

**MÉTODO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO EN FUNCIÓN DE LAS  
PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO PARA DETERMINAR LAS  
PERDIDAS DE PRESIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CRUDOS PESADOS EN  
LOS CAMPOS DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES**

**JOSE LUIS LOPEZ POMBO  
EDINSON GIOVANY MOSQUERA CEPEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2017**

**MÉTODO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO EN FUNCIÓN DE LAS  
PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO PARA DETERMINAR LAS  
PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CRUDOS PESADOS EN  
LOS CAMPOS DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES.**

**JOSE LUIS LOPEZ POMBO  
EDINSON GIOVANY MOSQUERA CEPEDA**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de petróleos**

**Director**

**José Carlos Cárdenas Montes  
M.Sc en Ingeniería de Hidrocarburo.**

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

**2017**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi PADRE Rigoberto Mosquera, mi MADRE María Esperanza Cepeda que siempre creyó en mí y me encomendó a todos sus santos, mi HERMANA Stephany Mosquera, mi NOVIA Ángela Delgado que me sirvió de apoyo en momentos difíciles, por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora. Por último a mi compañero de tesis porque aunque tuvimos nuestras diferencias logramos dejar al lado los orgullos y trabajar en equipo para llegar a cumplir nuestros objetivos.

***Edinson Giovany Mosquera Cepeda.***

## COMPLETO

	Pág.
INTRODUCCION.....	17
1. NOCIONES PRELIMINARES DE LA METODOLOGÍA .....	19
1.1 CRUDO PESADO.....	19
1.2 FLUJO EN TUBERÍA .....	19
1.2.1 Flujo Multifásico en Tuberías .....	20
1.3 PATRONES DE FLUJO .....	20
1.3.1 Flujo Tipo Burbuja.....	21
1.3.2 Flujo Tapón o Slug.....	22
1.3.3 Flujo de Transición.....	22
1.4 REOLOGÍA .....	23
1.4.1 Parámetros Reológicos.....	23
1.5 MODELOS REOLÓGICOS .....	25
1.5.1 Modelo Plástico de Bingham.....	26
1.5.6 Ley de Potencia .....	26
1.5.7 Ley de Potencia Modificada .....	26
1.5.8 Modelo de Casson .....	27
1.6 MODELOS EXPERIMENTALES.....	27
1.6.1 Viscosímetro de Indicación Directa.....	27
1.7 CAÍDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍA .....	28
1.8 ECUACIÓN GENERAL PARA EL CÁLCULO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN PARA UN FLUIDO MULTIFÁSICO.....	29
1.8.1 Gradiente de Aceleración.....	29
1.8.2 Gradiente de Fricción.....	29
1.9 CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN DE FLUJO MULTIFÁSICO EN LA TUBERÍA.....	30
1.9.1 Correlaciones Empíricas.....	30

1.9.2 Correlación Hagedorn And Brown .....	31
2. GENERALIDADES E INFORMACIÓN PRELIMINAR PARA REALIZAR LA METODOLOGÍA .....	32
2.1 CUENCA LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA .....	32
2.2 MODELOS EXPERIMENTALES.....	33
2.2.1 Modelos Básicos de Los Pozos .....	34
2.2.2 Materiales y Equipos.....	34
3. PROCEDIMIENTOS PARA DESARROLLAR LA METODOLOGÍA .....	35
3.1 PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD API POR EL MÉTODO DEL HIDRÓMETRO.....	35
3.2 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE AGUA POR CENTRIFUGACIÓN.....	36
3.3 PROCEDIMIENTO PARA CALCULO DE VISCOSIDAD EN VISCOSÍMETRO BROOKFIELD.....	37
3.4 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS.....	40
3.4.1 Modelo Plástico de Bingham.....	40
3.4.2 Ley de Potencia .....	41
3.4.3 Ley de Potencia Modificada .....	41
3.4.4 Modelo de Casson .....	42
3.5 PROCEDIMIENTO PARA SELECCIÓN DEL MODELO.....	42
3.6 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN.....	43
3.6.1 Ecuación General de Hagedorn And Brown .....	43
3.6.2 Gradiente de Elevación o Hidrostático .....	43
3.6.3 Pérdidas de Presión por Aceleración .....	44
3.6.4 Pérdidas de Presión Por Fricción.....	44

4. METODOLOGÍA GENERAL PARA CALCULAR PERDIDAS DE PRESION EN FUNCIÓN DE LOS PARAMETROS REOLÓGICOS .....	49
5. CÁLCULOS DEL EXPERIMENTO.....	52
5.1 DATOS EXPERIMENTALES .....	52
5.2 PROPIEDADES DEL CRUDO MUESTRA (BLACK OIL).....	52
5.3 DATOS PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	53
5.3.1 Lecturas Viscosímetro .....	53
5.4 DATOS ANALÍTICOS PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	53
5.4.1 Esfuerzo de Corte y Tasa de Corte Medidos .....	54
5.5 PROPIEDADES REOLÓGICAS CALCULADAS CON LOS MODELOS.....	54
5.5.1 Plástico de Bingham .....	54
5.5.2 Ley de Potencia .....	55
5.5.3 Ley de Potencia Modificada .....	56
5.5.4 Modelo de Casson .....	56
5.6 SELECCIÓN DEL MODELO.....	57
5.7 PÉRDIDAS DE PRESIÓN.....	58
5.7.1 Plástico de Bingham .....	58
5.7.2 Ley de Potencia .....	59
5.7.3 Ley de Potencia Modificada .....	59
5.7.4 Modelo de Casson .....	60
5.7.5 Comparación de las Perdidas Calculadas. ....	61
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
7. CONCLUSIONES .....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	67

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Modelo básico de los pozos.....	34
Tabla 2.lista de materiales y equipos.....	34
Tabla 3. PROPIEDADES DE CRUDO .....	52
Tabla 4. MODELO BASICO DE POZO .....	52
Tabla 5. LECTURAS DEL VISCOSIMETRO .....	53
Tabla 6. ESFUERZO DE CORTE Y TASAS DE CORTE MEDIDOS.....	54
Tabla 7.ESFUERZOS DE CORTE CALCULADO MODELO PASTICO DE BINGAHM .....	54
Tabla 8 PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS MODELO PLASTICO DE BINGHAM .....	55
Tabla 9.ESFUERZO DE CORTE CALCUADO LEY DE POTENCIA .....	55
Tabla 10. PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS LEY DE POTENCIA...55	
Tabla 11.ESFUERZO DE CORTE CALCULADO MODELO LEY DE POTENCIA MODIFICADA .....	56
Tabla 12.PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS LEY DE POTENCIA MODIFICADA .....	56
Tabla 13. ESFUERZO DE CORTE CALCULADOS MODELO DE CASSON .....	56
Tabla 14. PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS METODO DE CASSON .....	57
Tabla 15.COMPARACION ERROR PROMEDIO DE LOS METODOS .....	57
Tabla 16 SELECCIÓN DEL METODO.....	57
Tabla 17. DATOS DE ENTRADA PARA CALCULAR PÉRDIDAS.....	58
Tabla 18. CALCULO DE PERDIDAS PLASTICO DE BINGAHM.....	58
Tabla 19. DATOS DE ENTRADA PARA CALCULO DE PERDIDAS MODELO LEY DE POTENCIA.....	59
Tabla 20.CÁLCULO DE PÉRDIDAS MODELO LEY DE POTENCIA .....	59

Tabla 21 DATOS DE ENTRADA PARA CÁLCULOS DE PÉRDIDAS LEY DE POTENCIA MODIFICADA .....	60
Tabla 22.CÁLCULOS DE PERDIDAS MODELO LEY DE POTENCIA MODIFICADA.....	60
Tabla 23.DATOS DE ENTRADA PARA CÁLCULOS DE PERDIDA MODELO DE CASSON.....	60
Tabla 24. CÁLCULOS DE PÉRDIDAS MODELO DE CASSON .....	61
Tabla 25.COMPARACION DE LAS PERDIDAS CALCULADAS .....	61
Tabla 26 RESULTADOS DE SIMULACION (PSIA).....	61
Tabla 27. Comparación de pérdidas calculadas con los modelos y con las calculadas con la simulación.....	62

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Flujo burbuja .....	21
Figura 2. Flujo tipo tapón. ....	22
Figura 3. Flujo de transición.....	22
Figura 4. Esfuerzo de corte vs tasa de corte .....	24
Figura 5. Viscosímetro de lectura directa.....	28
Figura 6. Cuenca llanos orientales de Colombia.....	33
Figura 7. Diagrama de flujo para el calculo de las caidas de presion . ....	51

## LISTA DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
Ecuación 1 .....	26
Ecuación 2 .....	26
Ecuación 3 .....	26
Ecuación 4 .....	27
Ecuación 5 .....	29
Ecuación 6 .....	29
Ecuación 7 .....	30
Ecuación 8 .....	37
Ecuación 9 .....	38
Ecuación 10 .....	38
Ecuación 11 .....	38
Ecuación 12 .....	39
Ecuación 13 .....	39
Ecuación 14 .....	40
Ecuación 15 .....	40
Ecuación 16 .....	40
Ecuación 17 .....	40
Ecuación 18 .....	41
Ecuación 19 .....	41
Ecuación 20 .....	41
Ecuación 21 .....	41
Ecuación 22 .....	41
Ecuación 23 .....	42
Ecuación 24 .....	42
Ecuación 25 .....	42
Ecuación 26 .....	42
Ecuación 27 .....	43

Ecuación 28 .....	44
Ecuación 29 .....	44
Ecuación 30 .....	45
Ecuación 31 .....	45
Ecuación 32 .....	45
Ecuación 33 .....	46
Ecuación 34 .....	46
Ecuación 35 .....	46
Ecuación 36 .....	46
Ecuación 37 .....	46
Ecuación 38 .....	47

## NOMENCLATURA

$BHA$	Bottom Hole Assembly
$d$	Diámetro interno de la tubería, <i>pulg</i>
$f$	Factor de fricción de Fanning, <i>adimensional</i>
$\gamma$	Velocidad de corte, $s^{-1}$
$k$	Índice de consistencia, $cP_{eq}$
$L$	Longitud de la sección de análisis, <i>pies</i>
	Índice de comportamiento de flujo, <i>adimensional</i>
$N$	Velocidad de rotación del rotor, <i>RPM</i>
$NRe$	Número de Reynolds, <i>adimensional</i>
$NRec$	Número de Reynolds crítico, <i>adimensional</i>
$q$	Tasa de flujo, <i>gal/min</i>
$v$	Velocidad axial de flujo, <i>pies/s</i>
$\Delta Pa$	Pérdidas de presión por fricción en el anular, <i>psi</i>
$\Delta Pt$	Pérdidas de presión por fricción en la tubería, <i>psi</i>
$\theta_x$	Lectura a X RPM en el viscosímetro de Fann.
$\mu_p$	Viscosidad plástica, <i>cP</i>
$\rho$	Densidad del fluido, <i>lbm/gal</i>
$\tau$	Esfuerzo de corte, <i>lbf/100ft<sup>2</sup></i>
$\tau_y$	Punto de cedencia, <i>lbf/100ft<sup>2</sup></i>

## RESUMEN

**TITULO:** METODO EXPERIMENTAL Y ANALITICO EN FUNCION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DEL FLUIDO PARA DETERMINAR LAS PERDIDAS DE PRESION EN LA PRODUCCION DE CRUDOS PESADOS EN LOS CAMPOS DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES<sup>1</sup>.

**AUTORES:** EDINSON GIOVANY MOSQUERA CEPEDA.  
JOSE LUIS LOPEZ POMBO.<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** crudos pesados, reología, viscosidad, punto de cedencia.

### DESCRIPCIÓN

En este proyecto se elaboró una metodología para el cálculo de las caídas de presión en la producción de crudo pesado, estas caídas de presión son calculadas en base a las propiedades reológicas del crudo las cuales nos permiten modelar el comportamiento y movimiento del fluido a través de la tubería.

Para el cálculo de las propiedades se tomaron cuatro modelos reológicos, los cuales se compararon para averiguar cuál de ellos modelan mejor las características reológicas. Los modelos que se emplearon para este análisis son ley de potencia, plástico de Bingham, ley de potencia modificada y Casson. Para cada modelo se describe la ecuación que lo representa. Además se detalla la manera para calcular las propiedades reológicas a través del viscosímetro de rotación directa y las ecuaciones para que se puedan calcular las caídas de presión en el sistema de producción. Para analizar cada modelo se desarrolló un programa en Excel, el cual solo necesita los datos de las pruebas en el viscosímetro (esfuerzo de corte y tasa de corte) como la densidad del fluido, la distancia del fondo de pozo a cabeza, caudal de producción y otros cada uno de estos datos necesarios para poder calcular las propiedades reológicas. Este programa además también calcula simultáneamente las caídas de presión totales para cada modelo y su error. Los resultados obtenidos no son suficientes para decidir cuál de los métodos que modele de manera más acertada las pérdidas de presión que se pueden obtener en crudos pesados, pero sí cumplió con las expectativas en cuanto a que es posible hacer estos cálculos, pero se debe tener un apoyo económico mayor para evitar errores. También se pudo observar que el tener un mayor acceso a informaciones de datos daría una menor incertidumbre en los resultados.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado

<sup>2</sup> Aspirantes al título de Ingenieros de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físicoquímicas. Escuela de ingeniería de Petróleos. Director. Ing. José Carlos Cárdenas Montes.

## ABSTRACT

**TITLE:** METHOD EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL DEPENDING ON THEM PROPERTIES RHEOLOGICAL OF THE FLUID TO DETERMINE THEM LOST OF PRESSURE IN THE PRODUCTION OF RAW HEAVY IN THEM FIELDS OF THE BASIN OF THEM LLANOS ORIENTALES<sup>3</sup>.

**AUTHORS:** EDINSON GIOVANY MOSQUERA CEPEDA.  
JOSÉ LUIS LÓPEZ POMBO<sup>4</sup>.

**KEY WORDS:** heavy crudes, rheology, viscosity, cadencies.

### DESCRIPTION

In this project is developed a methodology for the calculation of them falls of pressure in the production of crude heavy, these falls of pressure are calculated based on them properties rheological of the crude which us allow modeling the behavior and movement of the fluid through the pipe. For the calculation of the properties were taken four rheological models, which were compared to find out which one best model the rheological properties. Models that were used for this analysis are law power, Bingham plastic, law amended and Casson. For each model describes the equation that represents it. Also details how to calculate through the forward rotation viscometer rheological properties and equations so you can calculate pressure in the production system drops. To analyze each model a program was developed in Excel, which only needs the test data in the viscometer (shear and cutting rate) as the density of the fluid, the distance from the bottom of well head, production flow and others each of these data necessary to calculate the rheological properties. This program also also calculates simultaneously total pressure drops for each model and its error. The results obtained are not enough to decide which of the method that model more accurately the losses of pressure that can be obtained from heavy crudes, but whether it complied with the expectation that it is possible to make these calculations, but one greater economic support should be to avoid mistakes. Also noted that having greater access to information data would a less uncertainty in outcomes.

---

<sup>3</sup> Degree Project

<sup>4</sup> Petroleum Engineer Candidates of the Industrial University of Santander. Faculty of Physical Chemistry. School of Petroleum Engineering. Director. Jose Carlos Cardenas Montes

## INTRODUCCION.

Uno de los problemas más destacados en el proceso de producción de crudos pesados es el cálculo de las caídas de presión, ya que en la actualidad los métodos utilizados para calcular estas caídas de presión suponen flujo newtoniano. Dada que estas suposiciones no son tan reales, la eficiencia en las bombas de producción es baja, haciendo que la producción de crudo no sea la esperada.

En la presente investigación se pretende elaborar una metodología experimental y analítica que permita calcular las caídas de presión tanto para flujo newtoniano como para flujo pseudo plástico. Con el fin de poder lograr esto se debe tener en cuenta las propiedades reológicas del crudo las cuales son muy importantes. Ya que estas nos pueden dar un cálculo más real del comportamiento del fluido al momento de determinar las pérdidas en la tubería de producción, a lo largo del pozo.

Para poder modelar el comportamiento reológicos del crudo pesado se pueden utilizar varios modelos, los cuales nos van a permitir hacer una corrección al comportamiento del fluido a una tasa de corte. Este proyecto además de predecir las pérdidas de presión a través de la tubería de producción también pretende hacer una comparación entre los diferentes modelos reológicos más usados en la industria que son: Plástico de Bingham, Ley de Potencia, Casson y Herschel-Beckley o también llamada ley de potencia modificada.

Estas ecuaciones modelan el comportamiento del crudo en función del número de Reynolds, el cual vamos a calcular utilizando las propiedades reológicas del fluido tales como tasa de corte, esfuerzo de corte, punto de Cedencia y viscosidad. Para

poder determinar estas propiedades se deben realizar pruebas de laboratorio utilizando un viscosímetro de rotación directa.

Además de estas propiedades reológicas se deben tener en cuenta también las características del fluido y del pozo. Con el fin de obtener un modelo más real del comportamiento del fluido a través de la tubería y así poder optimizar la eficiencia de las bombas en la línea de producción.

## **1. NOCIONES PRELIMINARES DE LA METODOLOGÍA.**

En este capítulo se mencionara toda la investigación relacionada con la teoría usada para realizar las pruebas de laboratorio, modelos reológicos y definiciones de los parámetros reológicos y de las propiedades más importantes que se deben tener en cuenta en el experimento.

### **1.1 CRUDO PESADO<sup>5</sup>**

El petróleo pesado se produce típicamente en yacimientos que tienden a ser someros localizados en formaciones geológicamente jóvenes: pleistoceno y mioceno, Estos yacimientos poseen sellos menos efectivos, exponiéndolos a condiciones que conducen a la formación del petróleo pesado.

Originalmente, cuando la roca generadora produce petróleo crudo, este no es pesado. Los expertos generalmente coinciden en que casi todos los petróleos crudos inicialmente tienen densidades entre 30 y 40 grados API. El petróleo se vuelve pesado debido a la degradación ocurrida durante la migración y luego del entrapamiento. La degradación es resultado de un conjunto de procesos biológicos, químicos y físicos.

### **1.2 FLUJO EN TUBERÍA<sup>6</sup>**

Las caídas de presión más frecuentes que se presentan en el sistema de producción se dan en la tubería de producción, y de la línea de descarga. Cuando esta es demasiado larga, por lo tanto es de vital importancia para los ingenieros de

---

<sup>5</sup> ANGUIANO ALVARADO, Aliskair. Metodología para el aseguramiento de flujo de crudo pesado. México D.F, 2009, trabajo de grado (ingeniero de petróleos). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

<sup>6</sup> SOSA SOLIS, Sergio. Aplicación de modelos mecanísticos para la optimización del diámetro de tubería flexibles como sargas de velocidad. México D.F, 2010, trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos), Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

producción contar con métodos y herramientas más adecuadas para predecir las caídas de presión y de esta forma optimizar el diseño de los pozos.

**1.2.1 Flujo Multifásico en Tuberías** El flujo multifásico en tuberías es el movimiento realizado por los líquidos dentro de la tubería. Este flujo se puede mover hacia varias direcciones y su mezcla puede ser homogénea o heterogénea, ya sean empujándose o viajando uno al lado del otro.

El estudio del flujo multifásico en tuberías nos ayuda a predecir la presión necesaria en el fondo de pozo para desplazar un cierto caudal de producción hasta las facilidades en superficie.

Es común que muchos de los conceptos y correlaciones que fueron desarrollados para su aplicación dentro de la ingeniería del petróleo, sean generalizados para su empleo con otros fluidos diferentes al aceite y gas natural, lo que ha favorecido que tengan actualmente diversas áreas de aplicación y una amplia investigación sobre el tema (oleoductos y gasoductos, producción de petróleo y gas costa afuera, la explotación de la energía geotérmica, etc.).

El conocimiento de la velocidad y las propiedades del fluido tales como densidad, viscosidad y en algunos casos tensión superficial son requeridos para calcular los gradientes de presión.

### **1.3 PATRONES DE FLUJO**

Los patrones de flujo se definen como una serie de posiciones que el líquido puede tomar a través de una tubería, la diferencia entre un líquido de una fase y de dos fases, es que el líquido de dos fases (líquido y gaseoso) puede estar distribuido en varias configuraciones a través de la tubería, las cuales difieren unas de otras por la distribución espacial de la interfase.

Los patrones de flujo más frecuentes dependen de las siguientes variables:

- Costos operacionales, principalmente de la cantidad de gas y líquido.
- Dimensiones de la tubería e inclinación.
- Propiedades físicas del líquido, tales como densidad, viscosidad, bsw, etc.

**1.3.1 Flujo Tipo Burbuja** Es tal vez el patrón de flujo que más veces se presenta en movimiento del líquido a través de la tubería .consiste en que el líquido está llenando completamente la tubería y la fase gaseosa se encuentra suspendida en el líquido, en forma de pequeñas burbujas las cuales se mueven a diferentes velocidades dependiendo de su densidad. Las de mayor densidad afectan el gradiente de presión.

La pared de la tubería siempre está en contacto con el líquido, también hay que tener en cuenta que no existe deslizamiento entre las fases ya que la fase gaseosa es siempre movida por el líquido. Ver figura N°1.

Figura 1. Flujo burbuja



Fuente: Multiphase flow in pipes. GRIFFITH, Peter. SPE N°12895

**1.3.2 Flujo Tapón o Slug** Es un flujo compuesto por una serie de bolsas de gas las cuales poseen un diámetro similar a la de la tubería. A estos tapones de gas se le conoce como “burbuja de Taylor”, y su movimiento a través de la tubería consiste en una fila de burbujas de Taylor separadas solamente por algunos baches de líquido. Ver figura N° 2.

Figura 2. Flujo tipo tapón.



Fuente: Multiphase flow in pipes. GRIFFITH, Peter. SPE N°12895

**1.3.3 Flujo de Transición** Régimen de flujo multifásico en tuberías verticales en el cual se mueven por el centro de la tubería de gas grande e irregular, llevando usualmente gotas de aceite con ellos. La mayor parte del resto del aceite fluye a lo largo de las paredes de la tubería hacia arriba. Ver Figura N° 3

Figura 3. Flujo de transición.



Fuente: Multiphase flow in pipes. GRIFFITH, Peter. SPE N°12895

## 1.4 REOLOGÍA

Es el estudio de Los principios físicos que regulan el movimiento y la deformación de la materia cuando es sometida a esfuerzos externos.

La relación entre el esfuerzo y la deformación en materiales que son capaces de fluir; definiendo como flujo la deformación continua generada por la aplicación de una fuerza tangencial. Las propiedades que dependen de esta relación se denominan parámetros reológicos y la forma como se relacionen se llama modelo reológicos.

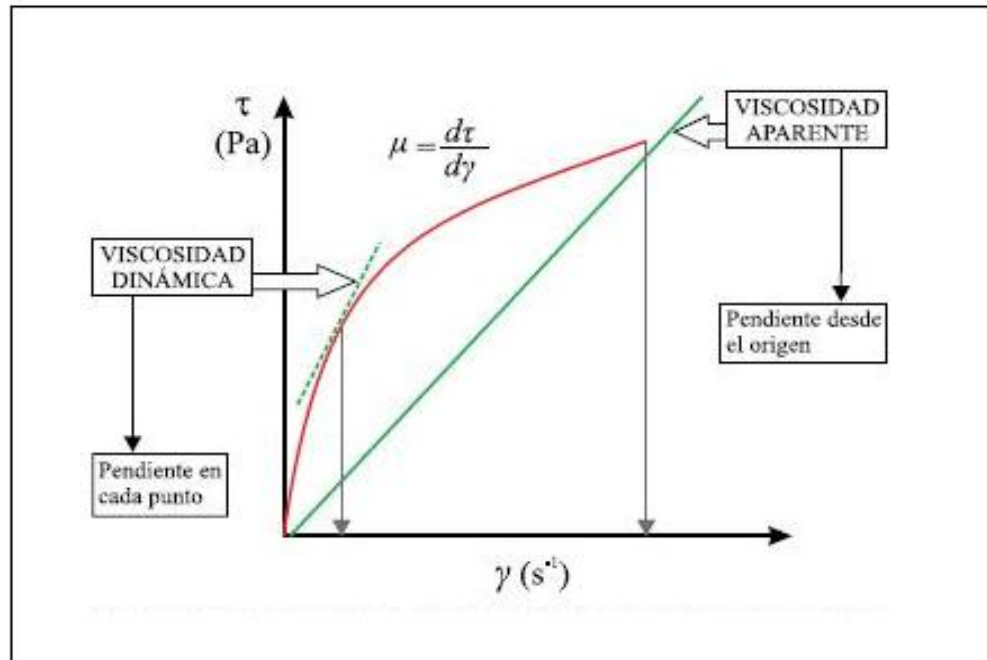
**1.4.1 Parámetros Reológicos<sup>7</sup>** Para la definición de los parámetros reológicos se tiene en cuenta el flujo laminar, fluido que presenta varias capas que se deslizan una sobre otra.

- **Esfuerzo de corte ( $\tau$ )** Resistencia del fluido al movimiento deslizante de sus capas cuando se aplica una fuerza en forma tangencial a su superficie laminar.
- **Tasa de corte ( $\dot{\gamma}$ ):** Diferencia entre las velocidades de dos capas/ la distancia que las separa,  $[\dot{\gamma}] = \text{velocidad} / \text{longitud}$ .
- **Viscosidad ( $\mu$ ):** Resistencia que opone un fluido a ser deformado. En términos Matemáticos es la relación de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte. En la Figura 4 se aprecian los tipos de viscosidad a tratar en este trabajo.

---

<sup>7</sup> BEDOYA MORENO, María; LAMPION, Natalia. Estudio Comparativo de Modelos Reológicos Para Lodos de Perforación. Medellín. 2009, proyecto de grado (ingeniero de petróleos), Universidad nacional de Colombia, facultad de minas.

Figura 4. Esfuerzo de corte vs tasa de corte



Fuente: BEDOYA MORENO, María; Estudio comparativo de modelo reológicos para lodos de perforación.

Cuando un fluido es no newtoniano y no lineal presenta una viscosidad diferente para cada tasa de corte llamada Viscosidad Absoluta o Dinámica. La viscosidad plástica o aparente es generalmente explicada como la parte de la resistencia al flujo causada por fricción mecánica y es afectada por la concentración de sólidos, el tamaño y la forma de las partículas sólidas y la viscosidad de la fase fluida. Una baja viscosidad plástica puede traer ventajas como menores pérdidas de presión a altas tasas de corte y un mejor levantamiento de cortes.

- **Punto de cedencia ( $\tau_y$ ):** Esfuerzo cortante mínimo requerido para que se dé la deformación del fluido. Representa el valor del esfuerzo de corte para una velocidad de deformación igual a cero. Su valor aumenta con el contenido de sólidos y disminuye con aumentos en el contenido de agua o dispersantes.

- **Índice de comportamiento ( $n$ ):** Indica la desviación del comportamiento reológico del fluido con respecto a los fluidos newtonianos, es decir, mientras más se aleje el valor de  $n$  de la unidad más pronunciadas serán las características no newtonianas del fluido.
- **Índice de consistencia ( $k$ ):** Caracterización numérica de la consistencia del fluido, es decir, es una medida indirecta de la viscosidad, pero sus unidades dependen de  $n$ . A medida que  $k$  aumenta el fluido se hace más espeso o viscoso.

## 1.5 MODELOS REOLÓGICOS<sup>8</sup>

Relación matemática que nos permite caracterizar la naturaleza reológica de un fluido estudiando la deformación dada a una tasa de corte específica.

La reología permite analizar la hidráulica en la perforación rotatoria. Para ello, se utilizan normalmente los modelos “Plástico de Bingham” y “Ley de la Potencia”, por lo simple de las ecuaciones de flujo y la facilidad con la que se estiman los parámetros involucrados. Sin embargo, algunos autores consideran que estos modelos no siempre tienen la capacidad de caracterizar el fluido en un rango amplio de tasas de corte y extienden el análisis a otros modelos reológicos.

En este estudio se seleccionara un modelo más actual para analizar el comportamiento de los aceites en rangos de trabajo más amplios, el método es el de Ley de Potencia Modificada (Herschel-Buckley).

El modelo se define sin tener en cuenta el efecto de la rotación ni la variación de la temperatura con la profundidad. A continuación se describe cada uno de ellos.

---

<sup>8</sup> Jiménez, J. & Agudelo W. (1996) Reología de Fluidos Newtonianos y No Newtonianos.

**1.5.1 Modelo Plástico de Bingham** Es un modelo de dos parámetros muy usado en la industria. La ecuación que lo define es

*Ecuación 1*

$$t = t_y + \mu_p \dot{\gamma}$$

Un fluido Plástico de Bingham no comienza a fluir hasta que el esfuerzo de corte aplicado exceda el valor mínimo ( $\tau_y$ ). A partir de este punto el cambio en el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte y la constante de proporcionalidad es la viscosidad plástica ( $\mu_p$ ).

**1.5.6 Ley de Potencia** Es un modelo de dos parámetros para el cual la viscosidad absoluta disminuye a medida que la tasa de corte aumenta. La relación entre la tasa de corte y el esfuerzo de corte está dada por la siguiente ecuación:

No existe un término para el punto de Cedencia por tanto bajo este modelo los fluidos comienzan a fluir a una tasa de corte cero.

*Ecuación 2*

$$t = k\dot{\gamma}^n$$

**1.5.7 Ley de Potencia Modificada** Es el resultado de la combinación de aspectos teóricos y prácticos de los modelos Plástico de Bingham y Ley de la Potencia. La siguiente ecuación describe el comportamiento de un fluido regido por este modelo:

*Ecuación 3*

$$t = t_y + k\dot{\gamma}^n$$

**1.5.8 Modelo de Casson** Este modelo da una buena descripción de las características reológicas de los fluidos de perforación. A altas temperaturas y bajas presiones la aproximación se hace más pobre. La relación que los caracteriza es:

*Ecuación 4*

$$t^{1/2} = t_y^{1/2} + (\mu_p \dot{\gamma})^{1/2}$$

## 1.6 MODELOS EXPERIMENTALES

Para la medición en laboratorio o en campo se pueden utilizar varias herramientas como embudos y viscosímetros entre los más utilizados se encuentran:

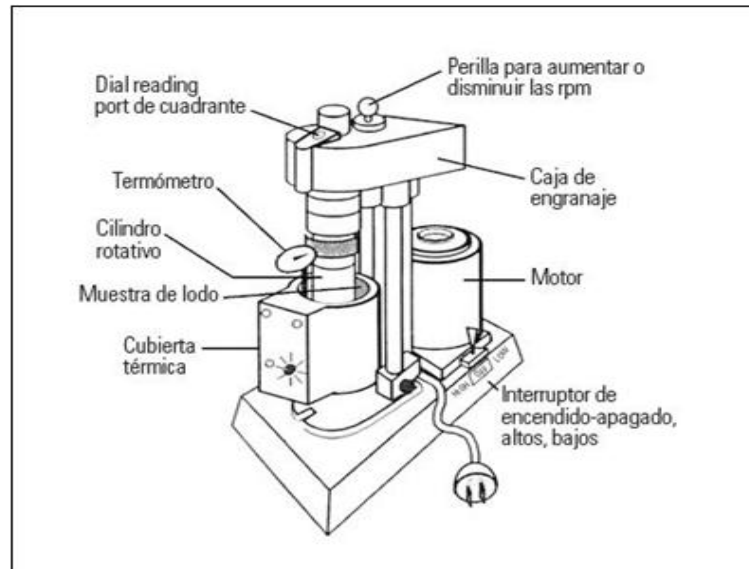
**1.6.1 Viscosímetro de Indicación Directa<sup>9</sup>** También llamado medidor V-G, instrumento utilizado para medir la viscosidad y la resistencia de gel de un fluido

El viscosímetro de indicación directa es un instrumento compuesto por un cilindro giratorio y una plomada. Hay dos velocidades de rotación, 300 y 600 rpm disponibles en todos los instrumentos, pero algunos tienen 6 velocidades o velocidad variable. Se llama "de indicación directa" porque, a una velocidad dada, la lectura del dial es una viscosidad en centipoise verdadera.

---

<sup>9</sup> SIERRA BAENA, Ma. Lecturas sobre lodos de perforación. Medellín, 2000, Universidad Nacional de Colombia.

Figura 5. Viscosímetro de lectura directa



Fuente: SIERRA BAENA, Ma. Lecturas sobre lodos de perforación. Medellín, 2000, Universidad Nacional de Colombia.

## 1.7 CAÍDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍA<sup>10</sup>

Las pérdidas de presión que ocurren en la tubería al momento de pasar un fluido multifásico, son principalmente atribuidas a:

- Perdidas por elevación.
- Perdidas por fricción.
- Perdidas por aceleración.

Estas pérdidas son cuantificadas por los así llamados gradientes de presión, cada fluido multifásico posee una curva de gradiente de presión que no es más que un perfil de presiones que dicho fluido posee a través de la tubería.

<sup>10</sup> ALTON R, Hagedorn; Kermit e, Brown. Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits, Austin, 1965, University of Texas.

Para flujo vertical o direccional las caídas de presión por elevación son las más significativas y para flujo horizontal las caídas de presión por fricción son las que predominan.

## 1.8 ECUACIÓN GENERAL PARA EL CÁLCULO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN PARA UN FLUIDO MULTIFÁSICO.<sup>11</sup>

Ecuación general de gradiente de presión:

*Ecuación 5*

$$\frac{dP}{dL} = \frac{g * \rho * \sin \theta}{g_c} + \frac{f * \rho * V^2}{2 * g_c * d} + \frac{\rho * \Delta V^2}{2 * g_c * \Delta L}$$

**1.8.1 Gradiente de Aceleración** El gradiente de aceleración o de cambio de energía cinética se basa en los cambios de velocidad que pueden ocurrir en algunas posiciones dentro de la tubería. Representa el 15% de las caídas de presión que ocurren en el sistema de producción. Aunque el gradiente de aceleración no sea demasiado grande siempre se debe tener en cuenta ya que si ocurre un cambio en la velocidad la caída de presión puede ser significativa.

*Ecuación 6*

$$\frac{\rho * V * dv}{g_c dL}$$

**1.8.2 Gradiente de Fricción** El problema más común en las pérdidas generadas por fricción, dependen de mucho factores como la rugosidad de la tubería ya sea nueva o usada, la densidad del líquido o el régimen de flujo etc. Pero estos problemas son aún más notorios si el flujo es multifásico.

---

<sup>11</sup> ALTON R, Hagedorn; Kermit e, Brown op. Cit pag 22.

Es necesario para el cálculo del gradiente tener muy en cuenta el régimen de flujo ya sea laminar o turbulento.

*Ecuación 7*

$$\frac{f * \rho * V^2}{2 * g_c * d}$$

## **1.9 CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN DE FLUJO MULTIFÁSICO EN LA TUBERÍA.<sup>12</sup>**

Poder predecir las caídas de presión en la tubería de producción es un trabajo complicado por tal motivo algunos autores han creado correlaciones a partir de la ecuación general para poder calcular estas caídas de una manera más sencilla y rápida, también se han empleado software que hacen que este cálculo sea más sencillo de realizar.

En esta parte de nuestro proyecto se mencionaran los métodos y se explicara de manera detallada los más utilizados actualmente.

**1.9.1 Correlaciones Empíricas** Existen varias correlaciones empíricas para el cálculo de la caída de presión y el hold up del líquido del flujo multifásico, entre los más conocidos tenemos los de poettman y carpenter (1952) ,dun y ross (1963) , hangedorn y Brown (1965) , orkiszewkis (1967) etc. Estas ecuaciones fueron construidas en base de la ecuación general de energía.

Si se considera el efecto del deslizamiento se debe conocer primero el hold up del líquido, que se define como la relación entre el volumen de líquido que ocupa en la tubería y el volumen de la tubería, este parámetro es muy importante para el cálculo de la caída de presión en flujo vertical debido al efecto que produce la

---

<sup>12</sup> ALTON R, Hagedorn; Kermit e, Brown op. Cit pag 22.

gravedad. El factor de fricción es calculado a través de la correlación estándar para flujo monofásico.

**1.9.2 Correlación Hagedorn And Brown<sup>13</sup>** La correlación que establecieron Hagedorn y Brown fue una correlación general la cual incluía todos los rangos de flujo, tamaño de tubería y los efectos y propiedades de los líquidos, los datos fueron tomados a partir de tuberías de 1 y 2 ½ pulg. Los rangos de aplicación del método son:

- Viscosidad: 1 y 110 cp. a 80\*f
- RGL: menor a 5000
- Gravedad API: 30- 40

Se presenta a continuación uno de los principales métodos empleados en el modelamiento de flujo multifásico vertical en tuberías y que se constituye en uno de los preferidos desde el punto de vista del tratamiento académico no solo porque conlleva un alto desarrollo analítico si no porque a partir de él se han planteado modelos más recientes y se conoce como la correlación de flujo generalizada de Hagedorn y Brown.

---

<sup>13</sup> ALTON R, Hagedorn; Kermit e, Brown. Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits, op. Cit, pag 22.

## **2. GENERALIDADES E INFORMACIÓN PRELIMINAR PARA REALIZAR LA METODOLOGÍA**

En este capítulo se hablara de las generalidades que se van a tener en cuenta a la hora de realizar el experimento, del por qué se usaran algunos datos arbitrarios y herramientas de trabajo.

### **2.1 CUENCA LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA**

La cuenca de los llanos orientales junto con la cuenca del magdalena medio, según Ecopetrol aportan juntas el 99% de crudos de API<15 de Colombia, La cuenca cuenta con campos como: Apiay, Suria, Chichimene, Castilla con estimaciones de producción de hasta 120 KBPPD.

La cuenca de los llanos orientales limita al norte con Venezuela, al sur con la serranía de la macarena, el arco de Vaupés y las rocas metamórficas precámbricas, al oeste con el sistema de cabalgamiento de la cordillera Oriental y al oriente con las rocas precámbrica del escudo Guayana, se ubica entre los departamentos de Meta, Arauca, Casanare, Guainía y Guaviare, esta cuenca cuenta con aproximadamente un área de 96000 Km<sup>2</sup>.

Figura 6. Cuenca llanos orientales de Colombia



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos. [www.anh.gov.co](http://www.anh.gov.co)

Por esta razón nuestro tema de investigación se centró en la cuenca de los llanos orientales dado a su gran aporte a la producción de crudo pesado del país.

## 2.2 MODELOS EXPERIMENTALES

Para tal fin se escogió unos determinados muestras de pozos que cumplieran con la característica principal para esta investigación, se seleccionó pozos con crudos de un API menor a 20, los datos a trabajar se seleccionaron después de una investigación, teniendo en cuenta que se va a realizar un experimento y con la dificultad para obtener datos reales se trabajara con los datos básicos que con amabilidad nos suministraron en el Instituto Colombiano del Petróleo, debido a esto se nos pidió confidencialidad sobre los datos proporcionados, por consiguiente nos referiremos a los datos como muestras y los modelos básicos de pozo usados son escogidos como una base para trabajar en el experimento.

### 2.2.1 Modelos Básicos de Los Pozos

Tabla 1. Modelo básico de los pozos.

MODELO DEL POZO	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
INCLINACION	0°	0°	0°
PROFUNDIDAD (ft)	8459	8292	8514
CAUDAL (gal/min)	58,3	45,21	43,87
DIAMETRO INTERNO (in)	7	7	7

### 2.2.2 Materiales y Equipos

Tabla 2. Lista de materiales y equipos.

Materiales y equipos	cantidades
Muestra crudo pozo 1	1 gal
Muestra crudo pozo 2	1 gal
Muestra crudo pozo 3	1 gal
Viscosímetro de lectura directa.	1
Termómetros	1
Horno	1
Tinner	1
Guantes	6
Tapabocas	2
Bata	2
Gafas de seguridad	2
Vaso de precipitado	1
Hidrómetro	1

### **3. PROCEDIMIENTOS PARA DESARROLLAR LA METODOLOGÍA**

En este capítulo se describirán detalladamente todos los procedimientos que se realizaron durante el proyecto, desde la caracterización del fluido hasta el desarrollo del cálculo de las pérdidas de fricción que pueden presentar el fluido.

#### **3.1 PROCEDIMIENTOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD API POR EL MÉTODO DEL HIDRÓMETRO.<sup>14</sup>**

- Transvasar un volumen determinado de la sustancia a analizarse en la probeta limpia y sin salpicar, a fin de evitar la formación de burbujas de aire y reducir al mínimo la evaporación de los componentes de más baja ebullición.
- Quitar las burbujas de aire formadas, después de que se han recogido en la superficie de la muestra, al tocar con un pedazo de papel filtro limpio antes de insertar el hidrómetro.
- Colocar la probeta que contiene la muestra en posición vertical en un lugar libre de corrientes de aire.
- Escoger el hidrómetro adecuado según la muestra a analizar.
- Introducir el hidrómetro y dejarlo que flote libremente, sin que roce las paredes de la probeta y simultáneamente introducir el termómetro.
- Cuando el hidrómetro está totalmente quieto y la temperatura de la muestra es constante a 0.2 °F (0,1 °C), leer el hidrómetro en la división de escala más próxima.
- Observar el punto en la escala del hidrómetro en el cual la muestra se eleva por encima de su superficie principal, poniendo los ojos ligeramente por encima del plano de la superficie del líquido. Esta lectura debe corregirse, es decir, el valor que se lee de Densidad API, se debe restar 0.1 o 0.2 °API, dependiendo de

---

<sup>14</sup> Método de prueba estándar para la determinación de la gravedad api de petróleo crudo y sus derivados(método del hidrómetro). ASTM D 287-92, (reaprobada 2000)

cuanto se eleva la muestra por encima de su superficie, para que la lectura sea correcta.

- Observar la temperatura de la muestra lo más cercano a 0.25 °F (0,1 °C) inmediatamente antes y después de la observación de la densidad API. Registrar las medidas de las lecturas del termómetro antes y después de la última lectura del hidrómetro, como la temperatura de la prueba.
- Retirar el hidrómetro y el termómetro, limpiarlos y colocar cada muestra en su recipiente adecuado para evitar su volatilización.
- Registrar los valores observados de densidad API y su temperatura de equilibrio, respectivamente en una tabla de resultados y realizar la corrección de la temperatura de la densidad API a 60 °F por medio de las Petroleum Measurement Tables.

### **3.2 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE AGUA POR CENTRIFUGACIÓN.<sup>15</sup>**

- Agitar fuertemente la muestra antes de introducirla en los tubos centrífugos.
- Colocar exactamente 50 cm<sup>3</sup> de la muestra y añadir 50 cm<sup>3</sup> de solvente saturado de agua en dos tubos centrífugos.
- Colocar el tapón mediante presión en la boca de cada tubo y agitarlos con fuerza hasta obtener una mezcla perfecta.
- Añadir 3 gotas de desenmulsificante.
- Sumergir los tubos hasta la marca de 100 cm<sup>3</sup> en el baño calefactor, manteniéndolo por 10 minutos a una temperatura de 60 ± 1 °C.
- Invertir los tubos de centrifuga para asegurar que la muestra y el solvente se encuentran perfectamente mezclados. Si fuera necesario, agitar los tubos con precaución.

---

<sup>15</sup> Método de prueba estándar para agua y sedimentos en petróleo crudo por el método de centrifugación

- Colocar los tubos llenos en porta tubos opuestos para mantener el equilibrio y hacer girar la centrífuga durante 10 minutos a una velocidad comprendida entre 500 y 800.
- Leer y anotar el volumen total de agua y sedimento en el fondo de los tubos.
- Sin agitar los tubos volver a colocarlos en la centrífuga y hacer girar durante 10 minutos más.
- Repetir esta operación hasta obtener dos lecturas iguales de volumen de agua y sedimento.

### 3.3 PROCEDIMIENTO PARA CALCULO DE VISCOSIDAD EN VISCOSÍMETRO BROOKFIELD <sup>16</sup>

- Definir la concentración de la muestra a la cual se desea conocer la viscosidad, por ejemplo 1%, 2%,3%,4%, 5%, etc. La cual se refiere al contenido de 500 gramos de peso en solución.
- Determinar la humedad, como se indica en el documento CK-G24 “Método para determinar la humedad”.
- Para determinar la cantidad de muestra a cierta concentración se utiliza esta fórmula:

*Ecuación 8*

$$MBH = \frac{C * S}{100}$$

- **C** = concentración a la cual se va a preparar la solución.
- **S** = peso total de la solución.
- Para determinar la concentración en base seca se utiliza la fórmula:

---

<sup>16</sup> Método superpave para medir la viscosidad mediante viscosímetro rotacional brookfield, universidad nacional de asunción, facultad de ingeniería. San Lorenzo 2013

*Ecuación 9*

$$M = \frac{MBH*100}{100-\%Humedad}$$

- **M** = Peso de la muestra en base seca.
- **%Humedad** = Resultado del paso 2
- El agua destilada a utilizar se calcula de la siguiente manera

*Ecuación 10*

$$V = 500 - M$$

- Y en base húmeda:

*Ecuación 11*

$$V = 500 - MBH$$

- **V** = Volumen de agua destilada en mililitros.
- Colocar en el vaso de precipitado de 600ml. la cantidad de agua calculada en el punto 6.3.4, con ayuda de una probeta.
- Para los productos de alta viscosidad ajustar la temperatura del agua entre 18 y 20°C. Para los productos de baja viscosidad ajustar entre 23 y 24°C.
- Colocar el vaso con agua en el agitador IKA, con una propela que ofrezca un buen corte, e iniciar la agitación a baja velocidad. La velocidad se va incrementando poco a poco conforme se va agregando la muestra, cuidando que no se pierda el producto. Continuar la agitación hasta completar la disolución del producto y comprobar la temperatura de la solución la cual debe ser de 25° +/- 0.2°C.

- Cuando la muestra esté completamente disuelta y tenga la temperatura de 25°C  $\pm$ 0.2°C, retirarla del agitador y colocarla en el viscosímetro, seleccionando el spin y las rpm, según las tablas.
- Introducir la aguja (spin) en la muestra en forma inclinada para evitar que queden burbujas en la parte inferior. Una vez dentro centrarla de modo que el oleaje que produzca al girar sea el mismo en todos los puntos alrededor del spin.
- Encender el viscosímetro y dejar que funcione libremente entre un mínimo de 30 segundos a un máximo de 1 minuto. En caso de que el dial pase de 100, apagar el viscosímetro, colocar el spin inmediato superior y proceder como al inicio de este punto. Al cabo de este tiempo, oprimir la palanca para detener la escala y anotar la lectura.

Las siguientes fórmulas dan resultados en cps, en base húmeda.

- **VISCOSÍMETRO ANALÓGICO**

*Ecuación 12*

**Viscosidad a 25°C = LI x F**

**LI** = Lectura del instrumento

**F** = Factor

- **VISCOSÍMETRO DIGITAL**

*Ecuación 13*

Viscosidad a 25°C = LD

- **LD** = Lectura directa

### 3.4 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS.

Para el cálculo de los parámetros se van a emplear las ecuaciones y modelos reológicos más utilizados en la industria, para poder comparar estos modelos se va elaborar una hoja de Excel la cual nos va a calcular los parámetros reológicos y los esfuerzos de corte, cabe resaltar que estos modelos no se han aplicado comúnmente en crudo de tipo pesado y donde se busca obtener una respuesta satisfactoria de los mismos. Se deben calcular primero el  $\theta_i$ ,  $N_i = 3, 6, 30, 60, 100, 200, 300, 600$  para poder calcular los esfuerzo y tasas e corte iniciales. Utilizando las siguientes ecuaciones.

*Ecuación 14*

$$\tau_i = 1.067\theta$$

*Ecuación 15*

$$\gamma_i = 1.703N$$

**3.4.1 Modelo Plástico de Bingham** Este modelo depende de la viscosidad plástica y del punto de Cedencia por eso es necesario las lecturas de  $\theta_{600}$  y  $\theta_{30}$ . Se debe calcular la viscosidad plástica utilizando la siguiente ecuación:

*Ecuación 16*

$$u_p = 478.8 * \frac{t_{600} - t_{30}}{y_{600} - y_{30}}$$

El punto de Cedencia se calcula utilizando la siguiente ecuación.

*Ecuación 17*

$$t_y = t_{30} - 2.0886 * 10^{-3} * u_p y_{30}$$

**3.4.2 Ley de Potencia** Depende del índice de consistencia e índice de comportamiento de flujo. Para este modelo se utilizan las lecturas  $\theta_{600}$  y  $\theta_{100}$

Al igual que en el modelo plástico de Bingham las ecuaciones para definir los parámetros reológicos de este método se necesitan hallar a través del modelo experimental el esfuerzo de corte, la tasa de corte y la viscosidad luego de hallar estas variables se debe remplazar en las siguientes ecuaciones.

*Ecuación 18*

$$n = \frac{\log(t_{600}/t_{100})}{\log(y_{600}/y_{100})}$$

*Ecuación 19*

$$k = 478.8 \frac{t_{100}}{y_{100}^n}$$

**3.4.3 Ley de Potencia Modificada** En este modelo el parámetro “n” se definen igual que en Ley de Potencia, como caso especial se tiene que el modelo se convierte en Plástico de Bingham cuando  $n=1$  y en Ley de Potencia cuando  $\tau_y=0$ .

*Ecuación 20*

$$0 = (t_6 - t_{600}) + y_3^n \left( \frac{t_{100} - t_6}{y_{100}^n - y_6^n} \right) - y_1^n \left( \frac{t_{100} - t_6}{y_{100}^n - y_6^n} \right)$$

*Ecuación 21*

$$n = \frac{\log\left(\frac{t_{600}-t_i}{t_{100}-t_i}\right)}{\log(y_{600}/y_{100})}$$

*Ecuación 22*

$$k = 478.8 \left( \frac{t_{100} - t_6}{y_{100}^n - y_6^n} \right)$$

*Ecuación 23*

$$ty = t_6 - 2.0886 * 10^{-3} ky_6^n$$

**3.4.4 Modelo de Casson** Este modelo da una buena descripción de las características reológicas de los fluidos de perforación. A altas temperaturas y bajas presiones la aproximación se hace más pobre. La relación que los caracteriza es:

*Ecuación 24*

$$u_p = 478.8 \left( \frac{\sqrt{t_{600}} - \sqrt{t_{60}}}{\sqrt{y_{600}} - \sqrt{y_{60}}} \right)^2$$

*Ecuación 25*

$$ty = \left( \sqrt{t_{60}} - \sqrt{2.0886 * 10^{-3} u_p y_{60}} \right)$$

### **3.5 PROCEDIMIENTO PARA SELECCIÓN DEL MODELO**

Para la selección del modelo que vamos a emplear para el cálculo de las pérdidas de presión, vamos a calcular el error promedio de cada uno de los modelos y se escogerá el que tenga menos error. Esto se hará a través de una hoja de Excel.

*Ecuación 26*

$$\%ERROR = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|\hat{t}_i - t_i|}{\hat{t}_i}}{n}$$

Se debe tener en cuenta que  $\hat{t}_i$  es el esfuerzo de corte medida a través del viscosímetro de rotación directa y  $t_i$  es el esfuerzo de corte medido por el modelo en cada punto

### 3.6 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LAS CAÍDAS DE PRESIÓN

Luego de seleccionar el modelo reológico, se realiza el cálculo de las pérdidas de presión a través de la tubería. Para calcular las pérdidas se va a tomar la ecuación general. Para este cálculo el procedimiento es el mismo solo se va a modificar las pérdidas por fricción, ya que estas no se van a calcular de manera habitual sino utilizando los parámetros reológicos calculados anteriormente.

#### 3.6.1 Ecuación General de Hagedorn And Brown<sup>17</sup>

*Ecuación 27*

$$\Delta P_T = \rho_m \Delta H + \frac{f_m * q_L^2 * M^2}{c * \rho_m^2 * d^5} + \frac{v_M^2}{2 * g_c * \Delta H}$$

La ecuación general de Hagedorn y Brown es la suma de los gradientes hidrostáticos, de fricción y de aceleración.

Según el tipo de flujo la pérdida por fricción son diferentes, las pérdidas por elevación o por velocidad no varían significativamente.

**3.6.2 Gradiente de Elevación o Hidrostático** Las pérdidas por elevación depende de la densidad de la mezcla y la longitud que ocupa el líquido en la tubería según varíen estos terminos las pérdidas por elevación pueden ser altas.

---

<sup>17</sup> ALTON R, Hagedorn; Kermit e, Brown. Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small-diameter vertical conduits, op. Cit, pág. 22.

*Ecuación 28*

$$\Delta P_E = \rho_m \Delta H$$

**3.6.3 Pérdidas de Presión por Aceleración** Estas pérdidas son casi siempre despreciables ya que no representa un cambio importante. Para su solución se deben reemplazar los datos en la ecuación.

*Ecuación 29*

$$\Delta P_A = \frac{v_M^2}{2 * g_c * \Delta H}$$

Para nuestro trabajo vamos a despreciar las pérdidas por aceleración ya que no va a ver un cambio drástico de la velocidad en el proceso de producción.

**3.6.4 Pérdidas de Presión Por Fricción<sup>18</sup>** Las pérdidas por fricción se van a calcular para los modelos que se seleccionaron como se explica en el capítulo (2).

Después de obtener los resultados y las lecturas en el viscosímetro rotacional: tasa de corte esfuerzo y el esfuerzo de corte.

Se van a reemplazar en las ecuaciones. (14) y (15) Para ley de potencia y para la ley de potencia modificada se usaran las ecuaciones (16) y (17), con esto podremos calcular el índice de consistencia y el índice de comportamiento.

Después de obtener el índice de consistencia y el índice de comportamiento para cada modelo podemos empezar a calcular las caídas de presión por fricción

---

<sup>18</sup> BEDOYA MORENO, María; LAMPION, Natalia. Estudio Comparativo de Modelos Reológicos Para Lodos de Perforación. Medellín. 2009 op cit. Pág. 17.

utilizando las siguientes formulas, estas fórmulas se utilizan para ambos modelos el de la ley de potencia y ley de potencia modificada.

Empezamos calculando la velocidad promedio la cual es necesaria para el cálculo del número de Reynolds.

- **Velocidad promedio**

Para calcular la velocidad promedio usamos la ecuación (28)

*Ecuación 30*

$$\bar{v} = \frac{q_m}{2,448(d^2)}$$

- **Número de Reynolds**

El número de Reynolds para nuestro estudio se va a encontrar en función del índice de comportamiento y el índice de consistencia.

*Ecuación 31*

$$NRe = \frac{109000\rho\bar{v}^{2-n}}{k} \left[ \frac{0,0208(d)}{2+1/n} \right]^n$$

*Ecuación 32*

$$NRec=3470-1370n$$

Si  $NRec > NRe$  el flujo es laminar

Si  $NRec < NRe$  el flujo es turbulento

Según el número de Reynolds podemos averiguar si se encuentra en flujo laminar o turbulento.

- **Factor de fricción de fanning<sup>19</sup>**

Para determinar el factor de fricción de fanning se va emplear la ecuación serghides, ya que es una ecuación que permite calcular analíticamente el factor de fricción.

*Ecuación 33*

$$f = \left[ A - \frac{(B-A)^2}{C-2B+A} \right]^{-2}$$

*Ecuación 34*

$$A = -1,7372 \operatorname{Ln} \left[ \frac{12}{NRe} + \frac{\varepsilon/d}{3,7} \right]$$

*Ecuación 35*

$$B = -1,7372 \operatorname{Ln} \left[ \frac{1,254 A}{NRe} + \frac{\varepsilon/d}{3,7} \right]$$

*Ecuación 36*

$$C = -1,7372 \operatorname{Ln} \left[ \frac{1,254 B}{NRe} + \frac{\varepsilon/d}{3,7} \right]$$

- **Pérdidas de presión en flujo laminar**

Las pérdidas de presión cuando tenemos un flujo laminar se deben calcular con la siguiente ecuación.

*Ecuación 37*

$$\Delta P_f = \frac{Lk\bar{u}^n \left( \frac{3 + 1/n}{0,0416} \right)^n}{144000D^{1+n}}$$

---

<sup>19</sup> Anaya Durand, Alejandro; Cauch S, Guillermo. Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. México D.F. 2014. Universidad Nacional Autónoma de México.

- **Pérdidas de presión en flujo turbulento**

Las pérdidas de presión cuando tenemos un flujo laminar se deben calcular con la siguiente ecuación.

*Ecuación 38*

$$\Delta P_f = \frac{f \rho \bar{v}^2}{25,8d} L$$

Si el flujo se encuentra el flujo turbulento se debe hallar el factor de fricción este factor de fricción se debe hallar en función de las propiedades reológicas.

Luego de calcular las pérdidas por elevación, fricción y aceleración se suman para calcular las pérdidas totales, esta presión se va a comparar con los registros de la simulación.

Para los modelos de plástico de Bingham y la ecuación de Casson se utilizan diferentes ecuaciones para calcular las caídas de presión. Para ambos modelos las ecuaciones son las mismas

Empezamos calculando la velocidad promedio la cual es necesaria para el cálculo del número de Reynolds y a su vez calculamos la velocidad crítica para poder calcular el régimen de flujo.

*Ecuación 37*

$$\bar{v}_c = \frac{1,08\mu_p + 1,08\sqrt{\mu_p^2 + 12,34d^2\tau_y\rho}}{\rho d}$$

Si  $\bar{v}_c > v$  el flujo es laminar

Si  $\bar{v}_c < v$  el flujo es turbulento

- **Pérdidas de presión en flujo laminar**

Las pérdidas de presión cuando tenemos un flujo laminar se deben calcular con la siguiente ecuación.

*Ecuación 38*

$$\Delta P_f = \left( \frac{\mu_p \bar{v}}{1500d^2} + \frac{\tau_y}{225d} \right) L$$

- **Pérdidas de presión en flujo turbulento**

Las pérdidas de presión cuando tenemos un flujo laminar se deben calcular con la siguiente ecuación.

*Ecuación 39*

$$\Delta P_f = \frac{\rho^{0,75} \bar{v}^{1,75} \mu_p^{0,25}}{1800d^{1,25}} L$$

#### 4. METODOLOGÍA GENERAL PARA CALCULAR PERDIDAS DE PRESION EN FUNCIÓN DE LOS PARAMETROS REOLÓGICOS

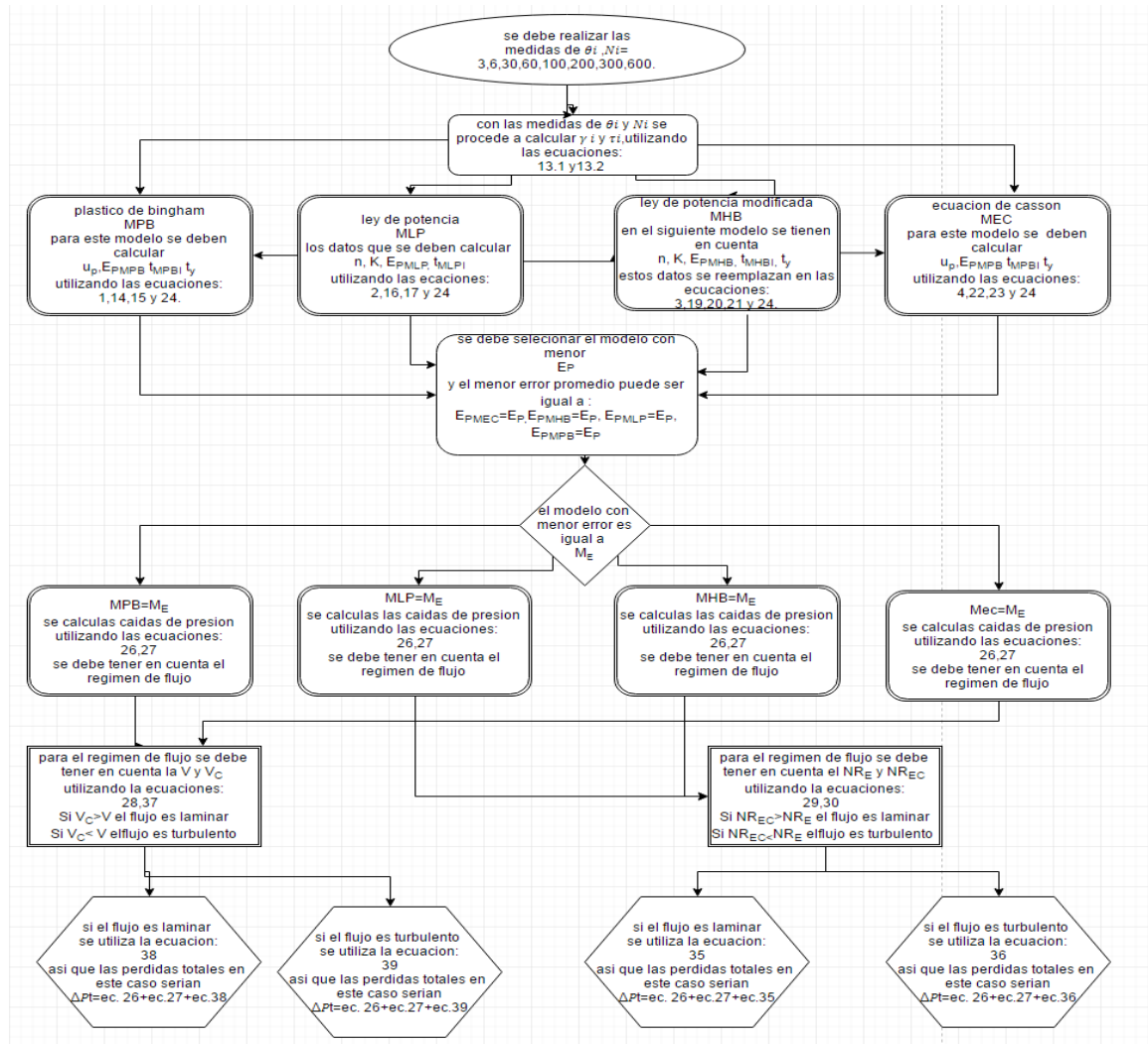
El objetivo general de nuestra tesis es el poder crear una metodología para poder calcular las caídas de presión en la producción de crudo pesado, basados en las propiedades reológicas del crudo dado que son estas las que nos informan como es el comportamiento del fluido dentro de la tubería de producción. Actualmente los cálculos y ecuaciones utilizadas para modelar las caídas de presión se basan en que el fluido se comporte como un fluido newtoniano, lo cual no se asemeja a la realidad, para poder comenzar a calcular estas caídas se deben conocer de antemano datos de y estado mecánicos de los pozos.

- **Obtención de datos:** para la obtención de datos se necesitan muestras de crudo a las cuales se le van a realizar pruebas para calcular su API, BSW, GOR, gravedad específica del gas, densidad del crudo,  $R_s$ , viscosidad. También son necesarios datos de yacimientos como presiones, temperaturas, permeabilidades, porosidades, diámetro del pozo, área productora, skin de la formación, etc. Por último para poder empezar se debe tener el estado mecánico del pozo a estudiar y sus datos más importantes tales como longitud, rugosidad, diámetro interno, diámetro externo, caudal de producción, tipo de levantamiento, profundidad promedio de las perforaciones.

- **Cálculos de tasas y esfuerzos de corte:** luego de obtener las muestras de los crudos que se van a utilizar, se procede a realizar las pruebas de laboratorio en el viscosímetro de Brookfield, estas pruebas se van a realizar lecturas a diferentes tasa de corte que van desde 3 hasta 600 RPM, luego de haber realizado estas pruebas tendremos los esfuerzos de corte para cada tasa. Estos esfuerzos son necesarios para el cálculo de las propiedades reológicas a través de los diferentes modelos.

- **Cálculos propiedades reológicas:** como se mencionó anteriormente se van a utilizar diferentes modelos para realizar estos cálculos se van a utilizar los modelos más utilizados actualmente que son el modelo de ley de potencia y plástico de Bingham además también se van a emplear dos modelos más los cuales algunos autores consideran pueden caracterizar mejor el comportamiento del fluido que son la ley de potencia modificada y la ecuación de Casson.
- **Selección del modelo:** para seleccionar el modelo que se va a utilizar se va a calcular un error promedio, el cual va a calcular los datos obtenidos en el viscosímetro de rotación directa y se comparan con los resultados de las ecuaciones de los modelos reológicos. Luego se escoge el menor de los errores calculados y se asume como el modelo que mejor representara las caídas de presión.
- **Cálculos caídas de presión:** según el modelo que se eligió se van a utilizar las ecuaciones que mejor representan las caídas de presión, se deben tener en cuenta para estos cálculos la densidad de fluido, caudales, gravedad API, diámetro interno de la tubería, factor de fricción, número de Reynolds, longitud de la tubería, velocidad promedio. Además de esto se debe definir el régimen del flujo, si es laminar o turbulento.
- **Validación de los datos:** para la validación de los datos se pueden utilizar varios recursos ya sean registros de pozos o a través de un software de simulación de producción de pozos, en el cual se van a calcular las pérdidas y se van a comparar con las del ítem anterior y se calcula un porcentaje de error el cual indicara si el modelamiento es acertado.

Figura 7. Diagrama de flujo para el calculo de las caidas de presion .



Fuente: autores

## 5. CÁLCULOS DEL EXPERIMENTO

En este capítulo vamos a encontrar los resultados obtenidos durante las pruebas de laboratorio y los cálculos de los parámetros reológicos a partir de cada modelo, adicionalmente se seleccionara con base a los resultados obtenidos el modelo que menor error genere, este modelo seleccionado será el que se usara a la hora de realizar la metodología experimental para calcular las pérdidas de presión en crudos pesados.

### 5.1 DATOS EXPERIMENTALES

A continuación presentamos los datos de entrada que se usaran a la hora de realizar los cálculos de las pérdidas de presión, como los modelos de pozo, propiedades del crudo, los parámetros reológicos calculados a partir de cada modelo.

Tabla 3. PROPIEDADES DE CRUDO

BLACK OIL	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
API °	16,8	15,8	15,3
DENSIDAD	7,96	8,02	8,06
GOR	3,45	2,75	2,53
BSW	30,45	29,7	30,89

### 5.2 PROPIEDADES DEL CRUDO MUESTRA (BLACK OIL)

Tabla 4. MODELO BASICO DE POZO

MODELO DEL POZO	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
INCLINACIÓN(°)	0	0	0
PROFUNDIDAD (ft)	1000	1000	1000
CAUDAL (gal/min)	92	85	60
GRADO	N-80	N-80	N-80
PESO TUBERÍA (Lbs/Ft)	8,6	8,6	8,6
DIÁMETRO EXTERNO (in)	2 7/8	2 7/8	2 7/8
DIÁMETRO INTERNO (in)	2,259	2,259	2,259

### 5.3 DATOS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Los valores leídos en las pruebas están sujetos a errores causados por diferentes variables externas que pueden afectar algunos resultados sin embargo es preciso comentar que la esta incertidumbre causada por estas variables

**5.3.1 Lecturas Viscosímetro** Las pruebas de laboratorio realizadas para este documento fueron realizadas en el instituto colombiano del petróleo bajo normas establecidas por la institución, las muestras otorgadas para el experimento fueron recogidas bajo las normas y procedimientos internos establecidos por la institución.

Tabla 5. LECTURAS DEL VISCOSIMETRO

DATOS EXPERIMENTALES				
N°	VELOCIDAD ROTACIONAL	LECTURAS DIALES		
		pozo 1	pozo 2	pozo 3
1	3	20,43	12,39	9,49
2	6	20,66	12,56	9,63
3	30	22,47	13,90	10,68
4	60	24,73	15,58	11,99
5	100	27,75	17,82	13,74
6	200	35,30	23,42	18,12
7	300	42,85	29,02	22,50
8	600	65,50	45,82	35,64
9	1550	137,23	99,02	77,25

### 5.4 DATOS ANALÍTICOS PROPIEDADES REOLÓGICAS.

Para calcular las propiedades reológicas de los crudos muestra fueron necesarios realizar pruebas de laboratorio y se usó un viscosímetro brookfield, durante las pruebas se notaron algunos comportamientos atípicos en las muestras que se reflejan en los resultados.

### 5.4.1 Esfuerzo de Corte y Tasa de Corte Medidos

Tabla 6. ESFUERZO DE CORTE Y TASAS DE CORTE MEDIDOS

ESFUERZO DE CORTE $lbf/100ft^2$			TASA DE CORTE $S^{-1}$
MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRAS
21,80	13,22	10,13	5,11
22,04	13,40	10,27	10,22
23,97	14,83	11,39	51,09
26,39	16,63	12,79	102,18
29,61	19,02	14,66	170,30
37,67	24,99	19,34	340,60
45,73	30,97	24,01	510,90
69,89	48,89	38,03	1021,80
146,42	105,66	82,43	2639,65

## 5.5 PROPIEDADES REOLÓGICAS CALCULADAS CON LOS MODELOS.

Para realizar los cálculos de la presente sección se usaron las ecuaciones nombradas en el capítulo 1 y capítulo 3. Se calculan los parámetros reológicos para cada modelo con la intención de compararlos y observar que modelo será seleccionado para continuar con el método experimental.

**5.5.1 Plástico de Bingham** Se puede observar que los resultados de los cálculos a partir de los modelos y los resultados leídos por el viscosímetro tienen algunas diferencias en el caso de modelo de plástico de Bingham se puede empezar a plantear que no está cumpliendo con los resultados esperados al ser comparado con las lecturas diales.

Tabla 7. ESFUERZOS DE CORTE CALCULADO MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM

ESFUERZO DE CORTE CALCULADO MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM $lbf/100ft^2$		
Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3
137,27	98,87	77,12
252,99	184,70	144,25
1178,70	871,32	681,29
2335,84	1729,60	1352,58
3878,70	2873,97	2247,64
7735,84	5734,89	4485,30
11592,98	8595,82	6722,95

ESFUERZO DE CORTE CALCULADO MODELO PLÁSTICO DE BIGHANM <i>lbf/100ft<sup>2</sup></i>		
23164,40	17178,60	13435,91
59807,24	44357,39	34693,61

Tabla 8 PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS MODELO PLASTICO DE BINGHAM

Parámetros reológicos	VISCOSIDAD PLÁSTICA <i>cP</i>	PUNTO DE CEDENCIA <i>lbf/100ft</i>	error
<b>MUESTRA 1</b>	22,65	21,56	10,74
<b>MUESTRA 2</b>	16,80	13,04	8,10
<b>MUESTRA 3</b>	13,14	9,99	10,80

### 5.5.2 Ley de Potencia

Tabla 9. ESFUERZO DE CORTE CALCUADO LEY DE POTENCIA

ESFUERZO DE CORTE CALCULADA MODELO LEY DE POTENCIA <i>lbf/100ft<sup>2</sup></i>		
MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
2641,06	1434,35	1087,27
3681,73	2066,86	1572,02
7962,43	4827,21	3700,40
11099,91	6955,87	5350,21
14178,95	9104,90	7020,61
19765,96	13119,89	10150,71
24005,60	16245,66	12593,94
33464,66	23409,53	18208,87
17887,06	11755,12	9085,58

Tabla 10. PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS LEY DE POTENCIA

	ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO (N) ADIMENSIONAL	ÍNDICE DE CONSISTENCIA (K) <i>cP<sub>eq</sub></i>	ERROR
<b>MUESTRA 1</b>	0,48	1208,64	14,23
<b>MUESTRA 2</b>	0,53	607,20	6,64
<b>MUESTRA 3</b>	0,53	456,63	3,68

### 5.5.3 Ley de Potencia Modificada

Tabla 11.ESFUERZO DE CORTE CALCULADO MODELO LEY DE POTENCIA MODIFICADA

ESFUERZO DE CORTE CALCULADO MODELO LEY DE POTENCIA MODIFICADA <i>lbf/100ft<sup>2</sup></i>		
MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
131,40	94,51	73,71
243,39	177,58	138,68
1156,27	854,68	668,27
2313,40	1712,95	1339,56
3869,10	2866,85	2242,07
7792,75	5777,10	4518,31
11745,65	8709,06	6811,52
23701,69	17577,11	13747,60
6312,15	4678,91	3659,37

Tabla 12.PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS LEY DE POTENCIA MODIFICADA

	ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO (N) ADIMENSIONAL	ÍNDICE DE CONSISTENCIA (K) <i>cP<sub>eq</sub></i>	PUNTO DE CEDENCIA <i>lbf/100ft</i>	ERROR
MUESTRA 1	1,01	21,00	21,58	4,82
MUESTRA 2	1,01	15,58	13,06	5,38
MUESTRA 3	1,01	12,18	10,00	3,09

### 5.5.4 Modelo de Casson

Tabla 13. ESFUERZO DE CORTE CALCULADOS MODELO DE CASSON

ESFUERZO DE CORTE CALCULADO MODELO DE CASSON <i>lbf/100ft<sup>2</sup></i>		
MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
3,31	3,05	2,87
3,74	3,47	3,27
5,17	4,86	4,57
6,02	5,68	5,35
6,76	6,39	6,02
7,95	7,52	7,09
8,75	8,29	7,81
10,33	9,80	9,23
13,02	12,36	11,64

Tabla 14. PARAMETROS REOLOGICOS CALCULADOS METODO DE CASSON

PARAMETROS REOLOGICOS	VISCOSIDAD PLÁSTICA cP	PUNTO DE CEDENCIA <i>lbf/100ft</i>	ERROR
MUESTRA 1	10,41	13,30	49,85
MUESTRA 2	8,51	7,45	21,29
MUESTRA 3	6,72	5,66	24,44

## 5.6 SELECCIÓN DEL MODELO

Para esta parte del proyecto se seleccionara el modelo de los anteriormente vistos que menor error genere, comparando el esfuerzo de corte calculado con el modelo y el leído por el viscosímetro, así elegiremos cual modelo representa mejor a nuestras muestras, sin embargo se seguirá calculando como carácter académico las pérdidas generadas usando los demás modelos.

Tabla 15.COMPARACION ERROR PROMEDIO DE LOS METODOS

ERROR PROMEDIO CALCULADO				
MODELO	PLASTICO DE BINGHAM	LEY DE POTENCIA	MODELO CASSON	LEY DE POTENCIA MODIFICADA
POZO				
MUESTRA 1	10,74	14,23	49,85	4,82
MUESTRA 2	8,10	6,64	21,29	5,38
MUESTRA 3	10,80	3,68	24,44	3,09

Tabla 16 SELECCIÓN DEL METODO.

SELECCIÓN DEL MÉTODO	MODELO CON MEJOR AJUSTE
MUESTRA 1	LEY DE POTENCIA MODIFICADA
MUESTRA 2	LEY DE POTENCIA MODIFICADA
MUESTRA 3	LEY DE POTENCIA MODIFICADA

Cabe resaltar que el modelo que mejor ajusto los cálculos de los parámetros reológicos fue el modelo de ley de potencia modificada y el de menor ajuste fue el modelo de Casson, sin embargo se realizara los cálculos de pérdidas para todos los modelo y observar que comportamiento podemos encontrar en los resultados.

## 5.7 PÉRDIDAS DE PRESIÓN

Para tener en cuenta con estos resultados nos centramos en el cálculo de pérdidas por fricción usando los parámetros reológicos anteriormente calculados. Esperando tener unos datos del comportamiento de los fluidos más acertados debido a que estamos teniendo en cuenta la reología del fluido.

### 5.7.1 Plástico de Bingham

Tabla 17. DATOS DE ENTRADA PARA CALCULAR PÉRDIDAS.

	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<b>Diámetro tubería (in)</b>	2,95	2,95	2,95
<b>Densidad (lbm/gal)</b>	8,00	7,96	8,13
<b>viscosidad plástica (cP)</b>	22,65	16,80	13,14
<b>Caudal(gal/min)</b>	92,00	85,00	60,00
<b>longitud tubería (ft)</b>	1000,00	1000,00	1000,00

Se calculan la velocidad promedio y la velocidad promedio corregida con el fin de determinar el tipo de flujo de las muestras y así poder seleccionar que ecuación se debe usar según el modelo de plástico de Bingham, al mismo tiempo se calcula número de Reynolds para confirmar el tipo de flujo y darnos una idea del comportamiento del fluido en tubería.

Tabla 18. CALCULO DE PÉRDIDAS PLÁSTICO DE BINGAHM

	CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN		
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<b>Velocidad prom. (pies/s)</b>	0,77	0,38	0,37
<b>Nreynold A<sup>20</sup></b>	1759,81	1168,84	1457,35
<b>Nreynold B<sup>21</sup></b>	N/A	N/A	N/A
<b><math>\bar{u}_c</math> (pies/s)</b>	427,52	332,66	291,21
<b><math>\Delta Pt</math> A(psia)<sup>22</sup></b>	13,92	8,37	6,41
<b><math>\Delta Pt</math> B(psia)</b>	N/A	N/A	N/A
<b><math>\Delta Pt</math> A(psia)<sup>23</sup></b>	N/A	N/A	N/A
<b><math>\Delta Pt</math> B(psia)</b>	N/A	N/A	N/A
<b>tipo de flujo</b>	flujo laminar	flujo laminar	flujo laminar

<sup>20</sup> Ecuación usada para calcular número de Reynolds para modelos Plástico de Bingham y Casson.

<sup>21</sup> Ecuación usada para calcular número de Reynolds para modelos ley de potencia y ley de potencia modificada.

<sup>22</sup> Ecuación usada para calcular perdidas en flujo laminar para modelos de plástico de Bingham y Casson.

<sup>23</sup> Ecuación usada para calcular perdidas en flujo turbulento para modelos de plástico de Bingham y Casson

### 5.7.2 Ley de Potencia

Tabla 19. DATOS DE ENTRADA PARA CALCULO DE PERDIDAS MODELO LEY DE POTENCIA

	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<b>Diámetro tubería(in)</b>	2,95	2,95	2,95
<b>densidad(lbm/gal)</b>	8,00	7,96	8,13
<b>caudal (gal/min)</b>	92,00	85,00	60,00
<b>longitud tubería(ft)</b>	1000,00	1000,00	1000,00
<b>F(adimensional)</b>	0,16	0,10	0,12

Para ley de potencia se determina el tipo de flujo calculando el número de Reynolds y el número de Reynolds corregido, con el objetivo de seleccionar la ecuación respectiva para calcular la diferencia de presión.

Tabla 20. CÁLCULO DE PÉRDIDAS MODELO LEY DE POTENCIA

CÁLCULO DE PÉRDIDAS			
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<b>velocidad prom (pies/s)</b>	4,318	3,99	2,816
<b>NReynolds A</b>	N/A	N/A	N/A
<b>Nreynolds B</b>	100,021	158,787	128,018
<b>Nrec</b>	2813,404	2747,954	2741,280
<b><math>\Delta P_t</math> A (psia)</b>	N/A	N/A	N/A
<b><math>\Delta P_t</math> B (psia)<sup>24</sup></b>	34,184	20,687	13,224
<b><math>\Delta P_t</math> A (psia)</b>	N/A	N/A	N/A
<b><math>\Delta P_t</math> B (psia)<sup>25</sup></b>	N/A	N/A	N/A
<b>tipo de flujo</b>	flujo laminar	flujo laminar	flujo laminar

**5.7.3 Ley de Potencia Modificada** Al igual que en ley de potencia, se calcula los números de Reynolds y número de Reynolds corregido para definir el tipo de flujo y seleccionar la ecuación necesaria para calcular pérdidas, también notamos que ya tenemos una tendencia en los resultados calculados a que el mejor modelo que podemos utilizar es el modelo y ecuaciones usadas en ley de potencia modificada.

<sup>24</sup> Ecuación usada para calcular pérdidas en flujo laminar para modelos de ley de potencias y ley de potencia modificada.

<sup>25</sup> Ecuación usada para calcular pérdidas en flujo turbulento para modelos de ley de potencia y ley de potencia modificada.

Tabla 21 DATOS DE ENTRADA PARA CÁLCULOS DE PÉRDIDAS LEY DE POTENCIA MODIFICADA

	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<b>Diámetro tubería(in)</b>	2,95	2,95	2,95
<b>Densidad (lbm/gal)</b>	8,00	7,96	8,13
<b>Caudal (gal/min)</b>	92,00	85,00	60,00
<b>longitud tubería (ft)</b>	1000,00	1000,00	1000,00
<b>F (adimensional)</b>	0,01	0,01	0,01

Tabla 22. CALCULOS DE PERDIDAS MODELO LEY DE POTENCIA MODIFICADA

<b>CÁLCULO DE PÉRDIDAS</b>			
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<b>velocidad prom (pies/s)</b>	4,32	3,99	2,82
<b>Nreynold A</b>	N/A	N/A	N/A
<b>Nreynold B</b>	1839,17	2280,61	2112,65
<b>Nrec</b>	2080,54	2080,54	2080,543
<b><math>\Delta P_t</math> A (psia)</b>	N/A	N/A	N/A
<b><math>\Delta P_t</math> B (psia)</b>	246,98	243,49	219,42
<b><math>\Delta P_t</math> A (psia)</b>	N/A	N/A	N/A
<b><math>\Delta P_t</math> B (psia)</b>	N/A	N/A	N/A
<b>tipo de flujo</b>	flujo laminar	flujo laminar	Flujo laminar

#### 5.7.4 Modelo de Casson

Tabla 23. DATOS DE ENTRADA PARA CÁLCULOS DE PÉRDIDAS MODELO DE CASSON.

	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
<b>Diámetro tubería (in)</b>	2,95	2,95	2,95
<b>Densidad (lbm/gal)</b>	8,00	7,96	8,13
<b>viscosidad plástica (cP)</b>	10,41	8,51	6,72
<b>Caudal (gal/min)</b>	92,00	85,00	60,00
<b>longitud tubería (ft)</b>	1000,00	1000,00	1000,00

Al igual que en el caso de modelo de plástico de Bingham se determina el tipo de flujo tomando como condición la diferencia entre los valores de velocidad promedio y velocidad promedio calculada, y también tenemos una tendencia a que los resultados de las pérdidas para modelo de Casson están más desviados

Tabla 24. CÁLCULOS DE PÉRDIDAS MODELO DE CASSON

CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN			
	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
velocidad prom ( <i>pies/s</i> )	4,32	3,99	2,82
Nreynold A	2437,42	2287,36	2871,08
Nreynold B	N/A	N/A	N/A
$\bar{u}_c$ ( <i>pies/s</i> )	326,18	243,04	217,64
$\Delta P_t$ A (psia)	23,48	13,83	9,98
$\Delta P_t$ B (psia)	N/A	N/A	N/A
$\Delta P_t$ A (psia)	N/A	N/A	N/A
$\Delta P_t$ B (psia)	N/A	N/A	N/A
tipo de flujo	flujo laminar	flujo laminar	flujo laminar

### 5.7.5 Comparación de las Perdidas Calculadas.

Tabla 25. COMPARACION DE LAS PERDIDAS CALCULADAS

	PÉRDIDAS CALCULADAS (psi)			
	PLÁSTICO DE BINGHAM	LEY DE POTENCIA	MODELO CASSON	LEY DE POTENCIA MODIFICADA
MODELO 1	13,92	34,184	23,48	246,98
MODELO 2	8,37	20,687	13,83	243,99
MODELO 3	6,41	13,224	9,98	219,42

Al observar los resultados obtenemos que cada método tiene diferentes resultados que varían mucho entre ellos, esto puede ser por la diferencia en las variables que se usan para calcular, sin embargo al comparar los resultados con los obtenidos en la simulación del modelo por medio del software notamos que el modelo de potencia modificada es el modelo que mejor representa o se acerca a un comportamiento real de las pérdidas.

Tabla 26 RESULTADOS DE SIMULACION (PSIA)

RESULTADOS DE SIMULACIÓN (PSIA)		
MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
248,7	250,77	221,88

Tabla 27. Comparación de pérdidas calculadas con los modelos y con las calculadas con la simulación.

	<b>muestra 1</b>	<b>muestra 2</b>	<b>muestra 3</b>	<b>Error%</b>
<b>Simulación (Psi)</b>	248,7	250,77	221,88	
<b>Plástico de Bingham (Psi)</b>	427,52	332,66	291,21	71,90
<b>Ley de Potencia (Psi)</b>	34,184	20,687	13,224	86,25
<b>Ley de Potencia Modificada (Psi)</b>	246,98	243,49	219,42	0,69
<b>Modelo de Casson (Psi)</b>	23,48	13,83	9,98	90,56

En la tabla 27 podemos observar que el modelo que menor error nos genera es el modelo de ley de potencia modificada, confirmando así nuestra hipótesis inicial donde se suponía que el modelo que mejor ajustaría era la ley de potencia modificada.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La primera etapa del proyecto en la cual se hicieron las medidas respectivas en el viscosímetro, no se tuvo ningún inconveniente con los datos obtenidos, sin embargo las lecturas se debieron corregir por la dificultad que se tenía, al ser unas muestras con emulsiones, se abre la posibilidad por la cantidad de agua alterar un poco en la lectura del viscosímetro por el fenómeno de inversión de fases.

La segunda etapa del proyecto se basó en la selección del método con mayor ajuste a los resultados reales leídos, donde se pudo concluir que el método de ley de potencia modificada era el que mejor ajuste tenía, esto nos llevó a nuestra primera hipótesis de que el modelo o método que mejor serviría era el de ley de potencia modificada, sin embargo cabe resaltar que los errores calculados aún siguen siendo altos para un análisis más detallado del experimento, aun así se decidió seguir adelante y observar que resultados podríamos llegar a obtener con los diferentes métodos de cálculos.

La tercera etapa del proyecto se centró en la obtención de las pérdidas de presión, a lo cual se encontró que el modelo de Casson y modelo de plástico de Bingham se pueden desestimar para uso del método experimental y quedan descartados, el método de ley de potencia modificada tiene un comportamiento más típico para un crudo con estas características y con las condiciones dadas para los cálculos, ya que al compararlo con la simulación realizada tiene una tendencia favorable y menor incertidumbre en los resultados.

Cabe aclarar que las condiciones en las que se realizaron los experimentos de laboratorio se nota en los resultados fenómenos como el punto de inversión de fases generan una incertidumbre mayor, además se recomienda continuar con este estudio realizando mayor cantidad de pruebas a diferentes tipo de crudos.

Los resultados acá obtenidos no se pueden aplicar a condiciones de campo debido a que se toman unas condiciones muy generales, ya que la idea del proyecto debido a su dificultad en la obtención de datos y realización de pruebas era de generar una fase cero de aprendizaje donde se deje claro la posibilidad y la importancia de tener en cuenta los parámetros reológicos a la hora de modelar comportamientos en los crudos pesados.

## 7. CONCLUSIONES

- Mediante el modelo experimental trabajado en este documento, es posible calcular las pérdidas de energía en tubería usando los parámetros reológicos del fluido, sin embargo cabe resaltar que los resultados obtenidos aún tienen un margen de error el cual debe ser mejorado con el fin de disminuir la incertidumbre con respecto a las pérdidas de presión.
- El modelo de ley de potencia modificada con un error de 0,69% fue el que menor error obtuvo al final de los cálculos, siendo así la mejor opción utilizada el proyecto para utilizar en el método experimental y analítico en función de las propiedades reológicas del fluido para determinar las pérdidas de presión en la producción de crudos pesados en los campos de la cuenca de los llanos orientales.
- Con los errores calculados al final del proyecto, es importante comentar que aún siguen siendo errores con un alto margen de incertidumbre, se debe tener en cuenta que estos resultados y esta metodología se puede tomar como una fase cero, investigación que aún necesita mayor cantidad de estudios y pruebas para llegar a una etapa de confirmación científica.
- Para las condiciones del pozo modelo dada, el modelo de ley de potencia genero un diferencial de presión de fondo de pozo a cabeza de 246,98 psi, 243,49 psi, 219,42 psi respectivamente para cada muestra.
- Para los modelos ley de potencia, plástico de Bingham, modelo de Casson, aunque en los resultados se concluyó que no servían para la metodología, sin embargo se recomienda hacer pruebas con crudos pesados de diferentes Api a

los usados en este proyecto, para poder descartarlos por completo en el cálculo de las pérdidas de presión.

## BIBLIOGRAFÍA

A Statistical Study of Rheological Models for Drilling Fluids. Weir, Iain S and Bailey, William J. 1996. Paper SPE 36359 submitted to SPEJ, Texas, Marzo 13.

An Improved Mathematical Model For Relating Shear Stress to Shear Rate in Drilling Fluids and Cement Slurries. Robertson, R and Stiff, H. Febrero 1976, SPEJ.

Bourgoyne Jr, A T, Millheim, K K and Chenever, M E. Applied Drilling Engineering. Texas: Textbook series, SPE, 1986.

Casson Rheological Model in Drilling Fluid Mechanics. Zhongying, Wang and Songran, Tang. 1982. Paper SPE 10564 presented at the International Petroleum Exhibition and Technical Symposium, Beijing, Marzo 17-24

High-Temperature, High-Pressure Rheology of Water-Based Muds. Aldeman, N J, et al. 1988. Paper SPE 18035 presented at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, 2-5 Octubre.

Investigation of Methods for Direct Rheological Model Parameter Estimation. Weir, Iain S. and Bailey, William J. Septiembre 1998, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 21.

Jiménez Mejía, José Fernando and Agudelo Durango, Walter Mario. Reología de Fluidos Newtonianos y No Newtonianos. 1996.

Naturel, Chambre. Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual. Francia: Gulf Publishing, 1982.

Rheology of oil-based muds. Houwen, O. H and Geehan, T. 1986. Paper SPE 15416 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Louisiana, October 5-8.

Sierra Baena, Miguel Angel. Lecturas Sobre Lodos de Perforación. Medellin, 2000.  
37

Staff, Exlog and Whittaker, Alun. Theory and Application of Drilling Fluids Hydraulics. Exlog, 1985.

Synthesizing Dispersant For MTC Design and Its Effect On Slurry Rheology. Hou, Jirui and Liu, Zhongchun. 1, Marzo 2000, SPE Drilling & Completion, Vol. 15, pp. 31-36. SPE Paper 62095.

Yield- Power Law Model More Accurately Predicts Mud Rheology. Hemphill, Terry, Campos, Wellington and Pilehvari, Ali. 34, Penton, Agosto 23, 1993, Oil & Gas Journal, Vol. 91, pp. 45-50.