

$$F_T = \frac{V_p}{V_a} = 1 - \frac{V_s}{V_a}$$

<b>Limpieza Efectiva</b>	$V_s = 0$	$RT = 1$
<b>Limpieza no Efectiva</b>	$V_s < V_f$	$RT < 0$
<b>Asentamiento</b>	$V_s > V_f$	$RT > 0$

- Índice de capacidad de limpieza: Un índice de limpieza bueno debe ser igual o mayor que 1, para cortes agudos y grandes en general, cuando su valor es 0,5 los sólidos son pequeños y redondeados y cuando es inferior a 0,3 los sólidos pueden ser de gran tamaño

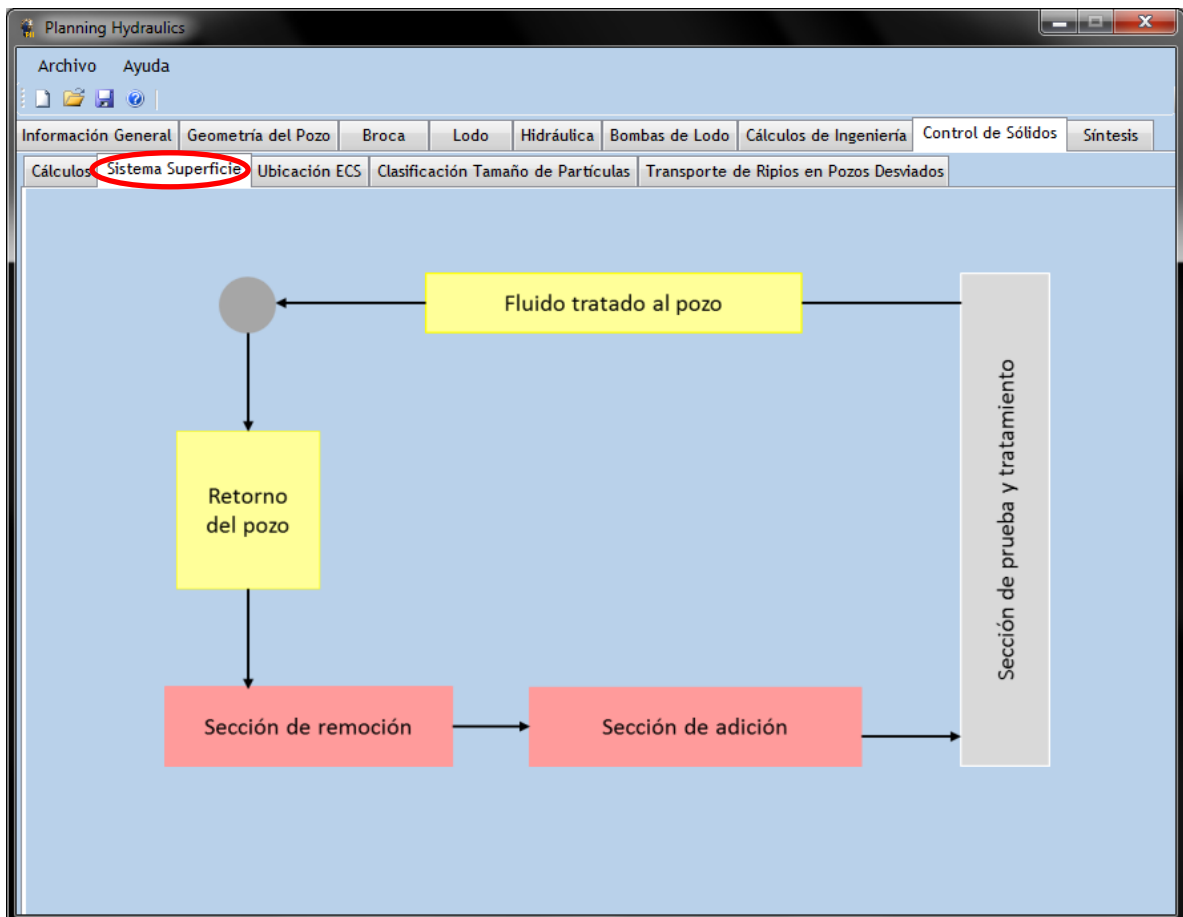
$$ICL = \frac{V_a * \rho_f * K}{400000}$$

- Tiempo de la partícula de fondo a superficie.

$$tiempo\ de\ pozo\ (min) = \frac{Volumen\ anular\ (bbl)}{Q\ (\frac{bbl}{min})}$$

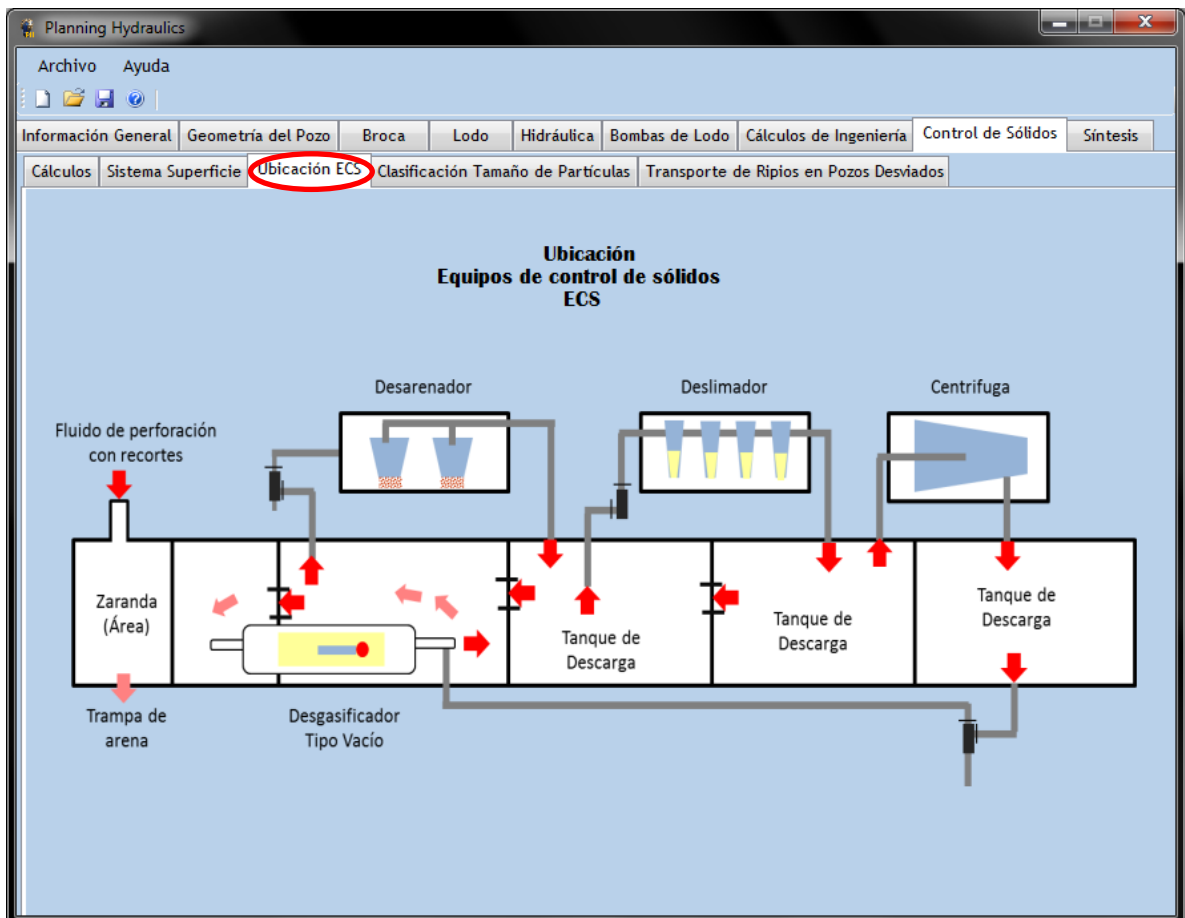
### Control de sólidos>Sistema superficie

El sistema de superficie necesita tener la capacidad de mantener el volumen apropiado de fluido durante la perforación, por otro lado la planificación anticipada y reserva de lodo premezclado debe ser considerada. El sistema de superficie consiste en 3 secciones claramente identificables. Retorna del pozo, pasa por las secciones de remoción, adición tratamiento y prueba y luego es tratado para que circule nuevamente.



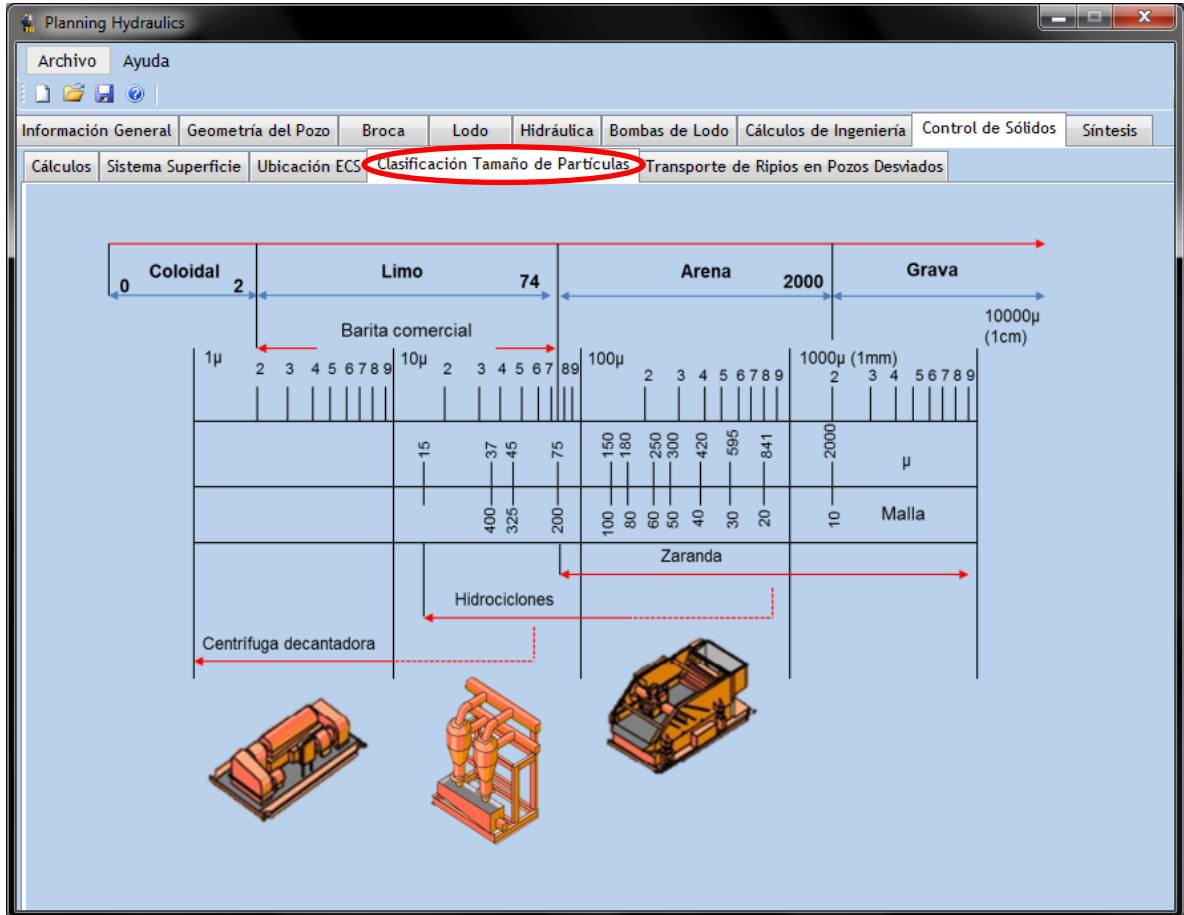
## Control de sólidos>Ubicación ECS

Respecto a la disposición básica de los equipos de control de sólidos se tiene en cuenta que el fluido de perforación con los recortes proveniente de la línea de retorno del lodo, primero ingresa a la zaranda y en algunos sistemas el fluido es recibido por la trampa de arena que pasa su contenido por rebose al siguiente equipo; el desarenador succiona el fluido del tanque de descarga del desgasificador y lo descarga en el tanque contiguo de este; el deslimador succiona el fluido de este tanque y lo descarga en el siguiente compartimiento, de éste la centrífuga lo succiona y su descarga es recibida por otro compartimiento y una línea lo conduce al tanque de succión del desarenador.



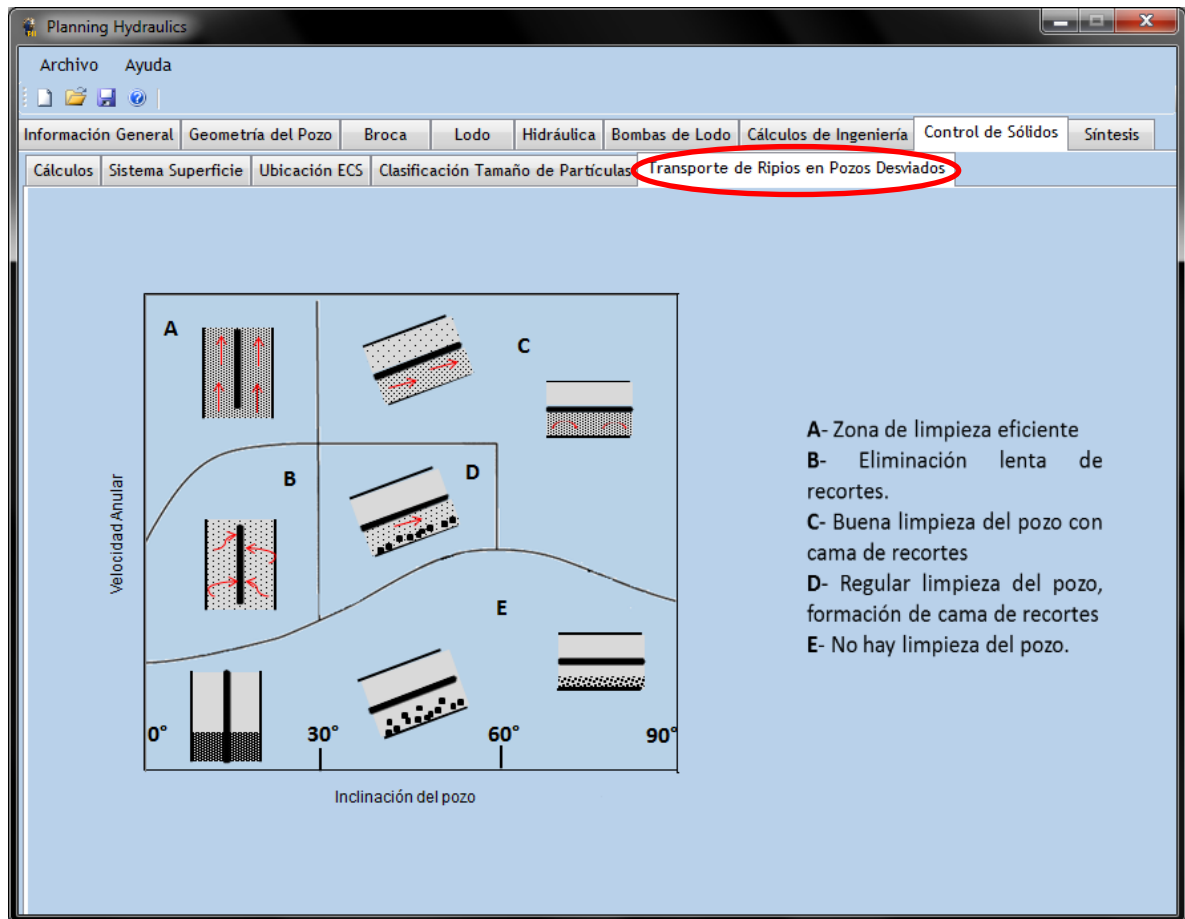
## Control de sólidos > Clasificación del tamaño de partículas

Relación entre el tamaño de las partículas, los puntos de corte y los equipos de control de sólidos se presenta en el anexo H. Esta guía resulta útil para identificar los equipos de control de sólidos y el tamaño de partículas que puede remover.



## Control de sólidos > Transporte en pozos desviados

De acuerdo al ángulo de inclinación del pozo y la velocidad anular podrá observarse en la siguiente guía zonas en las cuales se aprecia cómo será el transporte de las partículas.



## MÓDULO 9: SÍNTESIS

**Principales Componentes de sistema**

1. Bomba(s)
2. Equipos de Superficie
3. Sarta de Perforación
4. Espacio Anular
5. Broca

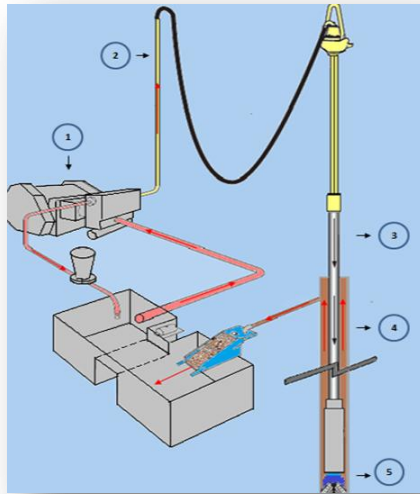
1. Caudal de Bombeo (gpm):	
1. Presión de Descarga (psi):	
2. Pérdida de Presión (psi):	
2. Caso API	
3. Pérdida de Presión (psi):	
3. Régimen de flujo (psi):	
4. Pérdida de Presión (psi):	
4. Régimen de flujo	
5. Pérdida de Presión (psi):	
5. % de Pérdida	
Densidad del lodo (lpg):	
ECD (en fondo) (lpg):	

Mostrar

El propósito fundamental de este módulo es el de presentar los resultados al usuario mediante un esquema gráfico (con los principales componentes del sistema), un registro hidráulico (siguiendo el formato API) y finalmente un diagnóstico presentado como un árbol de decisión de algunos de los principales problemas que se pueden presentar durante la perforación y que puede ser interpretados a partir de incrementos o disminuciones de las presiones medidas en la tubería y el anular.

## Síntesis>Reporte gráfico

Para la última sección a perforar se reporta, la presión y el caudal de bombeo, las pérdidas de presión en el equipo de superficie, la sarta de perforación, en el espacio anular y en la broca así como la densidad del lodo y la ECD (Densidad equivalente de circulación en fondo).



### Principales Componentes de sistema

1. Bomba(s)
2. Equipos de Superficie
3. Sarta de Perforación
4. Espacio Anular
5. Broca

Una vez se han registrado los datos requeridos en los módulos de broca, lodo, hidráulica y bombas de lodo (módulos del 2 al 5). Puede darse click en mostrar.

1. Caudal de Bombeo (gpm):	
1. Presión de Descarga (psi):	
2. Pérdida de Presión (psi):	
2. Caso API	
3. Pérdida de Presión (psi):	
3. Régimen de flujo (psi):	
4. Perdida de Presión (psi):	
4. Régimen de flujo	
5. Pérdida de Presión (psi):	
5. % de Pérdida	
Densidad del lodo (lpg):	
ECD (en fondo) (lpg):	

1. Caudal de Bombeo (gpm):	534
1. Presión de Descarga (psi):	0,00
2. Pérdida de Presión (psi):	61,19
2. Caso API	3
3. Pérdida de Presión (psi):	1.180,80
3. Régimen de flujo (psi):	Laminar
4. Perdida de Presión (psi):	37,71
4. Régimen de flujo	Laminar
5. Pérdida de Presión (psi):	2.317,67
5. % de Pérdida	64,38
Densidad del lodo (lpg):	11,4
ECD (en fondo) (lpg):	11,49

## Síntesis>Registro Hidráulico

Para cada una de las secciones planeadas en el caso de diseño una vez se han registrado los datos en los módulos 2 al 5, al dar click se registran los datos correspondientes a las necesidades hidráulicas establecidas en el formato API en el denominado Análisis del plan de perforación DPA por sus siglas en inglés.

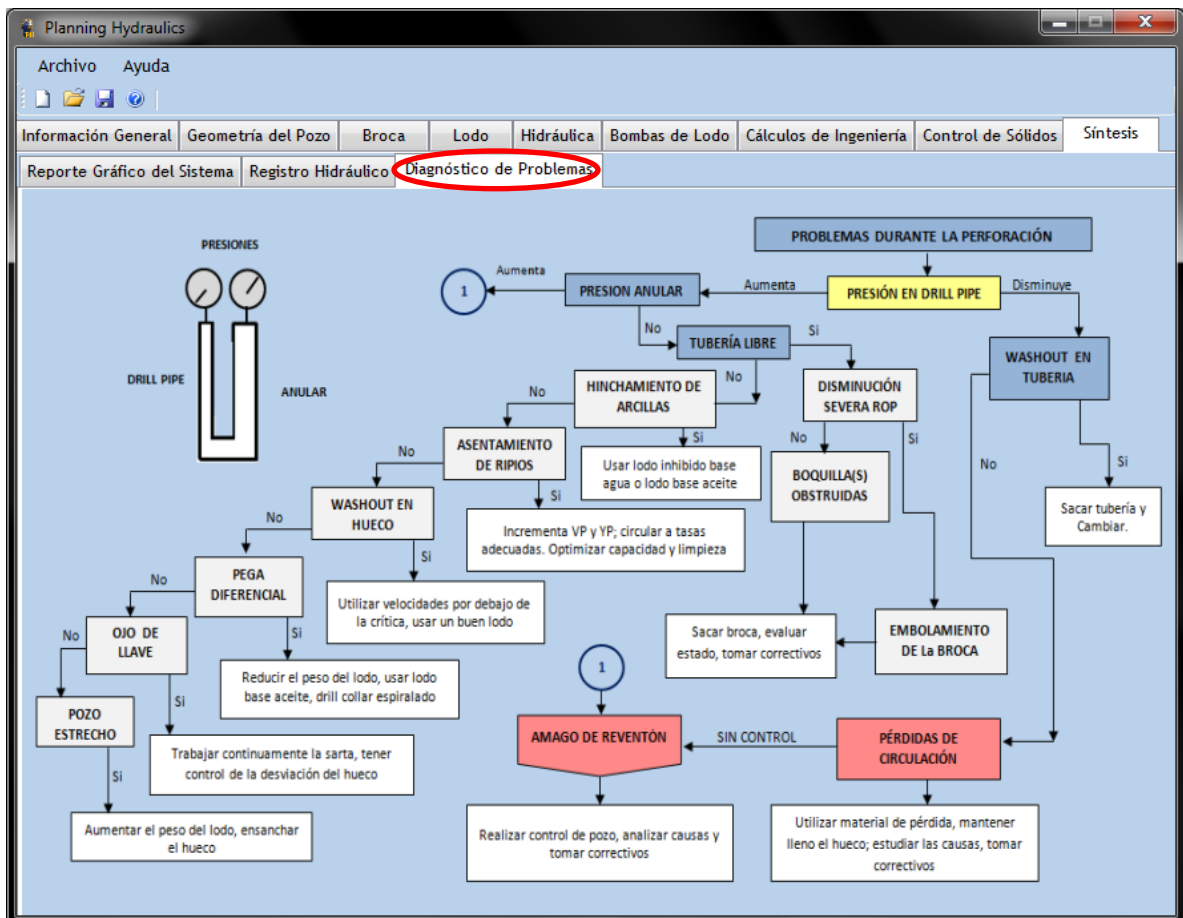
NECESIDADES HIDRÁULICAS	SECCIÓN 1	SECCIÓN 2	SECCIÓN 3	SECCIÓN 4	SECCIÓN 5	SECCIÓN 6
Tipo de fluido de perforación						
Densidad del lodo (lpg)						
Factor de Boyanza						
Potencia Hidráulica en la Broca (hp)						
Velocidad Anular (ft/min)						
Caudal de Trabajo (gpm)						
Velocidad en las Boquillas (ft/s)						
Pérd. Presión Equipos Superficie (psi)						
Pérd. Presión en Drillpipe (psi)						
Pérd. Presión en Drillcollar (psi)						
Pérd. Presión en la Broca (psi)						
Pérd. Presión Hueco-Drillcollar (psi)						
Pérd. Presión Hueco-Drillpipe (psi)						
Pérd. Presión Total (psi)						
Presión de Superficie (psi)						
Potencia Hidráulica en Superficie (hp)						

- Para generar el registro de las necesidades hidráulicas por cada sección se da click en “Generar”.
- Para exportar el D.P.A a un archivo de Excel y poder guardar el respectivo registro hidráulico creado a partir del caso dar click en “Exportar”.

## Síntesis>Diagnóstico de problemas

Para finalizar después de haber realizado todos los cálculos de hidráulica y otros parámetros relacionados es importante considerar que durante la perforación se pueden presentar eventos o problemas indeseables para el personal y que pueden ser diagnosticados mediante mediciones de las presiones para controlar el pozo y compararlos con los resultados dados por la herramienta, a fin de conocer las causas de los problemas y tomar las mejores decisiones operacionales. El siguiente árbol de decisión se ofrece como una guía para complementar el análisis del plan de hidráulica.

### Árbol de decisión



## 8. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO EN POZO ESTRATIGRÁFICO PROFUNDO

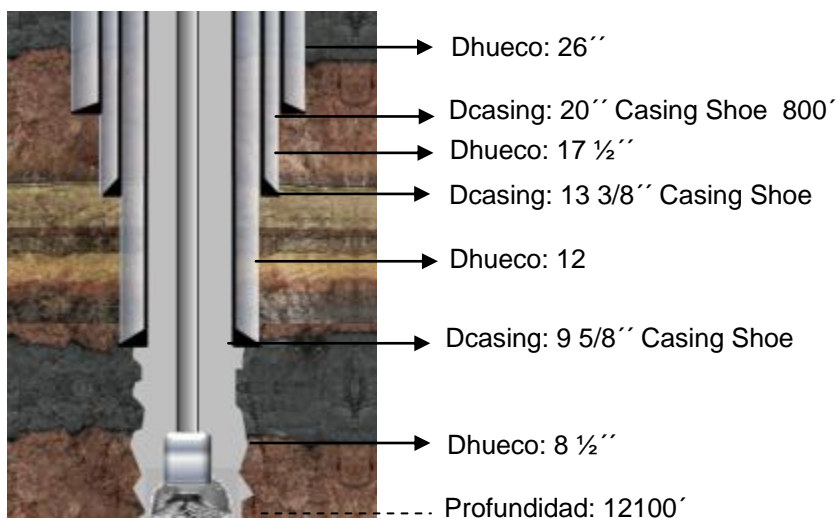
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la herramienta Planning Hydraulics para la planeación de la hidráulica de perforación de dos pozos estratigráficos profundos (Mercaderes y Buenaventura) que tiene proyectado perforar la UIS en el convenio con a la Agencia Nacional de Hidrocarburos ( ANH).

### 8.1 POZO MERCADERES

#### ➤ DATOS DE ENTRADA

#### - Descripción del diseño:

**Figura 50:** Estado mecánico pozo Mercaderes.



**Caso de superficie:** Caso 3

**Número de secciones:** 4

#### - Descripción de la sarta de perforación:

##### Sección 1:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 420 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 248 ft

Drillcollar 1: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 60 ft

Drillcollar 2: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 30 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

#### Sección 2:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 2290 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 620 ft

Drillcollar 1: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 150 ft

Drillcollar 2: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 90 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

#### Sección 3:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 7267 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 403 ft

Drillcollar 1: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 90 ft

Drillcollar 2: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 90 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

#### Sección 4:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 11530 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 341 ft

Drillcollar 1: 6 ½", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 90 ft

Drillcollar 2: 6 ½", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 90 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

- **Programa de Lodos:**

Modelo Reológico: Ley de Potencia

	Densidad del lodo (lb/gal)	Gradiente de presión (psi/ft)	VP (cP)	YP (lb/100ft <sup>2</sup> )	Esfuerzo de gel inicial
<b>Sección 1</b>	9.8	0,51	5	16	4
<b>Sección 2</b>	10.2	0,53	6	14	4
<b>Sección 3</b>	11.4	0,59	10	12	4
<b>Sección 4</b>	12.6	0,66	14	11	4

- **Programa de Brocas:**

	Tipo de Broca	Diámetro de broca	Número de boquillas	Tamaño de las boquillas (1/32")
<b>Sección 1</b>	PDC	26"	4	11,11,11,11
<b>Sección 2</b>	PDC	17 ½"	4	11,11,11,11
<b>Sección 3</b>	PDC	12 ¼"	4	11,11,11,11
<b>Sección 4</b>	PDC	8 ½"	4	11,11,11,11

**Nota:** El tamaño adecuado de las boquillas es un resultado obtenido de la optimización de hidráulica con la aplicación. Sin embargo para comenzar los cálculos se seleccionaron 4 boquillas de 11/32" para cada sección.

## 2. RESULTADOS

- Cálculos de diseño hidráulico optimizado (por sección):

	Galonaje (gpm)	PP en el sistema (psi)	PP en superficie (psi)	PP en la sarta (psi)	PP en el anular (psi)	PP en la broca (psi)	Velocidad en las boquillas (ft/s)	TFA (in <sup>2</sup> )
1	1562	2149,23	186,44	935,34	0,70	1026,76	341,90	1,462
2	867	2496,44	94,39	1199,61	6,36	1196,09	361,71	0,767
3	516	3597,37	61,19	1180,80	37,71	2317,67	476,27	0,347
4	310	3484,89	33,28	1004,71	200,83	2246,07	445,97	0,222

PP: Pérdidas de presión

	Galonaje mínimo (gpm)	Galonaje máximo (gpm)	Velocidad Crítica (ft/min)	Impacto Hidráulico (lb)	HP broca (hp)	HSI (hp/in <sup>2</sup> )	ECD (lb/gal)	Régimen de flujo
1	1529	4807	192,44	2711,77	935,70	1,76	9,82	Laminar
2	855	2107	213,14	1657,39	605,02	2,52	10,24	Laminar
3	506	822	233,97	1451,62	697,74	5,92	11,49	Laminar
4	296	336	274,35	902,57	406,23	7,16	12,92	Laminar

	Método de optimización	Factor de Opt	Presión de Stand Pipe (psi)	% Presión en broca	No. Óptimo Boquillas	Tamaño de las boquillas (1/32´´)
1	Impacto Hidráulico	1,86	2150	47,76	10	14,14,14,14,14,14,14,14,14,13,13
2	Impacto Hidráulico	1,86	2500	47,84	10	10,10,10,10,10,10,10,10,10,10,10
3	Potencia Hidráulica	1,86	3600	64,38	6	9,9,9,9,8,8
4	Potencia Hidráulica	1,86	3500	64,17	4	8,8,9,9

- **Corazonamiento:**

	Diámetro Broca	Intervalo (ft)	Presión de Stand pipe (psi)	Galonaje recomendado (gpm)
<b>Sección 1</b>	8 ½´´	-	-	-
<b>Sección 2</b>	8 ½´´	2800 - 3200	1200	297
<b>Sección 3</b>	8 ½´´	4000 - 4400	2000	297
		7500 - 7900	2000	297
<b>Sección 4</b>	6´´	8500 - 8900	2200	166

	No. Óptimo de Boquillas	Tamaño de las boquillas (1/32´´)
<b>Sección 1</b>	-	-
<b>Sección 2</b>	5	10,10,10,10,10
<b>Sección 3</b>	4	9,9,9,10
	4	9,9,9,10
<b>Sección 4</b>	3	8,8,8

- **Especificación bombas tipo triplex:**

Bomba Seleccionada: Potencia 1300 HP (API 7K Sunnda Corporation)

Longitud de la carrera: 12''

Stroke por minuto máximo: 120

Diámetro de camisa máximo: 7''

Eficiencia de la bomba: 90% (aunque puede ser especificada por sección)

	HP bomba** (hp)	HP motor (hp)	Camisa	SPM	N° de Bombas*	Presión Bombeo (psi)	Caudal bombeo (gpm)
<b>Sección 1</b>	687,24	951,20	7 ''	100	3	2181,35	1620
<b>Sección 2</b>	443,08	613,26	5 ½''	90	3	2531,48	900
<b>Sección 3</b>	569,99	788,92	5 ½''	80	2	3659,06	534
<b>Sección 4</b>	663,46	918,29	5 ½''	100	1	3414,94	333

\* Conectadas en paralelo.

\*\*Potencia de entrada requerida por bomba que debe ser menor a la nominal (1300 Hp).

- **Control de Sólidos:**

	Diámetro de Partícula (in)	GE Partícula	Densidad Partícula (lb/gal)	Vel. Asentamiento Partícula (ft/min)	Vel. Transporte Partícula (ft/min)	Eficiencia de transporte (%)	Índice de capacidad de limpieza	Tiempo de partícula (min)
1	0,38	2,65	22,07	27,89	30,90	52,56	8,63	12,80
2	0,35	2,65	22,07	29,95	45,57	60,34	7,81	42,93
3	0,32	2,65	22,07	30,56	70,53	69,77	6,08	77,68
4	0,28	2,65	22,07	31,44	129,30	80,44	7,31	73,39

**-Parámetros del proyecto:**

Cálculo de volúmenes

	<b>Volumen de pozo (Bbl)</b>	<b>Tiempo de ciclo de pozo (min)</b>
<b>Sección 1</b>	486,13	13,07
<b>Sección 2</b>	933,73	45,23
<b>Sección 3</b>	1087,99	88,56
<b>Sección 4</b>	750,55	101,69

Volumen recomendado para tanques: 2720 Bbls

Cálculo de surgencia y succión

	<b>Velocidad promedio tubería (ft/min)</b>	<b>Densidad del lodo (lpg)</b>	<b>Succión</b>		<b>Surgencia</b>	
			<b>EMW (lpg)</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>EMW (lpg)</b>	<b>Presión (psi)</b>
<b>Sección 1 (800 ft)</b>	60	9,8	9,785	407,056	9,815	408,304
<b>Sección 2 (3200 ft)</b>	60	10,2	10,168	1691,955	10,232	1702,60
<b>Sección 3 (7900 ft)</b>	60	11,4	11,324	4651,89	11,476	4714,34
<b>Sección 4 (12100 ft)</b>	60	12,6	12,350	7770,62	12,850	8085,22

Configuración de tanques recomendada:

14 Tanques rectangulares de fondo plano de 7x8x20ft

### 3. DRILLING PLAN ANALYSIS (RESUMEN)

**Tabla 19:** Registro Hidráulico formato API para pozo estratigráfico profundo Mercaderes.

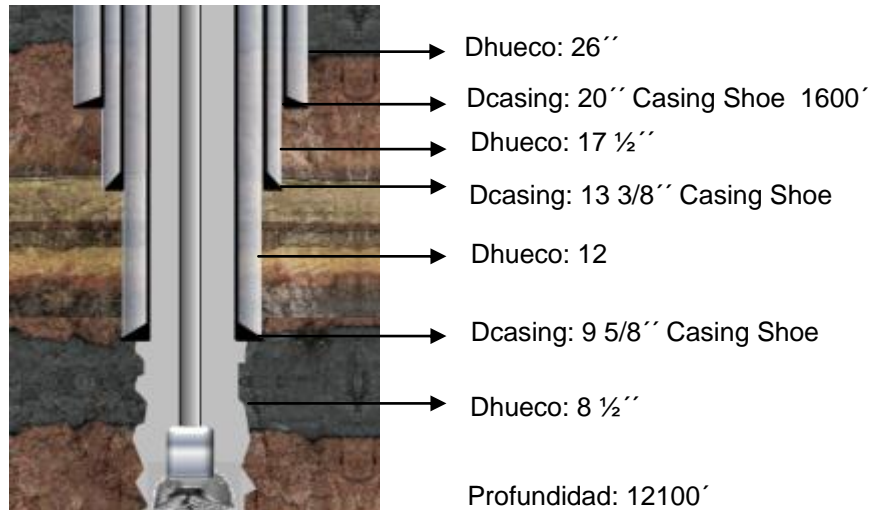
NECESIDADES HIDRÁULICAS	SECCIÓN			
	I	II	III	IV
Tipo de fluido (lodo) de perforación	Inhibido	Inhibido	Inhibido	Inhibido
Densidad o peso (lb/gal)	9,80	10,20	11,40	12,60
Factor de flotación	0,15	0,16	0,17	0,19
Potencia Hidráulica en la broca (hp)	935,70	605,02	697,74	406,23
Velocidad Anular (ft/min)	58,78	75,53	101,09	160,74
<i>Galonaje (gal/min)</i>	1562	867	516	310
<i>Velocidad en las boquillas (ft/s)</i>	341,90	361,71	476,27	445,97
<b>Perdidas de presión (psi)</b>				
En los equipos de superficie (psi)	186,44	94,39	61,19	33,28
En la tubería de perforación (psi)	283,04	485,05	566,59	439,20
En los collares de perforación (psi)	151,29	213,55	113,21	64,51
En la broca (psi)	1026,76	1196,09	2317,67	2246,07
En el anular hueco-drill collar (psi)	0,1	0,76	2,03	4,98
En el anular hueco-drill pipe (psi)	0,6	4,27	21,01	63,97
Total nominal (psi)	2149,23	2496,44	3597,37	3484,89
Presión de superficie o de bombeo (psi)	2150	2500	3600	3500
Potencia hidráulica en superficie (hp)	652,88	420,93	541,49	630,29

## 8.2 POZO BUENAVENTURA

### ➤ DATOS DE ENTRADA

#### - Descripción del diseño:

**Figura 51:** Estado mecánico pozo Buenaventura



**Caso de superficie:** Caso 3

**Número de secciones:** 4

#### - Descripción de la sarta de perforación:

##### Sección 1:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 990 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 372 ft

Drillcollar 1: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 90 ft

Drillcollar 2: 8", ID: 2 1/2", 154 lb/ft x 90 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

Sección 2:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 1800 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 620 ft

Drillcollar 1: 8", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 150 ft

Drillcollar 2: 8", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 90 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

Sección 3:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 7110 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 403 ft

Drillcollar 1: 8", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 90 ft

Drillcollar 2: 8", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 90 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

Sección 4:

Drillpipe: New, 5", S135, 19.50 lb/ft x 11530 ft

HW Drillpipe: 5", Espiralado, 55.40 lb/ft x 341 ft

Drillcollar 1: 6 ½", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 90 ft

Drillcollar 2: 6 ½", ID: 2 ½", 154 lb/ft x 90 ft

Accesorios: Centralizador, Motor ( $\Delta P$ : 500 psi)

- Programa de Lodos:

Modelo Reológico: Ley de Potencia

	Densidad del lodo (lb/gal)	Gradiente de presión (psi/ft)	VP (cP)	YP (lb/100ft <sup>2</sup> )	Esfuerzo de gel inicial
<b>Sección 1</b>	9,8	0,51	6	14	4
<b>Sección 2</b>	10,1	0,53	8	13	4
<b>Sección 3</b>	11,2	0,58	13	12	4
<b>Sección 4</b>	12,6	0,66	17	9	4

- Programa de Brocas:

	Tipo de Broca	Diámetro de broca	Número de boquillas	Tamaño de las boquillas (1/32")
<b>Sección 1</b>	PDC	26"	4	11,11,11,11
<b>Sección 2</b>	PDC	17 ½"	4	11,11,11,11
<b>Sección 3</b>	PDC	12 ¼"	4	11,11,11,11
<b>Sección 4</b>	PDC	8 ½"	4	11,11,11,11

**Nota:** El tamaño adecuado de las boquillas es un resultado obtenido de la optimización de hidráulica con la aplicación. Sin embargo para comenzar los cálculos se seleccionaron 4 boquillas de 11/32" para cada sección.

## 2. RESULTADOS

- Cálculos de diseño hidráulico optimizado (por sección):

	Galonaje (gpm)	PP en el sistema (psi)	PP en superficie (psi)	PP en la sarta (psi)	PP en el anular (psi)	PP en la broca (psi)	Velocidad en las boquillas (ft/s)	TFA (in <sup>2</sup> )
1	1588	3298,99	227,16	1496,35	1,42	1574,07	423,33	1,200
2	897	2799,01	117,99	1334,03	5,16	1341,83	385,01	0,746
3	515	3791,93	67,07	1237,68	38,23	2448,94	493,93	0,334
4	306	3585,27	34,98	1030,30	189,08	2330,91	454,32	0,216

PP: Pérdidas de presión

	Galonaje mínimo (gpm)	Galonaje máximo (gpm)	Velocidad Crítica (ft/min)	Impacto Hidráulico (lb)	HP broca (hp)	HSI (hp/in <sup>2</sup> )	ECD (lb/gal)	Régimen de flujo
1	1529	4663	186,67	3413,50	1458,35	2,75	9,82	Laminar
2	855	2120	214,45	1807,29	702,23	2,92	10,14	Laminar
3	506	861	245,17	1476,15	735,83	6,24	11,30	Laminar
4	296	321	262,09	907,60	416,14	7,33	12,90	Laminar

	Método de optimización	Factor de Opt	Presión de Stand Pipe (psi)	% Presión en broca	No. Óptimo Boquillas	Tamaño de las boquillas (1/32´´)
1	Impacto Hidráulico	1,86	3300	47,70	10	12,12,12,12,12,13,13,13,13,13
2	Impacto Hidráulico	1,86	2800	47,92	3	18,18,18
3	Potencia Hidráulica	1,86	3800	64,45	6	9,9,9,8,8,8
4	Potencia Hidráulica	1,86	3600	64,75	3	10,10,9

- Corazonamiento:

	Diámetro Broca	Intervalo (ft)	Presión de Stand pipe (psi)	Galonaje recomendado (gpm)
Sección 1	8 ½´´	-	-	-
Sección 2	8 ½´´	2300 - 2700	1200	297
Sección 3	8 ½´´	4500 - 4900	2000	297
		7300 - 7700	2000	297
Sección 4	6´´	9000 - 9400	2200	166

	No. Óptimo de Boquillas	Tamaño de las boquillas (1/32´´)
Sección 1	-	-
Sección 2	5	10,10,10,10,10
Sección 3	4	9,9,9,10
	4	9,9,9,10
Sección 4	4	7,7,7,7

- **Especificación bombas tipo triplex:**

Bomba Seleccionada: Potencia 1600 HP (API 7K Sunnda Corporation)

Longitud de la carrera: 12''

Stroke por minuto máximo: 120

Diámetro de camisa máximo: 7''

Eficiencia de la bomba: 90% (aunque puede ser especificada por sección)

	HP bomba** (hp)	HP motor (hp)	Camisa	SPM	N° de Bombas*	Presión Bombeo (psi)	Caudal bombeo (gpm)
<b>Sección 1</b>	1072,45	1484,36	7 ''	100	3	3404,03	1620
<b>Sección 2</b>	513,97	711,38	5 ½''	90	3	2936,51	900
<b>Sección 3</b>	599,66	829,98	5 ½''	80	2	3849,49	534
<b>Sección 4</b>	673,77	932,55	6''	80	1	3643,01	317

\* Conectadas en paralelo.

\*\*Potencia de entrada requerida por bomba que debe ser menor a la nominal (1600 Hp).

- **Control de Sólidos:**

	Diámetro de Partícula (in)	GE Partícula	Densidad Partícula (lb/gal)	Vel. Asentamiento Partícula (ft/min)	Vel. Transporte Partícula (ft/min)	Eficiencia de transporte (%)	Índice de capacidad de limpieza	Tiempo de partícula (min)
<b>1</b>	0,38	2,65	22,07	28,05	31,71	53,06	5,94	25,61
<b>2</b>	0,35	2,65	22,07	30,48	47,66	60,99	5,76	36,85
<b>3</b>	0,32	2,65	22,07	30,68	70,21	69,59	5,22	76,85
<b>4</b>	0,28	2,65	22,07	32,06	126,60	79,79	4,24	74,38

**-Parámetros del proyecto:**

Cálculo de volúmenes

	<b>Volumen de pozo (Bbl)</b>	<b>Tiempo de ciclo de pozo (min)</b>
<b>Sección 1</b>	990,28	26,19
<b>Sección 2</b>	825,78	38,67
<b>Sección 3</b>	1064,97	86,85
<b>Sección 4</b>	750,77	103,05

Volumen recomendado para tanques: 2662 bbls

Cálculo de surgencia y succión

	<b>Velocidad promedio tubería (ft/min)</b>	<b>Densidad del lodo (lpg)</b>	<b>Succión</b>		<b>Surgencia</b>	
			<b>EMW (lpg)</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>EMW (lpg)</b>	<b>Presión (psi)</b>
<b>Sección 1 (1600 ft)</b>	60	9,8	9,785	814,112	9,815	816,608
<b>Sección 2 (2700 ft)</b>	60	10,1	10,065	1413,126	10,134	1422,81
<b>Sección 3 (7700 ft)</b>	60	11,2	11,121	4452,848	11,278	4515,71
<b>Sección 4 (12100 ft)</b>	60	12,6	12,360	7776,912	12,839	8078,29

Configuración de tanques recomendada:

13 Tanques rectangulares de fondo plano de 7x8x20ft

### 3. DRILLING PLAN ANALYSIS (RESUMEN)

**Tabla 20:** Registro Hidráulico formato API para pozo estratigráfico profundo Buenaventura.

NECESIDADES HIDRÁULICAS	SECCION			
	I	II	III	IV
Tipo de fluido (lodo) de perforación	Inhibido	Inhibido	Inhibido	Inhibido
Densidad o peso (lb/gal)	9,80	10,10	11,40	12,60
Factor de flotación	0,15	0,15	0,17	0,19
Potencia Hidráulica en la broca (hp)	1458,35	702,23	735,83	416,14
Velocidad Anular (ft/min)	59,76	78,14	100,89	158,67
<i>Galonaje (gal/min)</i>	1588	897	515	306
<i>Velocidad en las boquillas (ft/s)</i>	423,33	385,01	493,93	454,32
<b>Perdidas de presión (psi)</b>				
En los equipos de superficie (psi)	227,16	117,99	67,07	34,98
En la tubería de perforación (psi)	609,89	552,75	608,83	459,02
En los collares de perforación (psi)	385,47	280,29	127,85	70,27
En la broca (psi)	1574,07	1341,83	2448,94	2330,91
En el anular hueco-drill collar (psi)	0,20	0,77	2,13	4,64
En el anular hueco-drill pipe (psi)	1,22	1,68	23,34	63,35
Total nominal (psi)	3298,99	2799,01	3791,93	3585,27
Presión de superficie o de bombeo (psi)	3300	2800	3800	3600
Potencia hidráulica en superficie (hp)	1018,83	488,27	569,68	640,08

## CONCLUSIONES

- La herramienta de cálculo Planning Hydraulics fue diseñada en este proyecto a diferencia de cualquier otra herramienta con propósitos similares para ofrecer además de un entorno amigable, para realizar los cálculos de hidráulica y visualizar los resultados para presentar los componentes que integran el sistema de circulación de pozos, así como para realizar otros cálculos relacionados y ofrecer guías de selección de equipos, propiedades reológicas entre otros que puedan ser útiles al usuario.
- Los valores reológicos del fluido de perforación seleccionado son esenciales para el diseño hidráulico ya que fluidos altamente viscosos necesitaran una mayor fuerza para moverse por lo cual tanto el caudal como la presión entregada por la bomba deberá ser mayor.
- La optimización de la hidráulica de perforación depende básicamente del tamaño de las boquillas, ya que son estas las que definen el porcentaje de presión aplicado en la broca, lo cual es el principio fundamental de la optimización en los métodos de potencia e impacto hidráulico.
- Para establecer o definir los valores necesarios de la reología del fluido de perforación es importante analizar el tipo de roca a perforar, ya que la reología es esencial para el control de sólidos durante la perforación. La herramienta Planning Hydraulics permite evaluar la calidad del lodo seleccionado básicamente con el cálculo de la eficiencia de transporte, si se observa que esta está por debajo del 50% entonces será necesario aumentar la viscosidad o del fluido seleccionado.

- Al seleccionar el tipo de bomba adecuada para la operación, es necesario conocer la potencia requerida de acuerdo a los valores de caudal de trabajo y pérdida de presión respectiva para cada sección del programa de perforación.
- Es importante además de realizar el diseño de la hidráulica planeada empleando la herramienta construida, hacer seguimiento a los valores de presiones medidos en campo para lo cual se presenta un árbol de diagnóstico de problemas durante la perforación que permita tomar en caso dado las mejores decisiones operacionales.
- De acuerdo a los resultados obtenidos para los dos casos de aplicación presentados, se observa que el caudal óptimo de perforación se hace mayor para las zonas menos profundas, esto se debe básicamente al tamaño de la broca, ya que teniendo en cuenta que en cada sección más profunda el diámetro de broca va disminuyendo, el caudal mínimo requerido para que haya una limpieza adecuada de la zona será proporcional a este tamaño.
- Acorde con los resultados obtenidos, así como para las secciones menos profundas se requiere un mayor caudal, para estas secciones se encontró una menor pérdida de presión a pesar del alto caudal, esto se debe básicamente a que las pérdidas de presión son proporcionales al recorrido que debe realizar el fluido, teniendo en cuenta que el recorrido del fluido va aumentando a medida que avanza la perforación.

## RECOMENDACIONES

- Para identificar cual es el modelo reológico que se ajusta mejor a las pérdidas de presión obtenidas se recomienda hacer una calibración en profundidad de revestimiento del casing y comparar con las mediciones en los manómetros ubicados en el sarta de perforación y el anular y los resultados obtenidos a partir de la implementación de cada uno de los modelos reológicos expuestos.
- Los casos de aplicación mostrados en este trabajo fueron realizados para pozos estratigráficos profundos, en los que no se conoce su litología, por esto es recomendable al momento de que la operación este avanzando analizar los ripsos en superficie para ajustar los cálculos de control de sólidos y si es necesario redefinir la reología y tipo de lodo usado para la perforación, en este caso se podría redefinir el diseño hidráulico con el fin de optimizar tiempo y costos durante la aplicación.
- Con el objetivo de tener un producto más versátil para la planeación de un programa de perforación en la parte de hidráulica, sería interesante agregar módulos a la herramienta “Planning Hydraulics” que permitan calcular variables como ventana de lodo, diseño de sarta de perforación, y diseño de tubería de revestimiento. .

## BIBLIOGRAFÍA

- AMOCO Production Company. EPTG Drilling Technology Teams. Training to Reduce Unscheduled Events. Third Edition 1996. 149p.
- API Recommended Practice 13D 2009. Rheology and Hydraulics of oil Well Drilling Fluids.
- API Recommended Practice 5CT 1998. Specification for Casing and Tubing. 6<sup>th</sup> Edition.
- API Recommended Practice 7G. Drill Stem Design and Operating limits. 1998. 6<sup>th</sup> Edition.
- API Recommended Practice for core R40 1998. 2<sup>nd</sup> Edition. 64p.
- ARIZA LEON, Emiliano. Fundamentos de Perforación de Pozos 2009. 35p.
- BAKER HUGHES INTEQ. Drilling Engineering Workbook 1995. 410p.
- BAKER HUGHES INTEQ. Manual de Ingeniería de Fluidos, 1998. 568p.
- BAKER HUGHES INTEQ. New Coring Handbook, 1999. 278p.
- BIZANTI, M.S and ALKAFEEF, S.F. A simplified Hole Cleaning to deviated and horizontal wells. SPE 81412. 2003. College of technological studies, Kuwait.
- CAPITULO I. El taladro de reacondicionamiento.193p. [En línea citado en 3 de septiembre de 2010]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/431/1/CD-0411.pdf>.

- CARDEN, Richard S and GRACE, Robert D. Horizontal and Directional Drilling 2007. 409p.
- Chengdu Huilingfeng Diamond Bit Co, Ltd [En línea citado en octubre 4 de 2010]. <http://www.cdhlf.com/eng/about.htm>.
- DARLEY, Henry. C.H, and GRAY, George R. Composition and properties of drilling and completions fluids, 1988. 5a Edición. 654p.
- ELSEVIER. Drilling Fluids Processing Handbook. 2005. 693p.
- HERIOT WATT University. Drilling Engineering, 2005. 653p.
- IADC. International Association of Drilling Contractors. Bit Weight Chart and Drill Bit Nozzle Chart. [En línea citado en noviembre 5 de 2010] <http://www.premiumrockbit.com/>.
- IADC. International Association of Drilling Contractors. Drilling Fluid Manual 2007. 11<sup>th</sup> Edition.
- IAPG. Instituto Argentino de petróleo y gas. Buenos Aires, 2009. 18p.
- JOHN LAWRIE. OILFIELD. New Heavy Weight Drill Pipe Dimensions, Weights, Yields and Yield Strength. [En línea citado en noviembre 7 de 2010]. [http://www.johnlawrieoilfield.com/cms\\_data/assets/HEAVY\\_WEIGHT.pdf](http://www.johnlawrieoilfield.com/cms_data/assets/HEAVY_WEIGHT.pdf).
- LENIS, Efraín. MI SWACO. Curso control de sólidos. 2004 [En línea citado en noviembre 14 de 2010]. <http://www.scribd.com/doc/7391632/Curso-Control-de-Solidos>.
- LOPEZ VALDEZ, Israel. Elementos de perforación. [En línea citado en julio 30 de 2010]. <http://www.scribd.com/doc/19414708/Brocas-de-Perforacion>

- MANUAL MI 2001. Capítulo 10. Sistemas base agua. 27p.
- MANUAL MI 2001. Capítulo 5. Reología e Hidráulica. 36p.
- MANUAL MI 2001. Capítulo 8. Control de sólidos. 25p.
- MANUAL MI 2001. Capítulo 9. Cálculos de ingeniería. 44p.
- MOLERO, Jairo. Planificación de la perforación de pozos y selección de taladro, 2009.
- MUÑOZ, Samuel. Tecnología avanzada de fluidos de perforación, 1992. 286p.
- OILWELL DRILLING. Volume 4. Mud circulation and treating Equipment.
- PDVSA CIED. Diseño de sartas de perforación 2002. [En línea citado en diciembre 13 de 2010]. <http://www.scribd.com/doc/25599059/Diseno-de-Sartas-de-Perforacion>.
- RABIA, Hussain. Well Engineering and construction. Chapter 8 “Practical Rig Hydraulics” 640p.
- RODRIGUEZ BERMUDEZ, Eliserio y ARIZA LEON, Emiliano. Guía de laboratorio de lodos y cementos. Capítulo 2, 3 y 8.
- SCHLUMBERGER. Drilling and measurements 2001. Drill Bits. 89p.
- SCHLUMBERGER. Manual 04. Sistema circulante de fluidos. 26p.
- SCHLUMBERGER. Manual 06. Selección de barrenas en el proceso de construcción de pozos. 103p.

- SCHLUMBERGER. Manual 14. Diseño de sartas de perforación y herramientas de fondo. 162p.
- SCHLUMBERGER. Manual 23. Teoría y procedimientos para la limpieza de agujero. 37p.
- SCHLUMBERGER. Tecnología de perforación. Sección 4, 306p. [En línea citado en agosto 26 de 2010].
- SUNNDA CORPORATION. Oilfield Equipment Oil Field Drilling Equipment Supply. Product catalog. 76p.
- USGS Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey. Application of Drilling, Coring, and Sampling Techniques to Test Holes and Wells. 36p.

# ANEXOS



## ANEXO A: TABLAS DE TUBERÍAS

### TUBERIA DE PERFORACIÓN O DRILL PIPE

New				Premium (80% del espesor)				Clase 2 (70% del espesor)			
OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	GRADOS	OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	GRADOS	OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	GRADOS
2 3/8"	1.995"	4.85	E75, X95, G105, S135	2.299"	1.995"	4.85	E75, X95, G105, S135	2.261"	1.995"	4.85	E75, X95, G105, S135
2 3/8"	1.815"	6.65	E75, X95, G105, S135	2.263"	1.815"	6.65	E75, X95, G105, S135	2.207"	1.815"	6.65	E75, X95, G105, S135
2 7/8"	2.441"	6.85	E75, X95, G105, S135	2.7882"	2.441"	6.85	E75, X95, G105, S135	2.7448"	2.441"	6.85	E75, X95, G105, S135
2 7/8"	2.151"	10.40	E75, X95, G105, S135	2.703"	2.151"	10.40	E75, X95, G105, S135	2.6578"	2.151"	10.40	E75, X95, G105, S135
3 1/2"	2.992"	9.50	E75, X95, G105, S135	3.3984"	2.992"	9.50	E75, X95, G105, S135	3.3476"	2.992"	9.50	E75, X95, G105, S135
3 1/2"	2.764"	13.30	E75, X95, G105, S135	3.3528"	2.764"	13.30	E75, X95, G105, S135	3.2792"	2.764"	13.30	E75, X95, G105, S135
3 1/2"	2.602"	15.50	E75, X95, G105, S135	3.3204"	2.602"	15.50	E75, X95, G105, S135	3.2306"	2.602"	15.50	E75, X95, G105, S135
4"	3.476"	11.85	E75, X95,	3.8952"	3.476"	11.85	E75, X95,	3.8428"	3.476"	11.85	E75, X95,

			G105, S135				G105, S135				G105, S135
<b>4''</b>	3.340''	14.00	E75, X95, G105, S135	<b>3.868''</b>	3.340''	14.00	E75, X95, G105, S135	<b>3.802''</b>	3.340''	14.00	E75, X95, G105, S135
<b>4''</b>	3.240''	15.70	E75, X95, G105, S135	<b>3.848''</b>	3.240''	15.70	E75, X95, G105, S135	<b>3.772''</b>	3.240''	15.70	E75, X95, G105, S135
<b>4 1/2''</b>	3.958''	13.75	E75, X95, G105, S135	<b>4.3916''</b>	3.958''	13.75	E75, X95, G105, S135	<b>4.3374''</b>	3.958''	13.75	E75, X95, G105, S135
<b>4 1/2''</b>	3.826''	16.60	E75, X95, G105, S135	<b>4.3652''</b>	3.826''	16.60	E75, X95, G105, S135	<b>4.2978''</b>	3.826''	16.60	E75, X95, G105, S135
<b>4 1/2''</b>	3.640''	20.00	E75, X95, G105, S135	<b>4.328''</b>	3.640''	20.00	E75, X95, G105, S135	<b>4.242''</b>	3.640''	20.00	E75, X95, G105, S135
<b>4 1/2''</b>	3.500''	22.82	E75, X95, G105, S135	<b>4.3''</b>	3.500''	22.82	E75, X95, G105, S135	<b>4.2''</b>	3.500''	22.82	E75, X95, G105, S135
<b>5''</b>	4.408''	16.25	E75, X95, G105, S135	<b>4.8816''</b>	4.408''	16.25	E75, X95, G105, S135	<b>4.8224''</b>	4.408''	16.25	E75, X95, G105, S135
<b>5''</b>	4.276''	19.50	E75, X95, G105, S135	<b>4.8552''</b>	4.276''	19.50	E75, X95, G105, S135	<b>4.7828''</b>	4.276''	19.50	E75, X95, G105, S135
<b>5''</b>	4.000''	25.60	E75, X95, G105, S135	<b>4.8''</b>	4.000''	25.60	E75, X95, G105, S135	<b>4.7''</b>	4.000''	25.60	E75, X95, G105, S135
<b>5 1/2''</b>	4.892''	19.20	E75, X95, G105, S135	<b>5.3784''</b>	4.892''	19.20	E75, X95, G105, S135	<b>5.3176''</b>	4.892''	19.20	E75, X95, G105, S135
<b>5 1/2''</b>	4.778''	21.90	E75, X95, G105, S135	<b>5.3556''</b>	4.778''	21.90	E75, X95, G105, S135	<b>5.2834''</b>	4.778''	21.90	E75, X95, G105, S135
<b>5 1/2''</b>	4.670''	24.70	E75, X95,	<b>5.334''</b>	4.670''	24.70	E75, X95,	<b>5.251''</b>	4.670''	24.70	E75, X95,

			G105, S135				G105, S135				G105, S135
<b>6 5/8"</b>	5.965"	25.20	E75, X95, G105, S135	<b>6.493"</b>	5.965"	25.20	E75, X95, G105, S135	<b>6.427"</b>	5.965"	25.20	E75, X95, G105, S135
<b>6 5/8"</b>	5.901"	27.70	E75, X95, G105, S135	<b>6.4802"</b>	5.901"	27.70	E75, X95, G105, S135	<b>6.4078"</b>	5.901"	27.70	E75, X95, G105, S135

Fuente: Tomado de API Recommended Practice 7G. Drill Stem Design and Operating limits. 1998. 6<sup>th</sup> Edition

## TUBERÍA PESADA O HEAVY WEIGHT

ESTANDAR			ESPIRALADO		
OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>
<b>3 1/2"</b>	23.40	2 1/4"	<b>3 1/2"</b>	27.50	2 1/4"
<b>4"</b>	29.90	2 9/16"	<b>4"</b>	34.30	2 9/16"
<b>4 1/2"</b>	41.10	2 3/4"	<b>4 1/2"</b>	46.50	2 3/4"
<b>5"</b>	50.10	3"	<b>5"</b>	55.40	3"
<b>5 1/2"</b>	57.60	3 3/8"	<b>5 1/2"</b>	63.80	3 3/8"
<b>6 5/8"</b>	71.30	4 1/2"	<b>6 5/8"</b>	77.70	4 1/2"

Fuente: Tomado de New Heavy Weight Drill Pipe Dimensions, Weights, Yields and Yield Strength. John Lawrie. Oilfield.

## COLLARRES DE PERFORACIÓN O DRILL COLLAR

	1''	1 1/4''	1 1/2''	1 3/4''	2''	2 1/4''	2 1/2''	2 13/16''	3''	3 1/4''	3 1/2''	3 3/4''	4''
2 7/8''	19	18	16										
3''	21	20	18										
3 1/8''	22	22	20										
3 1/4''	26	24	22										
3 1/2''	30	29	27										
3 3/4''	35	33	32										
4''	40	39	37	35	32	29							
4 1/8''	43	41	39	37	35	32							
4 1/4''	46	44	42	40	38	35							
4 1/2''	51	50	48	46	43	41							
4 3/4''			54	52	50	47	44						
5''			61	59	56	53	50						
5 1/4''			68	65	63	60	57						
5 1/2''			75	73	70	67	64	60					
5 3/4''			82	80	78	75	72	67	64	60			
6''			90	88	85	83	79	75	72	68			
6 1/4''			98	96	94	91	88	81	80	76	72		
6 1/2''			107	105	102	99	96	91	89	85	80		
6 3/4''			116	114	111	108	105	100	98	93	89		

7''			125	123	120	117	114	110	107	103	98	93	84
7 1/4''			134	132	130	127	124	119	116	112	108	103	93
7 1/2''			144	142	139	137	133	129	126	122	117	113	102
7 3/4''			154	152	150	147	144	139	136	132	128	123	112
8''			165	163	160	157	154	150	147	143	138	133	122
8 1/4''			176	174	171	168	165	160	158	154	149	144	133
8 1/2''			187	185	182	179	176	172	169	165	160	155	150
9''			210	208	206	203	200	195	192	188	184	179	174
9 1/2''			234	232	230	227	224	220	216	212	209	206	198
9 3/4''			248	245	243	240	237	232	229	225	221	216	211
10''			261	259	257	254	251	246	243	239	235	230	225
11''			317	315	313	310	307	302	299	295	291	286	281
12''			379	377	374	371	368	364	361	357	352	347	342

Fuente: Tomado IADC. International Association of Drilling Contractors. Drilling Fluid Manual 2007. 11<sup>th</sup> Edition.

## TUBERÍA DE REVESTIMIENTO O CASING

OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125	OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125	
4 1/2"	9.50	4.09"	x	x	x						5 1/2"	14.00	5.012"	x	x	x						
	10.50	4.052"		x	x							15.50	4.95"		x	x						
	11.60	4.00"		x	x	x	x	x	x			17.00	4.892"		x	x	x	x	x	x	x	
	13.50	3.92"			x	x	x	x	x			20.00	4.778"			x	x	x	x	x	x	
	15.10	3.826"							x	x		23.00	4.67"			x	x	x	x	x	x	x
5"	11.50	4.56"		x	x							26.80	4.5"							x		
	13.00	4,494"		x	x							29.70	4.376"							x		
	15.00	4.408"		x	x	x	x	x	x			32.60	4.25"							x		
	18.00	4.276"			x	x	x	x	x	x		35.30	4.126"							x		
	21.40	4.126"			x	x	x	x	x	x		38.00	4.00"							x		
	23.20	4.044"				x	x	x	x	x		40.50	3,876"							x		
	24.10	4.00"				x	x	x	x	x		43.10	3,75"							x		

OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125	OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125		
6 5/8"	20.00	6.049"	x	x	x						7"	50.10	5.5"						x				
	24.00	5.921"		x	x	x	x	x	x			53.60	5.376"							x			
	28.00	5.791"			x	x	x	x	x			57.10	5.25"							x			
	32.00	5.675"				x	x	x	x	x	7 5/8"	24.00	7.025"	x									
7"	17.00	6.538"	x									26.40	6.969"		x	x	x	x	x				
	20.00	6.456"	x	x	x							29.70	6.875"			x	x	x	x	x			
	23.00	6.366"		x	x	x	x	x				33.70	6.765"			x	x	x	x	x			
	26.00	6.276"		x	x	x	x	x	x			39.00	6.625"				x	x	x	x	x	x	
	29.00	6.184"			x	x	x	x	x			42.80	6.501"				x	x	x	x	x	x	
	32.00	6.094"			x	x	x	x	x			45.30	6.435"				x	x	x	x	x	x	
	35.00	6.004"				x	x	x	x	x		47.10	6.375"				x	x	x	x	x	x	
	38.00	5.92"				x	x	x	x	x		51.20	6.251"							x			
	42.70	5.75"							x			55.30	6.125"							x			
46.40	5.626"							x		7 3/4"	46.10	6.56"				x	x	x	x	x			

OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125	OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125	
8 5/8"	24.00	8.097"		x	x						9 5/8"	59.40	8.407"						x			
	28.00	8.017"	x		x							64.90	8.281"							x		
	32.00	7.921"	x	x	x							70.30	8.157"							x		
	36.00	7.825"		x	x	x	x	x				75.60	8.031"							x		
	40.00	7.725"				x	x	x	x	x	10 3/4"	32.75	10.19"	x								
	44.00	7.625"				x	x	x	x			40.50	10.05"	x	x	x						
	49.00	7.511"				x	x	x	x	x		45.50	9.95"		x	x						
9 5/8"	32.30	9.001"	x									51.00	9.85"		x	x	x	x	x	x	x	
	36.00	8.921"	x	x	x						55.50	9.76"			x	x	x	x	x	x		
	40.00	8.835"		x	x	x	x	x			60.70	9.66"							x	x	x	
	43.50	8.755"			x	x	x	x	x		65.70	9.56"							x	x	x	
	47.00	8.681"			x	x	x	x	x	x	73.20	9.406"							x			
	53.50	8.535"				x	x	x	x	x	79.20	9.282"							x			
	58.40	8.435"				x	x	x	x	x	83.50	9.156"							x			

OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125	OD <i>in</i>	PESO <i>lb/ft</i>	ID <i>in</i>	H40	J55 K55	M65	L80 C95	N80	C90 T95	P110	Q125		
<b>11</b> <b>3/4"</b>	42.00	11.084"	x								<b>16"</b>	65.00	15.25"	x									
	47.00	11.00"		x	x							75.00	15.124"		x	x							
	54.00	10.88"		x	x							84.00	15.01"		x	x							
	60.00	10.772"		x	x	x	x	x	x	x		109.00	14.688"		x		x	x		x	x		
	65.00	10.682"					x	x	x	x	x	<b>18</b> <b>5/8"</b>	87.50	17.755"	x	x	x						
	71.00	10.586"					x	x	x	x	x		<b>20"</b>	94.00	19.124"	x	x	x					
<b>13</b> <b>3/8"</b>	48.00	12.715"	x								106.50	19.00"			x	x							
	54.50	12.615"		x	x						133.00	18.73"			x								
	61.00	12.515"		x	x						X Grados disponibles de cada casing de un diámetro externo dado.												
	68.00	12.415"		x	x	x	x	x	x														
	72.00	12.347"					x	x	x	x													

Fuente: Tomado de API Recommended Practice 5CT 1998. Specification for Casing and Tubing. 6<sup>th</sup> Edition.



## ANEXO B: CÓDIGO DE CLASIFICACIÓN IADC BROCAS DE CONOS DE RODILLOS

517G

Serie de Estructura de corte -1er número-		
<b>Dientes Maquinados</b>	Formaciones blandas con baja resistencia a la compresión y alta perforabilidad	<b>1</b>
	Formaciones medias a medio duras con alta resistencia a la compresión	<b>2</b>
	Formaciones duras semi-abrasivas y abrasivas	<b>3</b>
<b>Insertos de Tungsteno</b>	Formaciones blandas con baja resistencia a la compresión y alta perforabilidad	<b>4</b>
	Formaciones blandas a medias con baja resistencia a la compresión	<b>5</b>
	Formaciones medio duras con alta resistencia a la compresión	<b>6</b>
	Formaciones duras semi-abrasivas y abrasivas	<b>7</b>
	Formaciones extremadamente duras y abrasivas	<b>8</b>

Descripción de cojinetes -3er número-	
Cojinete de rodillos estándar	<b>1</b>
Cojinete de rodillos refrigerados por aire	<b>2</b>
Cojinete de rodillos con calibre protegido	<b>3</b>
Cojinete de rodillos sellados	<b>4</b>
Cojinete de rodillos sellados con calibre protegido	<b>5</b>
Cojinete de fricción sellado	<b>6</b>
Cojinete sellado con calibre protegido	<b>7</b>

Tipo de estructura de corte -2do número-
1 se refiere a la formación más blanda de una serie particular y 4 se refiere la formación más dura dentro de la misma serie

### Características disponibles (Opcional)

A-Aplicación de aire
B-Cojinete de sello especial
C-Chorro central
D-Control de desviación
E-Toberas extendidas
G-Protección de calibre/cuerpo
H-Dirección horizontal
J-Chorros de deflexión
L-Lug Pad
M- Aplicación motor
S-Dientes estándar de acero
T-Broca de dos conos
W-Estructura mejorada de corte
X-Predomina dientes insertados
Y-Inserto de diente cónico
Z-Otra forma de inserto

Fuente: SPE 23937. Desarrollo de un nuevo sistema de clasificación de brocas de conos de rodillos IADC

## PARA BROCA DE CORTADORES FIJOS



<b>Material del Cuerpo</b>	Acero
	Matriz

<b>Densidad del cortador</b>	<b>PDC</b>	<b>1-4</b>
	<b>DIAMANTE</b>	<b>6-8</b>

<b>Tamaño de cortador/ Tipo</b>	<b>PDC</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. &gt;24 mm</li> <li>2. 14-24 mm</li> <li>3. 8-14 mm</li> <li>4. &lt;8mm</li> </ol>
	<b>DIAMANTE</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diamante Natural</li> <li>2. TSP</li> <li>3. Combinación diamante natural y TSP</li> <li>4. Impregnada</li> </ol>

<b>Perfil</b>	El último dígito indica el estilo general del cuerpo y varía desde 1 (perfil plano) a 4 (estilo de turbina con flancos largos)
---------------	--

Los códigos IADC para cortador fijo únicamente es un medio para caracterizar físicamente este tipo de brocas, a diferencia de la clasificación IADC para brocas de conos de rodillos, esta referencia no es una guía de aplicación.

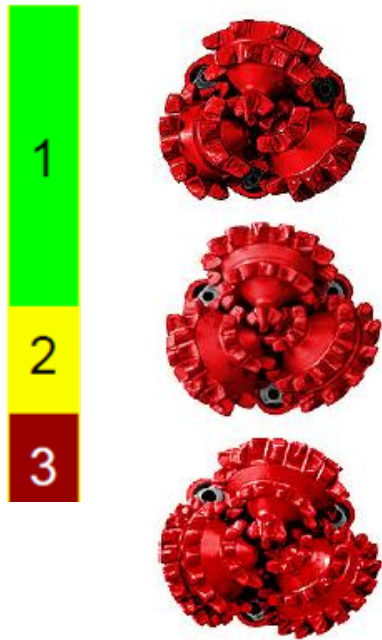
Fuente: SPE 23940. Desarrollo de un nuevo sistema de clasificación de brocas de cortador fijo IADC.

## ANEXO C: GUÍA DE CORTADORES

Blando Diente\*



Duro



1-1

1-3

2-1

\*Brocas tricónicas:

1er código: Serie de estructura de corte (De 1 a 8).

2do: Tipo de estructura (En el caso de las de insertos de tungsteno, se relaciona con la forma del inserto)

Inserto\*



4-1



8-3



258

PDC



Diamante Natural



Diamante Impregnado



## ANEXO D: ESPECIFICACIÓN DE BROCAS

### DIÁMETROS DE BROCA

3 5/8''	4 1/2''	5''	5 7/8''	6 1/2''	8 3/8''	9 7/8''	11 5/8''	13 3/4''	17''	22''	28''
3 3/4''	4 5/8''	5 1/4''	6''	6 3/4''	8 1/2''	10 1/2''	11 7/8''	14''	17 1/2''	23''	30''
3 7/8''	4 3/4''	5 1/2''	6 1/8''	7 1/2''	8 3/4''	10 5/8''	12''	14 3/4''	18 1/2''	24''	
4 1/8''	4 7/8''	5 3/4''	6 1/4''	7 7/8''	9 1/2''	11''	12 1/4''	16''	20''	26''	

Fuente: Premium Rock Bit. Bit Weights

## ÁREA TOTAL DE FLUJO-TFA

Tamaño <i>in</i>	Número de Boquillas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>8/32</b>	0.0490	0.0981	0.1472	0.1963	0.2454	0.2945	0.3436	0.3926	0.4417	0.4908
<b>9/32</b>	0.0621	0.1242	0.1863	0.2485	0.3106	0.3727	0.4348	0.4970	0.5591	0.6212
<b>10/32</b>	0.0766	0.1533	0.2300	0.3067	0.3854	0.4601	0.5368	0.6135	0.6902	0.7669
<b>11/32</b>	0.0928	0.1856	0.2784	0.3712	0.4640	0.5568	0.6496	0.7424	0.8352	0.9280
<b>12/32</b>	0.1104	0.2208	0.3313	0.4417	0.5522	0.6626	0.7731	0.8835	0.9940	1.1044
<b>13/32</b>	0.1296	0.2592	0.3888	0.5184	0.6481	0.7777	0.9073	1.0369	1.1665	1.2962
<b>14/32</b>	0.1503	0.3006	0.4509	0.6013	0.7516	0.9019	1.0523	1.2026	1.3529	1.5032
<b>15/32</b>	0.1725	0.3451	0.5177	0.6902	0.8628	1.0354	1.2080	1.3805	1.5531	1.7257
<b>16/32</b>	0.1963	0.3926	0.5890	0.7853	0.9817	1.1780	1.3744	1.5707	1.7671	1.9634
<b>18/32</b>	0.2485	0.4970	0.7455	0.9940	1.2425	1.4910	1.7395	1.9880	2.2365	2.4850
<b>20/32</b>	0.3067	0.6135	0.9203	1.2271	1.5339	1.8407	2.1475	2.4543	2.7611	3.0679
<b>22/32</b>	0.3712	0.7424	1.1136	1.4848	1.8561	2.2273	2.5985	2.9697	3.3410	3.7122
<b>24/32</b>	0.4417	0.8835	1.3253	1.7671	2.2089	2.6507	3.0925	3.5342	3.9760	4.4178

Fuente: Premium Rock Bit. Nozzle Chart.

## VENTAJAS Y CONSIDERACIONES DE CADA TIPO DE BROCA

BROCA	VENTAJAS	CONSIDERACIONES
<p><b>PDC</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta velocidad de perforación</li> <li>-Potencial de larga vida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Daño por impacto</li> <li>-Abrasividad</li> <li>-Estabilidad</li> </ul>
<p><b>Dientes Maquinados</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta velocidad de perforación</li> <li>-Buena estabilidad</li> <li>-Económica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Velocidad de desgaste de dientes</li> <li>-Vida del cojinete</li> </ul>
<p><b>Insertos</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Durabilidad de la estructura de corte</li> <li>-Rango de formaciones</li> <li>-Tolerancia entre capas</li> <li>-Se puede dirigir y es estable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Velocidad de perforación más lenta</li> <li>-Vida de los cojinetes</li> </ul>
<p><b>Diamante Natural e Impregnado</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Muy durable</li> <li>-Capacidad para Roca Dura</li> <li>-Riesgo de sufrir daño en contacto con residuos metálicos en el pozo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Velocidad de perforación más lenta</li> <li>-Sensibilidad a las RPM</li> <li>-Aplicaciones de costo elevado</li> </ul>

Fuente: Tomado de Selección de barrenas en el proceso de construcción de pozos. Schlumberger.

## ANEXO E: ESPECIFICACIÓN DE MOTORES

### MOTORES DE FONDO

Descripción del motor	OD (in)	Longitud (ft)	Máx ΔP	Descripción del motor	OD (in)	Longitud (ft)	Máx ΔP
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 3.0 STG	4,750	21,79	380	6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 2.0 STG	6,750	19,56	250
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	4,750	21,79	380	6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 3.0 STG	6,750	22,63	375
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 3.5 STG	4,750	19,54	500	6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 6.0 STG	6,750	35,88	750
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 6.3 STG	4,750	25,82	900	8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 3.0 STG	8,000	23,95	375
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 7.0 STG	4,750	31,04	1000	8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	8,000	27,33	500
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 2.2 STG	4,750	19,54	360	8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 3.6 STG	8,000	26,25	520
4-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 4.4 STG	4,750	31,04	720	8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 5.3 STG	8,000	31,92	760
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	6,250	25,05	500	8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 7.2 STG	8,000	42,25	1040
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 4.3 STG	6,250	21,95	625	8" SPERRYDRILL LOBE 6/7 - 4.0 STG	8,000	30,08	620
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 2.8 STG	6,250	21,95	460	8" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 3.0 STG	8,000	26,25	490
6-1/4" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 4.0 STG	6,250	23,05	625	8" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 6.0 STG	8,000	42,25	980
6-1/2" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	6,500	28,71	500	8" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 4.0 STG	8,000	27,08	550
6-1/2" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 4.8 STG	6,500	25,62	700	8" SPERRYDRILL LOBE 9/10 - 3.0 STG	8,000	22,91	375
6-1/2" SPERRYDRILL LOBE 8/9 - 3.0 STG	6,500	23,62	375	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	9,625	33,69	500
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 3.0 STG	6,750	23,3	375	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 5.0 STG	9,625	33,69	620
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.0 STG	6,750	26,63	500	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 3/4 - 4.5 STG	9,625	30,78	620
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 4.8 STG	6,750	24,63	700	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 3/4 - 6.0 STG	9,625	34,95	820
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 7.0 STG	6,750	29,72	1010	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 3/4 - 9.0 STG	9,625	49,03	1240
6-3/2" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 9.6 STG	6,750	39,84	1400	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 5/6 - 3.0 STG	9,625	30,78	450
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 6/7 - 5.0 STG	6,750	28,92	775	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 5/6 - 6.0 STG	9,625	49,03	900
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 3.0 STG	6,750	22,63	500	9-5/8" SPERRYDRILL LOBE 6/7 - 5.0 STG	9,625	33,28	775
6-3/4" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 6.0 STG	6,750	35,88	1000				

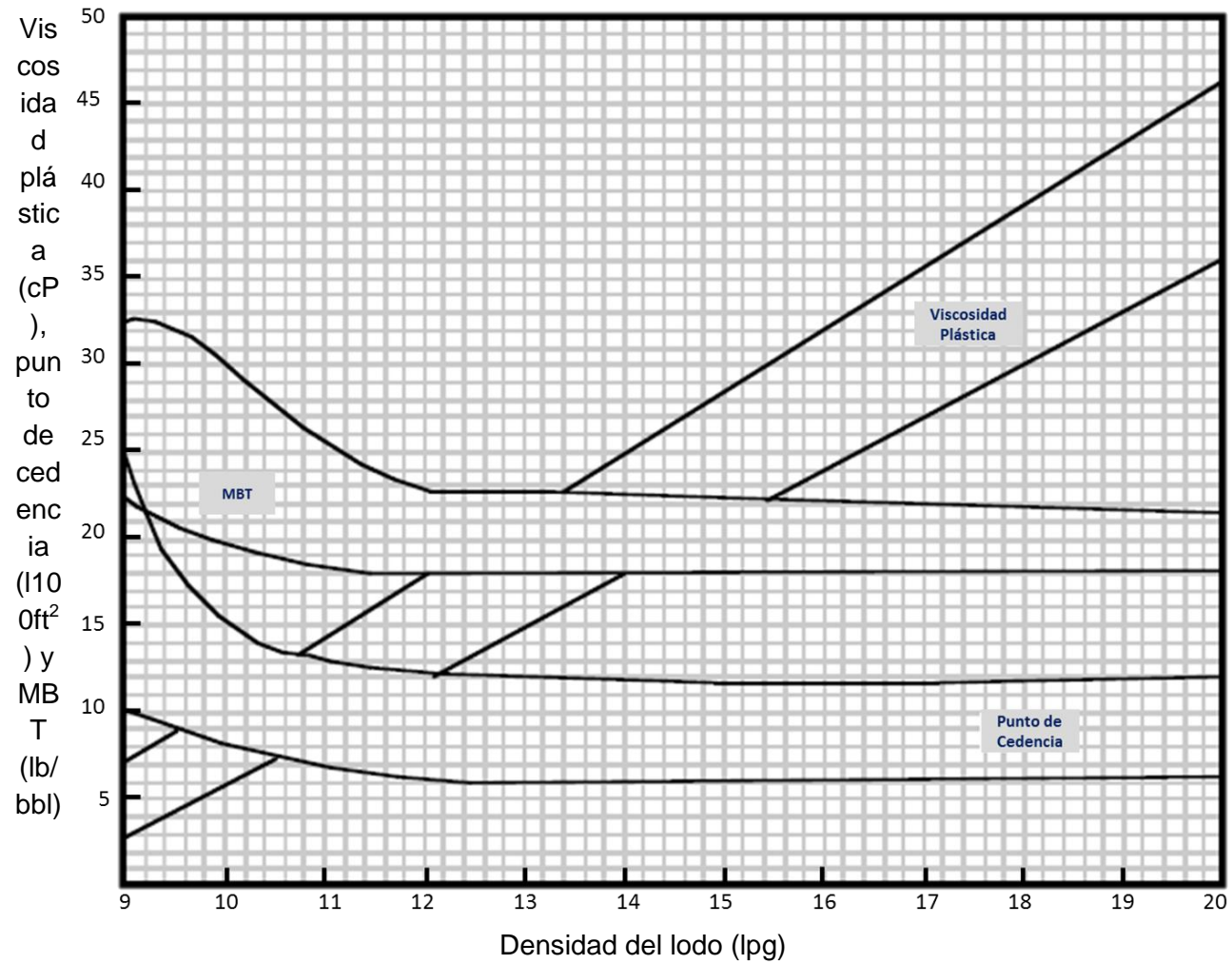
Fuente: Motor. Bit Hydraulics Halliburton

## MOTORES SLIM HOLE

Descripción del motor	OD (in)	Longitud (ft)	Máx ΔP
1-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.6 STG	1,750	11,24	575
1-3/4" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 2.3 STG	1,750	11,24	285
2-3/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 7.0 STG	2,375	14,9	875
2-3/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 3.5 STG	2,375	14,9	440
2-3/8" SPERRYDRILL LOBE 5/6 - 2.5 STG	2,375	10,02	380
2-7/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 7.0 STG	2,875	16,8	835
2-7/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 5.2 STG	2,875	16,8	650
2-7/8" SPERRYDRILL LOBE 5/6 - 3.3 STG	2,875	11,58	500
3-3/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 5.5 STG	3,375	22,95	685
3-3/8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 5.0 STG	3,375	17,7	725
3-3/8" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 3.0 STG	3,375	17,7	480
3-5/8" SPERRYDRILL LOBE 1/2 - 4.4 STG	3,625	22,86	550
3-5/8" SPERRYDRILL LOBE 4/5 - 3.5 STG	3,625	19,11	495
3-5/8" SPERRYDRILL LOBE 7/8 - 2.3 STG	3,625	19,11	375

Fuente: Motor. Bit Hydraulics Halliburton

**ANEXO F: Rangos de propiedades reológicas para los lodos base agua.**



Fuente: MANUAL MI 2001. Capítulo 10. Sistemas base agua. 27p.

## ANEXO G: ESPECIFICACIÓN DE BOMBAS

SDF-500		SDF-800	
<b>Potencia:</b>	500 Hp	<b>Potencia:</b>	800 Hp
<b>Velocidad nominal de bomba:</b>	165 Stroke/min	<b>Velocidad nominal de bomba:</b>	150 Stroke/min
<b>Máximo tamaño de la camisa:</b>	6 3/4"	<b>Máximo tamaño de la camisa:</b>	6 3/4"
<b>Longitud de la carrera:</b>	7 1/2"	<b>Longitud de la carrera:</b>	9"
<b>SPM</b>	<b>Potencia de Entrada (HP)</b>	<b>SPM</b>	<b>Potencia de Entrada (HP)</b>
165	500	150	800
150	455	140	747
140	424	130	694
130	394	120	640
120	364	110	587
110	334	100	533
<b>Tamaño camisa</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>Tamaño camisa</b>	<b>Presión (psi)</b>
6 3/4"	1342	6 3/4"	1969
6 1/2"	1447	6 1/2"	2122
6"	1699	6"	2490
5 1/2"	2020	5 1/2"	2962
5"	2442	5"	3588
4"	3820	4"	5000

Fuente: Triplex Mud Pumps. SUNNDA CORPORATION

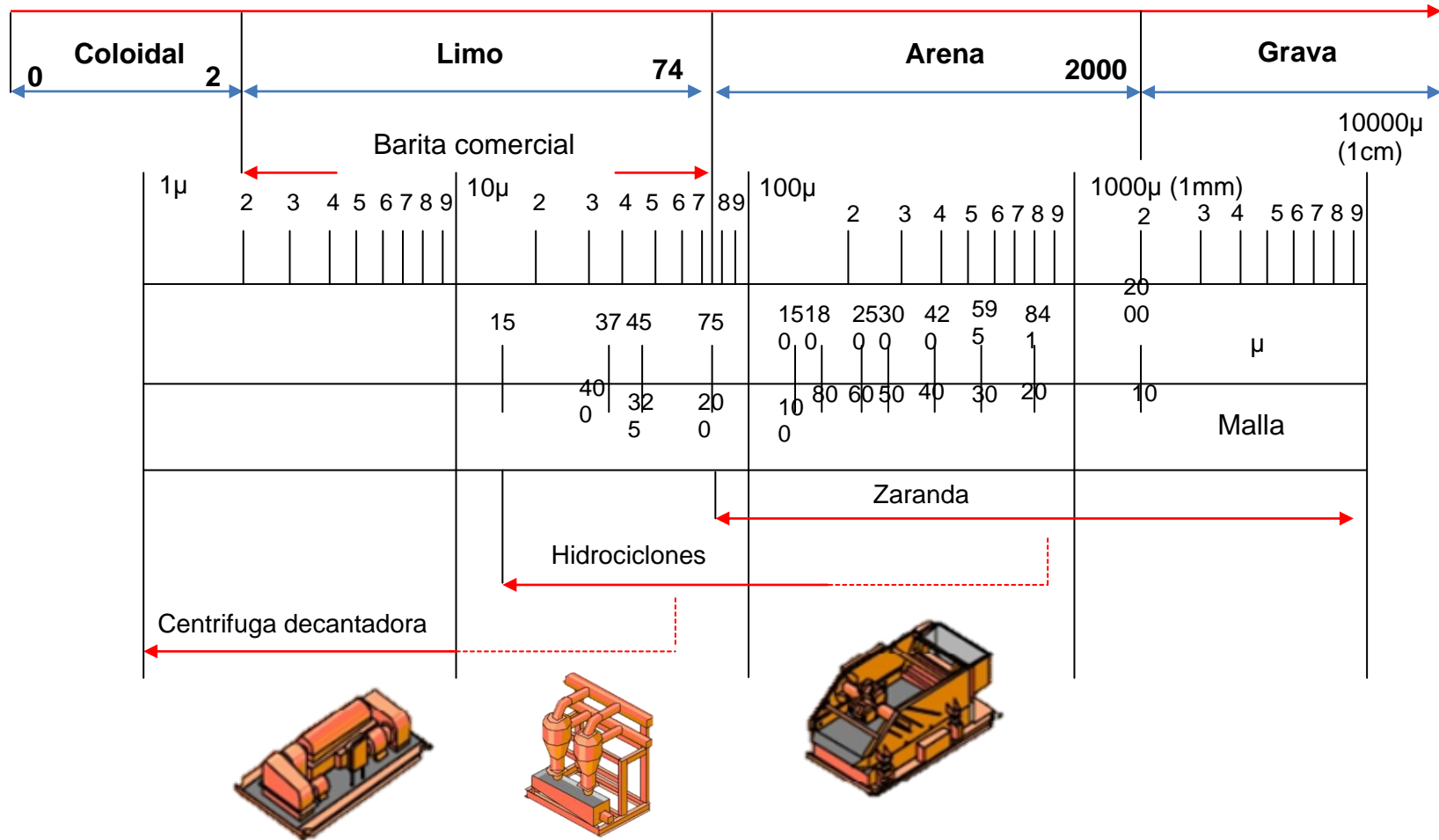
SDF-1000		SDF-1300	
<b>Potencia:</b>	1000 Hp	<b>Potencia:</b>	1300 Hp
<b>Velocidad nominal de bomba:</b>	140 Stroke/min	<b>Velocidad nominal de bomba:</b>	120 Stroke/min
<b>Máximo tamaño de la camisa:</b>	6 3/4''	<b>Máximo tamaño de la camisa:</b>	7''
<b>Longitud de la carrera:</b>	10''	<b>Longitud de la carrera:</b>	12''
<b>SPM</b>	<b>Potencia de Entrada (HP)</b>	<b>SPM</b>	<b>Potencia de Entrada (HP)</b>
140	1000	120	1300
130	928	110	1192
120	857	100	1083
110	785	90	975
100	714	80	867
90	642	70	758
<b>Tamaño camisa</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>Tamaño camisa</b>	<b>Presión (psi)</b>
6 3/4''	2370	7''	2788
6 1/2''	2558	6 3/4''	2988
6''	3000	6 1/2''	3232
5 1/2''	3572	6''	3792
5''	4322	5 1/2''	4516
4''	5000	5''	5000

Fuente: Triplex Mud Pumps. SUNNDA CORPORATION

<b>SDF-1600</b>		<b>SDF-2200</b>	
<b>Potencia:</b>	1600 Hp	<b>Potencia:</b>	2200 Hp
<b>Velocidad nominal de bomba:</b>	120 Stroke/min	<b>Velocidad nominal de bomba:</b>	105 Stroke/min
<b>Máximo tamaño de la camisa:</b>	7''	<b>Máximo tamaño de la camisa:</b>	9''
<b>Longitud de la carrera:</b>	12''	<b>Longitud de la carrera:</b>	14''
<b>SPM</b>	<b>Potencia de Entrada (HP)</b>	<b>SPM</b>	<b>Potencia de Entrada (HP)</b>
120	1600	105	2200
110	1467	90	1886
100	1334	80	1676
90	1200	70	1467
80	1067	60	1257
70	933	50	1048
<b>Tamaño camisa</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>Tamaño camisa</b>	<b>Presión (psi)</b>
7''	3430	9''	2760
6 3/4''	3690	8 1/4''	3310
6 1/2''	3978	7 1/2''	4040
6''	4668	7''	4505
5 1/2''	5000	6''	5000
5''	5000	5 1/2''	5000

Fuente: Triplex Mud Pumps. SUNNDA CORPORATION

## ANEXO H: CLASIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS



Fuente: Tomado de curso de control de sólidos. MI SWACO. Lenis, Efraín.

