

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA  
CÁLCULOS DE HIDRÁULICA COMO PREVENCIÓN DE INCIDENTES  
OPERACIONALES**

JADER ENRIQUE NAVARRO INFANTE  
JENNY KATHERINE CARRILLO HERNANDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTA DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA  
CÁLCULOS DE HIDRÁULICA COMO PREVENCIÓN DE INCIDENTES  
OPERACIONALES**

**Trabajo de Grado como requisito para optar el título de  
Ingeniero de petróleos**

JADER ENRIQUE NAVARRO INFANTE  
JENNY KATHERINE CARRILLO HERNANDEZ

**Director:**

Ing. Werney Machuca Boada

**Co-Director:**

Ing. Julián Andrés Quintero Silva

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTA DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro director Werney De Jesús Machuca Boada, por todo el apoyo brindado, por toda su guía en este camino, por sus aportes, que contribuyeron al éxito de nuestro proyecto y por brindarnos el tiempo necesario para la culminación de esta meta.

A nuestro co-director Julián Quintero, por no solo ser un apoyo, sino un amigo.

A todos los que creyeron en este trabajo, los cuales fueron el mayor soporte para seguir adelante, pese a las dificultades.

## DEDICATORIAS

*A Dios, por sus gigantes bendiciones.*

*A mis padres, porque más que darme cosas materiales, me dieron metas por cumplir.*

*A mi hija, por ser el motor de mi vida, a mi hermano por estar siempre ahí, también a  
mi tía bella.*

*Hoy este logro es para todos ellos, mi familia y amigos, a quienes doy gracias por  
apoyarme en todo momento.*

**JADER NAVARRO**

## DEDICATORIAS

*Al TODOPODEROSO, Ingeniero de Ingenieros, quien renueva mis fuerzas cada día y me regala su bendición en cada paso que doy. Sin él nada de esto hubiese sido posible.*

*A mis padres, quienes siempre se esforzaron para que nunca me faltara nada, los que siempre creyeron en mí y soportaron extensas horas de trabajo para sacar a mis hermanos y a mí adelante, quienes aparte de apoyarme, siempre me brindaron todo su cariño y comprensión, los amo.*

*A todos mis hermanos, Jhon, Leidy, Kerly, Ronald, Luisa, y Felipe, quienes son mi motor y de una u otra manera también contribuyeron en este importante logro.*

*A mis sobrinos Gabriel Santiago y Milan Leandro, que son la alegría de la casa y los futuros ingenieros.*

*A Jordi J.Motta, mi novio, mi apoyo incondicional, mi amigo, mi persona favorita, mi motor, gracias por tanto, porque contar con alguien que convierta los momentos más difíciles en livianos y sonrisas, se llama bendición. Gracias por aguantarme tanto.*

*A Werney De Jesùs Machuca Boada, Ingeniero porque gracias a usted, tengo una muy buena percepción de la perforación, porque cada una de sus clases, fueron el camino para conocer el verdadero amor por mi carrera Ingeniería de Petróleos, por todo su apoyo incondicional, tiempo y paciencia que me ha brindado en este largo y maravilloso camino.*

*A mis amigos quienes son la familia que Dios me ha permitido elegir, Marilyn G porque iniciamos este camino juntas ,y sin importar lo que pasara, siempre estuvo ahí, Nicolás B con quien tuve la bendición de compartir casi todas las clases y fue un apoyo en cada una de ellas ,Reina Carolina B porque su amor llegó a mi vida e hizo de mí una mejor persona, con quien compartí todas las salidas técnicas y las convertíamos en aventuras y aprendizajes, Reina Dayanna S quien transmite en mí su fuerza en cada momento , Henry D por apoyarme en cada situación difícil, gracias por demostrarme que sí se puede, Javier C, por tantos consejos sin importar la hora en los que los necesito, gracias a cada uno de ustedes , por brindarme su valiosa amistad y porque sin ustedes mi vida universitaria no hubiese sido la misma, , gracias por tanto.*

**DE CORAZÒN GRACIAS INFINITAS  
JENNY CARRILLO**

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	18
1. GENERALIDADES DE REOLOGÌA.....	19
1.1 PATRONES DE FLUJO .....	20
1.1.1 Flujo Laminar .....	20
1.1.2 Flujo turbulento .....	21
1.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL LODO .....	22
1.2.1 Tasa de corte.....	22
1.2.2 Esfuerzo de corte .....	24
1.2.3 Viscosidad del fluido .....	26
1.2.4 Viscosidad plástica y punto de cedencia .....	27
1.2.5 Esfuerzo de gel .....	28
1.3 MODELOS DE COMPORTAMIENTOS DE LOS FLUIDOS.....	29
1.3.1 Fluidos Newtonianos.....	29
1.3.2 Modelo plástico de Bingham.....	30
1.3.3 Modelo de Ley de Potencia.....	32
2. FUNDAMENTOS DE HIDRÀULICA.....	35
2.1 Càlculo de pèrdidas por fricciòn en el sistema_circulatorio. ....	36
2.1.1 Pérdidas por fricción en el equipo de superficie.....	39
2.1.2 Pérdidas por fricción dentro de la sarta y el anular .....	43
2.1.3 Pérdidas por fricción en la broca.....	50
2.2 OPTIMIZACION DE LA HIDRAULICA .....	54
2.2.1 Potencia hidráulica de la broca .....	57
2.2.2 Fuerza de impacto hidráulico .....	59

2.3 DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACION (ECD).....	61
2.3.1 Cálculos para determinar la (ECD). .....	62
2.3.2 Factores que afectan la ECD. ....	63
2.4 LIMPIEZA DEL POZO .....	63
2.4.1 Métodos para limpiar un pozo.....	65
3. BOMBAS.....	69
3.1 Especificaciones de bombas.....	69
3.2 Calculo de la tasa de bombeo.....	74
3.3 POTENCIA DE LA BOMBA .....	75
4. MANUAL DEL USUARIO.....	76
4.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PHP.....	76
4.2 INICIACION DEL PROGRAMA.....	77
4.3 VISTA GENERAL DEL PROGRAMA E INGRESO DE DATOS.....	80
4.4 GENERACIÓN DE RESULTADOS.....	85
5. CONCLUSIONES .....	88
6. RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFIA.....	92
ANEXOS.....	92

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación de un Flujo Laminar .....	20
<b>Figura 2.</b> Representación de un Flujo Turbulento .....	21
<b>Figura 3.</b> Representación de dos capas de fluido en un canal de flujo .....	23
<b>Figura 4.</b> Viscosímetro de Cilindro Coaxial Tipo Couette .....	24
<b>Figura 5.</b> Representación de Esfuerzo Cortante .....	25
<b>Figura 6.</b> Perfil de comportamiento de Esfuerzo de Corte .....	25
<b>Figura 7.</b> Rango sugerido de viscosidad plástica para lodos base agua.....	28
<b>Figura 8.</b> Comportamiento de un fluido Newtoniano .....	29
<b>Figura 9.</b> Comportamiento el modelo plástico de Bingham.....	31
<b>Figura 10.</b> Comportamiento del modelo de Ley de Potencia .....	32
<b>Figura 11.</b> Representación del logaritmo del esfuerzo y la deformación.....	33
<b>Figura 12.</b> Dibujo esquemático del sistema de circulación.....	37
<b>Figura 13.</b> Sistema Circulación Generalizado .....	39
<b>Figura 14.</b> Swivel.....	40
<b>Figura 15.</b> Válvula contra reflujo entre la conexión de Swivel y Kelly.....	40
<b>Figura 16.</b> Representación del flujo del lodo en e pozo .....	44
<b>Figura 17.</b> Flujo Laminar en tubería .....	45
<b>Figura 18.</b> Flujo Turbulento en tubería .....	45
<b>Figura 19.</b> Broca Tricónica, estructura de corte convencional.....	51
<b>Figura 20.</b> Diferencia entre Potencia Hidráulica y Fuerza de Impacto .....	60
<b>Figura 21.</b> Bombas Dúplex.....	70
<b>Figura 22.</b> Bombas Triplex.....	71
<b>Figura 23.</b> Amortiguador DAMPER .....	72
<b>Figura 24.</b> SUCTION DAMPER.....	73
<b>Figura 25.</b> Inicio del programa.....	77
<b>Figura 26.</b> Opciones desplegadas.....	78
<b>Figura 27.</b> Listado de pozos.....	79

<b>Figura 28.</b> Datos de Entrada, estado mecánico: Geometría del hueco.....	80
<b>Figura 29.</b> Sección de tubería .....	81
<b>Figura 30.</b> Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación .....	81
<b>Figura 31.</b> Caudal para perforar .....	82
<b>Figura 32.</b> Número de Nozzle .....	83
<b>Figura 33.</b> Tipo de modelo hidráulico .....	83
<b>Figura 34.</b> Selección del tipo de equipo de superficie .....	84
<b>Figura 35.</b> Método para pérdidas en el Stand Pipe y Broca.....	84
<b>Figura 36.</b> Pérdidas en las conexiones de superficie, sarta y anular. ....	85
<b>Figura 37.</b> Pérdidas en el Stand Pipe y Broca .....	86
<b>Figura 38.</b> Especificaciones de los Nozzle o Boquillas .....	86

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Tipos de conexiones Superficiales .....	42
<b>Tabla 2.</b> Valores de la constante E .....	43

## ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Nomenclatura .....	94
<b>Anexo B.</b> Sumario de ecuaciones: Pérdidas de presión dentro de la sarta de perforación.....	95
<b>Anexo C.</b> Sumario de ecuaciones: Pérdidas de presión en el anular.....	96
<b>Anexo D.</b> Tipos de conexiones superficiales.....	97
<b>Anexo E.</b> Valores de la constante E.....	98
<b>Anexo F.</b> Ejemplo de aplicación .....	99

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA CÁLCULOS DE HIDRÁULICA COMO PREVENCIÓN DE INCIDENTES OPERACIONALES<sup>1</sup>

**AUTORES:** JADER ENRIQUE NAVARRO INFANTE

JENNY KATHERINE CARRILLO HERNANDEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Hidráulica, perforación, modelos reológicos, limpieza de pozo, pérdidas por fricción.

En las operaciones de perforación es fundamental efectuar un hueco estable y permanente para obtener los hidrocarburos del yacimiento. Este tipo de procedimientos se desarrolla mediante un taladro de perforación, en el cual, los sólidos o cortes de la broca del mismo son arrastrados por el lodo y expulsados por la zona anular de la tubería con el objetivo central de limpiar el fondo del pozo. Existen dos maneras de transportar los sólidos del pozo a la superficie; la primera es con el aumento en el caudal del lodo considerando la hidráulica y la segunda involucra, las capacidades de arrastre del lodo, en donde inciden la reología y las propiedades del fluido.

Para la ingeniería de petróleo es de vital importancia los cálculos de la hidráulica para mantener un hueco limpio y estable, porque así se garantizara tasas de perforación óptimas, libre rotación de la sarta, riesgo mínimo de pega de tubería, entre otras. Además, durante la etapa de perforación, se pueden presentar diferentes problemas operacionales, causando sobrecostos. Por esto se quiere generar una herramienta confiable y de fácil manejo que permita observar fácilmente los resultados requeridos, el cual beneficiara a los estudiantes ya que serviría como material de apoyo para las clases a estudiantes de pregrado y posgrado.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Pregrado.

\*\* Faculta de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.  
Director: Ing. Werney Machuca Boada. Co-Director: Julián Quintero Silva

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SOFTWARE TOOL FOR  
HYDRAULIC CALCULATIONS AS PREVENTION OF INCIDENTS  
OPERATIONAL<sup>2</sup>

**AUTHORS:** JADER ENRIQUE NAVARRO INFANTE  
JENNY KATHERINE CARRILLO HERNANDEZ\*\*

**KEYWORDS:** Hydraulic, drilling, rheological models, hole cleaning, friction losses.

In drilling operations it is essential to carry out a stable and permanent hole for the oil reservoir. This type of procedure is developed through a drilling rig, in which solid or cuts the bit of it are dragged through the mud and expelled by the annular zone of the pipe with the main objective to clean the bottom hole. There are two ways of transporting solids from the well to the surface; the first is to increase the mud flow considering the hydraulic and the second involves, drag capabilities mud, where affect rheology and fluid properties.

For petroleum engineering is vital hydraulic calculations to maintain a clean and stable hole, because this would guarantee optimum drilling rates, free rotation of the drill string, minimal risk of stuck pipe, among others. Also, during the drilling stage, they may to present different operational problems causing cost overruns. This is intended generate a reliable tool and easy to handle that allowing to observe the required results, which will benefit students and to serve as support material for classes to undergraduate and graduate students.

---

<sup>2</sup> Undergraduate Project.

\*\* Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School.  
Director: Ing. Werney Machuca Boada. Co-Director: Julián Quintero Silva.

## INTRODUCCIÓN

En las diferentes operaciones de perforación, siempre corremos el riesgo que se presenten problemas operacionales que afectan los objetivos de esta misma, daños en la maquinaria y en el peor de los casos la vida de las personas. Por tal motivo es muy importante para la industria del petróleo, mantener el control en todas sus actividades, en especial la de la perforación; Siendo parte fundamental la limpieza del pozo, la hidráulica y mantener los parámetros apropiados para mantener siempre optimizado la perforación. De tal forma que es fundamental entender que parámetros y propiedades afectan directa e indirectamente las operaciones de perforación con el fin de disminuir la subjetividad del ingeniero que intérprete eficazmente las situaciones en una perforación,

Por eso hoy en día se necesitan herramientas prácticas, de fácil manejo que permitan una mejor interpretación a la hidráulica, tanto para la vida laboral, como para la base de aprendizaje en las universidades, ya que es la hidráulica la base para prevenir diversos problemas operacionales y pérdidas excesivas de presión.

En este proyecto tendremos una herramienta la cual usará los modelos y correlaciones de capacidades dependiendo de las características del pozo, además permitirá al usuario seleccionar los modelos más convenientes según las propiedades de los lodos a utilizar, tales como modelos reológicos de Bingham y ley de potencia, para poder hallar el cálculo de la pérdida de presión por fricción. Igualmente la facilidad y práctica de obtener recomendaciones para las bombas y la optimización de la broca, área y número de boquillas recomendable para cada operación, la cual le permitirá al usuario, una mejor práctica y una guía cuando hablamos de limpieza e hidráulica de pozos.

## 1. GENERALIDADES DE REOLOGÍA

La mayoría de los parámetros hidráulicos, primero que todo, dependen del tipo de fluido de perforación y del modelo que se esté utilizando para los cálculos. De manera que se le deba suministrar al lodo ciertas propiedades fisicoquímicas (densidad, viscosidad, esfuerzo de gel), para poder culminar exitosamente una operación.

La reología es la ciencia de la deformación de los materiales (si son sólidos) o de su flujo (si son líquidos) bajo un esfuerzo aplicado. En caso de fluidos de perforación la reología es el estudio de las características que definen el flujo y las propiedades gelatinizantes del mismo.

Las razones por las cuales es de vital importancia estudiar la reología son:

- Que tan bueno es el transporte de los recortes.
- Que tan buena es la limpieza de los ripios en la cara de la barrena.
- Cuáles son las pérdidas por fricción en el sistema.
- Como se comporta el sistema de fluido con los regímenes de flujo que se emplean en el pozo.
- En otras palabras se necesita entender la hidráulica de los fluidos de perforación.

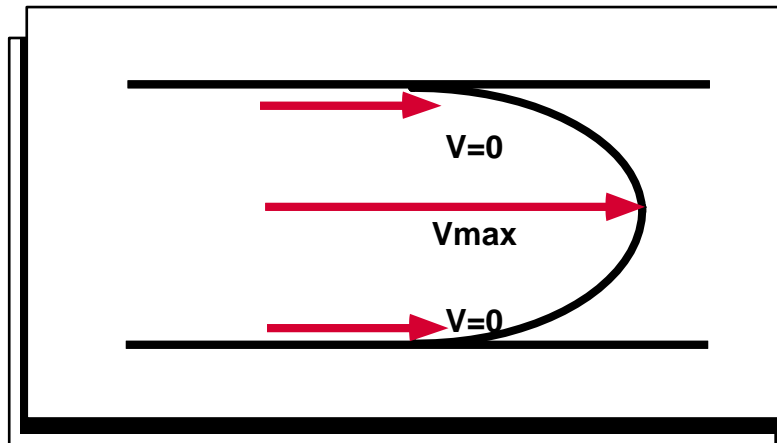
## 1.1 PATRONES DE FLUJO

El tipo de patrón de flujo es determinado por la velocidad del fluido, los diámetros anulares y las características del lodo.

Por lo general, a menor velocidad de fluido y mayor diámetro anular, el flujo tiende a ser laminar. Mientras que un patrón de flujo turbulento se da cuando la velocidad del fluido es alta y cuando se tiene un espacio anular pequeño, es decir, alrededor de la sección de los collares (drill collar).

### 1.1.1 Flujo Laminar

**Figura 1.** Representación de un Flujo Laminar



**Fuente:** Introducción a la reología-Schlumberger, pág. 4.

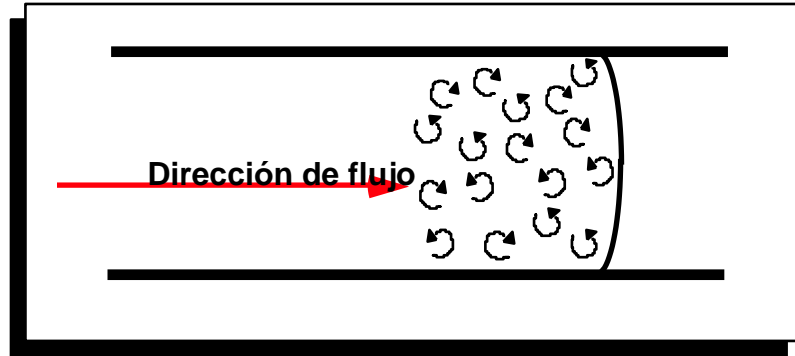
El flujo laminar se caracteriza por:

- Movimiento de deslizamiento
- Velocidad en la pared = 0
- La velocidad máxima se encuentra en el centro
- $V_{max}=2V$

Donde  $V$ = velocidad promedio de la partícula

### 1.1.2 Flujo turbulento

**Figura 2.** Representación de un Flujo Turbulento



**Fuente:** Introducción a la reología- Schlumberger, pág. 5.

- Con flujo turbulento, el patrón del flujo es aleatorio en tiempo y espacio, con movimiento caótico y desordenado de las partículas del fluido.
- Con movimiento caótico y multidireccional e incremento de fricción; las fuerzas, la resistencia de corte son mucho mayores en el flujo turbulento que en el flujo laminar.
- Se presentara flujo turbulento a velocidades de flujo altas con un perfil de velocidad que tiende a ser uniforme a pesar de los movimientos caóticos.

Por esta razón el flujo turbulento es realmente más efectivo en la remoción de rípios, aunque las desventajas son mayores que las ventajas.

Desventajas:

- Erosión de rípios, lo cual destruye las propiedades interpretativas.
- Posibilidad de erosión del hueco.
- Aumento es las pérdidas de presión debido a fuerzas de fricción altas del movimiento del fluido, a velocidades altas y mayor contacto con la pared.

### 1.1.3 Flujo transicional.

Realmente no hay cambios instantáneos de flujo laminar a flujo turbulento a medida que la velocidad del fluido se incrementa. Obviamente existirá un periodo transicional donde los flujos cambian de un estado a otro. Este flujo transicional presentará elementos de flujo laminar y turbulentos.

La transición de flujo laminar a flujo turbulento es controlada por la relativa importancia de las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales presentes en el flujo; en flujo laminar dominan las fuerzas viscosas, mientras que en flujo turbulento las fuerzas inerciales son más importantes. La relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas resulta en el número de Reynolds para tubería, definido por:

$$N_{Re} = \frac{15,467 d * v * \rho}{\mu}$$

Donde d es el diámetro del canal de flujo en pulgadas, V es la velocidad promedio de flujo (pies/minuto),  $\rho$  es la densidad del fluido (Libras/galón), y  $\mu$  es la viscosidad del fluido (cP). Si el número de Reynolds es menor a 2000 se presenta flujo laminar, si está entre 2000 y 4000 flujo transición, y mayor a 4000 turbulento.<sup>1</sup>

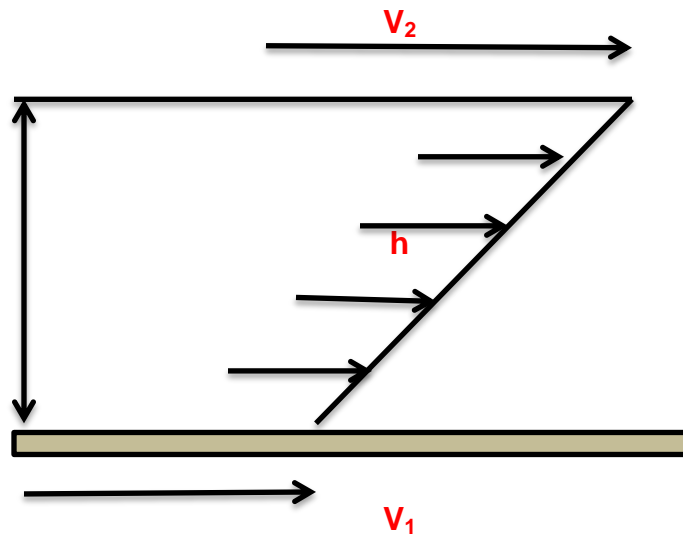
## 1.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL LODO

**1.2.1 Tasa de corte.** La Tasa de corte en un fluido simple, es el cambio de velocidad dividido por el ancho del canal a través del cual el fluido se está moviendo, (Figura 3).

---

<sup>1</sup> ESTERLIN, Juan Gabriel y GOMEZ, Miguel Armando. Metodología para el cálculo de reología e hidráulica para pozos estratigráficos profundos, usando una herramienta software (compass y well plan). Trabajo de grado Ingeniero de petróleos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2011. 26

**Figura 3.** Representación de dos capas de fluido en un canal de flujo



**Fuente:** Hidráulica del fluido de perforación-Datalog, pag14.

$$(\gamma)(seg^{-1}) = \frac{\Delta V}{\Delta r} = \frac{V_2 - V_1}{h}$$

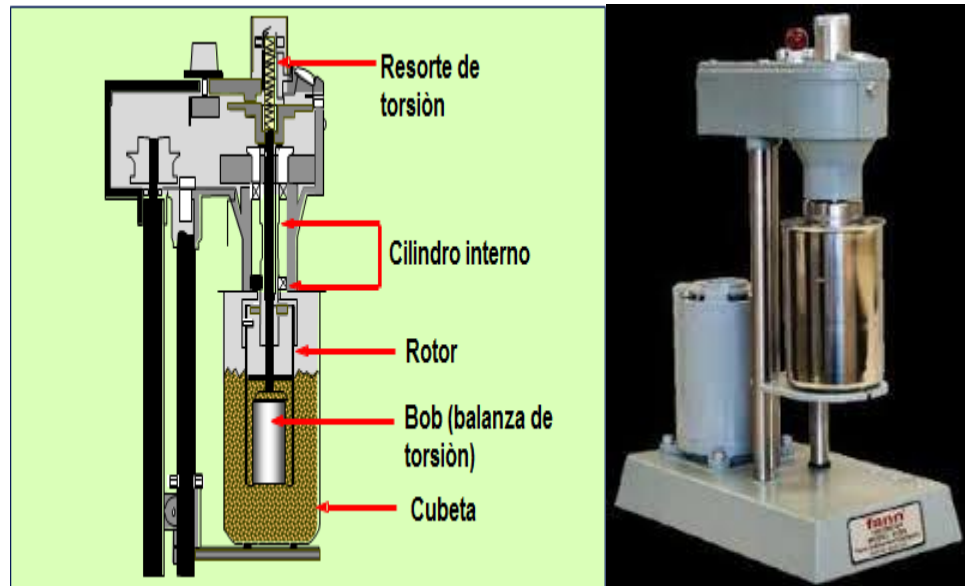
Dónde:

- $\Delta V$  es el cambio de velocidad entre las capas de fluidos.
- $h$  es el ancho del canal de fluidos.

Dentro de un sistema de circulación de un equipo de perforación, la velocidad de corte depende de la velocidad promedio del lodo en la sección que está atravesando en ese momento. Así las velocidades de corte son muy altas en las boquillas de la broca. Son más bajas en la sarta, y todavía menores en el anular. Un cambio en el caudal de la bomba afectara las velocidades de corte en todo el sistema.

En el pozo la tasa de corte se determina por la velocidad rotacional del viscosímetro de Fann en el que se realizan las pruebas, (figura 4).

**Figura 4.** Viscosímetro de Cilindro Coaxial Tipo Couette



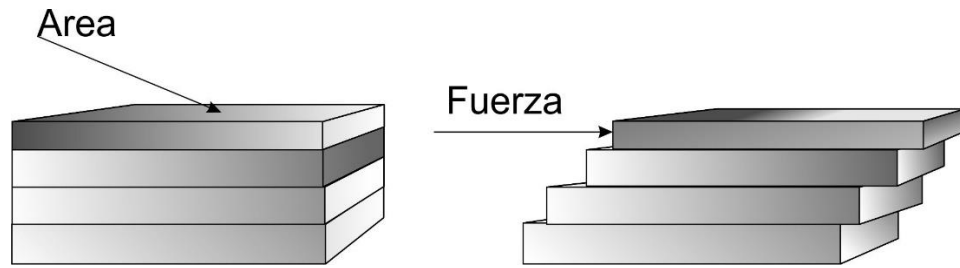
**Fuente:** Introducción a la reología- Schlumberger, pág. 13.

**1.2.2. Esfuerzo de corte.** El esfuerzo cortante es la fuerza por unidad de área que se requiere para mover un fluido a una tasa de corte dada, (Figura 5).

De esta manera el Esfuerzo Cortante es registrado a velocidades rotacionales de:

- 600 (tasa de corte= $1022 \text{ seg}^{-1}$ )
- 300(tasa de corte = $511 \text{ seg}^{-1}$ )
- 200, 100,6 y 3 rpm.

**Figura 5. Representación de Esfuerzo Cortante**



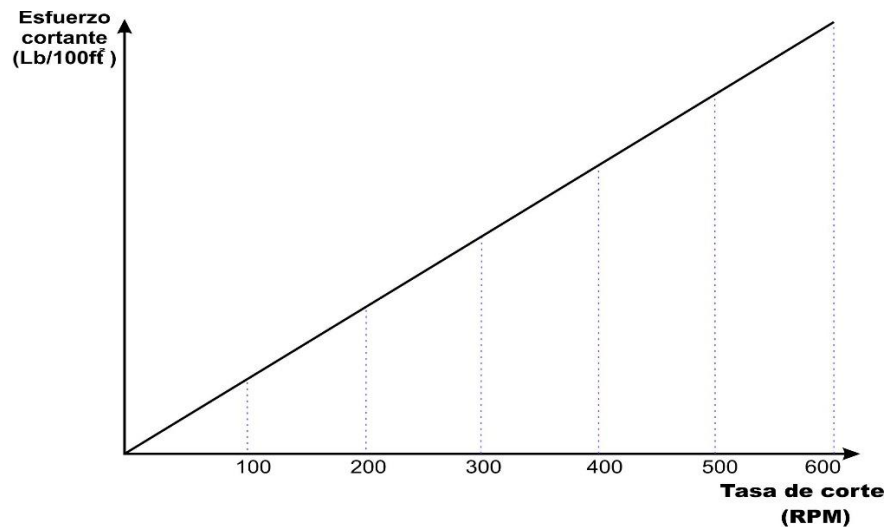
Fuente: Autor

El esfuerzo de corte  $\tau$  es representado matemáticamente la razón entre la fuerza aplicada ( $F$ ) y el área superficial ( $A$ ) sujeta el esfuerzo.

$$\tau \left( \frac{Lb * pie}{Pulg^2} \right) = \frac{F}{A}$$

Los esfuerzos de corte registrados para cada una de las tasas de corte a diferentes velocidades del viscosímetro se pueden plantear para obtener un perfil del comportamiento completo a través del “espectro reológico”.

**Figura 6. Perfil de comportamiento de Esfuerzo de Corte**



Fuente: Hidráulica del fluido de perforación-Datalog, pag15.

**1.2.3. Viscosidad del fluido.** Matemáticamente, la viscosidad se determina dividiendo el esfuerzo cortante de un fluido por la correspondiente tasa de corte.

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\text{dinas/cm}^2}{\text{seg}^{-1}} = \text{Poise}$$

La viscosidad controla la magnitud del esfuerzo cortante que se desarrolla en una capa que se desliza sobre otra. Es una medida de la fricción sobre entre capas de fluido, aportando una escala para describir el espesor del fluido. Disminuirá con la temperatura. En términos simples, describe el espesor del lodo cuando está en movimiento.

- **Viscosidad Efectiva (cP):** La viscosidad efectiva ( $\mu_e$ ) de un fluido es la viscosidad de un fluido bajo condiciones específicas de velocidad de corte, presión y temperatura. El término de viscosidad efectiva es usado para describir la viscosidad medida o calculada correspondiente a la tasa de corte existente en las condiciones de flujo en el pozo o en la sarta de perforación.
- **Viscosidad Aparente (cP):** La viscosidad aparente (VA) está indicada por la lectura del viscosímetro de Fann a 300 RPM ( $\Theta 300$ ) o la mitad de la indicación del viscosímetro a 600 RPM ( $\Theta 600$ ). Cabe indicar que ambos valores, de viscosidad aparente y efectiva concuerdan con la fórmula de viscosidad a 600 RPM.

**1.2.4. Viscosidad plástica y punto de cedencia.** Para un fluido Bingham (ver siguiente sección), la viscosidad plástica (VP) es la cantidad de esfuerzo cortante adicional al esfuerzo cedente (Yield Stress) que inducirá una unidad de tasa de corte. Más simplemente, es la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte durante el movimiento del fluido. Es la pendiente de la línea recta que pasa a través  $\theta_{600}$  y  $\theta_{300}$  (el esfuerzo causado por las velocidades rotacionales de 600 y 300 rpm).

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

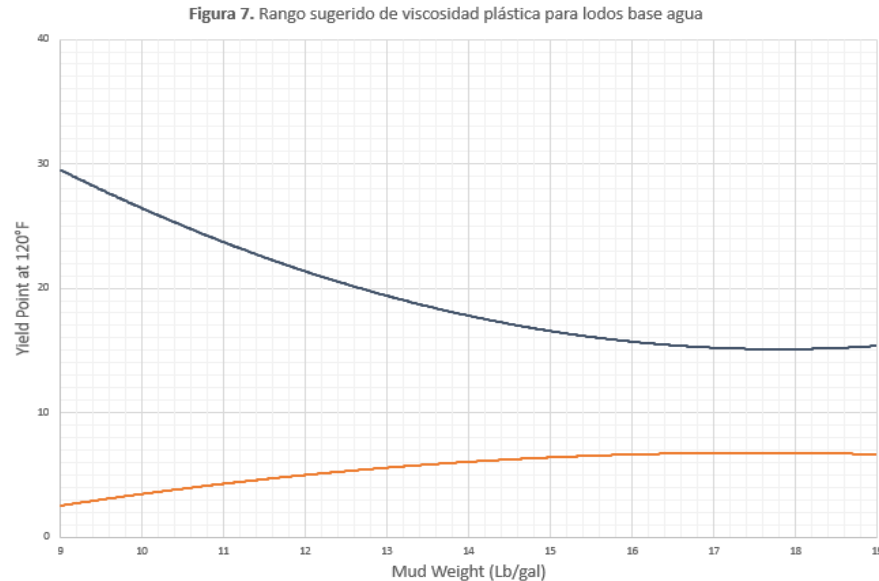
Mientras que el punto cedente, es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido. Estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas ubicadas en o cerca de las superficies de las partículas. El punto cedente es una medida de estas fuerzas bajo las condiciones de flujo, y depende de las propiedades superficiales de los sólidos del fluido, la concentración volumétrica de los sólidos, y el ambiente eléctrico de estos sólidos (concentración y tipos de iones en la fase líquida del fluido).

$$(YP) \left( \frac{Lb}{100 \text{ pies}^2} \right) = 2 * \theta_{300} - \theta_{600}$$

$$(YP) \left( \frac{Lb}{100 \text{ pies}^2} \right) = \theta_{300} - PV$$

Las interacciones eléctricas de los sólidos son controladas por tratamiento químico, y la interacción mecánica por ajuste del tipo y cantidad de sólidos o polímeros en el lodo. La figura 7 muestra el rango de yield point en función de la densidad para lodos base agua.

**Figura 7.** Rango sugerido de viscosidad plástica para lodos base agua



**Fuente:** Drilling Fluid Technology – Exxon, Pág. 70

**1.2.5 Esfuerzo de gel.** El esfuerzo de gel es la capacidad del lodo a desarrollar y retener una estructura en gel. Es análogo al esfuerzo al esfuerzo cortante y define la habilidad del lodo para sostener sólidos en suspensión. Mas simplemente, describe el espesor de un lodo que ha estado en reposo por un cierto periodo de tiempo (diferencia de la viscosidad que describe el espesor del lodo cuando está en movimiento).

Este también es una medida de la propiedad engrosamiento de un fluido y es función del tiempo. Las medidas son por lo tanto conducidas después de 10 segundos y 10 minutos. Unidades normales de medida (lb/100 pies<sup>2</sup>).

Con la duración de una operación de perforación, es decir la “edad” de un fluido de perforación, la viscosidad y el esfuerzo cortante tienden a incrementarse como resultado del aporte de sólidos dentro del sistema del lodo. Se debe agregar más líquido para compensar esto, o remover los sólidos mediante el uso de centrífugas.

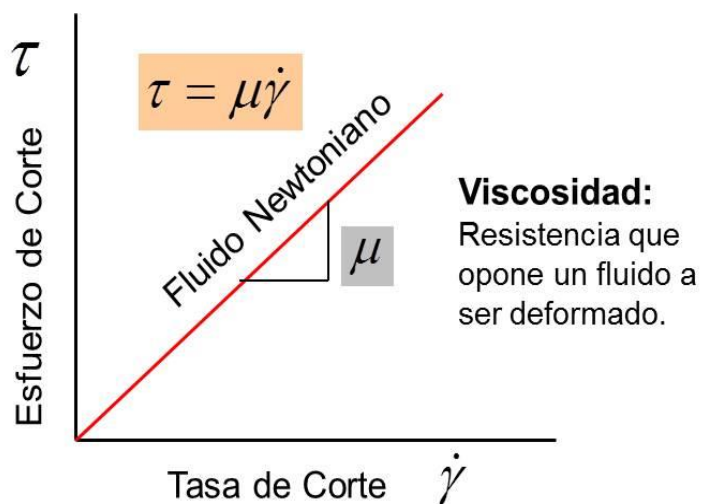
### 1.3. MODELOS DE COMPORTAMIENTOS DE LOS FLUIDOS

Un modelo reológico es una descripción matemática de la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, y proporcionan asistencia en la caracterización de flujo de fluidos. Los reogramas son la representación gráfica del modelo reológico (esfuerzo de corte contra tasa de corte).

Para determinar exactamente el reograma para un fluido no newtoniano, es necesario utilizar un viscosímetro de velocidad variable, pues no hay una ecuación que describa precisamente la reología de todos los lodos, porque son muy variados y complejos. Los modelos aplicados a fluidos no newtonianos son el modelo plástico de Bingham, Ley de Potencia.

**1.3.1. Fluidos Newtonianos.** Un fluido Newtoniano comenzará a moverse o a deformarse en el instante en el que se aplica una fuerza o esfuerzo cortante. Una vez se ha iniciado el movimiento, el grado de movimiento es proporcional al esfuerzo aplicado. Es decir, existe una relación lineal entre el Esfuerzo Cortante y la Tasa de Corte.

**Figura 8.** Comportamiento de un fluido Newtoniano



**Fuente:** Hidráulica del fluido de perforación-Datalog, pág. 17.

Por lo tanto, para un fluido Newtoniano:

$$\tau = \mu * \gamma$$

Dónde:

- $\tau$  es el esfuerzo cortante.
- $\gamma$  es la tasa de corte.
- $\mu$  es la viscosidad.

La mayoría de los fluidos de perforación y las lechadas de cemento, presentan un comportamiento no Newtoniano donde el flujo laminar la relación entre esfuerzo cortante y tasa de corte no es lineal. Estos fluidos también requieren una cierta cantidad de esfuerzo cortante para iniciar el flujo por lo que resulta necesario aplicar un esfuerzo adicional a medida de que la tasa de corte se incrementa.

El nivel de esfuerzo cortante requerido para iniciar el flujo de un fluido se conoce como el Punto de Cedencia del fluido (Yield Point).

Se han utilizado dos modelos principales como un estándar en la industria petrolera:

1. El modelo **Plástico de Bingham**.
2. El modelo **de Ley de Potencia**.

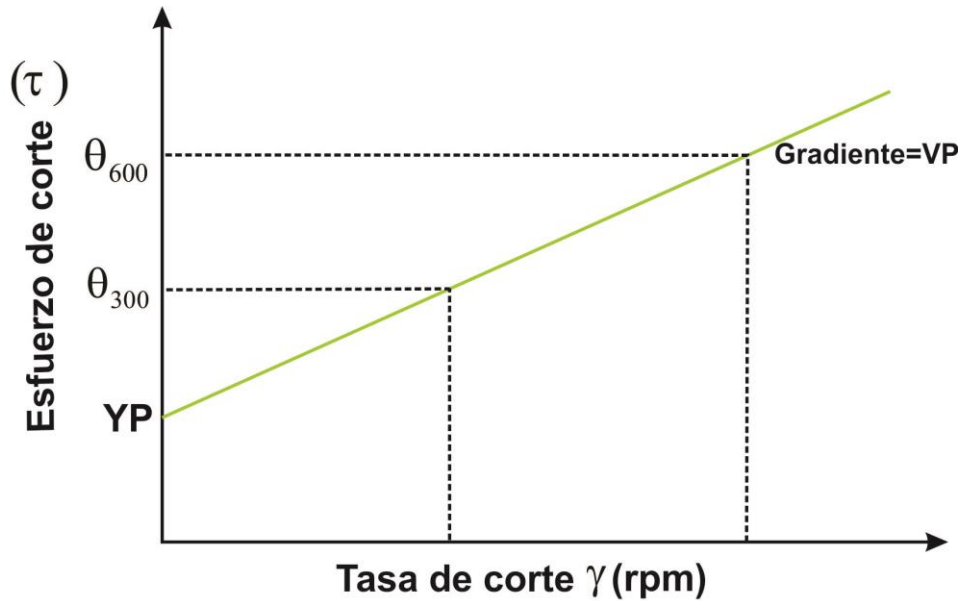
Recientemente, se acepta, generalmente que ambos modelos tienen méritos, pero el modelo de Ley de Potencia se aplica más a la mayoría de los fluidos.

**1.3.2 Modelo plástico de Bingham.** Este modelo predice que el movimiento del fluido ocurrirá solo después que se haya aplicado un valor mínimo de Esfuerzo Cortante. Este valor mínimo es el Punto de Cedencia o Yield Point del fluido.

Una vez se ha iniciado el movimiento, la relación entre Esfuerzo Cortante y la Tasa de Corte es lineal(es decir, Newtoniano), con la constante denominada

viscosidad plástica (VP). En donde la viscosidad plástica depende de la temperatura y la presión.

**Figura 9.** Comportamiento el modelo plástico de Bingham



**Fuente:** Hidráulica del fluido de perforación-Datalog, pág. 19.

Para fluidos Bingham:

$$\tau = YP + \gamma * VP$$

$$VP = \theta_{600} - \theta_{300}$$

$$YP = \theta_{300} - VP = \tau_0$$

El modelo plástico de Bingham representa, de manera acertada, el comportamiento de fluidos tales como lechadas de bentonita, cemento clase G y aceites de baja gravedad. Un fluido Bingham tendrá una alta viscosidad, pero no esfuerzo de gel.

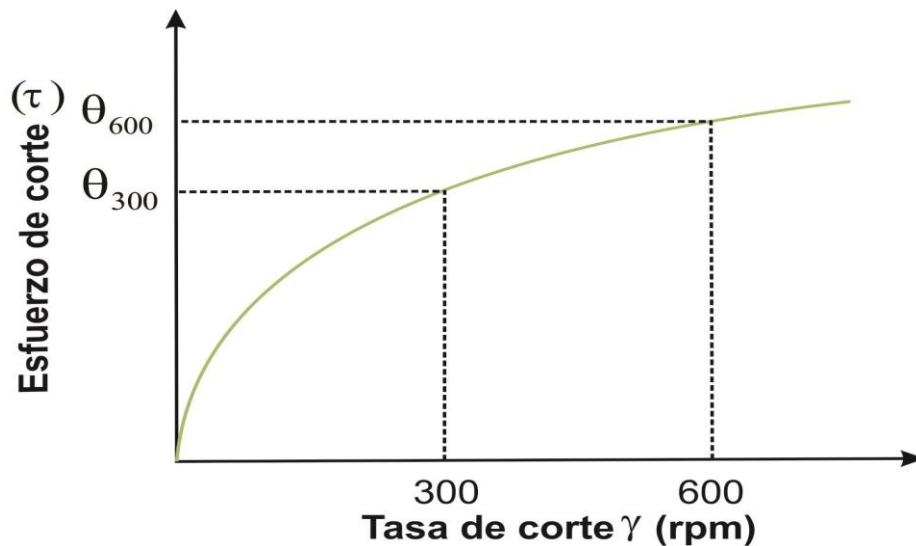
Para fluidos más complejos, el modelo de Bingham está sujeto a errores. Si bien el modelo Bingham simula el comportamiento de un fluido a una tasa alta de corte (300 a 600 rpm), es generalmente inexacto en las tasas de corte bajas.

Los esfuerzos cortantes medidos a altas tasas de corte son usualmente pobres indicadores del comportamiento del fluido a bajas tasas de corte, el área de interés y que constituyen el área de interés para simular el comportamiento del flujo en el anular. Sujeto a este error, el punto de cedencia tiende a dar resultados en pérdidas de presiones calculadas y densidades de circulación equivalentes que son mayores a las observadas actualmente.

**1.3.3 Modelo de Ley de Potencia.** El modelo de Ley de Potencia asume que el movimiento del fluido se iniciará inmediatamente se aplique cualquier esfuerzo cortante.

El modelo entonces predice que, que una vez se ha iniciado el movimiento, los fluidos muestran una relación no lineal entre Esfuerzo Cortante y la Tasa de Corte e induce dos valores “índice “para determinar la relación.

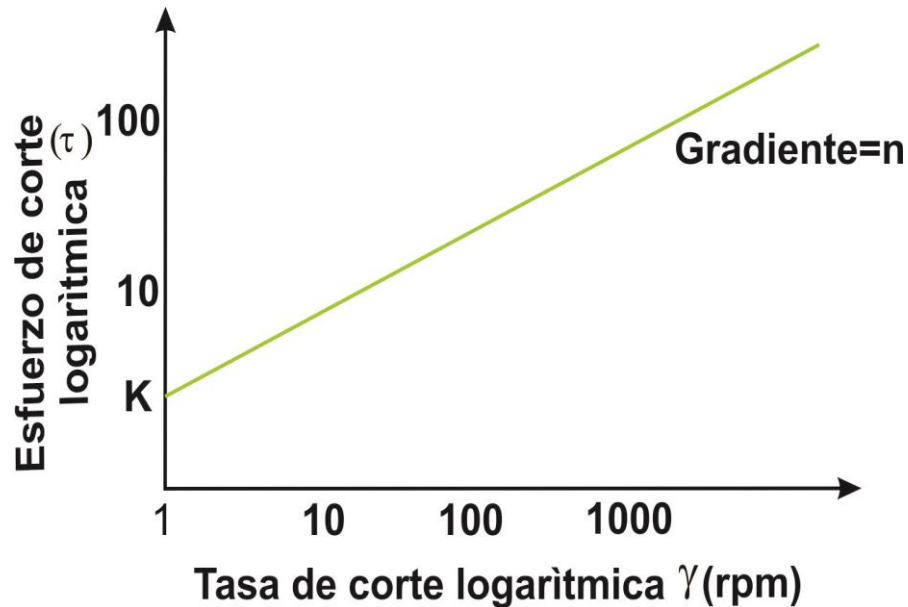
**Figura 10.** Comportamiento del modelo de Ley de Potencia



**Fuente:** Hidráulica del fluido de perforación-Datalog, pág. 20.

Al representar gráficamente el logaritmo del esfuerzo y la deformación se tiene:

**Figura 11.** Representación del logaritmo del esfuerzo y la deformación



**Fuente:** Hidráulica del fluido de perforación-Datalog, pág. 20.

Para el modelo de Ley de Potencia se tiene:

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

*Donde:*

*k = índice de consistencia*

*n = índice del comportamiento del flujo*

Calculo de n y k:

$$n = 3.32 * \text{Log} \left( \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right) \quad k = \left( \frac{\theta_{300}}{500^n} \right)$$

El modelo reológico de Ley de Potencia es el que mejor se ajusta a la mayoría de los fluidos más que el modelo Plástico de Bingham, especialmente fluidos de base polímero.

Los fluidos que siguen este modelo no presentan esfuerzo cortante cuando la tasa de corte es cero. El inconveniente en este caso, es que la mayoría de los fluidos tienen un punto de cedencia, pero no se pueden considerar en este modelo.

De manera similar al modelo Plástico de Bingham, pero en menor grado, el modelo de Ley de Potencia predice exactamente el comportamiento del fluido a tasas de corte altas, pero muestra un margen de error a tasas de corte bajas.

El resultado de esto, es que la pérdida de presión en el anular y el ECD son “subestimados” por los cálculos del modelo. En la mayoría de los casos, el modelo de Ley de Potencia se aproxima bastante a las propiedades del fluido aun cuando son calculadas a partir de valores de tasas de corte altos.

Es posible obtener valores de “n” diferentes, dependiendo de los pares de esfuerzo cortante/tasa de corte que se usan en el cálculo. Así pues, este modelo se puede aplicar usando datos de una escala de tasas de corte anulares, proporcionando una mejor precisión en la predicción del desempeño del fluido de perforación.

## 2. FUNDAMENTOS DE HIDRÀULICA

En la realización de unos buenos cálculos hidráulicos y una elección adecuada de los fluidos de perforación, está uno de los pasos trascendentales para lograr una perforación exitosa de un pozo. Todos los parámetros que permitan llevar por un camino ideal en la perforación y su limpieza adecuada son de gran importancia, tales como escoger un buen tipo de lodo, un caudal adecuado, tener en cuenta la clase de litología que se va a perforar y los problemas que se consideran como críticos durante la perforación, en donde las propiedades fisicoquímicas también juegan un papel muy importante de manera que se obtenga un lodo con ciertas propiedades (densidad, viscosidad, pérdida de agua y fuerza de gel) que permitan la culminación exitosa de la operación.

La hidráulica en particular se ocupa de los efectos ligados a la viscosidad, el caudal y las presiones de circulación sobre el desempeño del fluido de perforación para el cumplimiento de sus diferentes funciones. Aunque cabe recalcar que no todas las propiedades del flujo son positivas en algunos casos, siendo algunas propiedades causa de varios problemas operacionales si no se lleva una adecuada revisión, por tal motivo siempre se trata de buscar un equilibrio entre los distintos parámetros involucrados en la hidráulica de manera que se obtenga un mínimo perjuicio de uno sobre otro.

Siendo así que las diferentes ecuaciones que han sido utilizadas para hidráulica de fluidos, se han construido usando parámetros de varios los modelos, tales como el de Bingham y de la ley de potencia. Cualquier error en el cálculo de caídas de presión, puede producir nuevos errores en otros cálculos, tales como la densidad equivalente de circulación (ECD)

## **2.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN EL SISTEMA CIRCULATORIO.**

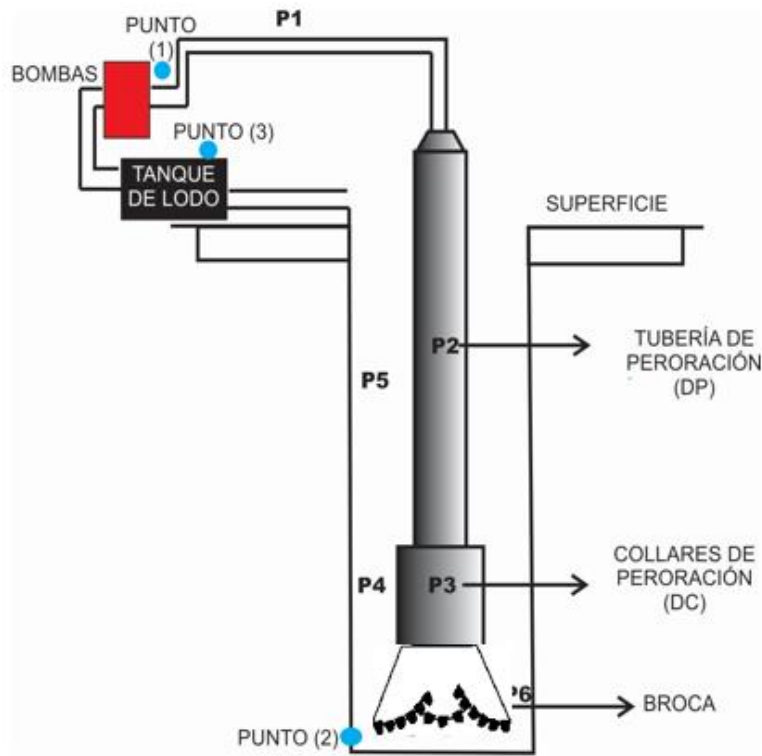
La utilización adecuada de la hidráulica en la broca y la determinación de las pérdidas de presión en las distintas partes de la sarta de perforación, son algunos de los temas que vamos a tocar en este capítulo sobre el sistema circulatorio y sus pérdidas debido a la fricción.

Existen varios modelos para el cálculo de las pérdidas de presión en las tuberías y collares. Cada modelo se basa en un conjunto de supuestos que no pueden ser completamente cumplidos en cualquier situación de perforación, dando así un mayor interés debido a la importancia de este en la perforación de un pozo y su variabilidad.

En el sistema circulatorio en general podemos encontrar diversidad de momentos en donde las pérdidas de fricción afectan la perforación, así igual otros criterios, entre los cuales y más notorios encontramos:

- Pérdidas de presión totales
  - Pérdidas de conexión de superficie
  - Pérdidas de tuberías y anulares
  
- Optimización hidráulica de broca
- Presión de la bomba de superficie
- Selección de Nozzle
- Caudal óptimo

**Figura 12.** Dibujo esquemático del sistema de circulación.



**Fuente:** Oil well Drilling Engineer, Principles and practice, H. Rabia Cap.7

En la figura 12, Podemos observar las diversas partes de las conexiones de la sarta de perforación, la broca y en superficie. Debido a los efectos directos de las fuerzas de fricción, el sistema de circulación perderá energía cuando el líquido se bombea desde el punto (1) al punto (2) y de vuelta al punto (3) en el tanque de lodo. Por lo tanto, el primer objetivo de la hidráulica del equipo de perforación es calcular las pérdidas de presión resultantes de las fuerzas de fricción en cada parte del sistema de circulación.

Tales pérdidas de presión en las diferentes partes del sistema de circulación convenientemente pueden ser discutidos en cuatro categorías: (1) las pérdidas de conexión de superficie, (2) las pérdidas de tuberías; (3) pérdidas anulares; y (4) las pérdidas a través de la broca. Estas pérdidas de presión dependen del tipo de fluido utilizado y el tipo de flujo en el sistema de circulación.

Para entender la distribución de la presión del pozo, empezamos considerando un sistema cerrado teniendo en cuenta que posee pérdidas de presión en todo el sistema:

- Cuando el lodo pasa a través de toda la tubería.
- Cuando el lodo pasa a través de la broca.
- Cuando el lodo regresa a través del anular.
- Cuando el lodo es bombeado a través de las líneas de superficies, tales como el Standpipe, la manguera Kelly y las Bombas.

El total de estas pérdidas, es decir, la pérdida total de presión en el sistema sería igual a la presión real medida en el Standpipe y es, por lo tanto, igual a la presión a la cual están operando las bombas.

Esto es una parte importante en la evaluación de la hidráulica. Obviamente, la máxima pérdida de presión posible será determinada por la capacidad de funcionamiento de las bombas y los demás equipos de superficie. Esta máxima pérdida de presión supera a la pérdida de presión deseada por el ingeniero de perforación.

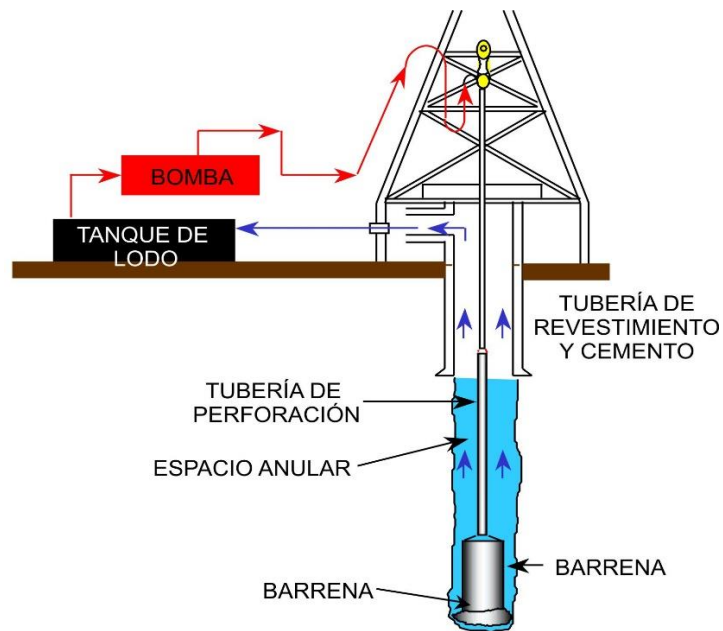
Por tal motivo los ingenieros a cargo deben analizar los parámetros proporcionados y tomar decisiones para una mejor perforación, tales como, el tamaño correcto de las boquillas para lograr la pérdida de presión del sistema requerida.

La pérdida de presión depende de la tasa de flujo, densidad y reología del lodo, de la longitud de cada sección y los diámetros de cada sección de tubería y anular. También es muy importante tener en cuenta el tipo de flujo que se presenta, puesto que este influirá en las pérdidas de presión, dado que el flujo turbulento producirá grandes pérdidas de fricción a diferencia que un flujo laminar.

**2.1.1 Pérdidas por fricción en el equipo de superficie.** El cálculo de las pérdidas de presión debido a los equipos de superficie no está tan bien definida como las otras pérdidas expuestas en el sistema circulatorio, y esto debido que estas dependerán del tipo de equipo presente en el taladro. Es decir, al tipo de bomba, longitud del Standpipe y las líneas de superficie, longitud de la Kelly, entre otros.

Las partes principales del sistema para hallar las pérdidas por fricción en superficie son: Swivel, manguera giratoria, Kelly, Rotary drive (master pushing, Kelly pushing), y la mesa giratoria.

**Figura 13.** Sistema Circulación Generalizado



**Fuente:** Oil well Drilling Engineer, Principles and practice, H. Rabia

El Swivel establece una conexión entre gancho y Kelly, tiene que ser construido extremadamente robusto ya que tiene que llevar el peso total de la sarta de perforación y, al mismo tiempo, proporcionar un sello de alta presión (conexión flexible entre Rotary hose y la rotación Kelly).

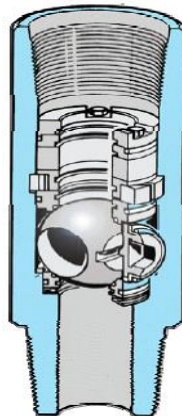
**Figura 14.** Swivel



**Fuente online.** <http://www.jereh-oilfield.com/spain/products/Drilling-Swivel.shtml>

La Kelly tiene una sección transversal cuadrada o hexagonal y proporciona la rotación de la sarta de perforación. La Kelly es de alta calidad, acero tratado, es una de las partes más costosas de la sarta de perforación. Por lo tanto se debe evitar que la Kelly se desgaste en exceso, porque puede causar el rompimiento de las conexiones. Una sub Kelly está montada en el extremo inferior de la misma, para evitar un posible refluo de barro en caso de una patada, la Kelly proporciona una restricción refluo con una válvula que se sitúa a menudo entre Kelly y Swivel.

**Figura 15.** Válvula contra refluo entre la conexión de Swivel y Kelly



**Fuente.** DPT Diseño de Sarta de Perforación y de BHA, Schlumberger

Las estimaciones analíticas con respecto a las caídas de presión en las conexiones superficiales son complejas debido a los cambios de dirección del flujo y la geometría de sus componentes, por eso una forma para la determinación de las caídas de presión sería medidas en campo, circulando el lodo de perforación solamente a través de las conexiones superficiales y verificando los diferentes gastos, Sin embargo no se considera recomendable. Otro de los métodos de cálculo utilizado para este tipo de pérdida por fricción se basa en el modelo Plástico de Bingham para pérdidas de presión en flujos turbulentos.

La tarea de la estimación de las pérdidas de presión de la superficie se complica por el hecho de que tales pérdidas dependen de las dimensiones y geometrías de conexiones superficiales. Estas dimensiones pueden variar con el tiempo, debido a un desgaste continuo de las superficies por los fluidos de perforación. La siguiente ecuación general puede ser usada para evaluar las pérdidas de presión en las conexiones de superficie ( $P_1$ ).

$$P_1(PSI) = E\rho^{0.8}Q^{1.8}(PV)^{0.2}$$

*Donde:*

$$\rho\left(\frac{Lbm}{gal}\right) = \text{Peso del lodo}$$

$$Q\left(\frac{gal}{min}\right) = \text{Caudal volumètric}$$

$E = Cte$  - depende del equipo de superficie

$PV(cP) = \text{Viscosidad Plàstica}$

En la práctica, sólo hay cuatro tipos de equipo de superficie; cada tipo se caracteriza por las dimensiones del tubo vertical, Kelly, manguera rotatoria y Swivel. **La Tabla 1.** Resume los cuatro tipos de equipo de superficie. Generalmente, para las aplicaciones prácticas de campo, las caídas de presión por fricción en las conexiones superficiales se determinan considerando una longitud equivalente de tubería de perforación, de acuerdo con cualquiera de las cuatro combinaciones de equipo superficial mostradas en la Tabla. Para el valor de la constante E en la ecuación de  $(P_1)$ , la encontramos en la **Tabla 2**, dependiendo del valor del caso escogido que represente mejor nuestro equipo superficial, para luego hallar mediante la ecuación el valor de la pérdida por fricción en el equipo de superficie.

**Tabla 1.** Tipos de conexiones Superficiales

CONEXIONES SUPERFICIALES								
COMPONENTES DE LAS CONEXIONES SUPERFICIALES	COMBINACIONES TÍPICAS (CASOS)							
	CASO 1		CASO 2		CASO 3		CASO 4	
	Di [pg]	L[m]	Di [pg]	L[m]	Di [pg]	L[m]	Di [pg]	L[m]
TUBERÍA DE PIE	3.00	12.2	3.50	12.2	4.00	13.7	4.00	13.7
MANGUERA	2.00	13.7	2.50	16.8	3.00	16.8	3.00	16.8
TUBO LAVADOR DE LA UNION GIRATORIA Y CUELLO DE GANSO	2.00	1.2	2.50	1.5	2.50	1.5	3.00	1.8
FLECHA	2.25	12.2	3.25	12.2	3.25	12.2	4.00	12.2
TUBERÍA DE PERFORACIÓN			LONGITUD EQUIVALENTE DE LAS CONEXIONES SUPERFICIALES, EN METROS DE TUBERÍA DE PERFORACION					
Di [pg]	PESO[lb/pie]	Di [pg]						
3.5	13.3	2.764	133.2		49.1		-	
4.5	16.6	3.826	-		232.0		146.0	
5.0	19.5	4.276	-		-		248.8	

**Tabla 2.** Valores de la constante E

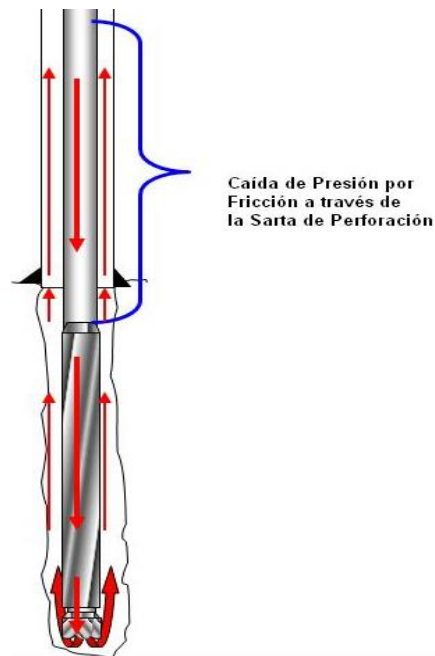
<b>VALORES DE LA CONSTANTE E</b>		
<b>TIPO DE EQUIPO DE SUPERFICIE</b>	<b>VALORES DE E</b>	
	<b>UNIDADES IMPERIALES</b>	<b>UNIDADES MÉTRICAS</b>
<b>1</b>	2.5E-4	8.8E-6
<b>2</b>	9.6E-5	3.3E-6
<b>3</b>	5.3E-5	1.8E-6
<b>4</b>	4.2E-5	1.4E-6

**FUENTE:** Oilwell Drilling Engineering, Principies and practice. H.Rabia

**2.1.2 Pérdidas por fricción dentro de la sarta y el anular.** Inicialmente en las bombas hay pérdidas de presión debido a la fricción a medida que el lodo es bombeado a través de la sarta, siendo estas pérdidas mayores en las secciones inferiores de la sarta, debido que el diámetro interior es más pequeño y la velocidad del lodo se aumentaría.

Las otras pérdidas de presión friccionales relacionadas se presentan a medida que el lodo retorna por el anular, pero son por lo general, las más pequeñas de todo el sistema del hueco. Así como las pérdidas de presión en la sarta, las pérdidas de presión serán mayores hacia el fondo del hueco, alrededor de la sección de los collares (Drill Collar), donde el espacio anular (Diámetro del hueco menos diámetro exterior de la tubería) es muy pequeño y la velocidad anular es alta.

**Figura 16.** Representación del flujo del lodo en e pozo



**Fuente.** Hidráulica avanzada de pozos, HALLIBURTON

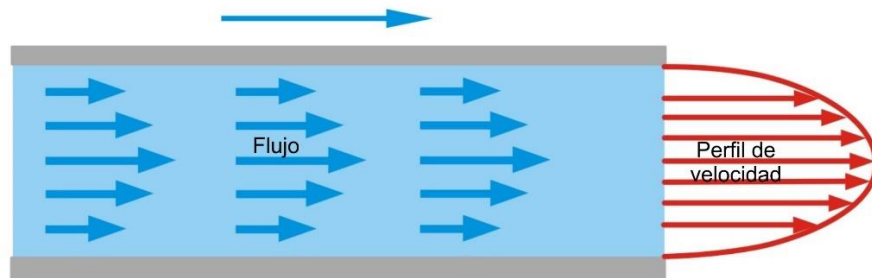
Entonces podemos observar que las pérdidas de fricción las podemos observar de manera similar en ambas partes del sistema por donde se está moviendo el fluido, con capas interactuando entre si y entre las paredes de la sarta, y por el anular teniendo en cuenta los collares y demás herramientas que restrinjan el fluido, así también el tamaño del hueco. Todas estas fuerzas formadas de fricción tienen un gran efecto en las pérdidas de presión resultantes.

Las fuerzas friccionales concurridas son muy diferentes dependiendo el tipo de flujo que ella se presente sea laminar o turbulento siendo que:

- Con flujo laminar, el movimiento del fluido ocurre solamente en una dirección paralelamente a las paredes del conducto por donde vaya, e incrementándose hacia el centro del mismo. Por lo tanto las fuerzas de

fricción serán, por lo tanto, aquellas donde las capas formadas se muevan longitudinalmente una con respecto a la otra.

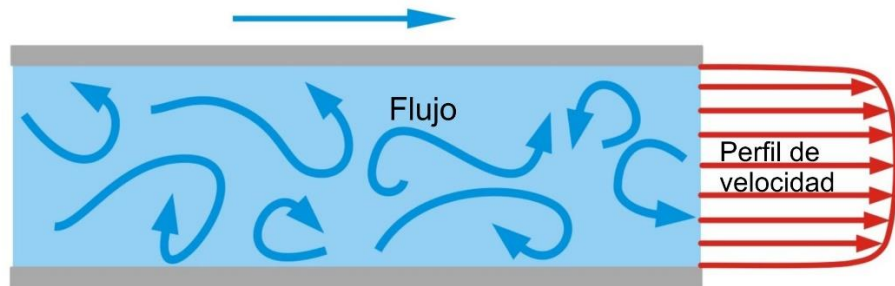
**Figura 17.** Flujo Laminar en tubería



**Fuente.** Flujo De Fluidos A Través De Tuberías, Tubos Y Manguera, ASHM

- Con flujo turbulento, el movimiento del fluido es mucho más complejo y multidireccional, por lo que muchas fuerzas más fricción están presentes.

**Figura 18.** Flujo Turbulento en tubería



**Fuente.** Flujo De Fluidos A Través De Tuberías, Tubos Y Manguera, ASHM

Por esta razón, se determina para cada tipo de flujo unas pérdidas, utilizando un modelo que muestre estos desgastes de fricción dentro de la sarta y anular respectivamente. Dichas Pérdidas por fricción se determinan a partir de las propiedades que directamente afectan el fluido del lodo tales como las velocidades tanto crítica, como promedio, diámetro, densidad y viscosidad efectiva, entre otras.

Para las operaciones de perforación el flujo de fluido de lodo es muy importante. Los siguientes conjuntos de ecuaciones se pueden aplicar para calcular las pérdidas de presión por fricción [psi], la velocidad de cizallamiento en la pared del tubo y el orificio inferior circulación la presión para los diferentes modelos de flujo:

- **Modelo Plástico de Bingham:**

Donde  $\nabla$  y  $V_c$  dentro de la sarta son iguales a:

$$\nabla = \frac{24,5Q}{ID^2} \quad (ft/min)$$

$$V_c = \frac{97Pv + 97\sqrt{Pv^2 + 8,2\rho(ID^2)YP}}{\rho(ID)} \quad (ft/min)$$

Una manera más práctica de poder saber qué tipo de flujo estamos presentando, está dada por las siguientes condiciones debido a la operación con las velocidades presentadas en el fluido.

Si  $\nabla < V_c$ , entonces el Flujo es Laminar y usamos.

- Para flujo laminar en la sarta:

$$P = \frac{L}{300 ID} \left[ YP + \frac{(Pv)\nabla}{5 ID} \right] \quad (Psi)$$

Si  $\nabla > V_c$ , entonces el Flujo es Turbulento y usamos.

- Para flujo turbulento en la sarta:

$$P = \frac{8,91 \times 10^{-5} \rho^{0,8} Q^{1,8} P_v^{0,2} L}{ID^{4,8}} \text{ (Psi)}$$

Para el caso de las perdidas en el anular usamos las condiciones:

Donde  $\nabla$  y  $V_c$  en el anular son iguales a:

$$\nabla = \frac{24,5Q}{Dh^2 - OD^2} \text{ (ft/min)}$$

$$V_c = \frac{97P_v + 97\sqrt{P_v^2 + 6,2\rho(Dh - OD)^2YP}}{\rho(Dh - OD)} \text{ (ft/min)}$$

Si  $\nabla < V_c$ , entonces el Flujo es Laminar y usamos.

- Para flujo laminar en el Anular:

$$P = \frac{L P_v \nabla}{60000 (Dh - OD)^2} + \frac{L YP}{200 (Dh - OD)} \text{ (Psi)}$$

Si  $\nabla > V_c$ , entonces el Flujo es Turbulento y usamos.

- Para flujo turbulento en el anular:

$$P = \frac{8,91 \times 10^{-5} \rho^{0,8} Q^{1,8} P_v^{0,2} L}{(Dh - OD)^3 (Dh + OD)^{1,8}} \text{ (Psi)}$$

$P$  = Perdidas de Fricción (Psi)

$\nabla$  = Velocidad Promedio (ft/min)

$V_c$  = Velocidad Critica (ft/min)

$P_v$  = Viscosidad Plástica (cP)

$YP$  = Yield Point (Lb/100ft<sup>2</sup>)

Q = Caudal de Perforación (gal/min)

$\rho$  = Peso del Lodo (ppg)

ID = Diámetro interno de la tubería (In)

$D_h$  = Diámetro interno del hueco (In)

OD = Diámetro externo de la tubería (In)

- **Modelo Ley de Potencia Hidráulica**

Para este caso tenemos que hallar primero el valor de dos constantes denominadas n y K

$$\theta 600 = 2Pv + YP \quad \theta 300 = Pv + YP$$

Donde n y K están dadas por:

$$n = 3,32 \text{ LOG} \left( \frac{\theta 600}{\theta 300} \right) \quad Y \quad K = \frac{\theta 300}{(511)^n}$$

Donde  $\nabla$  y  $V_c$  dentro de la sarta son iguales a:

$$\nabla = \frac{24,5Q}{ID^2} \quad (ft/min)$$

$$V_c = \left[ \frac{5,82 (10^4) K}{\rho} \right]^{\frac{1}{2-n}} \left[ \frac{1,6 (3n + 1)}{ID \cdot 4n} \right]^{\frac{n}{2-n}} \quad (ft/min)$$

Si  $\nabla < V_c$ , entonces el Flujo es Laminar y usamos.

- Para flujo laminar en la sarta:

$$P = \left[ \frac{1,6\nabla}{ID} \frac{3n + 1}{4n} \right]^n \frac{KL}{300 ID} \text{ (Psi)}$$

Si  $\nabla > V_c$ , entonces el Flujo es Turbulento y usamos.

- Para flujo turbulento en la sarta:

$$P = \frac{8,91 \times 10^{-5} p^{0,8} Q^{1,8} P_v^{0,2} L}{ID^{4,8}} \text{ (Psi)}$$

Para el caso de las pérdidas en el anular usamos la condiciones Donde  $\nabla$  y  $V_c$  en el anular son iguales a:

$$\nabla = \frac{24,5Q}{Dh^2 - OD^2} \text{ (ft/min)}$$

$$V_c = \left[ \frac{3,878(10^4)K}{p} \right]^{\frac{1}{2-n}} \left[ \frac{2,4}{Dh - OD} \left( \frac{2n + 1}{3n} \right) \right]^{\frac{n}{2-n}} \text{ (ft/min)}$$

Si  $\nabla < V_c$ , entonces el Flujo es Laminar y usamos.

- Para flujo laminar en el Anular:

$$P = \left[ \frac{2,4\nabla}{Dh - OD} \left( \frac{2n + 1}{3n} \right) \right]^n \frac{KL}{300(Dh - OD)} \text{ (Psi)}$$

- Para flujo turbulento en el anular:

$$P = \frac{8,91 \times 10^{-5} p^{0,8} Q^{1,8} P_v^{0,2} L}{(Dh - OD)^3 (Dh + OD)^{1,8}} \text{ (Psi)}$$

P = Perdidas de Fricción (Psi)

$\bar{V}$  = Velocidad Promedio (ft/min)

$V_c$  = Velocidad Critica (ft/min)

Pv = Viscosidad Plástica (cP)

YP = Yield Point (Lb/100ft<sup>2</sup>)

Q = Caudal de Perforación (gal/min)

$\rho$  = Peso del Lodo (ppg)

ID = Diámetro interno de la tubería (In)

$D_h$  = Diámetro interno del hueco (In)

OD = Diámetro externo de la tubería (In)

$\Theta_{600}$ ,  $\Theta_{300}$  y  $\Theta_2$  = Son valores reológicos leídos en el viscosímetro de Fann

**2.1.3 Pérdidas por fricción en la broca.** Las brocas de perforación son la herramienta de corte localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación que se utiliza para cortar o triturar la formación durante el proceso de la perforación rotatoria.

Para realizar la perforación, las brocas funcionan con base en dos principios esenciales: fallar la roca venciendo sus esfuerzos de corte y de compresión.

El principio de ataque de la barrena se realiza mediante la incrustación de sus dientes en la formación y posteriormente en el corte de la roca al desplazarse dentro de ella; o bien, mediante el cizallamiento generado por los cortadores de la broca y que vence la resistencia de la roca.

**Figura 19.** Broca Tricónica, estructura de corte convencional



**Fuente.** Reología e hidráulica y mechas de perforación, Cap. 5

La caída de presión por fricción a través de las boquillas de la broca comúnmente referida como caída de presión en la broca, está basada principalmente en el cambio de la energía cinética de un fluido fluyendo a través de una restricción corta, como una boquilla, y añadiéndole ciertas suposiciones tales como:

- Un fluido incompresible.
- Flujo isotérmico.
- El cambio en la presión debido a un cambio de elevación es despreciable.
- La velocidad a la entrada de las boquillas es despreciable con respecto a la velocidad a la salida.
- Las pérdidas de presión por fricción a través de las boquillas son despreciables.

El objetivo de cualquier programa hidráulico es optimizar la caída de presión a través de la broca de tal manera que la máxima limpieza del orificio inferior pueda lograrse para una longitud dada de sarta de perforación (Drill Pipe y Drill Collar) y propiedades del lodo dadas, las pérdidas de presión en superficie ( $P_1$ ), pérdidas

de presión en la sarta (P2), la pérdida de presión en el anular (P3), las pérdidas del Standpipe (P4) y las pérdidas en la broca (P5) se mantendrán constante. Sin embargo, la pérdida de presión a través de la broca está fuertemente influenciada por los tamaños de boquilla utilizada, ya que este último determinar la cantidad de caballos de fuerza hidráulica disponible en la broca.

Entre más pequeña sea el tamaño de la boquilla mayor es la caída de presión y mayor la velocidad del fluido al pasar por esta, en algunas situaciones donde la roca es suave, el objetivo es proporcionar la máxima limpieza y no la acción máxima de inyección. En este caso se requiere un alto caudal con mayor número de Boquillas.

Para determinar la caída de presión en la broca, y añadirlas a las pérdidas totales de presión en todo el sistema,  $P1 + P2 + P3 + P4 + P5$ , y así poder dar un valor total de  $P_t$  (descrito como la pérdida de carga del sistema total) Después de determinar la capacidad de presión de la bomba utilizada. Si esta bomba se va a operar en, por ejemplo 80 - 90% de su valor nominal, entonces la caída de presión en el broca es simplemente los datos de la bomba menos las presiones.

Un balance de energía resulta:

$$\Delta P = \Delta P_b = \frac{\rho}{2gc} (V_1^2 - V_2^2) = \frac{\rho V_n^2}{2gc}$$

Despejando la velocidad en las boquillas se tiene:

$$V_n = \left( \frac{2gc \Delta P_b}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Sin embargo, para una la caída de presión a través de las boquillas de la broca la velocidad del fluido determinada con la expresión anterior, nunca es obtenida. Esto se debe a la inevitable pérdida de energía mecánica causada por la fricción.

Para compensar por esta diferencia entre los valores de velocidad calculados y medidos se introduce un factor de corrección, denominado coeficiente de descarga ( $C_d$ ); de tal manera que la expresión anterior resulta:

$$V_n = C_d \left( \frac{2gc \Delta P_b}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Por otro lado, la velocidad del flujo a través de las boquillas de la broca se puede expresar mediante:

$$V_n = \frac{Q}{At}$$

Combinando esta expresión con la anterior y resolviendo para la caída de presión resulta:

$$\Delta P_b = \frac{\rho Q^2}{2gc At^2 C_d^2}$$

Varias pruebas demostraron que un valor del coeficiente de descarga igual a 0.95 produce resultados satisfactorios, por lo que introduciendo este valor en la ecuación antes vista y expresándola en unidades prácticas de campo, se tiene:

$$\Delta P_b = \frac{\rho Q^2}{18511,7 At^2}$$

Debido a que en la derivación de la expresión y los efectos viscosos (fricción) del fluido se consideran despreciables, esta última ecuación es aplicable a cualquier tipo de fluido incompresible fluyendo a través de las boquillas de la broca, lo que la convierte en una ecuación muy precisa.

Por otro lado, las brocas tienen más de una boquilla, cuyo diámetro se expresa generalmente en 1/32 de pulgada; por lo que el área total de flujo se expresa como:

$$A_t = \frac{\pi}{4,096} (d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots)$$

Donde  $d_1, d_2, d_3 \dots$  = Diámetro de las Boquillas, 1/32 pulgada.

## **2.2 OPTIMIZACION DE LA HIDRAULICA**

El objetivo principal de la optimización de la hidráulica es mantener un equilibrio entre los diversos parámetros de los que esta depende, la limpieza del pozo, la densidad equivalente de circulación (ECD), la presión de bombeo, la tasa de penetración, las pérdidas de presión en la broca, y la estabilidad del pozo, entre otros factores.

Los caudales afectan la limpieza del pozo, la estabilidad de las paredes y las presiones anulares, así como la velocidad de penetración, el tamaño de las boquillas solo afecta la velocidad de penetración, de manera que el procedimiento correcto para la optimización de la hidráulica consiste ante todo en determinar el caudal adecuado. Las pérdidas de presión en la broca, pueden ser controladas con el diámetro de las boquillas dependiendo de la presión de bombeo que sea seleccionada.

Los métodos de optimización de la hidráulica consisten en determinar la caída de presión en la barrena de tal forma que la energía generada por el equipo de bombeo en superficie sea transmitida óptimamente hasta el fondo del pozo para su correcta limpieza. Esta caída de presión óptima es obtenida determinando el tamaño de las boquillas en la broca. Los dos métodos de optimización aceptados y comúnmente utilizados son:

- a) Máxima potencia hidráulica en la broca.
- b) Máxima fuerza de impacto del chorro de lodo en el fondo del pozo.

La hidráulica puede ser optimizada de dos maneras:

- Mediante la maximización de la fuerza de impacto de los chorros en la parte inferior del agujero.
- Mediante la maximización de la potencia hidráulica gastada por el broca.

El poder gastado (o agotado) por la broca es una proporción de la potencia total disponible (HPT). Esto se determina ya sea por la presión máxima de las bombas:

$$\max HP_{pump} = HP_t = \frac{P_{\max} Q}{1714}$$

O, más típicamente, que se basa en una presión de la bomba máximo deseado junto con una caudal máximo que dará velocidad anular suficiente para la eliminación de esquejes.

Una vez que la potencia máxima disponible para el sistema es conocido, el rendimiento hidráulico puede ser optimizado de las siguientes maneras:

- Optimizar Horsepower estableciendo Bit HP al 65% de la energía total disponible.

- Optimizar Fuerza de impacto mediante el establecimiento de bits de HP en el 48% de la energía total disponible.

Dado que la potencia hidráulica en la broca depende de la velocidad del chorro y por lo tanto en la pérdida de presión en el bit, el rendimiento hidráulico en la práctica simplemente se puede optimizar la selección de tamaños de chorro para dar:

***Pérdida de Presión Bit = 64 % la pérdida de presión del sistema***

La eficiencia del transporte es una función de los parámetros hidráulicos; es un hecho bien conocido que el sistema hidráulico de brocas que afecta a las pérdidas por fricción, que a su vez afectan a la concentración de ripios en el espacio anular. Para transportar de manera eficiente ripios hasta el espacio anular, es importante para optimizar la hidráulica broca.

Durante la perforación, en el punto de contacto entre la broca y la formación, varias cosas pueden ocurrir:

- Las boquillas de broca podrían proporcionar suficiente fuerza de impacto del chorro para transportar los esquejes a la superficie.
- Si las boquillas no proporciona suficiente fuerza de impacto del chorro, los cortes serán triturado y producir una disminución de la tasa de penetración.

La hidráulica de la broca relaciona parámetros tales como el tamaño de la boquilla, el número de boquillas, la velocidad del chorro a través de las boquillas, y también la pérdida de presión en la broca.

**2.2.1 potencia hidráulica de la broca.** La remoción de ripios del fondo de pozo, es dependiente de la cantidad de energía del fluido disponible en la broca. Para este criterio el caudal corresponde donde un tercio de la presión de la bomba disponible es gastada en el sistema de circulación, excluyendo la broca.

- **Máxima potencia hidráulica en la barrena**

Este modelo asume que la velocidad de penetración de la barrena puede incrementarse con la potencia hidráulica, ya que los recortes son removidos tan rápido como se generan. Sin embargo, se alcanza el punto donde el incremento en la potencia hidráulica ya no se refleja en un aumento en el avance de la penetración, el criterio aplicado en este método de optimización consiste en calcular el diámetro óptimo de las boquillas para obtener la máxima potencia hidráulica en la broca.

La presión disponible en la broca,  $P_b$ , es igual a la presión superficial,  $P_s$ , menos las pérdidas de presión por fricción en el sistema hidráulico exceptuando en la barrena,  $\Delta P_p$ . Este último término es conocido como pérdidas de presión parásitas.

$$P_b = P_{s\max} - \Delta P_p$$

$$\Delta P_p = \Delta P_{tp} + \Delta P_{ea}$$

La máxima potencia hidráulica se obtiene cuando la relación entre las pérdidas de presión parásitas óptima y la presión superficial,  $P_s$ , iguala  $[1/(m + 1)]$

$$\frac{\Delta P_p|_{\text{opt}}}{P_{s\max}} = \left[ \frac{1}{m + 1} \right]$$

Para efectos de la planeación de la hidráulica del pozo, se toma un valor de  $m=1.75$ , valor aplicable para un régimen de flujo turbulento como el que existe en la barrena. Este valor de  $m$  obedece a la relación  $\Delta P \propto Q^m$ , donde  $m=1.75$ .

De acuerdo a lo anterior, se obtienen las siguientes relaciones:

$$\Delta P_p \Big|_{\text{ópt}} = 0.36 P_{\text{smáx}}$$

$$\Delta P_b \Big|_{\text{ópt}} = 0.64 P_{\text{smáx}}$$

Esto indica que el 64 % de la presión de bombeo en superficie es transmitida a la barrena como se dijo anteriormente.

Esta es la potencia utilizada por la acción de chorro de la broca, que tiene que equilibrar máximo ROP y máxima de inyección con una limpieza eficaz agujero.

$$\text{Bit HP (HP)} = \frac{P_b * Q}{1714}$$

Donde,  $Q = \text{gpm}$  y  $P_b = \text{psi}$

No hay estudios comparativos reportados en la literatura, donde comparen las tasas de perforación para estas técnicas con idénticas condiciones en el taladro. Tenga en cuenta también, que la tasa de perforación no está incluida en la derivación de la optimización. De modo que el criterio de optimización de hidráulica que sea tomado depende de la experiencia de la persona o el equipo encargado de la operación de perforación.

**2.2.2 Fuerza de impacto hidráulico.** La remoción de cortes depende de la fuerza del fluido golpeando el fondo del pozo, esto se logra aumentando el caudal. Este corresponde al caudal donde la mitad de la presión de la bomba disponible se gasta en el sistema circulante, sin tener en cuenta las pérdidas en la broca.

La fuerza de impacto se define como la fuerza que imparte el fluido a la formación, en el cual se seleccionan los diámetros de boquillas de tal forma que la fuerza de impacto hidráulico sea máximo en la broca, en términos generales, cuando las caídas de presión son del 47 % de la presión de bombeo se calcula la presión disponible en la broca,  $P_b$

$$P_b = P_{sm\acute{a}x} - \Delta P_p$$

La máxima potencia hidráulica se obtiene cuando la relación entre las pérdidas de presión parásitas óptima y la presión superficial iguala  $[2 / (m + 2)]$

$$\frac{\Delta P_p |_{\acute{o}pt}}{P_{sm\acute{a}x}} = \left[ \frac{2}{m + 2} \right]$$

- Para un valor de  $m=1.75$ , se obtiene:

$$\Delta P_p |_{\acute{o}pt} = 0.53 P_{sm\acute{a}x}$$

$$\Delta P_b |_{\acute{o}pt} = 0.47 P_{sm\acute{a}x}$$

Esto indica que el 47 % de la presión de bombeo en superficie es transmitida a la broca.

Esta es la fuerza ejercida sobre la formación debido al fluido que sale de los chorros. La limpieza es por la erosión directa en la parte inferior y por flujo cruzado bajo la broca.

$$Bit\ IF\ (Lbs) = \frac{\rho * Q * V_n}{1932}$$

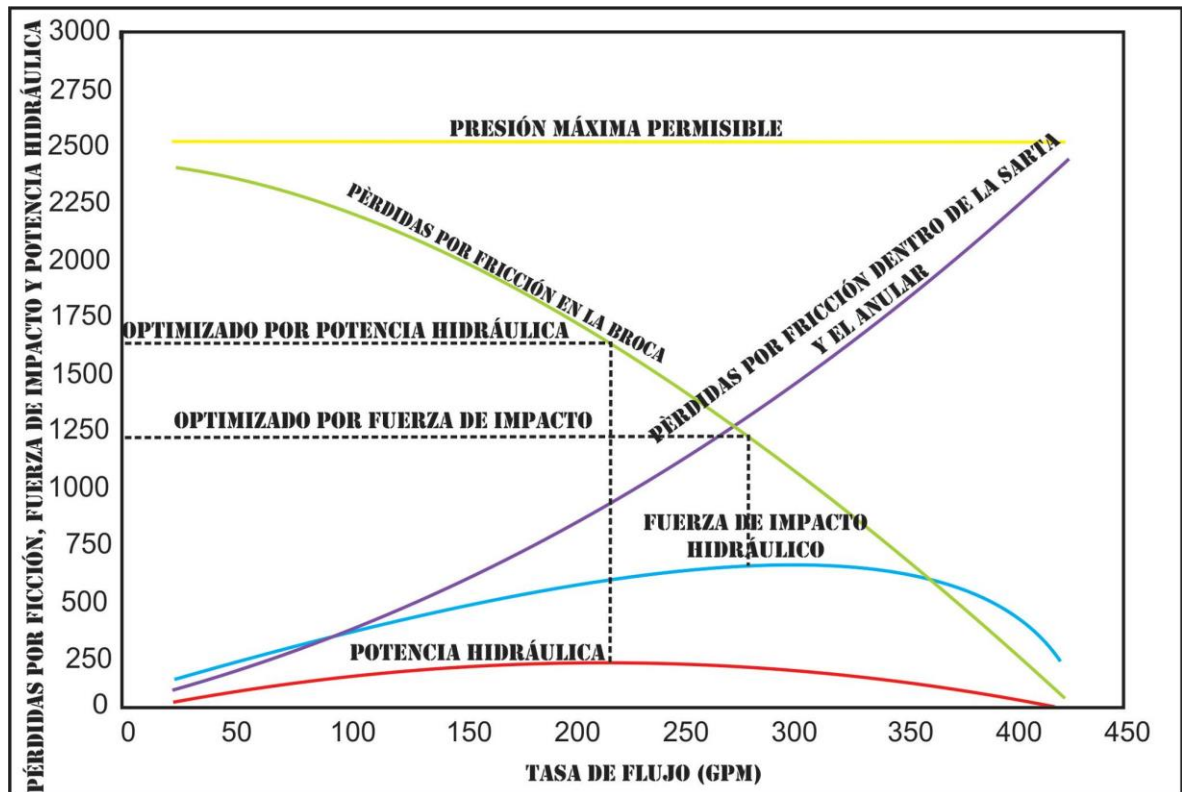
Donde,  $\rho$  = ppg

Q = gpm

Vn = ft/sec

En el siguiente gráfico se puede observar la diferencia entre optimizar para potencia hidráulica y para fuerza de impacto.

**Figura 20.** Diferencia entre Potencia Hidráulica y Fuerza de Impacto



Fuente. Manual de MIDF. Cap 4

### 2.3 DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACION (ECD)

La presión hidrostática de la columna de fluido constituye la mayor parte de la presión equivalente de circulación, pero la presión que se requiere para mover el fluido también actúa sobre las paredes (fricción). La contrapresión, o presión ejercida en el estrangulador, también aumenta la presión de fondo, la que puede ser estimada sumándole todas las presiones conocidas que actúan sobre o en el fondo. La presión de fondo puede ser estimada durante las siguientes actividades:

- **Pozo estático:** No hay fluido en movimiento, el pozo está estático. La presión de fondo es igual a la presión hidrostática del fluido en el anular del pozo más la presión que hubiera en el casing en superficie.

$$BHP = P_h + P_{sup}$$

- **Circulación normal:** Durante la circulación, la presión de fondo del pozo es igual a la presión hidrostática del fluido más las pérdidas de presión por fricción en el anular ( $\Delta P_f$ ).

$$BHP = P_h + \Delta P_f$$

Una vez que las propiedades reológicas para un fluido han sido determinadas y modeladas para predecir el comportamiento del flujo, los cálculos de hidráulica son realizados para determinar el efecto que este fluido en particular tendrá sobre las presiones del sistema. Las presiones críticas son la presión total del sistema (presión de bombeo), la pérdida de presión a través de la barrena y la pérdida de presión anular (convertida en ECD).

La presión en una formación durante la circulación es igual al total de las pérdidas de presión de circulación anular desde el punto de interés hasta el niple de campana, más la presión hidrostática del fluido. Esta fuerza se expresa como la densidad del lodo que ejercería una presión hidrostática equivalente a esta presión. Este peso equivalente del lodo se llama Densidad Equivalente de Circulación (ECD).

### 2.3.1 Cálculos para determinar la (ECD).

$$ECD = \rho + \frac{\Delta Pa}{(0,052 * PPV)}$$

Donde:  $\Delta Pa$ , Pérdida de la presión en el espacio anular

$PPV$ , Profundidad vertical verdadera en pies

$\rho$ , Densidad del lodo en el pozo en lbs/gal

Por lo tanto, la Presión de Circulación en el Fondo PCF o BHCP puede ser expresada así:

$$ECD * 0,052 * PPV$$

**Nota:** Una ECD excesiva puede causar pérdidas al exceder el gradiente de fractura en un pozo. Es importante optimizar las propiedades reológicas para evitar una ECD excesiva.

### **2.3.2 Factores que afectan la ECD.**

- Densidad del lodo.
- Pérdidas de presión en el espacio anular.
- Geometría del agujero, viscosidad efectiva, temperatura, presión, gasto o tasa de bombeo.
- Velocidad de penetración y tamaños de los recortes.
- Eficiencia de la limpieza del agujero.

## **2.4 LIMPIEZA DEL POZO**

Muchas variables juegan un rol importante en la eficiencia de limpieza del hueco, incluyendo el peso sobre la broca, velocidad de rotación, tipo de broca, tasa de flujo, velocidad de chorro, presión diferencial, tamaño de las boquillas, localización y distancia del frente de roca, volumen de sólidos, etc.

Los recortes de perforación deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la barrena. Con este fin, se hace circular un fluido de perforación dentro de la columna de perforación y a través de la barrena, el cual arrastra y transporta los recortes hasta la superficie, subiendo por el espacio anular. La remoción de los recortes (limpieza del agujero) depende del tamaño, forma y densidad de los recortes, unidos a la Velocidad de Penetración (ROP); de la rotación de la columna de perforación; y de la viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido de perforación.

La acción de chorro de salida de lodo a través de la boquilla de la broca debe proporcionar la velocidad suficiente y fluir hacia el frente de la roca para remover efectivamente los ripios que se encuentran alrededor de la broca a medida de que la roca es penetrada de nuevo. Esto prevendría que se acumulen ripios alrededor de broca y sus dientes (empaquetamiento de la broca), evitando el molimiento

excesivo de los ripios y transportándolos hacia arriba por el anular, maximizando la eficiencia de la perforación.

- **Viscosidad.** La viscosidad y las propiedades reológicas de los fluidos de perforación tienen un efecto importante sobre la limpieza del pozo. Los recortes se sedimentan rápidamente en fluidos de baja viscosidad (agua, por ejemplo) y son difíciles de circular fuera del pozo. En general, los fluidos de mayor viscosidad mejoran el transporte de los recortes.

La mayoría de los lodos de perforación son tixotrópicos, es decir que se gelifican bajo condiciones estáticas. Esta característica puede suspender los recortes mientras que se efectúan las conexiones de tuberías y otras situaciones durante las cuales no se hace circular el lodo. Los fluidos que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte y que tienen altas viscosidades a bajas velocidades anulares han demostrado ser mejores para una limpieza eficaz del pozo.

- **Velocidad.** En general, la remoción de los recortes es mejorada por las altas velocidades anulares. Sin embargo, con los fluidos de perforación más diluidos, las altas velocidades pueden causar un flujo turbulento que ayuda a limpiar el agujero, pero puede producir otros problemas de perforación o en el agujero.

La velocidad a la cual un recorte se sedimenta en un fluido se llama velocidad de caída. La velocidad de caída de un recorte depende de su densidad, tamaño y forma, y de la viscosidad, densidad y velocidad del fluido de perforación. Si la velocidad anular del fluido de perforación es mayor que la velocidad de caída del recorte, el recorte será transportado hasta la superficie.

La velocidad neta a la cual un recorte sube por el espacio anular se llama velocidad de transporte. En un pozo vertical:

$$\text{Velocidad de transporte} = \text{Velocidad anular} - \text{velocidad de caída}$$

El transporte de recortes en los pozos de alto ángulo y horizontales es más difícil que en los pozos verticales. La velocidad de transporte, tal como fue definida para los pozos verticales, no es aplicable en el caso de pozos desviados, visto que los recortes se sedimentan en la parte baja del pozo, en sentido perpendicular a la trayectoria de flujo del fluido, y no en sentido contrario al flujo de fluido de perforación. En los pozos horizontales, los recortes se acumulan a lo largo de la parte inferior del pozo, formando camas de recortes. Estas camas restringen el flujo, aumentan el torque, y son difíciles de eliminar.

Al considerar la mejor manera de limpiar el agujero, es importante recordar que la mayoría de los parámetros que la limpieza aumento agujero también resulta en un aumento de la caída de presión por fricción, que a su vez conduce a una mayor tubo vertical e inferior hoyos presiones. Fractura de la formación debido al aumento de ECD no es el deseado resultado de tratar de mejorar la limpieza del pozo.

#### **2.4.1 Métodos para limpiar un pozo**

- **El uso de fluidos tixotrópicos:** disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte y que tienen una alta viscosidad a muy baja velocidad de corte y condiciones de flujo laminar. Dichos sistemas de fluidos de perforación proporcionan una alta viscosidad con un perfil de velocidad anular relativamente plano, limpiando una mayor porción de la sección transversal del pozo. Este método tiende a suspender los recortes en la trayectoria de flujo del lodo e impide que los recortes se sedimenten en la parte baja del pozo. Con los lodos densificados, el transporte de los recortes puede ser mejorado aumentando las indicaciones de 3 y 6 RPM del cuadrante de Fann de 1 a 1 1/2

veces el tamaño del pozo en pulgadas, y usando el más alto caudal laminar posible.

- **El uso de un alto caudal y de un lodo fluido para obtener un flujo turbulento.** El flujo turbulento proporcionará una buena limpieza del pozo e impedirá que los recortes se sedimenten durante la circulación, pero éstos se sedimentarán rápidamente cuando se interrumpa la circulación. Este método funciona manteniendo los recortes suspendidos bajo el efecto de la turbulencia y de las altas velocidades anulares. Es más eficaz cuando se usan fluidos no densificados de baja densidad en formaciones competentes (que no se desgastan fácilmente). La eficacia de esta técnica puede ser limitada por distintos factores, incluyendo un agujero de gran tamaño, una bomba de baja capacidad, una integridad insuficiente de la formación y el uso de motores de fondo y herramientas de fondo que limitan el caudal.
- **Densidad.** Los fluidos de alta densidad facilitan la limpieza del pozo aumentando las fuerzas de flotación que actúan sobre los recortes, lo cual contribuye a su remoción del pozo. En comparación con los fluidos de menor densidad, los fluidos de alta densidad pueden limpiar el agujero de manera adecuada, aun con velocidades anulares más bajas y propiedades reológicas inferiores. Sin embargo, el peso del lodo en exceso del que se requiere para equilibrar las presiones de la formación tiene un impacto negativo sobre la operación de perforación; por lo tanto, este peso nunca debe ser aumentado a efectos de limpieza del agujero.

Durante la perforación de un pozo, siempre se generan recortes, ripios y derrumbes que son retirados del fondo por el flujo ascendente del lodo a través del anular hasta llegar a superficie. Los ripios están sometidos al mismo tiempo a la fuerza de la gravedad que tiende a provocar su caída hacia el fondo del pozo. La velocidad a la cual caen en medio del lodo ascendente, recibe el nombre de

velocidad de asentamiento y depende principalmente de la densidad y viscosidad del lodo, y del tamaño, forma y densidad de los cortes<sup>2</sup>.

$$V_s = \frac{175d(21-w)^{0.667}}{w^{0.333}m^{0.333}}$$

Donde velocidad de asentamiento ( $V_s$ ), está en función del diámetro promedio de los recortes ( $d$ ), la densidad del lodo ( $w$ ) y la viscosidad anular ( $m$ ); y la viscosidad anular está en función del yield point (YP), el diámetro hidráulico ( $D$ ), la velocidad en el anular ( $V$ ) y la viscosidad plástica (cP).

Estas ecuaciones solo aplican cuando se está usando el modelo plástico de Bingham, existen otras ecuaciones para otros modelos en función del número de Reynolds de partícula.

$$m = 213 \frac{YP(D)}{V} + PV$$

Teniendo en cuenta los factores de los que depende la velocidad de asentamiento de los ripios, la forma más práctica de reducir la velocidad de asentamiento de los ripios es aumentar la viscosidad en el anular. Dado que las velocidades de corte en el anular son bajas (habitualmente menos de 60 rpm equivalente), el punto de cedencia (Yield Point) tiene un efecto más marcado que la viscosidad plástica

La velocidad de levantamiento ( $V_r$ ) de los recortes es la velocidad a la cual los recortes son en realidad llevados hacia arriba en el espacio anular, matemáticamente es la diferencia entre la velocidad anular ( $V$ ), y la velocidad de asentamiento de los ripios ( $V_s$ ).

$$V_r = V - V_s$$

---

<sup>2</sup> HALLIBURTON; "Tecnología aplicada de lodos", capítulo 25.

El óptimo método de transporte de ripios es con fluidos de baja viscosidad en flujo turbulento, siempre y cuando un adecuado caudal de flujo sea alcanzado en todas las áreas del hueco<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>LEISING, L.J. AND WALTON, I.C. "Cutting-Transport Problems and Solutions in Coiled-Tubing Drilling". SPE 77261, 2002.

### **3. BOMBAS**

La bomba de lodo es el componente primario del sistema de circulación, ella provee la fuerza de impulsión requerida para mover la columna de lodo desde la superficie hasta la broca, y de regreso hasta la superficie, la bomba de lodo es también uno de los elementos críticos del programa hidráulico.

Hay dos razones importantes relacionadas con la aplicación hidráulica de la bomba de lodo, una de ellas es la limpieza de la formación por debajo de la broca, y la otra es la remoción inmediata de los ripios cortado por la misma.

#### **3.1 ESPECIFICACIONES DE BOMBAS**

- **BOMBAS DUPLEX**

Las bombas de lodo dúplex son bombas cuya función es garantizar la circulación del lodo de perforación o el suministro de líquido desde el sistema de limpieza de lodo a la parte inferior del pozo. Pueden funcionar con diésel o con electricidad. El mantenimiento de una bomba de lodo dúplex es fácil, ya que incorpora un nuevo diseño de válvula de seguridad y cuenta con sellos binoculares de vástagos flotantes. Además, consta de un sistema de lubricación forzada de los vástagos del pistón, que reduce la fricción que normalmente provoca un desgaste rápido y desgarros.

Las bombas dúplex poseen dos cilindros con doble acción, lo cual significa que los pistones se mueven hacia atrás tomando lodo de perforación a través de la válvula abierta de admisión y otras partes del mismo pistón. Estos pistones empujan el lodo hacia fuera a través de las válvulas de descarga.

**Figura 21.** Bombas Dúplex



**Fuente.** Curso de adiestramiento México, 2002, pág. 190

- **BOMBAS TRIPLEX**

Las bombas de lodo tríplex son aplicables en la perforación que requiere alta presión de la bomba, tales como la extracción de petróleo. Estas bombas trabajan mediante la reducción del volumen del fluido, que se descarga para producir la presión suficiente para fomentar el flujo. Se compone de tres pistones: el pistón medio ejerce una mayor presión en el cigüeñal en comparación con los otros dos pistones externos. Sin embargo, la aplicación de presión excesiva, debida a una alta carga del pistón, resulta en el agrietamiento o en el fracaso del cigüeñal.

Las bombas tríplex poseen tres cilindros de simple acción. Los pistones se mueven hacia atrás y tiran lodo de perforación a través de las válvulas de admisión abiertas.

Cuando los pistones se mueven hacia adelante, el fluido es empujado hacia afuera a través de las válvulas de descarga abiertas.

Los operarios pueden cambiar las camisas y los pistones y no solamente pueden cambiar los inservibles si no también instalarlos de diferentes tamaños. Normalmente las bombas usan camisas y pistones grandes cuando se necesitan mover grandes volúmenes de lodo a presiones relativamente bajas, usan camisas y pistones pequeños cuando se necesita mover volúmenes más pequeños de lodo a presiones relativamente altas.

**Figura 22.** Bombas Triplex



**Fuente.** Curso de adiestramiento México, 2002, pág. 194

Una bomba de lodo tiene una sección de fluidos, otra de fuerza, válvulas de entrada y de descarga. La sección de fluidos contiene los pistones con las camisas que introducen y descargan los lodos, los pistones de la bomba aspiran el lodo a través de las válvulas de entrada y lo expulsan a través de las válvulas de descarga. La sección de fuerza, aloja el cigüeñal y el montaje de engranaje que mueven los pistones que a su vez están montados en la sección de fluidos. La potencia de la bomba se alimenta por un motor, los equipos de perforación modernos y grandes utilizan potentes motores eléctricos para accionar las

bombas, los equipos de perforación mecánicos utilizan la transmisión por cadenas o correas de potencia para accionar las bombas.

Un amortiguador conectado al tubo de descarga del lodo suaviza el vacío formado por los pistones cuando descargan el lodo.

- Amortiguador de Pulsación (DAMPER)

Este es un amortiguador estándar de vejiga, la vejiga en el cuerpo del amortiguador separa el nitrógeno presurizado de la parte de arriba del lodo en la parte inferior de la vejiga, esta vejiga está fabricada de fibra sintética la cual la hace muy flexible, cuando la presión de descarga del lodo empuja contra la parte inferior de la vejiga la presión del nitrógeno en su parte superior lo resiste, esta resistencia amortigua las sacudidas del lodo al salir de la bomba.

**Figura 23.** Amortiguador DAMPER

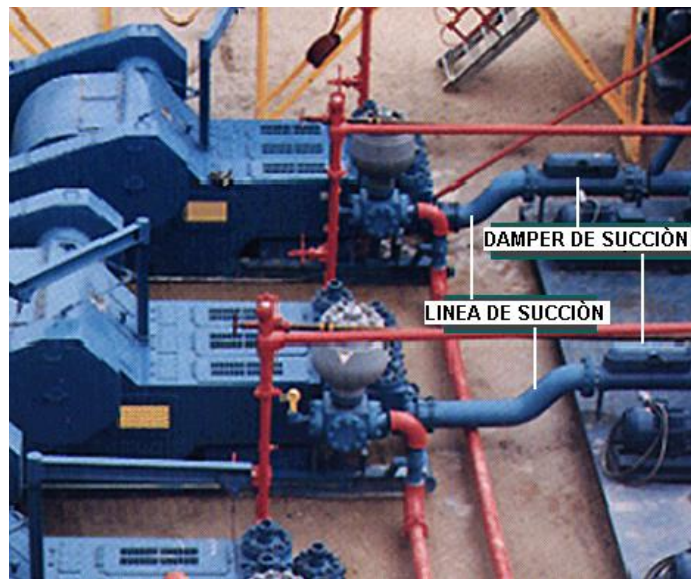


**Fuente.** Curso de adiestramiento México, 2002, pág. 195

- Amortiguador de Succión (SUCTION DAMPER)

Un amortiguador en la succión (SUCTION DAMPER) suaviza el flujo del lodo que entra en la bomba, los operarios montan este amortiguador en la línea de succión de la bomba de lodo tríplex, dentro de la cámara de acero hay una vejiga o un diafragma de caucho cargado de aire con una presión de 10 a 15 lppc. El amortiguador en la succión absorbe las sacudidas de la línea de succión de las bombas de lodo, originada por el rápido movimiento de los pistones de la bomba, los pistones inician y detienen constantemente el flujo de lodo a través de la bomba.

**Figura 24. SUCTION DAMPER**



**Fuente.** Curso de adiestramiento México, 2002, pág. 196

- Bomba de Precarga

Al otro extremo de la línea de succión se encuentra una bomba de precarga, que envía un flujo constante de lodo a la entrada de la bomba. Cuando este flujo constante se encuentra con las pulsaciones, el impacto lo absorbe el amortiguador.

- Válvula de seguridad en la línea de descarga de emergencia

Los operarios instalan una válvula de seguridad en la línea de descarga de emergencia, la instalan en el lado de emergencia de la bomba o junto a la línea de descarga. Si por alguna razón se produce demasiada presión en la línea de descarga quizás por obstrucción en la mecha o en el espacio anular del pozo, se abre la válvula de seguridad. Esta válvula protege a la bomba y a los sistemas de lodo contra los daños por sobre presión.

### 3.2 CALCULO DE LA TASA DE BOMBEO

La eficiencia de una bomba de circulación de lodo es el producto de eficiencia mecánica y la eficiencia volumétrica. La eficiencia mecánica usualmente es asumida ser 90% y es relacionada a la eficiencia de la fuerza motriz y a la conexión con la transmisión del motor. La eficiencia volumétrica de una bomba cuya succión es adecuadamente cargada puede ser tan alta como 100%.

- Eficiencia mecánica  $E_m = 90\%$
- Eficiencia volumétrica  $E_v = 100\%$

- Ciertas operaciones de perforación requieren precisión para calcular el volumen de lodo que se bombea, como por ejemplo: El desplazamiento de la lechada de cemento durante la cementación del revestidor.

Para calcular el desplazamiento de una bomba tríplex, tenemos en cuenta lo siguiente:

$$\text{Desplazamiento} = 0,000243 * D^2 * L * \text{Eficiencia}$$

Donde, D: Diámetro del pistón (pulgadas).

L: Longitud de la camisa o carrera (pulgadas).

Eficiencia: en fracción.

### 3.3 POTENCIA DE LA BOMBA

Las bombas están relacionadas por

- Potencia hidráulica.
- La presión máxima.
- Caudal de flujo máximo.

Si la presión de succión de la bomba es esencialmente atmosférica, el incremento de la presión del fluido en movimiento a través de la bomba es aproximadamente igual a la presión de descarga. La potencia hidráulica de descarga de la bomba es igual a la presión de descarga por el caudal de flujo. Las unidades de campo de la potencia HP, presión PSI, caudal GAL/MIN. La potencia de la bomba desarrollada por la bomba está dada por:

$$P_H = \frac{\Delta p q}{1714}$$

Donde: PH = Potencia hidraulica de la bomba; hp

q = Caudal de descarga; gal/min

$\Delta P$  = Presion de descarga; psi

Para un nivel de potencia hidráulica dado, la presión de descarga máximo y el caudal e flujo puede ser variado por el cambio de velocidad de strokes (carreras) por minuto y el tamaño del liner. Un liner más pequeña permitirá al operador obtener una presión más alta de descarga, pero un bajo caudal. Para evitar problemas de la bomba no se acostumbra pasar presiones de 3000psi.

## 4. MANUAL DEL USUARIO



### 4.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PHP

Kumbia Enterprise es el framework PHP utilizado como lenguaje de programación para la realización de este software cuyo principal objetivo es la practicidad y facilidad de uso, sin dejar de darle importancia al rendimiento, robustez, profesionalismo y calidad de una aplicación orientada a la Web.

**PHP** es un lenguaje de programación de uso general de código del lado del servidor originalmente diseñado para el desarrollo web de contenido dinámico. PHP se considera uno de los lenguajes más flexibles, potentes y de alto rendimiento conocidos hasta el día de hoy, lo que ha atraído el interés de múltiples sitios con gran demanda de tráfico, como Facebook, para optar por el mismo como tecnología de servidor.<sup>1</sup>

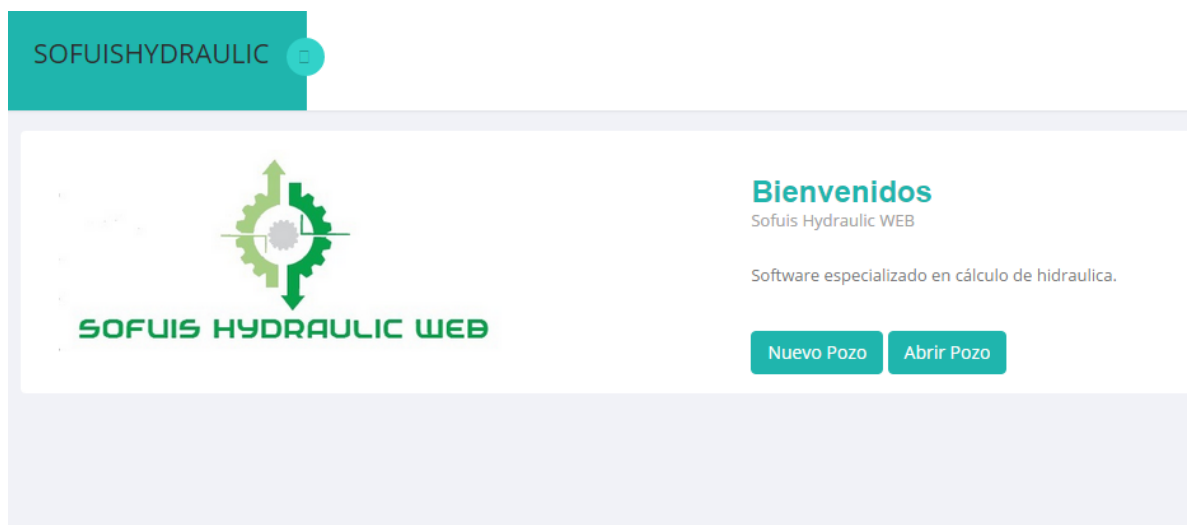
---

<sup>1</sup>PHP, Historical trends in the usage of server side programming languages for websites. W3Techs. Consultado el 10 de septiembre de 2013, Disponible WEB: [https://es.wikipedia.org/wiki/PHP#cite\\_note-porcentaje-5](https://es.wikipedia.org/wiki/PHP#cite_note-porcentaje-5)

El código de acceso al programa es interpretado por un servidor web con un módulo de procesador de PHP que genera la página Web resultante por tal motivo este programa comienza su apertura desde una dirección web en cualquier navegador que tenga un servidor web al servicio.

## 4.2 INICIACION DEL PROGRAMA

**Figura 25.** Inicio del programa

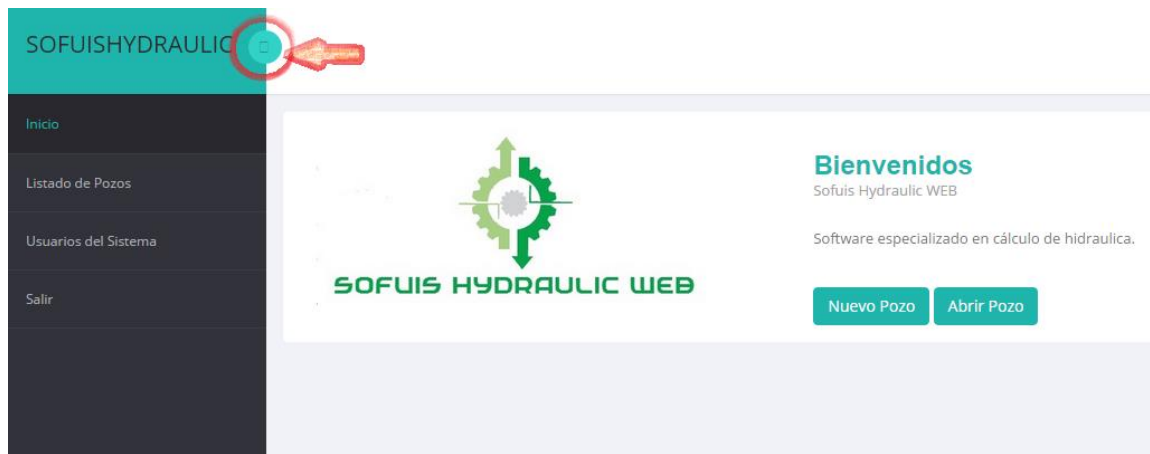


Al iniciar SOFUIS Hydraulic Web, tenemos 2 posibilidades: Nuevo Pozo y Abrir Pozo. Con la opción Abrir Pozo, abrimos archivos que hayan sido guardados con anterioridad, estos son guardados en una sección llamada Listado de pozos, la cual posteriormente se explica.

Con la opción Nuevo Pozo, nos aparece una nueva ventana en el cual podemos ingresar algunos datos sobre el nuevo pozo, como el nombre de pozo y otras especificaciones para poder realizar los cálculos.

En la parte superior izquierda podemos observar un icono desplegable el cual nos permitirá abrir unas opciones principales, entre las cuales encontramos: Inicio, listado de pozos, usuario del sistema y por ultimo salir.

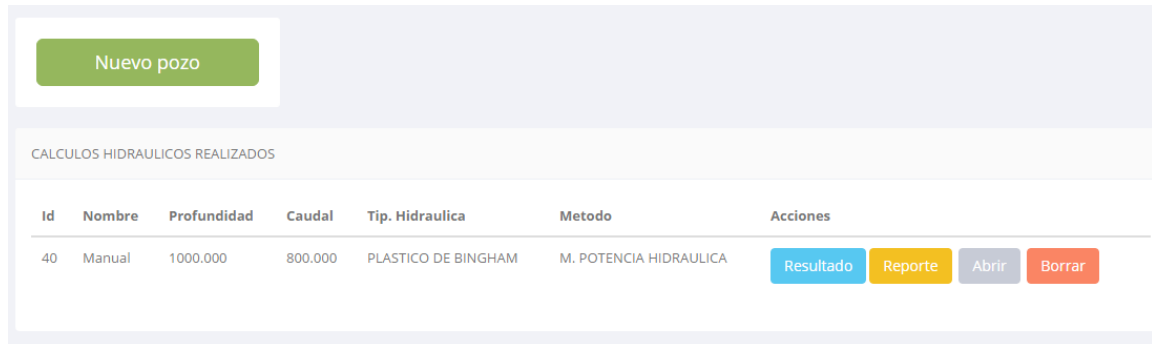
**Figura 26.** Opciones desplegadas



Para la opción Listado de Pozos encontramos todos los pozos que se han realizado, donde este muestra 3 opciones principales tales como los son (ver Figura 26):

- Resultado: El cual nos permitiría ver los resultados del pozo guardado.
- Reporte: Nos permitiría ver solamente el PDF del reporte de ese pozo guardado.
- Abrir: El cual nos permite abrir los datos de entrada y poder modificarlos, cabe aclarar que la modificación de los mismos generaría un nuevo pozo guardado.
- borrar, con el fin de poder borrar pozos que no estemos utilizando.

**Figura 27.**Listado de pozos



Id	Nombre	Profundidad	Caudal	Tip. Hidraulica	Metodo	Acciones
40	Manual	1000.000	800.000	PLASTICO DE BINGHAM	M. POTENCIA HIDRAULICA	<a href="#">Resultado</a> <a href="#">Reporte</a> <a href="#">Abrir</a> <a href="#">Borrar</a>

Aparte de estos botones base encontramos las especificaciones de los pozos guardados con varios fines positivos que nos permiten sacarle el mejor provecho a la herramienta, entre los cuales encontramos.

- Id= Representa el numero serial del pozo guardado
- Nombre del pozo
- Caudal
- Tipo de modelo hidráulico que se utilizó.
- Tipo de Método para hallar las pérdidas en el Stand pipe y la broca
- Profundidad.

Para este último caso de la profundidad, podemos sacarle provecho si guardamos la hidráulica de todo un pozo perforado, y así podríamos ir observando entre más profundo se va haciendo como va su hidráulica si ha variado si ha habido problemas de limpieza, entre otros fines.

Ya por ultimo encontramos un botón de atajo para abrir un nuevo pozo ubicado en la parte superior, con el fin de ser más práctico el software y un botón de usuario con el fin de poder crear nuevos usuarios y compartir mediante un administrador el software en una red.

### 4.3 VISTA GENERAL DEL PROGRAMA E INGRESO DE DATOS

Al iniciar el programa después de seleccionar (en este caso) Nuevo Pozo vemos la vista general del programa compuesta por los siguientes elementos (figura 28):

**Figura 28.** Datos de Entrada, estado mecánico: Geometría del hueco

ESTADO MECANICO: GEOMETRIA DEL HUECO

Nombre del Pozo

Profundidad (Ft)

**Info!** Especifique en decimales los diámetros Ejemplo : 17 ½ se escribiría, 17.5.

Seccion/Nombre	OD(in)	ID(in)	Long(Ft)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

- 1) Nombre del Pozo: nos sirve para identificar a que pozo le aplicaremos la hidráulica.
- 2) Profundidad (ft): Es la profundidad total del pozo en consideración.
- 3) Geometría del hueco:
  - 3.1) Sección /Nombre: Nombre de la sección encontrada en la geometría del hueco. Ejemplo (CSG, LINER, OH)
  - 3.2) OD (in): Es el diámetro externo de la sección.
  - 3.3) ID (in): Es el diámetro interno de la sección.
  - 3.4) Long (ft): Es la longitud que mide cada sección
  - 3.5) Agregar: Nos da la opción de agregar más secciones.

**Figura 29.** Sección de tubería

Nombre Tuberia	OD(in)	ID(in)	Long(Ft)	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="Agregar"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="Borrar"/>

4) Sección de tubería

4.1) Nombre de tubería: Ejemplo (DP, DC, HWDP, XO etc.)

4.2) OD (in): Es el diámetro externo de la tubería.

4.3) ID (in): Es el diámetro interno de la tubería.

4.4) Long (ft): Es la longitud que mide cada sección de tubería

4.5) Agregar: Nos da la opción de agregar más secciones.

**Figura 30.** Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION

MW

YP

Pv

## 5) Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación

5.1) MW: Peso del lodo (ppg)

5.2) YP: Yield Point (Lb/100ft<sup>2</sup>)

5.3) Pv: Viscosidad Plástica (cP)

**Figura 31. Caudal para perforar**

CAUDAL PARA PERFORAR (GALONAJE DE PERFORACIÓN)\*

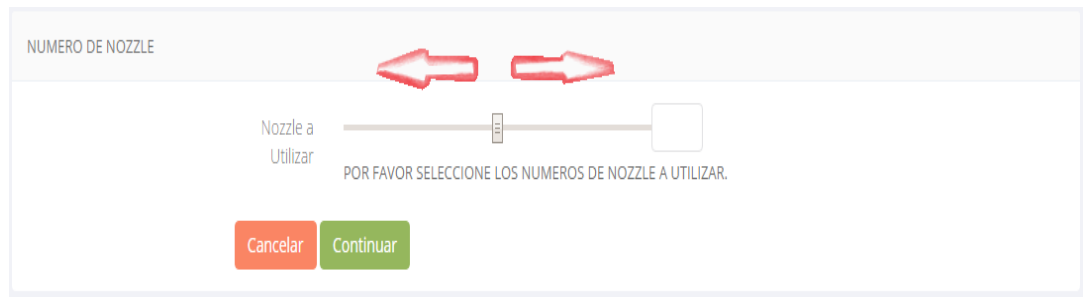
Diametros API de brocas	Galonaje Min (gpm)
26	1200
17 1/2	1200
12 1/4	800
8 1/2	400
6	250

Caudal para Perforar

SELECCIONE EL VALOR DEL CAUDAL A UTILIZAR EN LA TABLA SUPERIOR (Doble Click).

En esta parte del programa se escoge dándole doble clic al caudal o galonaje Min (gpm), en el cual se coloca una tabla por recomendación experimental con respecto al Diámetro de la broca, Si la persona desea ingresar un valor que no se encuentre en la gráfica, pulsar Digitar Caudal, e inmediatamente se abrirá la casilla.

**Figura 32.** Número de Nozzle

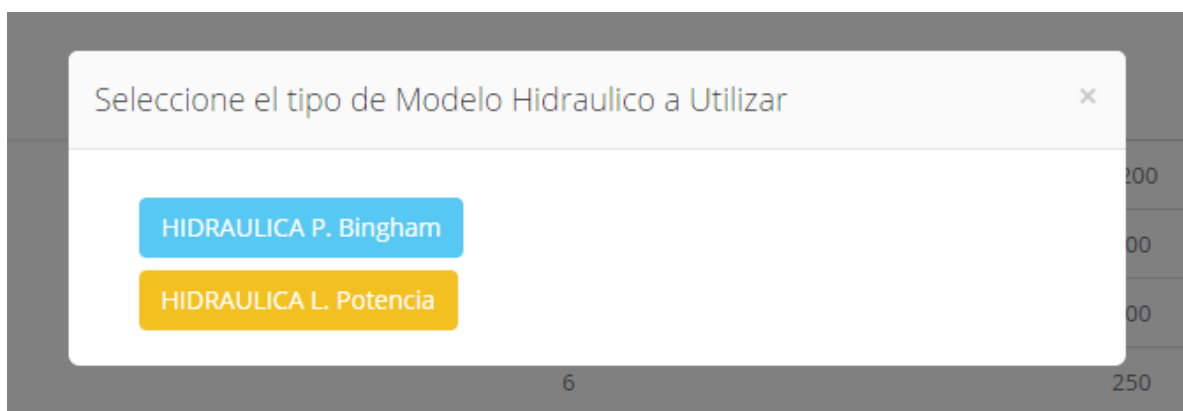


Para escoger los #Nozzle o Boquillas a utilizar, se desplaza el indicador hacia donde se encuentra el número de Nozzle que desea, siendo de izquierda derecha mayor partiendo de 3 a 7.

Encontrando al final de este dos botones, Cancelar y continuar, los cuales nos denotan si nos encontramos satisfechos y seguro de los datos ya ingresados anteriormente en los numerales 1, 2, 3, 4 y 5.

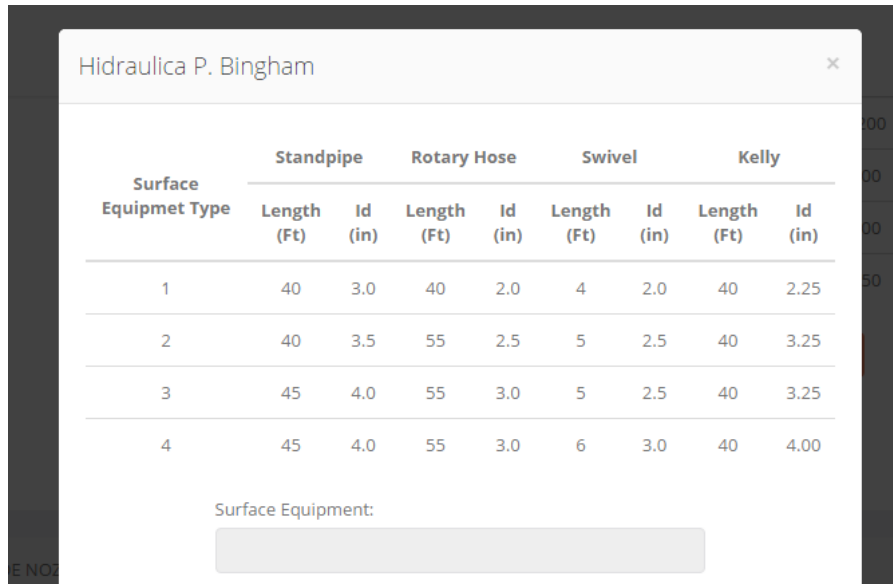
Al darle en continuar el programa como muestra en la (figura 32) nos dirige a los últimos dos datos de entrada que el software exige para realizar los cálculos hidráulicos concernientes.

**Figura 33.** Tipo de modelo hidráulico

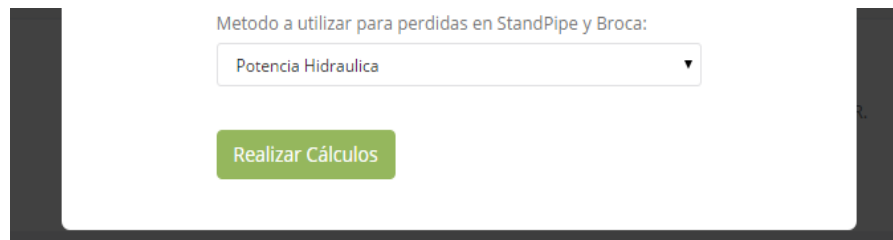


Escogemos cual va ser el modelo para realizar los cálculos hidráulicos.

**Figura 34.** Selección del tipo de equipo de superficie



**Figura 35.** Método para pérdidas en el Stand Pipe y Broca



Encontramos una pantalla compartida como se observa en la Figura 34 y la Figura 35, en donde:

Figura 34. Nos da la opción de escoger dándole un doble clic, en la opción que más nos represente el tipo de equipos de superficie, recordando que los equipos en donde son más representativa las pérdidas por fricción superficie son el Stand Pipe, Rotary Hose, Swivel y la Kelly.

Figura 35. Podemos observar una opción seleccionar, la cual nos permite escoger entre los dos métodos posibles para hallar las perdidas por fricción en la broca y el Stand Pape las cuales son.

- Potencia Hidráulica
- Impacto Hidráulico

#### 4.4 GENERACIÓN DE RESULTADOS

Una vez ingresados todos los datos necesarios podemos encontrar el botón “Realizar Cálculos” el cual nos permite iniciar y guardar automáticamente las características y valores de entrada. Realizando automáticamente las perdidas en cada una de las secciones donde puede presentarse perdidas por fricción.

**Figura 36.** Pérdidas en las conexiones de superficie, sarta y anular.

The image shows a software interface with three distinct sections for calculating pressure losses. Each section has a title and a corresponding input field.

- PERDIDAS EN SUPERFICIE**  
PERDIDAS DE PRESION EN CONEXIONES DE SUPERFICIE
- PERDIDAS EN LA SARTA DE PERFORACION**  
PERDIDAS DE PRESION DENTRO DE LA SARTA DE PERFORACION
- PERDIDAS DE PRESION EN EL ANULAR**  
PERDIDAS DE PRESION EN EL ANULAR

**Figura 37.** Pérdidas en el Stand Pipe y Broca

PERDIDAS DE PRESION EN EL STANDPIPE Y LA BROCA	
PERDIDAS DE PRESION EN EL STANDPIPE	2250
PERDIDAS DE PRESION EN LA BROCA	1560,041

BOMBA A SELECCIONAR
F-750-HP-TRIPLEX-6***8" LINER SIZE 6.000 (in) Con 95% Eficiencia

Bomba a seleccionar: es el valor optimizado que recomienda para escoger la bomba a utilizar, teniendo en cuenta los caballos de fuerza, el tipo de bomba, el tamaño de la camisa, con respecto al estado y perdidas de que se están presentando en el pozo.

Además también nos recomienda para el caso del tipo de boquilla, tamaño y combinación más favorable para obtener una buena limpieza de pozo, con respecto a los cálculos de velocidad en las boquillas y área, así como lo muestra en la Figura 38.

**Figura 38.** Especificaciones de los Nozzle o Boquillas

ESPECIFICACIONES DE LOS NOZZLE	TIPO DE COMBINACION Y TAMAÑO DE NOZZLE RECOMENDADO EN MULTIPLES DE 32
VELOCIDAD DE LOS NOZZLE	16 16 17
AREA TOTAL DE LOS NOZZLE	
TAMAÑO DE LOS NOZZLE EN MULTIPLES DE 32	<a href="#">Ver Reporte</a>

Además encontramos una sección donde podemos observar gráficamente como esta nuestro estado mecánico y un botón para que el usuario pueda observar más

detalladamente el reporte de su hidráulica. Estos dos podemos encontrarlos en el ejemplo de aplicación al final del libro (ANEXO F).

## 5. CONCLUSIONES

- Con esta herramienta se puede obtener los valores de las pérdidas por fricción en todo el sistema circulatorio, además podemos observar las recomendación para la utilización caracterizada de las bombas y el tipo de combinaciones más ideal para el tamaño y el área de las boquillas, con el fin de obtener una buena hidráulica y limpieza de pozo.
- Factores tales como la viscosidad, peso del lodo, Yield Point, entre otras, juegan un papel importante al momento de determinar el comportamiento del fluido en la perforación dentro de la sarta y el anular, resaltando en las pérdidas por fricción total.
- Las propiedades reológicas del lodo deberían ser controladas para que se pueda transmitir a la broca la mayor parte posible de la presión máxima de circulación del equipo de perforación, reduciendo las pérdidas de presión parásitas en las conexiones superficiales, la columna de perforación y el espacio anular, sin perjudicar la limpieza del pozo o la suspensión de los sólidos.
- Las velocidades crítica y promedio son parámetros importantes ya que mediante estas, podemos determinar qué tipo de flujo se presenta, para luego utilizar los modelos adecuados y obtener mejores resultados en cada sección del pozo.
- El caudal de la bomba es el que domina el tiempo que dura en salir todos los rípios en la limpieza de pozo, este tiempo se ve afectado directamente por las capacidades anulares presentes en el estado mecánico.

- Los modelos reológicos utilizados en esta herramienta son los más adecuados para describir el comportamiento del lodo a lo largo de la sarta y el espacio anular, presentándose diferencias mínimas en los cálculos de pérdidas de fricción.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda con el apoyo tecnológico realizar una Aplicación móvil, que sincronizadamente trabaje con el software Web, así obtener otra opción anexa de manejo del software.
- Se recomienda obtener gráficamente resultados, que permitan identificar y comparar los posibles incidentes, debido a los diferentes cambios en las propiedades reológicas, de limpieza entre otros, para así comparar con datos reales.
- Se debe escoger un numero de boquillas adecuado para evitar pérdidas excesivas de presión en la broca, de esta manera se tiene una presión de bombeo adecuada y se evita el sobredimensionamiento de los equipos.
- Se debe utilizar un caudal óptimo recomendado, ya que se pueden presentar problemas operacionales asociados a la limpieza del hueco o en el peor de los casos a la erosión del mismo.
- Se debe escoger el tipo de equipo de superficie adecuado a utilizar, pues de este valor depende unos buenos cálculos para las pérdidas en las conexiones que representan su pozo.
- Es importante identificar el tipo de flujo presentado en cada sección dentro de la sarta y el anular, puesto que para un flujo laminar las perdidas serían mucho menores que en un flujo turbulento, por eso es importante que las velocidades de acarreo en el anular sean adecuadas para que se presente un flujo laminar, de lo contrario podríamos obtener problemas en la limpieza del hueco

- Esta herramienta constituye una guía práctica de cómo se debe realizar los cálculos hidráulicos, sin embargo el ingeniero debe estar siempre atento a la escogencia adecuada en las propiedades del lodo y equipos para tomar las decisiones adecuadas y así culminar con éxito la perforación.

## BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Rheology and Hydraulics of oil-well Drilling fluids. API Recommended Practice 13D, Washington D.C., 2006.
2. ANNIS Max R. and SMITH, Martin V. Drilling Fluids Technology, EXXON COMPANY, 1974.
3. ANNIS, M.R. and SMITH, M.V. Drilling Fluids Technology. Exxon Company, U.S.A. 1996.
4. API ENERGY. Manual de Fluidos de Perforación. Capítulo 5. Dallas, Texas. 2001.
5. ARIZA LEÓN, Emiliano. Principios de hidráulica de perforación, 2007.
6. BAKER HUGHES. Drilling Fluids, Reference Manual. 2006.
7. BAROID PETROLEUM SERVICES. Manual de fluidos de Baroid. 1995.
8. ESTERLIN, Juan Gabriel y GOMEZ HERREÑO, Miguel Armando. Metodología para el cálculo de reología e hidráulica para Pozos estratigráficos profundos, usando una herramienta Software (compass y Well plan). Bucaramanga, 2011, Trabajo de grado (Ingeniero de petroleos). Universidad industrial de Santander. Facultad Físico- Químicas. Escuela de Ingeniería de petroleos.
9. HALLIBURTON. Tecnología aplicada de lodos. 1981.
10. HAWKER, Dave. Datalog. Hidráulica del fluido de perforación, Enero 2001.

11. HUSSAIN, Rabia. Oilwell Drilling Engineering,
12. HUSSAIN, Rabia. Well Engineering & Construction.
13. MCCAIN, W.D; the Properties of Petroleum Fluids. Penn Well, Tulsa. OK, 1973.
14. PEMEX. Guia de diseños para la hidráulica en la perforación de pozos petroleros.
15. PRASSL, Wolfgang F. Drilling Engineering, Curtin University of Technology, Master of Petroleum Engineering.
16. SCHLUMBERGER. DPT Diseño de Sarta de Perforación y de BHA.
17. SCHLUMBERGER. Manual de Perforación Drilling School.

## ANEXOS

### Anexo A. Nomenclatura

$P$  = Pérdida de presión por fricción (psi)

$\rho$  = Densidad (ppg)

$\Delta P_f$  = Pérdidas por fricción en el espacio anular, (psi)

$SIDPP$  = Shut in drill pipe pressure, (ppg)

$BHP$  = Presión de fondo, (psi)

$SICP$  = Shut in casing pressure, (psi)

$PV$  = Viscosidad plástica, (cp)

$YP$  = Punto de cedencia, (lb/100 ft<sup>2</sup>)

$Q$  = Caudal de perforación, (gal/min)

$ID$  = Diámetro interno del drill collar o drill pipe, (in)

$D_h$  = Diámetro interno del casing o del hoyo, (in)

$OD$  = Diámetro externo del drill collar o drill pipe, (in)

$N_{re}$  = Numero de Reynolds, (adimensional)

$f$  = Factor de fricción, (adimensional)

$n$  = Índice de ley de potencia, (adimensional)

$K$  = Índice de consistencia, (adimensional)

$V_c$  = Velocidad crítica, (ft/s)

$\bar{V}$  = Velocidad promedio, (ft/s)

$\mu$  = Viscosidad, (cp)

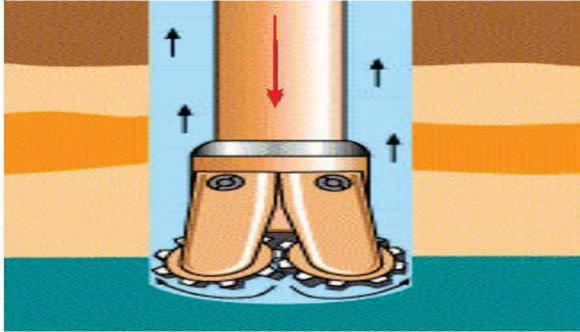
$\Theta_{300}$  = Velocidad medida en el viscosímetro de fann a 300rpm

$\Theta_{600}$  = Velocidad medida en el viscosímetro de fann a 600rpm

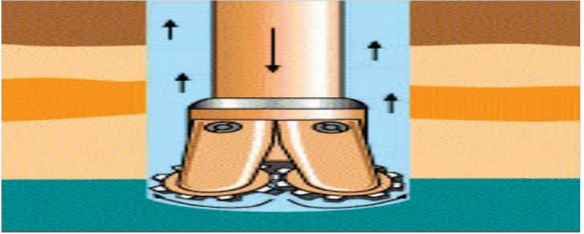
$2\Theta$  = Velocidad medida en el viscosímetro de fann a 2rpm

$L$  = longitud, (ft)

**Anexo B.** Sumario de ecuaciones: Pérdidas de presión dentro de la sarta de perforación.

<b>PÈRDIDAS POR FRICCIÓN DENTRO DE LA SARTA DE PERFORACIÓN</b>	
	<b>MODELO LEY DE POTENCIA</b>
	<b>1. Determinar n y k :</b>
	$PV = \theta_{600} - \theta_{300}$
	$YP = 2\theta_{300} - \theta_{600}$
	$n = 3.32 \log\left(\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}}\right), k = \left(\frac{\theta_{300}}{511^n}\right)$
<b>MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM</b>	
<b>1. Determinar la velocidad promedio:</b>	
$\bar{V} = \frac{24.5Q}{D^2} \left(\frac{ft}{min}\right)$	
<b>2.</b>	<b>2.</b>
$V_c = \frac{97 PV + 97 \sqrt{(PV)^2 + 8.2\rho D^2 YP}}{\rho D} \left(\frac{ft}{min}\right)$	$V_c = \left(\frac{5.82(10^4)k}{\rho}\right)^{\left(\frac{1}{2-n}\right)} \left(\frac{1.6}{D} \frac{3n+1}{4n}\right)^{\left(\frac{n}{2-n}\right)}$
$\bar{V} = \frac{24.5Q}{D^2} \left(\frac{ft}{min}\right)$	
<b>3. Si <math>\bar{V} &gt; V_c</math> el flujo es turbulento; Use :</b>	<b>3. Si <math>\bar{V} &gt; V_c</math> el flujo es turbulento; Use :</b>
$P = \frac{8.91(10^{-5})\rho^{0.8} Q^{1.8} (PV)^{0.2} L}{D^{4.8}} (PSI)$	$P = \frac{8.91(10^{-5})\rho^{0.8} Q^{1.8} (PV)^{0.2} L}{D^{4.8}} (PSI)$
<i>Si <math>\bar{V} &lt; V_c</math>, el flujo es la min ar; Use :</i>	<i>Si <math>\bar{V} &lt; V_c</math>, el flujo es la min ar; Use :</i>
$P = \frac{L}{300D} \left[ YP + \frac{(PV)\bar{V}}{5D} \right] (PSI)$	$P = \left(\frac{1.6\bar{V}}{D} \frac{(3n+1)}{4n}\right)^n \frac{KL}{300D} (PSI)$

Anexo C. Sumario de ecuaciones: Pérdidas de presión en el anular

<b>PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN EL ANULAR</b>	
<b>MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM</b>	
<b>1. Determinar la velocidad promedio:</b>	
$\bar{V} = \frac{24.5Q}{D_h^2 - OD_p^2} \left( \frac{ft}{min} \right)$	<b>MODELO LEY DE POTENCIA</b>
<b>2. Determinar la velocidad crítica:</b>	<b>1. Determinar n y k utilizando las fórmulas de la tabla anterior.</b>
$V_c = \frac{97PV + PV \sqrt{(PV)^2 + 6.2\rho D_c^2 YP}}{\rho D_c}$ <p>Donde <math>D_c = D_h - OD_{dp}</math> O <math>(OD_{dc})</math></p>	<b>2.</b> $V_c = \left( \frac{3.878(10^4)k}{\rho} \right)^{\frac{1}{(2-n)}}$ $* \left( \frac{2.4}{D_h - OD_p} \left( \frac{2n+1}{3n} \right) \right)^{\frac{n}{(2-n)}} \left( \frac{ft}{min} \right)$
<b>3a.</b> Si $\bar{V} > V_c$ el flujo es turbulento; Use :	$\bar{V} = \frac{24.5Q}{D_h^2 - OD_p^2} \left( \frac{ft}{min} \right)$
$P = \frac{8.91 * 10^{-5} \rho^{0.8} Q^{1.8} (PV)^{0.2} L}{(D_h - OD)^3 (D_h + OD)^{1.8}} (PSI)$ <p>Donde OD es el diámetro externo del <math>D_c</math> o <math>D_p</math></p>	<b>3a.</b> Si $\bar{V} > V_c$ el flujo es turbulento; Use :
<b>3b.</b> Si $\bar{V} < V_c$ , el flujo es la min ar; Use :	$P = \frac{8.91 * 10^{-5} \rho^{0.8} Q^{1.8} (PV)^{0.2} L}{(D_h - OD)^3 (D_h + OD)^{1.8}} (PSI)$
$P = \frac{L PV \bar{V}}{60000 D_c^2} + \frac{L YP}{200 D_c} (PSI)$ <p>Donde:  <math>D_c =</math> Distancia anular  <math>\bar{V} =</math> Velocidad promedio</p>	<b>3b.</b> Si $\bar{V} < V_c$ , el flujo es la min ar; Use :
	$P = \left( \frac{2.4 \bar{V}}{(D_h - OD)} \left( \frac{2n+1}{3n} \right) \right)^n \frac{KL}{300(D_h - OD)} (PSI)$

Anexo D. Tipos de conexiones superficiales

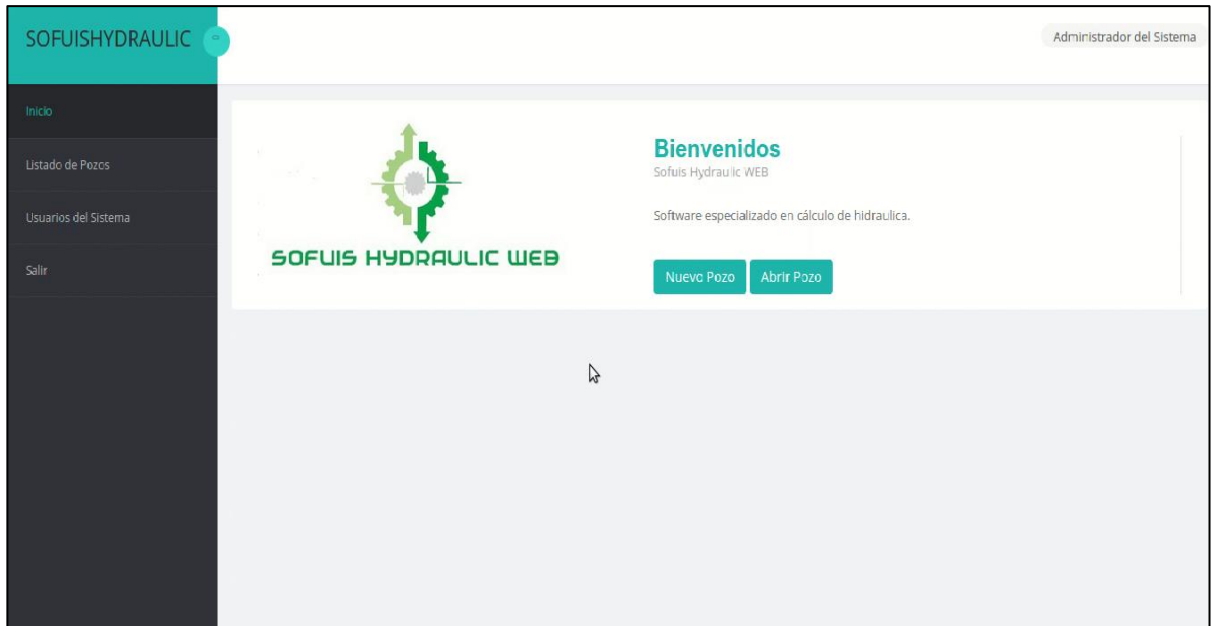
<b>CONEXIONES SUPERFICIALES</b>								
	<b>COMBINACIONES TÍPICAS(CASOS)</b>							
	<b>CASO 1</b>		<b>CASO 2</b>		<b>CASO 3</b>		<b>CASO 4</b>	
	<b>ID (Pulg)</b>	<b>L (m)</b>	<b>ID (Pulg)</b>	<b>L (m)</b>	<b>ID (Pulg)</b>	<b>L (m)</b>	<b>ID (Pulg)</b>	<b>L (m)</b>
<b>TUBERÍA DE PIE</b>	3.00	12.2	3.50	12.2	4.00	13.7	4.00	13.7
<b>MANGUERA</b>	2.00	13.7	2.50	16.8	3.00	16.8	3.00	16.8
<b>TUBO LAVADOR DE LA UNIÓN GIRATORIA Y CUELLO DE GANSO</b>	2.00	1.2	2.50	1.5	2.50	1.50	3.00	1.8
<b>KELLY</b>	2.25	12.2	3.25	12.2	3.25	12.2	4.00	12.2
<b>TUBERÍA DE PERORACIÓN</b>	<b>LONGITUD EQUIVALENTE DE LAS CONEXIONES SUPERFICIALES EN METROS DE TUBERÍA DE PERFORACIÓN</b>							
<b>OD (Pulg)</b>								
3.5	13.3	2.764	133.2	49.1	-	-		
4.5	16.6	3.826	-	232.0	146.0	103.7		
5.0	19.5	4.276	-	-	248.8	176.5		

**Anexo E. Valores de la constante E**

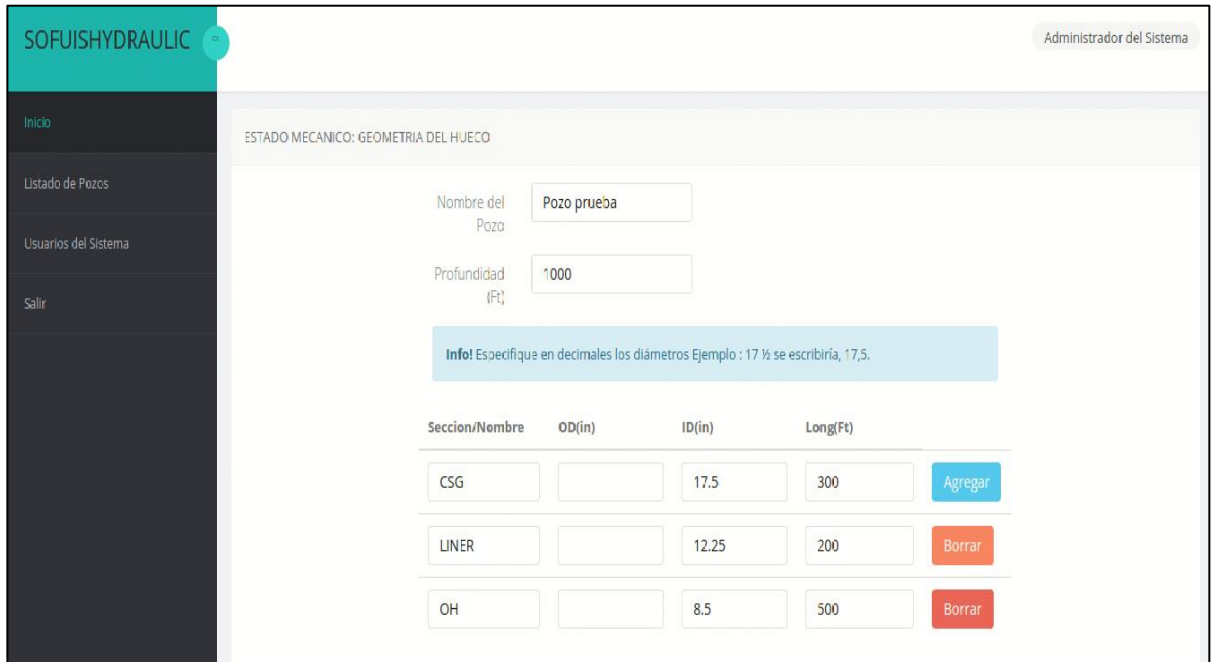
<b>VALORES DE LA CONSTANTE E</b>		
<b>TIPO DE EQUIPO DE SUPERFICIE</b>	<b>VALORES DE E</b>	
	<b>UNIDADES IMPERIALES</b>	<b>UNIDADES MÉTRICAS</b>
<b>1</b>	2.5E-4	8.8E-6
<b>2</b>	9.6E-5	3.3E-6
<b>3</b>	5.3E-5	1.8E-6
<b>4</b>	4.2E-5	1.4E-6

## Anexo F. Ejemplo de aplicación

- Pantalla de entrada



- Datos de Entrada



SOFUSHYDRAULIC Administrador del Sistema

Inicio

Listado de Pozos

Usuarios del Sistema

Salir

LINER

12.25

200

Borrar

---

OH

8.5

500

Borrar

---

SECCION DE TUBERIA

Nombre Tuberia	OD(in)	ID(in)	Long(Ft)	
DP	5	4.276	400	Agregar
HWDP	5	3	300	Borrar
DC	8	3	300	Borrar

SOFUSHYDRAULIC Administrador del Sistema

Inicio

Listado de Pozos

Usuarios del Sistema

Salir

DC

8

3

300

Borrar

---

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION

**MW**

**YP**

**Pv**

- Recomendación de caudal para perforar

SOFUISHYDRAULIC Administrador del Sistema

Inicio

Listado de Pozos

Usuarios del Sistema

Salir

Diametros API de brocas	Galonaje Min (gpm)
26	1200
17 1/2	1200
12 1/4	800
8 1/2	400
6	250

Caudal para Perforar:  Digitar Caudal

SELECCIONE EL VALOR DEL CAUDAL A UTILIZAR EN LA TABLA SUPERIOR (Doble Click).

**Señor Usuario** Si usted utiliza un galonaje **DIFERENTE** que el galonaje recomendado, asuma todos los problemas asociados a la limpieza del hueco o si es mayor asuma los problemas de erosión del mismo.

- Valor recomendado de caudal de perforación

SOFUISHYDRAULIC Administrador del Sistema

Inicio

Listado de Pozos

Usuarios del Sistema

Salir

CAUDAL PARA PERFORAR (GALONAJE DE PERFORACIÓN)\*

Diametros API de brocas	Galonaje Min (gpm)
26	1200
17 1/2	1200
12 1/4	800
8 1/2	400
6	250

Caudal para Perforar:  Digitar Caudal

SELECCIONE EL VALOR DEL CAUDAL A UTILIZAR EN LA TABLA SUPERIOR (Doble Click).

- Escoger número de Nozzles a utilizar

**SOFUISHYDRAULIC** Administrador del Sistema

26	1200
17 1/2	1200
12 1/4	800
8 1/2	400
6	250

Caudal para Perforar:  Digitar Caudal

SELECCIONE EL VALOR DEL CAUDAL A UTILIZAR EN LA TABLA SUPERIOR (Doble Click).

**NUMERO DE NOZZLE**

Nozzle a Utilizar:  POR FAVOR SELECCIONE LOS NUMEROS DE NOZZLE A UTILIZAR.

Cancelar Continuar

- Selección del tipo de modelo Hidráulico

**SOFUISHYDRAULIC** Administrador del Sistema

Seleccione el tipo de Modelo Hidraulico a Utilizar x

HIDRAULICA P. Bingham

HIDRAULICA L. Potencia

Caudal para Perforar:  Digitar Caudal

- Selección del tipo de equipos de superficie

Hidráulica P. Bingham

Surface Equipmet Type	Standpipe		Rotary Hose		Swivel		Kelly	
	Length (Ft)	Id (in)	Length (Ft)	Id (in)	Length (Ft)	Id (in)	Length (Ft)	Id (in)
1	40	3.0	40	2.0	4	2.0	40	2.25
2	40	3.5	55	2.5	5	2.5	40	3.25
3	45	4.0	55	3.0	5	2.5	40	3.25
4	45	4.0	55	3.0	6	3.0	40	4.00

Surface Equipment:  
4

Metodo a utilizar para perdidas en StandPipe y Broca:

- Potencia Hidraulica
- Potencia Hidraulica
- Impacto Hidraulico

Realizar Cálculos

- Pérdidas en la perforación

The screenshot displays the SOFUISHYDRAULIC software interface. On the left is a dark sidebar with a teal header containing the logo and the text "SOFUISHYDRAULIC". The sidebar menu includes "Inicio", "Listado de Pozos", "Usuarios del Sistema", and "Salir". The main content area is divided into three sections, each with a title and a data field:

- PERDIDAS EN SUPERFICIE**: A data field showing the value "23,29".
- PERDIDAS EN LA SARTA DE PERFORACION**: A data field showing the value "170,458".
- PERDIDAS DE PRESION EN EL ANULAR**: A data field showing the value "776,223".

Below the third data field, there is a small icon of a hand with a pointing finger.

- Sugerencia del tipo de bomba a seleccionar y boquillas

The screenshot displays the SOFUISHYDRAULIC software interface. On the left is a dark sidebar with navigation options: Inicio, Listado de Pozos, Usuarios del Sistema, and Salir. The main content area is divided into three sections:

- PERDIDAS DE PRESION EN EL STANDPIPE Y LA BROCA:** This section contains two input fields. The first is labeled "PERDIDAS DE PRESION EN EL STANDPIPE" with a value of 2935. The second is labeled "PERDIDAS DE PRESION EN LA BROCA" with a value of 1965,029.
- BOMBA A SELECCIONAR:** This section features a single input field containing the text "F-750-HP-TRIPLEX-6"\*8" LINER SIZE 5.250 (In) Con 95% Eficiencia".
- ESPECIFICACIONES DE LOS NOZZLE:** This section contains three input fields. The first is labeled "VELOCIDAD DE LOS NOZZLE" with a value of 467,639. The second is labeled "AREA TOTAL DE LOS NOZZLE" with a value of 0,274. The third is labeled "TAMAÑO DE LOS NOZZLE EN MULTIPLES DE 32" with a value of 10,907.

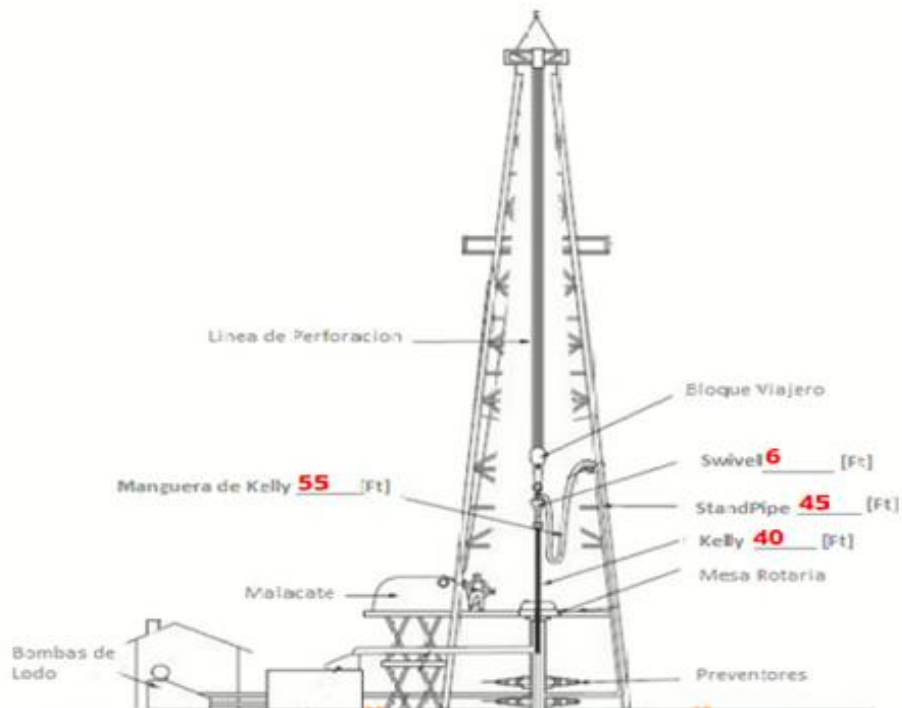
TIPO DE COMBINACION Y TAMAÑO DE NOZZLE RECOMENDADO EN MULTIPLES DE 32

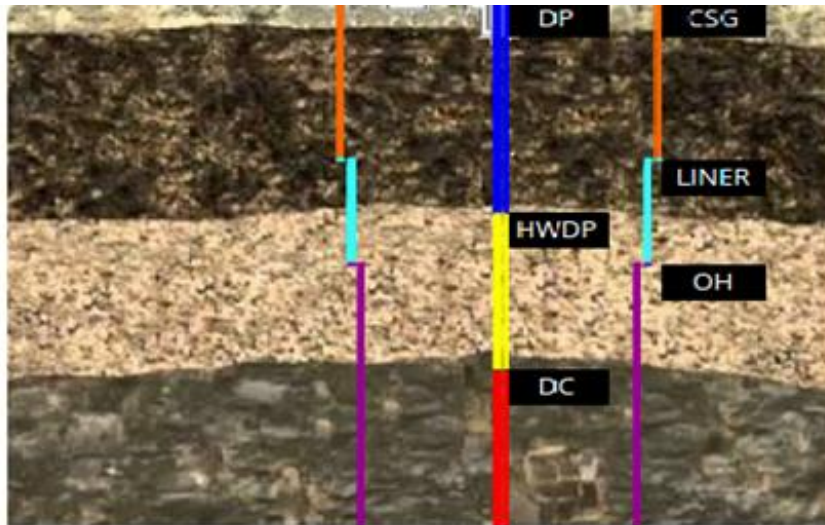
11 11 11

Ver Reporte

- Esquema grafico del estado mecánico del pozo


ESQUEMA





- Reporte de hidráulica

### REPORTE DE HIDRAULICA

	NOMBRE DEL POZO	Pozo prueba	FECHA	2015-10-01							
	COMPAÑIA		PROFUNDIDAD	1000							
	RIG										
PROFUNDIDAD DEL POZO: 1000 ft		CAUDAL DE PERFORACION:		400 gal/min							
		DENSIDAD DEL LODO:		10 ppg							
Seccion/Nombre	OD(in)	ID(in)	Long(ft)	Propiedades Físicoquímicas del fluido de perforación:							
CSG	0	17,5	300	Pv:	20 cP	YP:	22 lb/100ft <sup>2</sup>				
LINER	0	12,25	200								
OH	0	8,5	500								
MODELO PLASTICO DE BINGHAM				ANULAR (Broca a Superficie)				PIPES (Superficie a Broca)			
Seccion/Nombre	OD(in)	ID(in)	Long(ft)	Vel(ft/min)	V. Crit(ft/min)	Tip. Flujo	Perdidas (psi)	Vel	V. Crit(ft/min)	Tip Flujo	Perdidas (psi)
CSG / DP	5	4,275	300	34,344	374,1	Laminar	2,662	535,983	459,853	Turbulento	13,865
LINER / DP	5	4,275	100	78,361	386,001	Laminar	1,567	535,983	459,853	Turbulento	4,622
LINER / HWDP	5	3	100	78,361	386,001	Laminar	1,567	1088,889	481,704	Turbulento	25,329
OH / HWDP	5	3	200	207,407	417,935	Laminar	7,414	1088,889	481,704	Turbulento	50,657
OH / DC	8	3	300	1187,879	916,094	Turbulento	763,013	1088,889	481,704	Turbulento	75,986

RESUMEN: PERDIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA

PERDIDAS TOTALES DE PRESION	MODELO PLASTICO DE BINGHAM
SUPERFICIE	23,29 psi
DENTRO DE LA SARTA	170,458 psi
ANULAR	776,223 psi
STANDPIPE	2935 psi
BROCA	1965,029 psi
TOTAL:	5870

ESPECIFICACIONES DE LOS NOZZLE:

VELOCIDAD DE LOS NOZZLE:	467,639 Ft/s	TIPO DE COMBINACION Y TAMAÑO DE NOZZLE	
AREA TOTAL DE LOS NOZZLE:	0,274 In <sup>2</sup>	RECOMENDADO EN MULTIPLES DE 32	
TAMAÑO DE LOS NOZZLE EN MULTIPLES DE 32:	10,907	# NOZZLE: 3	11 11 11

BOMBA A SELECCIONAR: F-750-HP-TRIPLEX-6"8" LINER SIZE 5.25 (in) - Con 95% Eficiencia