



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-LÍQUIDO NO
NEWTONIANO Y FLUJO TRIFÁSICO LÍQUIDO-LÍQUIDO-LÍQUIDO NO
NEWTONIANO EN UNA TUBERIA HORIZONTAL”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERÍA PETROLERA Y GAS NATURAL
PRODUCCIÓN

P R E S E N T A:

FANY PAOLA SALINAS SALGADO

TUTOR:

DR. YURI VALERIEVICH FAIRUZOV



2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Samaniego Verduzco Fernando.**

Secretario: **Dr. Domínguez Vargas Guillermo Cruz.**

Vocal: **Dr. Fairuzov Yuri Valerievich.**

1^{er}. Suplente: **Dr. Rodríguez Valdés Alejandro.**

2^{do}. Suplente: **Dr. Rangel Germán Edgar René.**

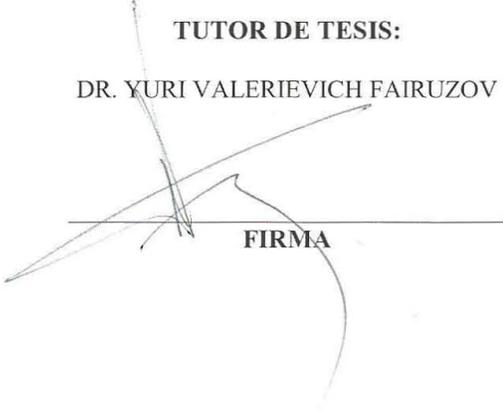
Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

México D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. YURI VALERIEVICH FAIRUZOV

FIRMA

A handwritten signature in black ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be 'YURI VALERIEVICH FAIRUZOV'. The line is labeled 'FIRMA'.

Agradecimientos

A mi padre celestial: Por darme la oportunidad de vivir y lograr un progreso terrenal importante en esta vida.

A mi madre: María Agapita Salgado Herrera, por su apoyo incondicional y por ser un pilar importante en mi vida.

A mi padre: Paulino Salinas Quintero[†], por ser ese ángel que desde ese lugar tan especial en donde se encuentra puedo sentir su protección.

A Uriel: Por tu compañía y apoyo incondicional, pero sobre todo por el cariño y amor que día con día me brindas. Te amo

A mis hermanos: Ricardo, Rubí, Sandra y Jorge por ser grandes ejemplos en mi vida.

A los miembros del jurado: Dr. Fernando Samaniego Verduzco, Dr. Guillermo Cruz Domínguez Vargas, Dr. Edgar René Rangel Germán, Dr. Rodríguez Valdés Alejandro; por compartir su tiempo, y en especial al Dr. Fairuzov Yuri Valerievich, por su acertada dirección en el presente trabajo.

Y a todos mis amigos: A los cuales algunos de ellos tuve la dicha que conocer durante este periodo maravilloso de la maestría.

Contenido

Lista de figuras	vi
Lista de tablas	viii
Resumen	1
CAPITULO I. Introducción	2
1.1 <i>Importancia del estudio de flujo multifásico en los sistemas de producción del petróleo</i>	2
1.2 <i>Importancia del estudio de flujo de líquidos (aceite/ agua-aceite)-líquido no Newtoniano (lodo) en ductos</i>	4
1.3 <i>Características del lodo acumulado en oleoductos</i>	7
1.4 <i>Problemas ocasionados por la acumulación de lodos en oleoductos</i>	8
1.5 <i>Clasificación de los fluidos no Newtonianos</i>	13
1.6 <i>Estudios experimentales relativos al flujo de fluidos que transportan un líquido no Newtoniano en tuberías horizontales</i>	17
1.6.1 <i>Flujo monofásico</i>	17
1.6.2 <i>Flujo bifásico</i>	19
1.6.3 <i>Flujo trifásico</i>	23
1.7 <i>Justificación</i>	24
1.8 <i>Objetivos del presente estudio</i>	26
CAPÍTULO II. Instalación experimental	27
2.1 <i>Descripción de la instalación experimental</i>	27
2.2 <i>Sección de pruebas</i>	28
2.3 <i>Equipo de almacenamiento, bombeo y separación</i>	29
2.4 <i>Equipo de compresión y almacenamiento de aire</i>	33
2.5 <i>Dispositivos para medición y adquisición de datos</i>	34
CAPITULO III. Desarrollo experimental	37
3.1 <i>Método de aforo del equipo</i>	37
3.2 <i>Procedimiento de calibración de los transmisores de flujo para agua y aceite</i>	39
3.3 <i>Principio de operación del viscosímetro Fann</i>	41

3.4 Procedimiento de operación del viscosímetro Fann	43
3.5 Modelos reológicos	44
3.5.1 Modelo de plástico de Bingham	44
3.5.2 Modelo de ley de potencias	46
3.6 Cálculo de las propiedades reológicas del fluido no Newtoniano.	47
3.7 Propiedades de los fluidos experimentales	50
3.8 Procedimiento experimental	51
CAPITULO IV. Pruebas y análisis de resultados	53
4.1 Datos experimentales para el sistema aceite-fluido no Newtoniano	53
4.2 Datos experimentales para el sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano.	59
CAPITULO V. Conclusiones, aportaciones y recomendaciones	67
5.1 Conclusiones	67
5.2 Aportaciones	69
5.3 Recomendaciones	70
APENDICE A. Datos registrados por aforo y transmisores de flujo	71
A.1 Registro de gastos volumétricos para aceite	71
A.2 Registro de gastos volumétricos para agua	75
APENDICE B. Cálculos de la fracción volumétrica de los fluidos	79
Nomenclatura	81
Referencias	83

Lista de Figuras

Fig.1.1	Transporte de hidrocarburos a través de un oleoducto	3
Fig.1.2	Esquema simplificado de un sistema de producción y transporte de aceite	6
Fig.1.3	Corrosión interior en líneas de aceite crudo	10
Fig.1.4	Diagrama de causas de fallas en sistemas de tuberías	10
Fig.1.5	Representación esquemática del enfriamiento de la pared del tubo	11
Fig.1.6	Lodo acumulado en las partes bajas del ducto	12
Fig.1.7	Comportamiento reológico de algunos materiales	15
Fig. 1.8	Vista esquemática de patrones de flujo definidos experimentalmente	21
Fig.2.1	Configuración del equipo experimental	27
Fig.2.2	Sección de pruebas configurable	28
Fig.2.3	"Riser" y línea de descarga al separador	29
Fig.2.4	Tanques de almacenamiento de aceite (derecha) y agua (izquierda)	29
Fig.2.5	Bombas de cavidades progresivas	30
Fig.2.6	Variadores de frecuencia	30
Fig.2.7	Punto de mezclado de los fluidos	31
Fig.2.8	Tanque separador trifásico	31
Fig.2.9	Primera mampara interna del separador	32
Fig.2.10	Segunda mampara interna del separador	32
Fig.2.11	Compresor de aire	33
Fig.2.12	Tanque acumulador de aire	33
Fig.2.13	Circuito en paralelo de inyección de gas	34
Fig.2.14	Sensores de flujo de agua y aceite	35
Fig.2.15	Transmisor de flujo para aceite	35
Fig.2.16	Transmisor de flujo para agua	35
Fig.3.1	Equipo de calibración	37
Fig.3.2	Gasto de aforo vs gasto de sensor de agua	40
Fig.3.3	Gasto de aforo vs gasto de sensor de aceite	40
Fig.3.4	Viscosímetro Fann modelo 35-A	41
Fig.3.5	Componentes principales del viscosímetro Fann	41
Fig.3.6	Llenado del vaso del equipo con el fluido no Newtoniano	43
Fig.3.7	Comportamiento de un fluido de Bingham	44
Fig.3.8	Relación exponencial de un fluido ley de potencia	46
Fig.3.9	Escala Log-Log de un fluido ley de potencia	46

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Fig.3.10	Comportamiento reológico del fluido no Newtoniano	48
Fig.3. 11	Sección de estudio horizontal con perforaciones para inyección del fluido	51
Fig.4.1	Flujo estratificado con lecho inmóvil de FNN	56
Fig.4.2	Transición de fases (formación de olas o lecho móvil del FNN)	56
Fig.4.3	Fluido adherido a la tubería	57
Fig.4.4	Fluido adherido en puntos posteriores al de estudio	58
Fig.4.5	a) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz b) Flujo estratificado con lecho inmóvil de FNN	63
Fig.4.6	Flujo estratificado con mezclado en la interfaz b) Flujo estratificado con lecho móvil (generación de olas o dunas) de FNN	64
Fig.4.7	Desplazamiento de la primera ola b) Propagación lenta de más olas c) Desplazamiento de la última ola d) Flujo estratificado	65
Fig.B.1	Representación geométrica de la altura de los fluidos dentro de la tubería	79

Lista de tablas

Tabla 3.1	Factores “K” para aceite	39
Tabla 3.2	Factores “K” para agua	39
Tabla 3.3	Resultados del viscosímetro Fann	47
Tabla 3.4	Propiedades reológicas de un fluido plástico de Bingham	49
Tabla 3.5	Propiedades del aceite	50
Tabla 3.6	Propiedades reológicas del fluido no Newtoniano	50
Tabla 4.1	Datos iniciales de la prueba experimental del sistema bifásico	54
Tabla 4.2	Prueba No. 1 del sistema aceite-fluido no Newtoniano	54
Tabla 4.3	Prueba No. 2 del sistema aceite-fluido no Newtoniano	55
Tabla 4.4	Prueba No. 3 del sistema aceite-fluido no Newtoniano	56
Tabla 4.5	Prueba No. 4 del sistema aceite-fluido no Newtoniano	57
Tabla 4.6	Datos iniciales de la prueba experimental	59
Tabla 4.7	Prueba No.1 del sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano	60
Tabla 4.8	Prueba No. 2 del sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano	61
Tabla 4.9	Prueba No. 3 del sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano	63
Tabla A.1.1	Datos de aforo y calibración para aceite a 5 Hz	71
Tabla A.1.2	Datos de aforo y calibración para aceite a 10 Hz	72
Tabla A.1.3	Datos de aforo y calibración para aceite a 15 Hz	72
Tabla A.1.4	Datos de aforo y calibración para aceite a 20 Hz	72
Tabla A.1.5	Datos de aforo y calibración para aceite a 25 Hz	73
Tabla A.1.6	Datos de aforo y calibración para aceite a 5 Hz	73
Tabla A.1.7	Datos de aforo y calibración para aceite a 6 Hz	73
Tabla A.1.8	Datos de aforo y calibración para aceite a 7 Hz	73
Tabla A.1.9	Datos de aforo y calibración para aceite a 8 Hz	74
Tabla A.1.10	Datos de aforo y calibración para aceite a 9 Hz	74
Tabla A.2.1	Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz	75
Tabla A.2.2	Datos de aforo y calibración para agua a 10 Hz	75
Tabla A.2.3	Datos de aforo y calibración para agua a 15 Hz	76
Tabla A.2.4	Datos de aforo y calibración para agua a 20 Hz	76
Tabla A.2.5	Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz	76
Tabla A.2.6	Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz	77
Tabla A.2.7	Datos de aforo y calibración para agua a 6 Hz	77
Tabla A.2.8	Datos de aforo y calibración para agua a 7 Hz	77

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla A.2.9	Datos de aforo y calibración para agua a 8 Hz	77
Tabla A.2.10	Datos de aforo y calibración para agua a 9 Hz	78

Resumen

En el trabajo presente, se reportan resultados de un estudio experimental que consiste de dos pruebas. La primera se trata de un sistema bifásico de aceite-fluido no Newtoniano y la segunda de un sistema trifásico de agua-aceite-fluido no Newtoniano. El fluido no Newtoniano seleccionado posee propiedades similares a los lodos acumulados en oleoductos. Como parte inicial, se describe de forma general, la importancia, causas y consecuencias que conllevan a un flujo simultáneo de varias fases, que involucre el transporte de un fluido no Newtoniano así como también la clasificación y características de este último. Se muestra también un resumen de los trabajos experimentales preliminares relacionados con el flujo de interés de esta investigación. En la segunda parte se realiza una descripción detallada del equipo utilizado, así como también de los detalles previos a las pruebas realizadas y el procedimiento desarrollado durante la operación experimental. En los experimentos se observaron dos patrones de flujo diferentes para cada sistema desarrollado. En la transición de éstos, se apreció el desplazamiento total del fluido no Newtoniano de la tubería a una velocidad de aceite mayor o igual a 0.33 m/s, mientras que para la mezcla de agua-aceite la velocidad es mayor o igual a 0.18 m/s; por lo tanto, estos resultados pueden considerarse en las redes de transporte de hidrocarburos como referencia para la remoción de fluidos acumulados en las parte bajas de los ductos, en el diseño de oleoductos y como datos para la validación de nuevos modelos analíticos.

CAPITULO I. Introducción

1.1 Importancia del estudio de flujo multifásico en los sistemas de producción del petróleo

El flujo multifásico, es por definición, la circulación simultánea de varias fases en una tubería (líquidos, sólidos y gases), la existencia y problemas asociados con este tipo de flujo se identificaron desde el año de 1797(Brown, 1977); sin embargo, muchas de las contribuciones importantes se desarrollaron desde 1945, las cuales se han presentado de forma individual como flujo horizontal, vertical e inclinado.

El comportamiento de flujo multifásico en una tubería es mucho más complejo que el flujo en una sola fase; los esfuerzos cortantes en la pared de la tubería son diferentes para cada fase como resultado de sus densidades y viscosidades desiguales (Brill, 1999). Las pérdidas de presión son mayores cuando se tiene este sistema, por lo que el flujo se complica considerablemente durante la producción y transporte de hidrocarburos en diferentes perfiles del ducto.

El problema del flujo simultáneo de varias fases se puede dividir en tres categorías (Brown y Beggs, 1977):

- Flujo multifásico horizontal
- Flujo multifásico vertical
- Flujo multifásico inclinado.

En la **Fig.1.1** se muestra la representación de un sistema de oleoductos que transporta aceite crudo. Se observa que la línea se ajusta a la forma de la superficie terrestre y recorre distancias considerables antes de llegar a las estaciones de almacenamiento. Los oleoductos son de gran aplicación en la industria petrolera, por lo que es importante conocer el comportamiento del flujo de las fases con el objetivo de obtener una producción segura y óptima, con las menores pérdidas de energía posibles así como también un buen diseño de las líneas.

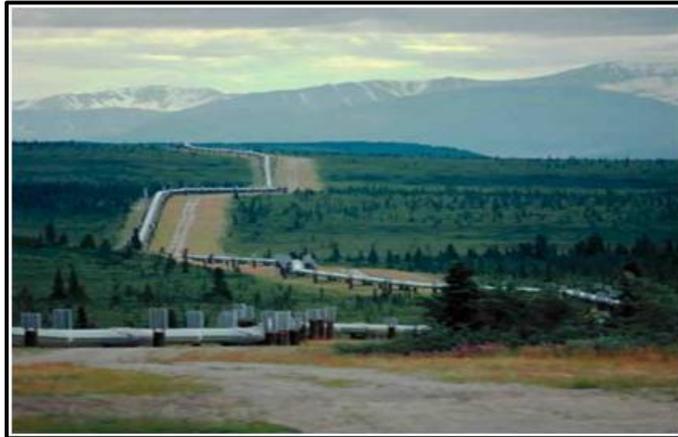


Fig.1.1 Transporte de hidrocarburos a través de un oleoducto (www.corrosioncost.com).

Los sistemas que se manejan en las líneas de transporte de hidrocarburos en la industria petrolera son los siguientes (Fairuzov, Y.V., 2009):

- Gas-líquido(95% se estudia en pozos)
- Líquido-líquido(oleoductos)
- Líquido-sólido(aceite-arenas; aceite-parafinas)
- Gas-sólido(gas-hidratos)
- Gas-líquido-líquido(gas asociado-aceite-agua)
- Líquido-líquido-líquido no Newtoniano(aceite-agua-lodo)

De los puntos anteriores, el sistema bifásico (líquido-líquido) y trifásico (líquido-líquido-líquido no Newtoniano), serán el objeto de estudio de esta tesis.

La importancia del flujo de más de una fase en un conducto no es única en la industria petrolera; adicionalmente se presenta este tipo de flujo en diversas áreas industriales, tales como, en los sistemas de generación de energía nuclear, energía geotérmica, industria química, etc.

1.2 Importancia del estudio de flujo de líquidos (aceite/ agua-aceite)-líquido no Newtoniano (lodo) en ductos

Los fluidos transportados desde los yacimientos de aceite hasta las líneas de descarga no sólo contienen compuestos orgánicos; también incluyen agua de producción, materiales contaminantes insolubles en el crudo tales como arenas, sales, óxidos, productos de la corrosión, etc. (Gómez y cols., 2003), los cuales no se derivan directamente del combustible y algunos de estos permanecen emulsionados con el aceite.

La mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos se conduce a las baterías de separación de la plataforma; en caso de existir o de lo contrario debido al costo elevado de los procesos de deshidratación del aceite y del tratamiento de agua en las plataformas de producción costa fuera, los fluidos se transportan en oleoductos de longitudes grandes hacia las instalaciones de procesamiento. En la etapa de deshidratación, se procede a separar el crudo del agua que se encuentra en forma de emulsión, los contaminantes insolubles e inhibir la formación de espuma, para lo cual se utilizan sustancias químicas desemulsificantes, antiespumantes, antioxidantes, etc., la mayoría de estas derivadas del benceno.

En las emulsiones regulares, la fase acuosa dispersa es usualmente llamada agua y sedimento (A&S) y la fase continua es aceite crudo. El A&S es principalmente agua salina; sin embargo, sólidos tales como arena, lodos, carbonatos, productos de corrosión y sólidos precipitados o disueltos se encuentran también presentes, por lo que al A&S también se le llama agua y sedimento básico (A&SB).

Una vez que el hidrocarburo se somete a la etapa de deshidratación, se transporta por medio de oleoductos a puntos de venta o plantas de proceso de refinación. En el caso de pozos terrestres, el crudo se somete al mismo tratamiento mencionado anteriormente; es decir, se conduce a baterías de separación y posteriormente a centros de almacenamiento y bombeo para su venta o procesamiento químico.

Se establece que los fluidos transportados posterior a la etapa de separación deben estar bajo una especificación en contenido de agua, sales y en teoría, la cantidad de sedimento básico debe ser insignificante; sin embargo, aún en el aceite deshidratado, existe un porcentaje pequeño de agua remanente (0.1 a 0.5%), algunos sedimentos de materia inorgánica provenientes del yacimiento y químicos inyectados durante la deshidratación.

Los fluidos recorren trayectorias largas en oleoductos de diámetros grandes con diferentes ángulos de inclinación, y en la mayoría de los casos, los crudos producidos se transportan en líneas que fueron diseñadas hace muchos años para condiciones de operación muy diferentes a las actuales. Con la declinación de la producción de crudo a través de los años, la velocidad de transporte del aceite ha disminuido, de tal forma que estas condiciones favorecen la acumulación y precipitación de agua y sedimentos que forman lodos en las partes bajas de los oleoductos.

El flujo de aceite-agua-lodo será más frecuente a medida que disminuya la producción de crudo y se incremente el corte de agua en los pozos, además la presencia de un fluido mucho más viscoso que el agua y aceite implica mayores pérdidas de presión e incluso puede provocar diversos problemas durante el transporte del crudo, los cuales se mencionarán en los apartados siguientes. Por lo anterior, es importante estudiar el comportamiento de las fases en los oleoductos, sobre todo el lodo acumulado en el fondo del ducto, ya que la presencia de este fluido se reflejará de forma permanente en años posteriores.

En conclusión, el entendimiento del comportamiento del flujo de aceite-lodo o aceite-agua-lodo, es muy importante para el diseño y la operación de los sistemas de transporte y distribución de crudo en campos nuevos. En la industria petrolera, la producción de hidrocarburos es un proceso sumamente importante; es la culminación de todos los esfuerzos realizados durante la etapa de exploración, perforación y puesta en marcha del proceso de producción; por lo tanto, es relevante que el personal que se desempeña en esta área entienda y comprenda el fenómeno de flujo multifásico dentro

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-gas en una tubería horizontal.

de los ductos con el objetivo de operar en condiciones óptimas, de tal manera que se puedan evitar pérdidas económicas por producción diferida, como consecuencia de cerrar todo un sistema de producción y transporte de aceite (ver **Fig. 1.2**), además de minimizar los problemas que surgen durante el transporte de los fluidos

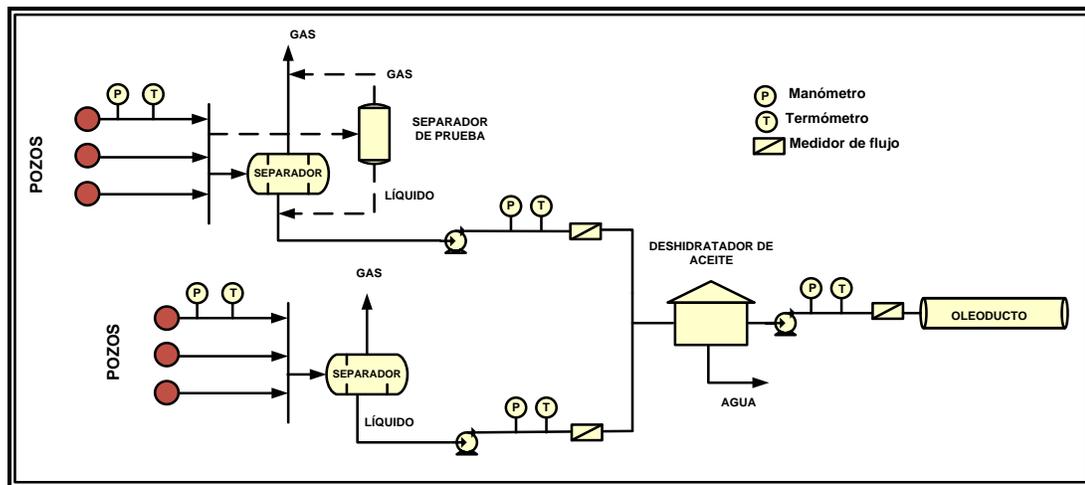


Fig.1.2 Esquema simplificado de un sistema de producción y transporte de aceite (Fairuzov, 2009).

1.3 Características del lodo acumulado en oleoductos

Los estudios relacionados al flujo de hidrocarburos que involucran el transporte de un fluido no Newtoniano, tal como un crudo pesado y lodos acumulados en oleoductos (flujo corriente arriba y corriente abajo en un sistema integral de producción), reportan a este tipo de fluidos como pseudoplásticos y plásticos de Bingham (Farina y Fasano, 1997; Jing-yu, Xu y cols., 2006; Jing-yu, Xu y cols., 2007; Jing-yu, Xu y cols., 2009; Kaminsky, 1998); por tal motivo, los lodos presentan un comportamiento no Newtoniano con un punto de cedencia específico.

El lodo es una mezcla de sedimentos provenientes de la formación y/o de las intervenciones a los pozos, agua y fracciones pesadas del crudo. Se acumula en el fondo del tubo cuando la velocidad del flujo es baja.

El comportamiento de flujo no Newtoniano es muy común cuando se asocia con fluidos que contienen partículas sólidas suspendidas, o componentes poliméricos (Kaminsky, 1998). Los parámetros reológicos principales de un lodo son la viscosidad y el punto de cedencia, además de que a medida que se incrementa el contenido de sólidos, el punto de cedencia es mayor (Kryłów, M y Fryźlewicz-Kozak, B., 2005).

Bajo condiciones favorables, el lodo y los sedimentos se disolverán en el líquido con un incremento potencial de la viscosidad. La formación de lodos y sedimentos que son insolubles en el crudo se presentan en alguna de las formas siguientes (Gómez, y cols., 2003):

- Material disuelto en el líquido
- Material emulsificado en el líquido
- Material precipitado.

1.4 Problemas ocasionados por la acumulación de lodos en oleoductos

Las líneas que transportan crudo para exportación contienen emulsiones de agua en aceite, las cuales bajo determinadas condiciones pueden romperse y dar origen al estancamiento de agua en el fondo de la línea. El volumen de agua libre se incrementa como consecuencia posible del efecto remanente del desémulsificante en el ducto o de una disminución del gasto que ocasione la separación de fases durante el transporte del aceite. A velocidades bajas de flujo, el agua libre puede acumularse en el fondo del oleoducto y esto puede ocasionar problemas severos de corrosión, sobre todo cuando se presenta flujo estratificado donde el área de contacto del agua con la pared del ducto es mayor (Sánchez y cols., 2001).

Además de los inconvenientes de la acumulación de agua libre en el ducto, la presencia de ésta en el proceso de transporte del crudo acelera la formación de los lodos formados por arenas (con mayor riesgo de acumulación si el equipo de levantamiento artificial es BEC, o la formación es de origen arenosa), fracciones pesadas del crudo, sales, polvo, óxidos, productos de la corrosión, productos de desémulsificación etc., los cuales se asientan en el fondo de la línea.

De los análisis de laboratorio, es posible inferir los fenómenos que se suscitan en el interior de los ductos, como puede ser la presencia de humedad, sulfuro de fierro, óxidos de fierro, crecimiento de bacterias, metales pesados y/o bentonita entre otros materiales (NRF-005-PEMEX-2000).

El asentamiento de lodos en una tubería que transporta aceite crudo provoca serios inconvenientes técnicos y económicos, tales como:

- Pérdidas de presión en tubería.
- Reducción del área de flujo.
- Crecimiento de bacterias en las paredes del ducto.
- Corrosión interior.
- Daño al medio ambiente por fugas o explosiones.

- Eficiencia baja de la inyección de inhibidores de corrosión, ya que la capa de lodo no permite que éste llegue a la pared del tubo.
- Producción diferida debido al cierre de las líneas en caso de la disminución considerable del espesor de la tubería.

La rapidez de acumulación del lodo en el ducto se incrementa si la velocidad del crudo es baja, o cuando se inyecta desemulsificante u otros químicos que rompan la emulsión. La precipitación de lodos en instalaciones petroleras puede causar pérdidas millonarias a esta industria en el ámbito mundial, sobre todo porque la corrosión por bacterias es sumamente rápida. La NRF-005-PEMEX-2000 referente a la protección interior de ductos con inhibidores, establece que la existencia de sedimentos como óxido o arena contenidos en los lodos favorece la proliferación de bacterias y por tanto la aparición de corrosión, afectada por microorganismos (**MIC**, “Microbiologically Influenced Corrosion”).

La corrosión bacteriana es provocada por la presencia y actividades de microorganismos como bacterias y hongos, por lo que puede representar el mayor riesgo de fallas. Se ha estimado que del 20 al 30% del total de problemas de corrosión en líneas que transportan crudo se relacionan con este tipo de corrosión (Thompson,).

La exposición del metal a medios reductores de hierro como el CO₂, oxígeno residual y bacterias reductoras de sulfato (presentes en los lodos), inducen a la corrosión ácida, dulce y por oxígeno. Las reacciones químicas de los diversos tipos de corrosión se presentan a continuación (Rojas Figueroa, 2001):

- Corrosión dulce
$$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{FeCO}_3 + \text{H}_2$$
- Corrosión amarga
$$\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} \xrightarrow{\text{H}_2\text{O}} \text{FeS} + \text{H}_2$$
- Corrosión por oxígeno
$$4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$$

En la **Fig. 1.3** se muestran problemas de corrosión. Como se puede observar, disminuye en gran medida el diámetro de la tubería.

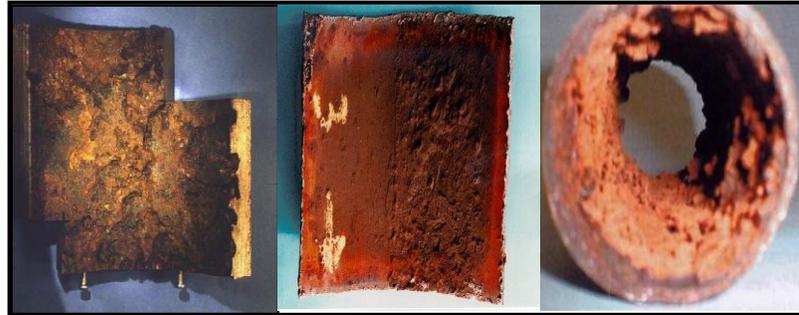


Fig.1.3 Corrosión interior en líneas de aceite crudo (Thompson, N.G.).

Dziubinski y cols. (2006) presentaron un diagrama representativo del daño real en las tuberías que transportan hidrocarburos (ver **Fig. 1.4**), en el que se observa de manera general que las fallas son provocadas por una disminución de la resistencia de la tubería y errores operacionales.

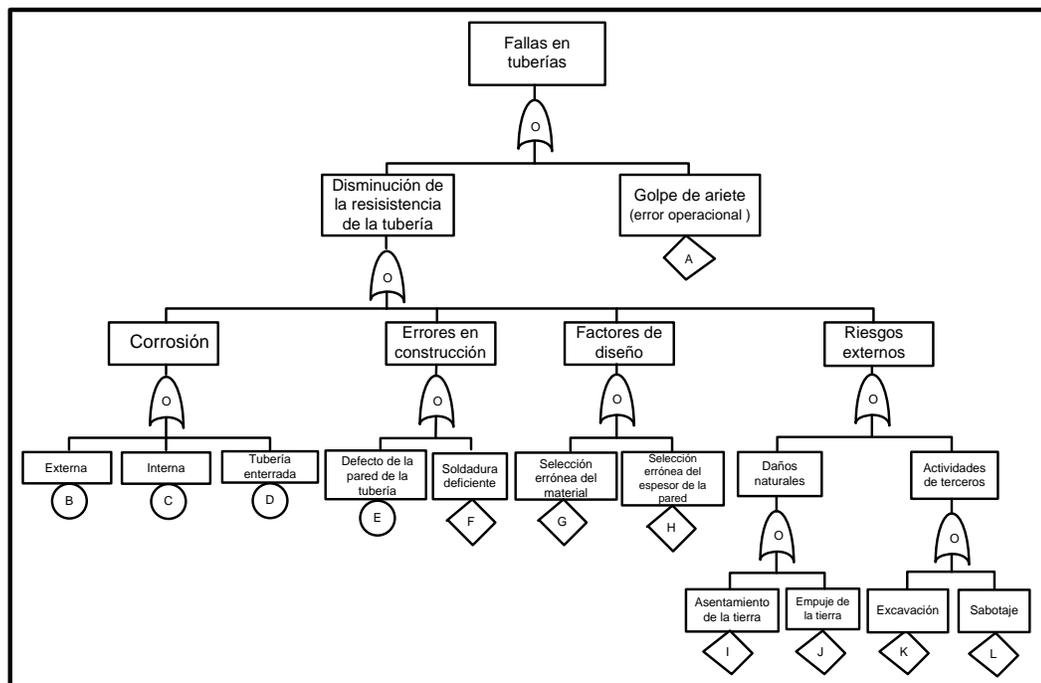


Fig.1.4 Diagrama de causas de fallas en sistemas de tuberías (Dziubinski y cols., 2006).

La capa de lodo también actúa como un aislante térmico que disminuye la temperatura de la pared del ducto cubierta por el lodo, de tal forma que existe mayor probabilidad de un ambiente favorable para el crecimiento de bacterias en la pared del ducto. En la **Fig. 1.5** se muestra una representación esquemática de la distribución de las fases en la tubería. Normalmente la capa de lodo está cubierta por una capa de agua libre.

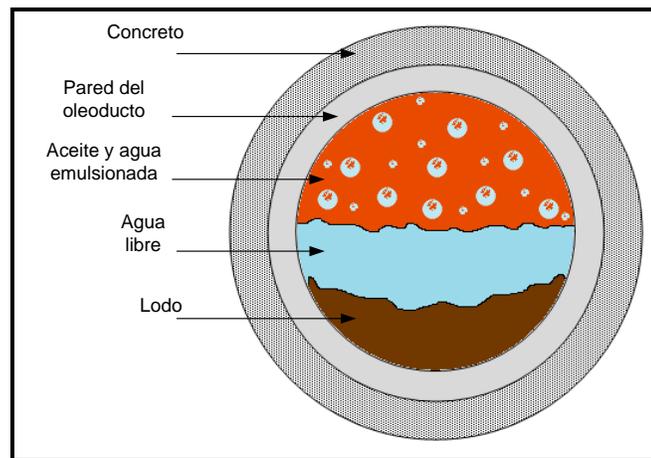


Fig.1.5 Representación esquemática del enfriamiento de la pared del tubo y distribución de las fases en un oleoducto.

La NRF-005-PEMEX-2000 establece que la función principal de un dispositivo de limpieza es remover los depósitos de la pared interna del ducto, desplazarlos y eliminarlos de su interior. Entre los objetivos principales de correr dispositivos de limpieza destacan los siguientes:

- Eliminar residuos de sedimento, óxido, parafinas, humedad, contaminantes y bacterias, entre otras sustancias.
- Controlar la calidad del fluido transportado.
- Preparar la superficie interna del ducto para implementar y/o mejorar un programa de inyección de inhibidores.
- Mantener la capacidad del ducto, debido a que los depósitos reducen el área interna de su sección transversal y afectan la eficiencia hidráulica del sistema.

Lamentablemente los programas de limpieza para remover los lodos formados en oleoductos no se consideran una operación permanente y continúa. En los casos donde se tiene presente el problema de taponamiento por lodos, se asume la preocupación de que dicho dispositivo pueda quedar atorado debido a la gran cantidad de lodo que ha provocado reducciones considerables del área de flujo; por tal motivo, es importante conocer el comportamiento de este fluido dentro del ducto, para posteriormente tomar las mejores decisiones o procedimientos para su remoción. En la **Fig. 1.6** se aprecia el lodo desplazado de un ducto por medio de un dispositivo de limpieza.



Fig.1. 6 Lodo acumulado en las partes bajas del ducto
(www.brenntagla.com).

Dentro de los factores que agravan el problema de corrosión provocada por acumulación de lodos, se encuentran los siguientes:

- Uso del bombeo electro centrífugo como sistema artificial de producción
- Enviar al ducto los desechos de los productos utilizados en las intervenciones realizadas a los pozos
- Imposibilidad de inspeccionar las líneas
- Producción de sólidos (sedimentos y arena) en los pozos del campo
- Antigüedad de las líneas de transporte de hidrocarburos
- Velocidades de flujo bajas
- Tuberías con ángulo de inclinación positivo

1.5 Clasificación de los fluidos no Newtonianos

Un fluido se define como una sustancia que cambia su forma continuamente siempre que esté sometido a un esfuerzo cortante, sin importar qué tan pequeño sea (Shames, 1995).

Los líquidos se clasifican según sus características en:

- Newtonianos
- No Newtonianos

Una característica importante que influye en esta clasificación es la viscosidad, la cual se define como aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes (Shames, 1995); la viscosidad tiene relación con las pérdidas de energía asociadas con el transporte de fluidos en ductos, canales y tuberías, por lo que es una propiedad extremadamente importante en el estudio del flujo de fluidos (Potter y Wiggert, 2003).

La *ley de potencia* es una forma de describir el comportamiento de materiales viscosos, está dada como:

$$\tau = k \left(\frac{dV}{dy} \right)^n. \quad (1.1)$$

Para un fluido Newtoniano, $k = \mu$ y $n = 1$. Para otros valores de n se tendría un fluido no Newtoniano. Si el esfuerzo cortante de un fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad, se dice que el fluido es un fluido Newtoniano, por consiguiente, este tipo de fluidos se rigen por la ley de viscosidad de Newton, matemáticamente se expresa como sigue:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}. \quad (1.2)$$

Existen algunas sustancias industrialmente importantes que no se comportan de acuerdo a la ley de la viscosidad de Newton, ya que su viscosidad a condiciones de presión y temperatura dadas es función del gradiente de velocidad. Los fluidos cuya relación entre tensión-velocidad de deformación no es proporcional se denominan fluidos no-Newtonianos

Antes de presentar una clasificación de los fluidos no Newtonianos, es preciso mencionar que los fluidos no-Newtonianos son parte de una ciencia más amplia denominada *Reología*, la cual se define como el estudio de la respuesta de los materiales a esfuerzos cortantes y comprende el estudio de las sustancias que "fluyen" pero que su comportamiento no está regido por la ley de Newton.

En realidad, existe una variedad amplia de fluidos tan comunes como los Newtonianos que no obedecen la relación dada por la ley de Newton, especialmente en las industrias químicas, alimenticias y en la industria del petróleo.

Los fluidos que no siguen la relación de proporcionalidad entre tensiones tangenciales y velocidades de deformación, se clasifican en tres grupos:

- Fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo.
- Fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo.
- Fluidos visco-elásticos.

Los fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo, se caracterizan porque las tensiones tangenciales dependen únicamente de la velocidad de deformación; por lo tanto, son constantes en el tiempo. En la **Fig. 1.7** se presenta un reograma en coordenadas x (velocidad de corte)- y (esfuerzo de corte), en donde se clasifican algunos de los fluidos que presentan este comportamiento.

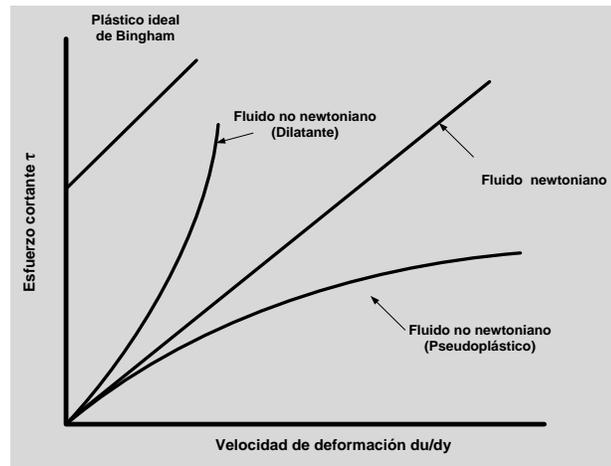


Fig.1. 7 Comportamiento reológico de algunos materiales (Potter, M. C., 2003).

Los fluidos independientes del tiempo se clasifican como:

- Plástico ideal de Bingham.
- Fluidos pseudoplásticos.
- Fluidos dilatantes.

Un **plástico de Bingham** se define como la sustancia o fluido que para tensiones tangenciales inferiores a un valor característico, τ_0 , se comportan elásticamente, y superado ese valor muestran un comportamiento similar al de un fluido Newtoniano, son materiales esencialmente parecidos a los pseudo-plásticos pero necesitan de una tensión mínima (punto de cedencia) para que exista deformación continua.

El modelo de plástico de Bingham es aplicable al comportamiento de muchos fluidos, tales como emulsiones, pinturas, lodos de perforación, sólidos en suspensión y en algunos casos, productos de la industria alimenticia (fluido propuesto en la experimentación), este último reportado como un fluido plástico de Bingham por Feys y Cols. (2007). La ecuación correspondiente a este tipo de fluidos se expresa matemáticamente como:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}. \quad (1.3)$$

Un **fluido pseudoplástico** se define como aquel que con el incremento de la velocidad de corte (dV/dy), existe una disminución curiosa en la viscosidad efectiva. Es decir, con un incremento en la tasa de corte el líquido se “adelgaza”. Un fluido cuyo comportamiento se describe mediante la ecuación de la ley de potencia con $n < 1$ se conoce como pseudoplástico.

Por otra parte, si $n > 1$, el fluido se conoce como **dilatante**; aquí el fluido se “engruesa” con un aumento en la tasa de corte; es decir, conforme se incrementa la velocidad de corte la viscosidad del fluido es mayor.

Los fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo son más complejos; su viscosidad aparente depende no sólo de la velocidad de deformación (dV/dy), sino también del tiempo durante el cual actúa la tensión de corte. Estos fluidos se clasifican en:

- Fluidos tixotrópicos
- Fluidos reopécticos.

En los fluidos de comportamiento tixotrópicos, la tensión de corte disminuye con el tiempo, mientras que en los reopécticos la tensión se incrementa.

Los **fluidos visco-elásticos** tienen la característica que a diferencia de los viscosos, donde la energía de deformación se disipa totalmente, esa energía puede recuperarse como sucede en los sólidos elásticos.

1.6 Estudios experimentales relativos al flujo de fluidos que transportan un líquido no Newtoniano en tuberías horizontales

Como consecuencia de la información escasa concerniente a estudios experimentales de sistemas involucrados en este trabajo (líquido-líquido no Newtoniano y líquido-líquido-líquido no Newtoniano), en los siguientes apartados se presenta una revisión en la literatura de los estudios experimentales de flujo monofásico, bifásico y trifásico en donde existe la presencia de un líquido no Newtoniano, de suspensiones con pequeñas partículas sólidas con determinado punto de cedencia o simplemente una fase sólida que representa a los sedimentos precipitados en los lodos.

1.6.1 Flujo monofásico

El estudio del flujo de un líquido que presentaba un comportamiento no Newtoniano comenzó a ser de gran interés debido a que las pérdidas de presión por fricción eran mayores. No existía información suficiente para realizar estimaciones precisas de la pérdida de presión por fricción ya que el problema del flujo de un lodo se trataba como el flujo de agua (Babbit y Caldwell, 1939).

El diseño correcto de las líneas que transportaban dichos fluidos debía contar con la información que permitiera estimar las pérdidas de presión; por tal motivo, uno de los propósitos de Babbit y Caldwell (1939), fue formular experimentalmente diversos factores que influyan en las pérdidas de presión por fricción cuando un lodo se bombea a través de una tubería. Además, demostraron que los lodos, tal como mezclas de arcilla y agua empleadas en operaciones de pozos petroleros, aguas residuales, sedimento residual de plantas tratadoras de agua y otras suspensiones acuosas similares, con partículas finas que obedecen a un comportamiento de un plástico de Bingham.

Otros estudios se enfocaron a reproducir de forma experimental el flujo de un líquido no Newtoniano por medio de la mezcla de algún fluido con partículas sólidas de tamaños muy pequeños.

Hill y Shook (1998) estudiaron el transporte de partículas (esferas de cristal de 2.47 gr/cm^3) de 1.7 y 4 mm de diámetro, por medio de agua y de fluidos con punto de cedencia (arcillas) en tuberías de 52 mm de diámetro. El fluido no Newtoniano utilizado fue principalmente Kaolin, con pequeñas cantidades de bentonita sódica para incrementar el punto de cedencia.

Para el caso en donde el agua funcionó como fase móvil, los depósitos de partículas acumulados en el fondo de la tubería se apreciaron a velocidades inferiores a 0.8 m/s, la generación de dunas sobre el lecho de partículas inmóviles se observó a partir de una velocidad del agua de 1 m/s hasta 1.6 m/s. Por otra parte, la velocidad de las suspensiones de arcilla para que exista un lecho de partículas acumuladas en la parte baja de la tubería fue menor a 0.87 m/s.

1.6.2 Flujo bifásico

La primera investigación experimental documentada sobre el flujo líquido-líquido en tuberías data a finales de 1950. Varios trabajos experimentales se han propuesto en la literatura para incrementar el entendimiento de flujo líquido-líquido, algunos de los cuales tienen el propósito general de crear una base de datos de experimentos para explorar el comportamiento de dos líquidos con propiedades determinadas, cuando fluyen juntos en un dominio determinado (Grassi y cols. ,2008).

En 1959, Rusell y cols. desarrollaron una serie de experimentos de flujo de aceite-agua y propusieron la primera clasificación de patrones de flujo observados. Además de establecer las bases para el estudio de flujo líquido-líquido, también representaron la fuente principal de datos por muchos años posteriores.

Aún cuando el trabajo de Russell y cols. (1959) fue de mucha ayuda, estos trabajos demostraron la incompatibilidad de los modelos gas-líquido para predecir el comportamiento del flujo líquido-líquido, por lo que se abrió un nuevo camino a la investigación para este sistema.

Uno de los objetivos del trabajo de Xiao-Xuan (2007) fue realizar una revisión de los estudios experimentales del sistema bifásico líquido-líquido en tuberías horizontales con diámetros que van de 2 a 10 cm. Por otra parte, Fairuzov y cols. (2000) investigaron de forma experimental las transiciones de patrones de flujo de aceite-agua en tuberías horizontales de 16 pulgadas de diámetro.

Con el paso de los años, el interés por estudiar el flujo bifásico de líquidos en donde uno de estos sea no Newtoniano ha sido mayor, ya que este sistema no se puede tratar como un flujo bifásico de líquidos Newtonianos; por tal motivo, fue indispensable efectuar pruebas experimentales concernientes al nuevo sub-sistema de flujo multifásico.

Aún cuando la cantidad de información disponible concerniente al flujo de dos fases con un líquido no Newtoniano es muy limitada (Jing-yu Xu y cols., 2007), algunos investigadores han desarrollado pruebas experimentales del flujo bifásico líquido-sólido. Esta última fase representa a los sedimentos o partículas densas que forman parte de un lodo, sin embargo, debe quedar claro que aunque no se trate de un fluido con ciertas propiedades reológicas, tal como los lodos que se acumulan en oleoductos de la industria petrolera, dichos estudios sirven como base para el análisis de sistemas más reales.

Doron y Barnea (1996) estudiaron experimentalmente los patrones de flujo líquido-sólido. La fase líquida fue agua, mientras que la sólida se trató de pequeñas esferas de acetato de 3 mm de diámetro cuya densidad fue de 1.24 gr/cm^3 . Los patrones de flujo definidos en este trabajo son los siguientes:

- Flujo suspendido completamente (*Fully suspended flow*): Se presenta cuando la velocidad de la mezcla es alta, de tal forma que permite que todas las partículas estén suspendidas. Este tipo de patrón de flujo se puede dividir en 2 sub-patrones de flujo:
 - Suspensión pseudohomogénea: Los sólidos se distribuyen casi de forma uniforme a través de la sección transversal de la tubería. Las velocidades de la mezcla requeridas para que se presente este flujo son normalmente muy altas y no se consideran factibles.
 - Flujo en suspensión heterogénea: Existe un gradiente de concentración mayor de partículas transportadas, en la parte inferior de la sección transversal de la tubería (**Fig. 1.8a**).

- Flujo con lecho móvil (*Flow with a moving bed*): A velocidades de flujo menores, las partículas sólidas se acumulan en las partes bajas de la línea (**Fig. 1.8b**). En estas condiciones se forma una capa de lecho empacado que se mueve a lo largo del fondo de la tubería mientras que la parte superior de la sección transversal de la tubería es ocupada por mezcla heterogénea.
- Flujo con lecho inmóvil (*Flow with a stationary bed*): Se observa un depósito de partículas inmóvil en el fondo de la tubería ya que la velocidad de la mezcla es muy baja para provocar el movimiento de todas las partículas inmersas (**Fig. 1.8c**). En muchos casos se observan dunas en la parte superior del lecho inmóvil, a este fenómeno se le conoce como “*saltation*”. El área restante de la tubería es ocupada también por mezcla heterogénea.

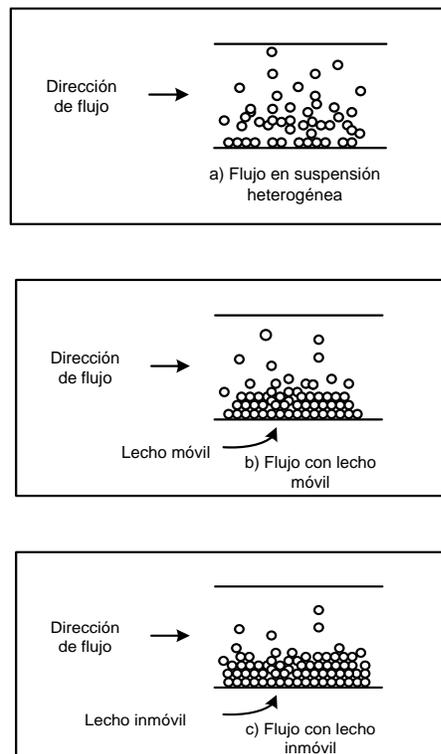


Fig. 1.8 Vista esquemática de patrones de flujo definidos experimentalmente (Doron y Barnea, 1996).

Doron y Barnea (1996) reportaron que el flujo estratificado con lecho inmóvil se origina a velocidades de la fase móvil que van de 0.1 a 0.6 m/s, por lo que a velocidades superiores de 0.6 m/s, se comienza a generar el movimiento del lecho acumulado en la parte inferior de la tubería.

Otros trabajos experimentales en donde una de las fases se trata de partículas sólidas son los presentados por Doron y Barnea (1995) y Smith, R. A. (1995).

Un sistema diferente a los mencionados con anterioridad es el flujo bifásico de líquido no Newtoniano (fluidos pseudoplásticos) - gas. El objetivo de estudiar estos sistemas se relaciona con el fenómeno conocido como “*drag reduction*” o reducción fricción. La inyección de gas reduce el área mojada de la superficie de la tubería y también el esfuerzo cortante con la pared de la tubería.

Los fluidos no Newtonianos que se han utilizado en las pruebas experimentales desarrolladas por diversos autores son soluciones poliméricas tal como carboximetil celulosa (CMC), caolín, suspensiones de arcilla y grasas lubricantes de densidad alta (Jing-yu Xu y cols., 2007; Jing-yu Xu y cols., 2006 y Viera y cols., 2006). De forma general, los resultados de las investigaciones concernientes a este fenómeno demuestran que la reducción de fricción más efectiva ocurre cuando el índice de comportamiento de flujo se mantiene en valores bajos ($n < 0.6$).

1.6.3 Flujo trifásico

Muchos procesos industriales, tal como la producción y procesamiento de hidrocarburos involucran flujos multifásicos complejos de aceite y/o agua, gas y mezclas de arenas. Entender el mecanismo del transporte de arenas por tuberías representa un impacto importante en el diseño de pozos horizontales. Por ejemplo, un incremento en el volumen de arenas en tuberías horizontales resulta en depósitos inmóviles los cuales ocasionan caídas de presión mayores y afectan las velocidades de producción de los hidrocarburos.

A la fecha, no existen trabajos experimentales referentes al flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano, sin embargo, Goharzadeh y Rodgers (2009) estudiaron el flujo de líquido-gas-sólido, investigaron la influencia de flujo bache, específicamente la longitud del bache, sobre el transporte de partículas sólidas (perlas de vidrio) en una tubería de plexiglás de 2.5 cm de diámetro. La fase líquida empleada fue agua con un gasto de 3 a 5 Lpm mientras que el gasto del aire fue de 3 a 11 Lpm. Para desarrollar el experimento, se fijó un lecho de partículas denominado como “longitud inactiva del frente del tapón” (SNIL) cuya longitud fue de 4 m con una altura de 5 mm. Se observó que la SNIL depende significativamente de la relación de flujo aire-gas, es decir, para cierta velocidad de agua, las dimensiones de la capa de partículas disminuye con el incremento del gasto de gas. Por otra parte, se concluyó también que a medida que se incremente el diámetro de las partículas, la longitud inactiva es mayor

Goharzadeh y Rodgers (2009) concluyeron que el gas influye grandemente en el transporte de las partículas precipitadas en el fondo de la tubería por lo que la inyección de éste puede ser una alternativa de desplazamiento del lodo en los oleoductos.

1.7 Justificación

El flujo de líquidos (agua-aceite)-líquido no Newtoniano sin un estudio o control adecuado puede provocar accidentes y deben ser tomados muy seriamente no sólo debido a las pérdidas económicas que se puedan originar, sino sobre todo, a la posibilidad de generar pérdidas de vidas humanas (Rumiche, F.A. e Indacochea, J.E.)

Los oleoductos pueden ser una fuente constante de derrames ocasionados por un manejo rutinario negligente o por accidentes de tal forma que exista una problemática considerable de contaminación al medio ambiente.

En la antigua Unión Soviética se ha producido contaminación a gran escala por la corrosión y el abandono a la que se ven sometidos los oleoductos. Se estima que en octubre de 1994, se vertieron entre 480,000 y 640,000 barriles de petróleo por la rotura de un oleoducto cerca de Usinsk, al sur del círculo polar ártico (www.estrucplan.com.ar).

En el 2006, la compañía petrolera *British Petroleum* tuvo que suspender operaciones a causa de la corrosión en los oleoductos, BP descubrió nuevos indicios de corrosión y decidió suspender el tránsito de la mitad de la producción del campo petrolífero Prudhoe Bay, unos 400,000 barriles diarios, lo que equivale a un 8% de la producción de los Estados Unidos. Los ductos sufrieron roturas por lo que se vertieron más de 70,000 litros de petróleo (www.crisisenergetica.org).

En abril del 2004, se suscitó un accidente en el norte de Irán en un oleoducto de transmisión, que condujo a una fuga considerable de petróleo; un análisis microbial reveló la presencia de bacteria reductora de sulfato (SRB), la cual intensificó la corrosión y crecimientos de fisuras.

El análisis de los productos de corrosión indicó una presencia alta de carbonato de hierro (FeCO_3) y un análisis posterior del suelo indicó una presencia elevada de compuestos corrosivos, como hidróxidos, carbonatos, bicarbonatos y nitruros (Rumiche, e Indacochea).

Se han presentado accidentes en las líneas de conducción de hidrocarburos de la empresa paraestatal "Petróleos Mexicanos". De acuerdo con un informe de la Procuraduría Federal de Protección al Medio Ambiente (Profepa) y del gobierno de Veracruz, los accidentes en ductos de instalaciones de PEMEX son originados principalmente por fallas en el material, corrosión, tomas clandestinas de hidrocarburo, fallas de equipo y humanas. Como consecuencia de esto, existen afectaciones en 60% al suelo, 30% al agua y 10% al aire y en algunos casos se dañan dos o tres medios ambientes al mismo tiempo. Según informes de la Profepa, el 88% de accidentes se registran en Veracruz, Campeche y Tabasco (www.eluniversal.com.mx).

Por todo lo anterior y los problemas que conllevan a manejar los sistemas mencionados previamente, es importante conocer el comportamiento de flujo de líquidos (aceite/agua-aceite)-fluido no Newtoniano (lodos). Dicho comportamiento lo podemos conocer reproduciendo el sistema de interés experimentalmente en tuberías horizontales con el objetivo de obtener las condiciones de operación a las cuales se exceda el esfuerzo de corte crítico (punto de cedencia) del lodo.

Los datos reportados pueden ser de gran utilidad para la validación de modelos de este tipo de sistemas ya que tendrán mayor confiabilidad de tal forma que habrá menos errores en la estimación de las pérdidas de presión a lo largo de un ducto e incluso será de beneficio para un buen diseño.

Adicionalmente, se dará origen a una base de datos experimentales referentes a este nuevo sistema de estudio ya que a la fecha no se han realizado trabajos experimentales de este tipo debido a la complejidad de encontrar un fluido con características similares a lodos acumulados en oleoductos y que permita reproducir un flujo con agua y aceite además de no representar un riesgo para el equipo experimental.

1.8 Objetivos del presente estudio

El trabajo presente tiene como objetivo principal: Obtener datos experimentales del flujo de un sistema bifásico aceite-líquido no Newtoniano y trifásico aceite-agua-líquido no Newtoniano.

Dentro de los objetivos particulares se propusieron los siguientes:

- Seleccionar un fluido con propiedades reológicas similares a las de los lodos acumulados en oleoductos, que permita generar de forma experimental los sistemas del flujo de interés.
- Medir el colgamiento del líquido no Newtoniano a distintos gastos del aceite y agua para el sistema trifásico y de aceite para el bifásico.
- Observar el comportamiento del fluido no Newtoniano respecto al cambio en la velocidad del aceite en el sistema bifásico.
- Observar el comportamiento del fluido no Newtoniano estancado en la tubería, respecto al cambio en la velocidad de la mezcla de aceite-agua para el sistema trifásico.
- Determinar la velocidad requerida de los fluidos Newtonianos para superar el punto de cedencia del fluido no Newtoniano; es decir, lograr el desplazamiento del fluido acumulado en el fondo de la tubería.
- Crear una base de datos experimentales con resultados de pruebas desarrolladas por vez primera.

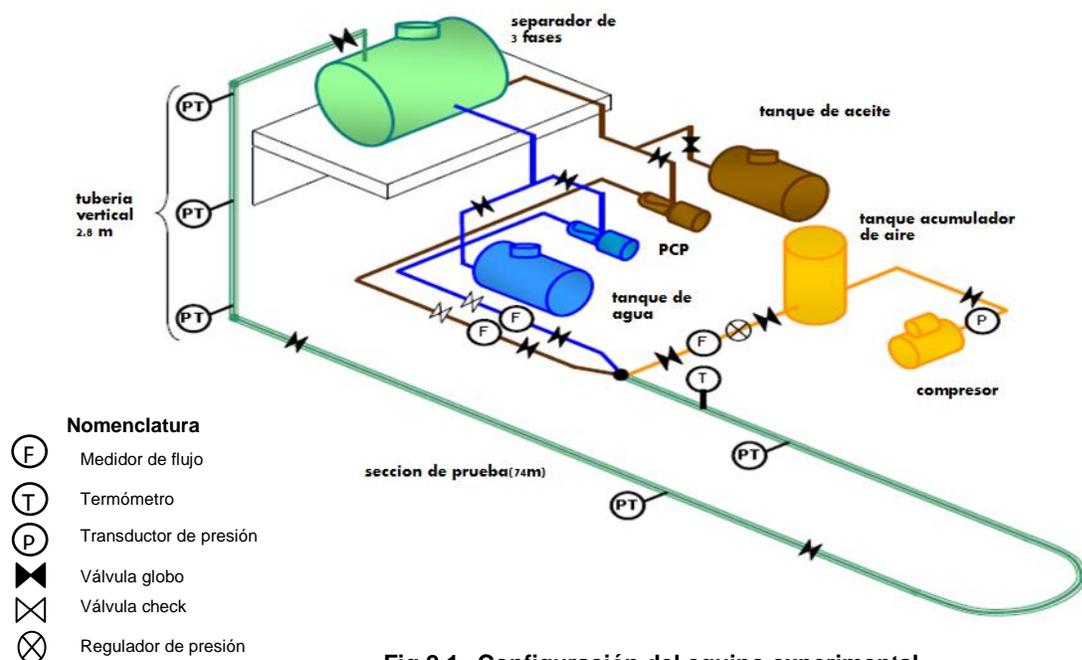
CAPÍTULO II. Instalación experimental

2.1 Descripción de la instalación experimental

La prueba experimental se llevó a cabo en una instalación que contiene los elementos de una batería de producción de hidrocarburos costa fuera, los componentes principales son:

- 2 tanques de almacenamiento para agua y aceite (2800 L).
- 1 tanque separador de 3 fases (5000 L).
- 2 bombas de cavidad progresiva para líquidos (7.5 Hp).
- 1 tubo vertical de 2.8 m de altura (“riser”).
- 1 línea de pruebas de 74 m (PVC transparente de 3 in de diámetro nominal).
- 1 compresor de aire (5 Hp).
- 1 tanque acumulador de aire.

En la **Fig. 2.1**, se puede apreciar de forma esquemática el equipo experimental



2.2 Sección de pruebas

La sección de pruebas de flujo experimental consiste de una tubería de PVC (poli cloruro de vinilo) transparente, de 0.0762m (3 pulg.) de diámetro nominal cédula 40 y 0.0772m (3.042 pulg.) de diámetro interior, puede soportar presiones de hasta 13.35 kg/cm² (190 psi). La sección comprende tramos de tubería de 3 m de longitud unidas mediante bridas por lo que se forma una línea de 74 m de longitud, de tal forma que una serie de soportes metálicos permite ajustar la inclinación de la tubería para configurar la sección de pruebas como se aprecia en la **Fig. 2.2**. La longitud de la línea de pruebas se mide a partir del punto de inyección de los fluidos manejados hasta la base del tramo vertical ascendente. El perfil de la línea se estableció a partir de la aplicación de un dispositivo de nivel para asegurar que la sección de estudio de la tubería sea completamente horizontal.



Fig.2.2 Sección de pruebas configurable.

Por otra parte, la sección de pruebas está conectada a un tubo vertical (“riser”), de 2.8 m de longitud por medio de un codo de 90°, y tiene tres puertos para la instalación de los transductores de presión; el “riser” está conectado a una línea horizontal de descarga de 3 m de longitud que llega al separador.

En la **Fig. 2.3**, se observa el “riser” y la línea de descarga al separador, secciones que tienen un diámetro nominal de 3 pulgadas.



Fig.2.3 "Riser" y línea de descarga al separador.

2.3 Equipo de almacenamiento, bombeo y separación

El equipo de almacenamiento consiste de dos tanques de polietileno de alta resistencia (para agua y aceite), con una capacidad de 2800 L, **Fig. 2.4**. Cada tanque se encuentra conectado a su bomba respectiva de cavidad progresiva de 7.5 HP, las cuales impulsan el fluido correspondiente hacia la sección de pruebas.



Fig.2.4 Tanques de almacenamiento de aceite (derecha) y agua (izquierda).

Las bombas de cavidades progresivas cuentan con motores trifásicos a 220 V y 19.4 A., alcanzan una presión de 50 kg/cm^2 (720 psi) y pueden manejar gastos desde 30 a 360 L/min. En la **Fig. 2.5**, se muestran las bombas para aceite y agua.



Fig.2.5 Bombas de cavidades progresivas.

La velocidad de las bombas se controla por medio de variadores de frecuencia que van de 5 a 60Hz, **Fig. 2.6**.



Fig.2.6 Variadores de frecuencia.

Los fluidos impulsados por las bombas se mezclan en un punto de inyección a la entrada de la sección de pruebas, la cual es una conexión tipo “Y” en la cual se incorpora una línea de gas, **Fig. 2.7**.



Fig.2.7 Punto de mezclado de los fluidos.

El equipo de separación consiste de un tanque horizontal trifásico con una capacidad de 5000 L, instalado sobre un talud a una altura de 1.8 m, **Fig. 2.8**.



Fig.2.8 Tanque separador trifásico.

En el interior del tanque se encuentran dos mamparas, por lo que se tienen tres compartimentos; la primer mampara (ver **Fig. 2.9**) cumple la función de controlar el flujo turbulento de los fluidos y la segunda mampara (ver **Fig. 2.10**), que tiene una altura menor, permite la separación de aceite del agua por diferencia de densidades.



Fig.2.9 Primer mampara interna del separador.

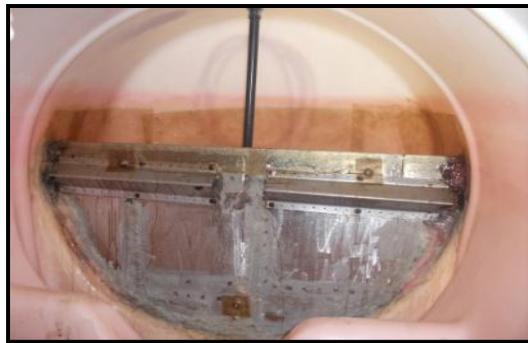


Fig.2.10 Segunda mampara interna del separador.

El aceite queda depositado en el tercer compartimento, y finalmente el aire se envía directamente a la atmósfera a través de una ventilación en la parte superior del tanque.

2.4 Equipo de compresión y almacenamiento de aire

El sistema experimental cuenta también con un compresor de aire de 454 L de capacidad aproximadamente y eleva la presión hasta los 17 kg/cm², **Fig. 2.11**.



Fig.2.10 Compresor de aire.

El aire proveniente del compresor se almacena en un tanque acumulador de 2000 L de capacidad, y maneja presiones de hasta 20 kg/cm², **Fig. 2.12**.



Fig.2.11 Tanque acumulador de aire.

El sistema neumático cuenta con dos reguladores de presión manuales, que permiten controlar la presión de 0 a 2.5 kg/cm². Para el manejo de gastos bajos, se utiliza un rotámetro adaptado al tanque acumulador y puede manejar de 50 a 1400 L/min; para gastos más altos se utiliza un circuito en paralelo, con una placa de orificio que permite manejar hasta 4000 L/ min.

En el caso de la experimentación, no se utilizará el gas para las pruebas, por lo que no será necesario controlar gastos de gas a través del rotámetro, solamente se tomará en cuenta para retirar los fluidos de la línea por cuestiones de limpieza, por lo tanto, se optará por operar el circuito alternativo que se observa en la **Fig. 2.13** siguiente.



Fig.2.12 Circuito en paralelo de inyección de gas.

2.5 Dispositivos para medición y adquisición de datos

La instalación experimental se ha instrumentado para medir y registrar los valores de los diversos parámetros de flujo, tales como gastos volumétricos, presión y temperatura. La variable de interés es el flujo volumétrico, por lo que se instalaron dos sensores de flujo de alto rendimiento tipo turbina marca GF SIGNET modelo 2540, cuyas terminales se conectaron a un transmisor de flujo el cual transforma la señal enviada por el sensor a una señal digital, con la finalidad de proporcionar el gasto volumétrico de agua y aceite. Los sensores se encuentran en la línea de flujo que se conecta a la sección de pruebas (ver **Fig. 2.14**).



Fig.2.13 Sensores de flujo de agua y aceite.

Los sensores de flujo se calibraron de acuerdo a una constante “K” para agua y aceite. Los datos leídos en el transmisor se validaron con resultados de aforos volumétricos, para obtener el menor error posible en la lectura de los gastos volumétricos de los fluidos en los transmisores GF SIGNET 8550, mostrados en la. **Fig. 2.15** y **Fig. 2.16**.



Fig.2.15 Transmisor de flujo para aceite.



Fig.2.14 Transmisor de flujo para agua.

El equipo cuenta también con tres transductores de presión instalados en la sección ascendente vertical (“riser”).

La medición de las presiones se realiza mediante transductores de presión (colocados en distintos puntos de la sección de pruebas), que transmiten una señal análoga de corriente directa que varía entre 0.0 y 20.0 mA.

La instalación descrita anteriormente tiene la capacidad de simular los fenómenos que se presentan en las líneas de flujo de hidrocarburos de la industria petrolera, por lo que el desarrollo experimental tiene como objetivo reproducir lo que sucede en los sistemas de producción.

CAPITULO III. Desarrollo experimental

3.1 Método de aforo del equipo

Para minimizar el error de los datos leídos en los transmisores de flujo, se prosiguió a realizar el aforo volumétrico para agua y aceite en un tanque con capacidad de 200 L y 0.565 m de diámetro; se adaptó un medidor de nivel de 0.50 m de longitud para facilitar la medición de la altura del fluido y finalmente, se calculó el gasto volumétrico por unidad de tiempo. En la **Fig. 3.1** se observa el tanque empleado para los aforos volumétricos.



Fig.3.1 Equipo de calibración.

Como se muestra en la figura anterior, se cerraron las válvulas de globo previas al punto de mezclado, y se conectó una manguera flexible en un tramo de tubería conectada en forma de “T” a la línea de flujo principal. Las válvulas mencionadas se representan en la **Fig.2.1**.

Al mismo tiempo, por medio de los sensores ubicados entre las válvulas globo y check de cada línea, se registraron datos de gasto volumétrico en los trasmisores; cabe mencionar que previamente se introdujeron valores de factores “K” a los transmisores de acuerdo al material y diámetro de la línea, como lo marca el manual de los dispositivos. El valor del factor “K” que se seleccionó para una línea de 1.5 pulg. (0.0381 m) de diámetro nominal cédula 80 y un material de PVC, fue de 42.877 pulsos/litro.

Se consideró un rango de frecuencias de 5 a 25 Hz, debido a que en la industria petrolera el flujo de hidrocarburos se encuentra normalmente dentro de estos valores.

Una vez obtenidos los gastos de los fluidos a diferentes frecuencias por aforo y los gastos leídos en los transmisores de flujo de forma simultánea, se comenzó a realizar la calibración de los transmisores, de tal forma que, los valores leídos en los dispositivos presenten una diferencia mínima respecto a los valores reales de aforo.

3.2 Procedimiento de calibración de los transmisores de flujo para agua y aceite

Los valores registrados en los transmisores de flujo y los obtenidos por aforo para aceite y agua se muestran en el apéndice A. La metodología que se aplicó fue la siguiente:

- Una vez obtenidos los registros de flujo por aforo y por los transmisores de flujo de cada fluido, se procedió a obtener un factor de corrección relacionando dichos valores con la finalidad de calcular un nuevo valor de “K”, corregido para las frecuencias de 10, 15, 20 y 25 Hz.
- Se obtuvo un valor promedio de los valores de “K” corregidos correspondientes a cada frecuencia, por lo que el dato del factor “K” con un valor de 42.877 pulsos/litro (introducido previo a la operación simultánea de aforo), fue modificado por el valor promedio para agua y aceite que se muestra en las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.2 Factores “K” para aceite.

Frecuencia (Hz)	Valores de constante “K” (Pulsos/litro)
10	42.5605
15	43.6070
20	45.3474
25	46.3799
promedio	44.4737

Tabla 3.1 Factores “K” para agua.

Frecuencia (Hz)	Valores de constante “K” (Pulsos/litro)
10	51.0290
15	51.7224
20	51.9296
25	51.4368
promedio	51.5294

- Una vez corregidos los datos leídos para frecuencias mayores a 10 Hz, se realizó un ajuste para valores de 5, 6, 7, 8, y 9 Hz, debido a que se notaron desviaciones grandes de “K” respecto a valores superiores a 10 Hz. Para la obtención de este ajuste, se graficaron los valores promedio de los gastos por aforo y por el sensor, para posteriormente encontrar la función matemática que mejor se ajustara a la gráfica obtenida.

- En la Fig. 3.2 y Fig. 3.3, se muestran las gráficas resultantes para agua y aceite, así como también la correlación de ajuste.

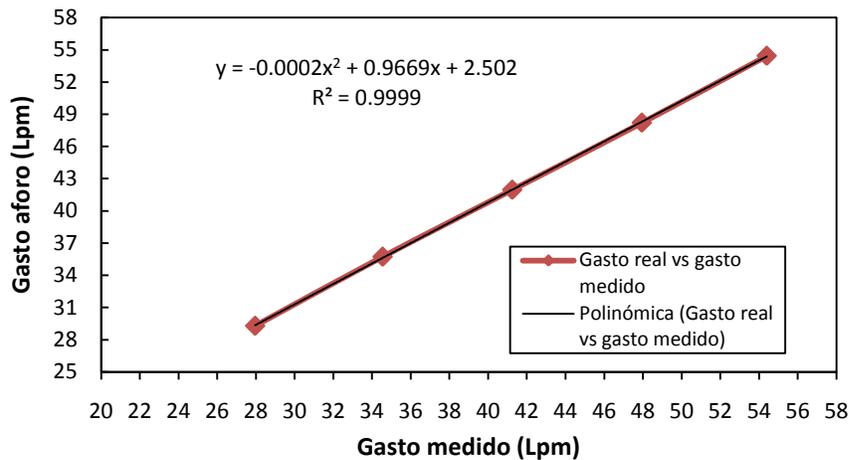


Fig.3.2 Gasto de aforo vs gasto de sensor de agua.

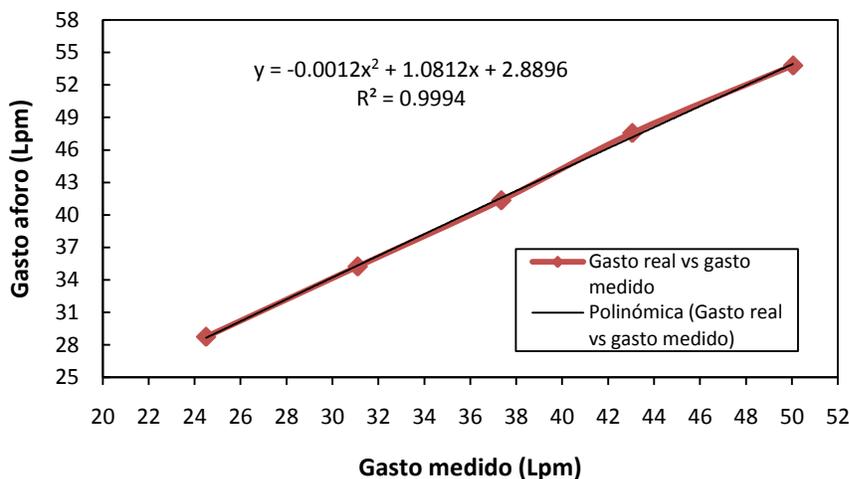


Fig.3.3 Gasto de aforo vs gasto de sensor de aceite.

- Finalmente, los valores de los gastos leídos por los transmisores para frecuencias menores a 10 Hz se modifican de acuerdo a la correlación de ajuste, de tal forma que la información capturada presente un margen de error menor y sea más confiable.

3.3 Principio de operación del viscosímetro Fann

El viscosímetro Fann modelo 35 mostrado en la **Fig. 3.4**, es un instrumento rotativo de lectura directa que se opera manualmente; está disponible en 6 y 12 velocidades, diseñado para trabajar a una frecuencia de 50 y 60 Hz y el voltaje de alimentación estándar es de 115 Volts.

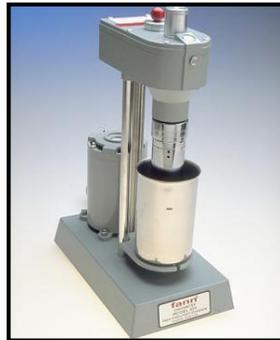


Fig.3.4 Viscosímetro Fann modelo 35-A.

Antes de describir el principio de operación es importante conocer las partes principales del equipo, por lo que en la **Fig. 3.5**, se presentan las partes esenciales del viscosímetro de cilindro coaxial tipo Couette.

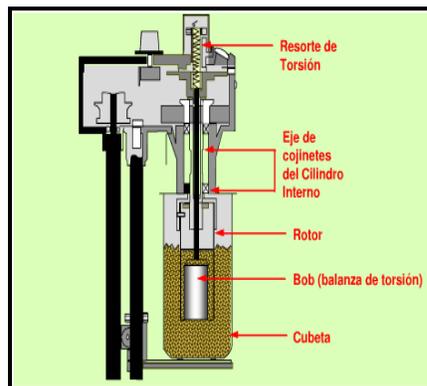


Fig.3.5 Componentes principales del viscosímetro Fann.

La muestra se confina entre dos cilindros concéntricos de radios R_1 y R_2 ($R_2 > R_1$), uno de los cuales, el rotor, está girando a velocidad constante N . El movimiento del rotor en presencia de una muestra de fluido produce un torque que generalmente se mide en la pared del cilindro interior, pero también predomina en la pared del cilindro exterior. El cilindro exterior (rotor o camisa) gira a una velocidad rotacional constante para cada una de las rpm. La rotación de la camisa (rotor) produce una deflexión en el fluido que a su vez es transmitida al Bob o balanza de torsión. La torsión de un resorte reprime el movimiento del Bob, y un disco con escala, sujeto al resorte, mide el desplazamiento de la balanza de torsión.

El rango de velocidades de corte se puede cambiar seleccionando una velocidad de rotor y usando varias combinaciones de rotor/Bob. Se dispone de una variedad de resortes de torsión que se han diseñado para intercambiarse de manera sencilla, con el objetivo de ampliar los rangos de esfuerzo de corte, y de esta forma permitir la medición de la viscosidad de una variedad de fluidos.

La velocidad nominal de corte y el esfuerzo de corte se pueden calcular de los datos del instrumento directamente, usando las expresiones siguientes:

$$\gamma = 1.7023N; \quad (3.1)$$

$$\tau_0 = 5.11F\theta. \quad (3.2)$$

3.4 Procedimiento de operación del viscosímetro Fann

El procedimiento de operación del viscosímetro se planteó de la forma siguiente:

- Llenar el vaso o cubeta con el fluido que se requiere analizar hasta un nivel determinado, aproximadamente de 350 ml(ver la **Fig. 3.6**)



Fig.3.6 Llenado del vaso del equipo con el fluido no Newtoniano.

- Con la camisa girando a una velocidad mínima, la copa debe levantarse hasta que el nivel del líquido alcance la línea grabada en la camisa.
- Aplicar las velocidades de corte a 3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm.
- Registrar el ángulo de deflexión (θ) en grados de la balanza de torsión.
- Graficar los valores de velocidades en rpm vs el punto de deflexión (θ) obtenidos en la operación del equipo.
- Comparar la representación gráfica con la teórica y determinar el modelo reológico.
- Calcular los parámetros de los fluidos.

Cabe mencionar que para las pruebas con el fluido seleccionado, se aplicó un resorte del número cinco debido a su viscosidad alta.

3.5 Modelos reológicos

Los modelos reológicos describen la relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte de un fluido. Los modelos más utilizados para describir las propiedades reológicas de los fluidos no Newtonianos son:

- ❖ Modelo de plástico de Bingham.
- ❖ Modelo de ley de potencias.

3.5.1 Modelo de plástico de Bingham

Cuando se grafica la velocidad de corte contra el esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas rectangulares cartesianas, el comportamiento del fluido como plástico de Bingham resultará en una línea recta con un esfuerzo de corte positivo a una velocidad de corte igual a cero. Para este modelo la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte se expresa por la ecuación 1.3.

En la **Fig. 3.7** se muestra de manera gráfica el comportamiento de un plástico de Bingham.

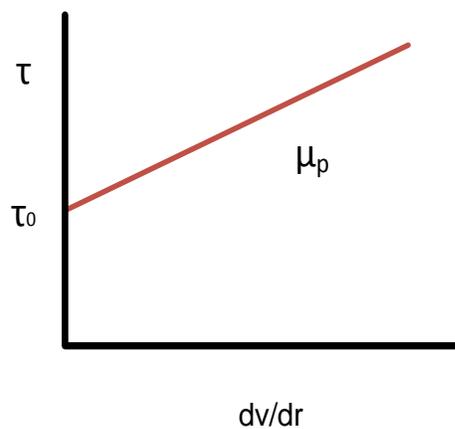


Fig.3.7 Comportamiento de un fluido de Bingham.

Una vez que se genera la gráfica para este modelo, se procede a prolongar una línea recta sobre los puntos obtenidos hasta cruzar con el eje de las ordenadas, de tal forma que se encuentre el valor del punto de cedencia del fluido, τ_y , el cual corresponde a la ordenada al origen y la viscosidad plástica la pendiente de la línea recta.

3.5.2 Modelo de ley de potencias

Cuando se grafica la velocidad de corte contra el esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas rectangular cartesiano, este modelo producirá una curva con un valor de esfuerzo de corte igual a cero para una velocidad de corte igual a cero. Si se grafica el esfuerzo de corte contra la velocidad de corte en papel doble logarítmico, el comportamiento del fluido como un fluido ley de potencias resultará en una línea recta. Para este modelo la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte esta expresado por la ecuación 1.1.

En la **Fig.3.8** y **Fig. 3.9** se muestra de manera gráfica el comportamiento de un fluido ley de potencias, en donde n' es el índice de comportamiento y K' el índice de consistencia.

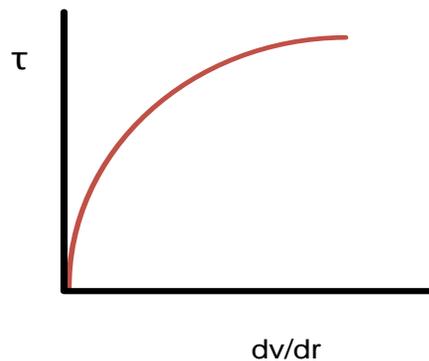


Fig.3.8 Relación exponencial de un fluido ley de potencia.

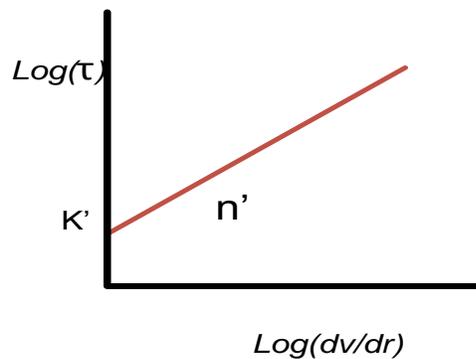


Fig.3.9 Escala Log-Log de un fluido ley de potencia.

En este modelo, los parámetros se obtienen realizando un análisis de regresión de la forma logarítmica de la ecuación que describe el modelo, dicha ecuación se presenta a continuación:

$$\log(\tau) = \log(k) + n' \log(\gamma). \quad (3.3)$$

Donde el índice de comportamiento de flujo n' es el valor de la pendiente.

3.6 Cálculo de las propiedades reológicas del fluido no Newtoniano.

Se seleccionó un fluido proveniente de la industria alimenticia que posea las características de un fluido plástico de Bingham; es decir, con un punto de cedencia determinado.

Los datos obtenidos durante la prueba experimental en el viscosímetro Fann son los siguientes:

Tabla 3.3 Resultados del viscosímetro Fann.

Velocidad del viscosímetro(rpm)	Ángulo de deflexión(θ)
3	13
6	25.5

El punto de cedencia del fluido se calculó a partir de la gráfica siguiente, la cual representa un comportamiento de un plástico de Bingham en coordenadas cartesianas.

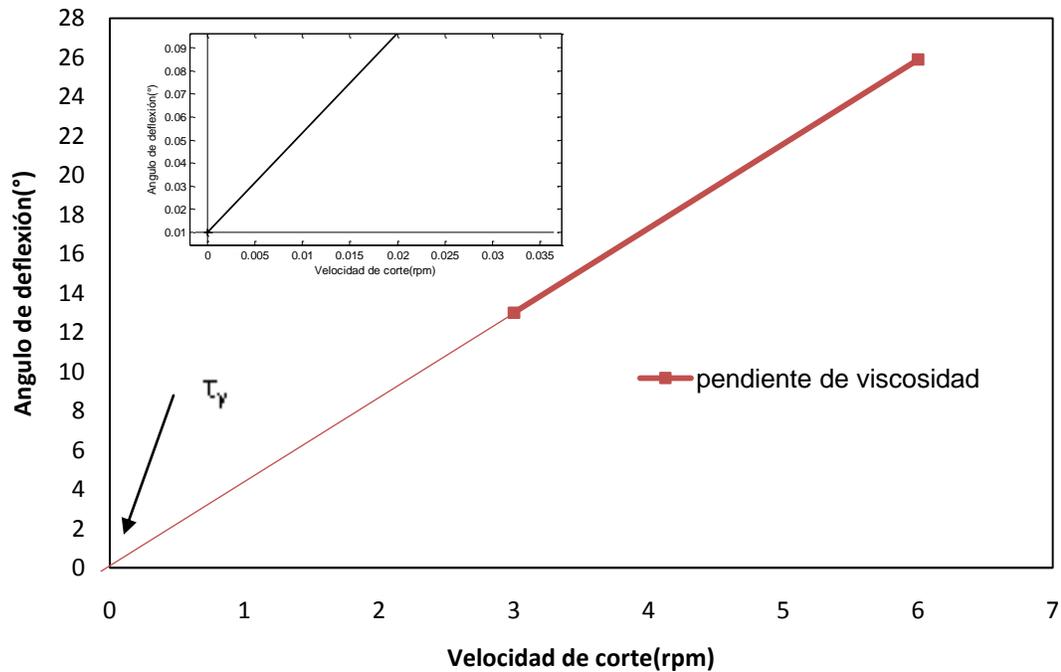


Fig.3.10 Comportamiento reológico del fluido no Newtoniano.

Como se puede observar en la gráfica anterior, sólo fue posible leer puntos de deflexión hasta 6 rpm debido a la viscosidad alta del fluido manejado, por lo que se planteó prolongar una línea recta sobre los dos puntos obtenidos y se determinó el valor del ángulo de deflexión de 0.01°

El valor del esfuerzo de corte (punto de cedencia) correspondiente a una velocidad cortante de cero se calculó con la ecuación siguiente:

$$\tau_y = 5.11F\theta. \quad (3.4)$$

El resultado obtenido con la expresión anterior está dado es Dinas/cm^2 , por lo que se procede a afectar dicho valor por un factor de conversión de 10 para obtenerlo en las unidades de Pa.

Por otra parte, la viscosidad del fluido se determinó por medio del cálculo de la pendiente de la línea mostrada en la **Fig. 3.10** y la densidad se obtuvo de forma directa en el laboratorio.

Ahmed y cols.(2007) reportaron datos de propiedades reológicas de un tipo de fluido no Newtoniano seleccionado para el experimento presentado en este trabajo; en la Tabla 3.4 se muestran los rangos obtenidos:

Tabla 3.4 Propiedades reológicas de un fluido plástico de Bingham (Ahmed y cols., 2007).

Densidad(gr/cm^3)	Punto de cedencia (Pa)	Viscosidad aparente(Pa s)
1.33-1.56	0.005-0.04	0.7-50

3.7 Propiedades de los fluidos experimentales

Los fluidos utilizados en el desarrollo experimental fueron aceite cristal 50 R, agua y un fluido proveniente de la industria alimenticia, el cual presenta características reológicas similares a los lodos que se han mencionado en capítulos anteriores.

Las propiedades del aceite se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 3.5 Propiedades del aceite.

Pruebas físicas	Método de referencia	Resultado
Color	ASTM D-1500 /VISUAL	7.0 ROJO
Apariencia	VISUAL	Líquido Brillante
Densidad relativa @ 20 °C	ASTM D-1298	0.8368
Punto de Inflamación °C	ASTM D-92	172
Punto de Ignición °C	ASTM D-92	194
Viscosidad @ 100 °C cSt	ASTM D-445	1.544
Viscosidad @ 210°F SSU	ASTM D-88	7.20
Viscosidad @ 40 °C cSt	ASTM D-445	4.392
Viscosidad @ 100 °F SSU	ASTM D-88	20.34
Agua por Crepitación	PLANCHA	Negativa

En la Tabla 3.6, se muestran los valores de las propiedades reológicas del fluido no Newtoniano.

Tabla 3.6 Propiedades reológicas del fluido no Newtoniano.

Viscosidad (Pa s)	Punto de cedencia(Pa)	Densidad(gr/cm³)
6.25	0.025	1.37

Como se observa en la Tabla 3.6, el fluido requiere recibir un esfuerzo igual o mayor al reportado, de tal forma que pueda ser desplazado por el aceite y finalmente se comporte similarmente a un fluido Newtoniano. Se observa también que las propiedades reológicas obtenidas se encuentran dentro de los intervalos reportados por Ahmed y cols. (2007) incluidas en la Tabla 3.4.

3.8 Procedimiento experimental

Las pruebas experimentales se desarrollaron para dos sistemas de flujo, el primero, un sistema bifásico de aceite-fluido no Newtoniano y el segundo, un sistema trifásico de aceite-agua-fluido no Newtoniano.

Los experimentos de flujo se efectuaron en una sección horizontal de la instalación, localizada a una distancia de 8 m a partir del punto de inyección (**Fig. 3.11**). Se realizaron dos perforaciones a lo largo de dicha sección con un diámetro de 0.013m (0.5 pulg.) .Se utilizó una bomba de transmisión de fluidos para inyectar el fluido no Newtoniano.



Fig.3. 11 Sección de estudio horizontal con perforaciones para inyección del fluido.

El procedimiento experimental para los sistemas aceite-fluido no Newtoniano y aceite-agua-fluido no Newtoniano fue el mismo, el cual se desarrollo en la forma siguiente:

- Inyectar el fluido no Newtoniano en la sección de estudio.
- Medir el colgamiento inicial del fluido no Newtoniano.
- Accionar las bombas de cavidades progresivas de aceite para el sistema bifásico y de aceite-agua para sistema trifásico, manteniendo una relación de gastos volumétricos de aceite-agua de 10:1.
- Registrar la temperatura de los fluidos.

- Variar la frecuencia de las bombas de tal forma que se incrementen los gastos de los fluidos manejados en cada prueba.
- Observar el comportamiento del fluido no Newtoniano respecto al cambio en la velocidad del aceite en el sistema bifásico y en la velocidad de la mezcla para el sistema trifásico.
- Registrar datos de gastos volumétricos manejados.
- Medir el colgamiento final de los fluidos de interés en cada etapa experimental y registrar datos.

Para determinar el valor del colgamiento, se trazaron segmentos de acetato de tal forma que se obtuviera 180° , que es el ángulo correspondiente a la mitad de la tubería y se colocaron sobre la parte frontal de la línea con el objetivo de leer los datos visualmente. Los cálculos desarrollados se basaron en el trabajo de Yemada y Dukler, (1976), incluidos en el apéndice B.

CAPITULO IV. Pruebas y análisis de resultados

4.1 Datos experimentales para el sistema aceite-fluido no Newtoniano

Se desarrollaron cuatro pruebas experimentales para este sistema. En la prueba experimental bifásica se establecieron dos puntos de medición para cuantificar las fracciones volumétricas de los líquidos manejados ubicados en la sección de tubería que se encuentra entre las perforaciones realizadas para la inyección del fluido no Newtoniano.

El fluido en estudio con un punto de cedencia de 0.025 Pa se inyectó en las secciones perforadas, asegurándose de que quedara distribuido uniformemente, el cual se desplazó y distribuyó con rapidez debido a que se manejó una configuración horizontal.

En cuanto se abrió la válvula de alimentación de aceite en el punto de inyección, comenzó el desplazamiento por efectos de gravedad, por lo que en esas condiciones se midió el colgamiento inicial del FNN (fluido no Newtoniano) reportado en la Tabla 4.1. El valor promedio del colgamiento en ambos puntos fue de 13 % sin considerar ningún valor de gasto y velocidad de la fase, debido a que no se accionó la bomba que corresponde al aceite, por lo que este resultado se consideró como dato inicial. También se reportan algunos parámetros necesarios para el cálculo del colgamiento como: $h_1, h_2, h_{FNN}, \tilde{h}_{FNN}, \text{factor } C, \tilde{A}_{FNN}$ y A_{FNN} ; los últimos cuatro, representan las variables adimensionales utilizadas por Yemada y Dukler (1976) para calcular la fracción volumétrica de los fluidos fluyendo en condiciones de flujo estratificado. El ángulo de medición obtenido en las tablas se refiere a la lectura directa en la tubería y las longitudes se consideraron a partir de un punto de referencia de 0m.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla 4.1 Datos iniciales de la prueba experimental del sistema bifásico.

Punto de medición	Interface	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN*-Aceite	150	0	120	2.223	2.223	1.641	0.212	-0.575	0.122	7.273	0.155
2	FNN-Aceite	210	0	125	2.550	1.895	1.314	0.170	-0.660	0.089	5.287	0.113
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)				Velocidad (m/s)				Frecuencia (Hz)			
aceite	0				0				0			

*Fluido no Newtoniano

Se accionó la bomba de aceite de tal forma que se comenzó a operar con un gasto de 77.32 m³/día (53.7 Lpm), correspondiente a una velocidad de 0.19 m/s, estimándose un colgamiento del 7.7%, por lo que la disminución de la fracción respecto al dato inicial fue del 40.7%. La temperatura registrada fue de 21°C.

Una vez que ya no se observaron cambios en la fracción volumétrica del FNN respecto al tiempo, es decir, el colgamiento permanecía constante, se incrementó la velocidad del aceite para la segunda prueba. Es importante señalar que la velocidad del aceite fue suficiente para disminuir parte del volumen del fluido acumulado, deslizando parcialmente algunas de sus capas superficiales en el fondo de la tubería, pero no la velocidad necesaria para remover por completo el fluido; es decir, si el sistema se quedara operando a esas condiciones ya no se observaría la disminución adicional en el colgamiento.

Tabla 4.2 Prueba No. 1 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interface	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN-Aceite	150	0	130	2.857	1.588	1.006	0.130	-0.740	0.060	3.591	0.077
2	FNN-Aceite	210	0	130	2.857	1.588	1.006	0.130	-0.740	0.060	3.591	0.077
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)				Velocidad (m/s)				Frecuencia (Hz)			
aceite	77.328				0.191				10			

Como se muestra en la Tabla 4.3, la velocidad en la prueba 2 fue de 0.251 m/s y un gasto correspondiente de 101.8 m³/día (70.7 Lpm).

El colgamiento fue de 4.7 % por lo que se redujo un 38.9 % respecto al registrado en la prueba anterior. Aunque el colgamiento disminuyó, la velocidad no fue suficiente para desplazar totalmente al fluido; es decir, aún no se tuvieron las condiciones de operación para exceder el punto de cedencia del fluido estancado. Es trascendente mencionar que a partir de la segunda prueba se observó un ligero ondulamiento en la interfase, es decir, se comenzaron a formar ligeras olas a lo largo del punto de estudio; sin embargo después de un periodo de tiempo, desaparecieron dando lugar a una interfase plana; es decir, el sistema se mantuvo en equilibrio de tal forma que el colgamiento del FNN fue constante.

Desde la prueba 2, se comenzó a manipular el gasto del aceite desde la válvula de recirculación de la línea de descarga de la bomba, por lo tanto, las frecuencia reportadas serán de 16 Hz de aquí en adelante.

Tabla 4.3 Prueba No. 2 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interfase	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN-Aceite	150	0	135	3.143	1.302	0.720	0.093	-0.814	0.037	2.201	0.047
2	FNN-Aceite	210	0	135	3.143	1.302	0.720	0.093	-0.814	0.037	2.201	0.047
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)				Velocidad (m/s)			Frecuencia (Hz)				
aceite	101.81				0.251			16				

Con el incremento del gasto en un 17.9%, se observó una disminución del colgamiento de 40.4 % respecto a los datos anteriores. En la Tabla 4.4, se reporta un gasto de 120 m³/día (83.4 Lpm), correspondiente a la velocidad de 0.29 m/s y la fracción promedio del fluido a estudiar del 2.8 % .De la misma forma que en las pruebas anteriores, existió un momento en el que la fracción volumétrica no disminuyó, por lo que fue necesario incrementar el gasto para verificar algún cambio radical en el fluido más denso.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla 4.4 Prueba No. 3 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interfase	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN-Aceite	150	0	140	3.405	1.040	0.458	0.059	-0.881	0.019	1.129	0.024
2	FNN-Aceite	207.5	0	138	3.303	1.142	0.560	0.072	-0.855	0.025	1.519	0.032
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)				Velocidad (m/s)			Frecuencia (Hz)				
aceite	120.096				0.2964			16				

En la prueba número cuatro, se incrementó el gasto de aceite en un 14.9 % con respecto al anterior observándose el movimiento considerable del fluido no Newtoniano, se visualizaron olas más prolongadas, por lo que el aumento del gasto fue suficiente para arrastrar el fluido estancado y generar un exceso que se arrastraba en forma de olas.

Durante la experimentación se apreciaron dos patrones de flujo, de un patrón de flujo estratificado (**Fig. 4.1**) se generó un patrón de flujo tipo ondulado, es decir, con lecho móvil de FNN (**Fig. 4.2**).

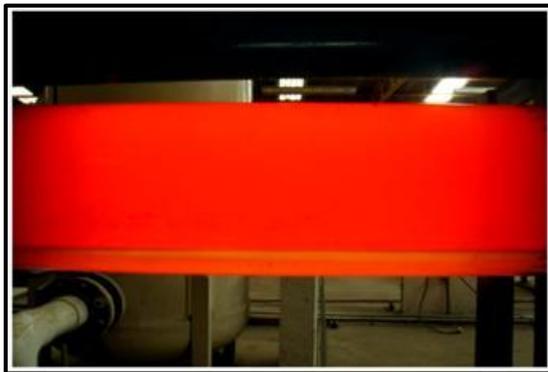


Fig.4.1 Flujo estratificado con lecho inmóvil de FNN.

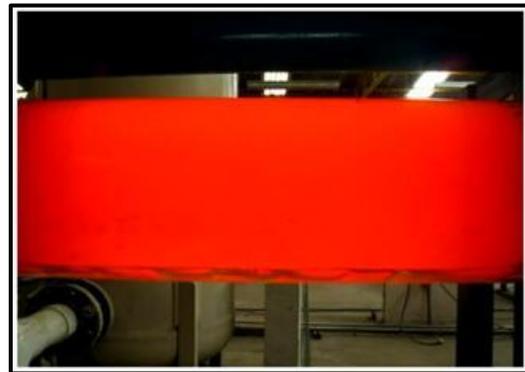


Fig.4.2 Transición de fases (formación de olas o lecho móvil del FNN).

En la Tabla 4.5 se reporta que a una velocidad de 0.33 m/s o gasto de 137.5 m³/día (95.5 L/min) del aceite es posible superar el punto de cedencia del FNN remanente estancado, esta velocidad es muy importante debido a que sólo en esta condición de operación, se observó un deslizamiento del fluido; es decir se logró una remoción casi total.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla 4.5 Prueba No. 4 del sistema aceite-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interface	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\bar{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN-Aceite	150	0	150	Se superó el punto de cedencia del FNN remanente (remoción total del FNN)							
2	FNN-Aceite	207.5	0	150								
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)				Velocidad (m/s)			Frecuencia (Hz)				
aceite	137.52				0.3395			16				

Aunque el fluido no Newtoniano se remueve en gran parte a lo largo de la tubería, este posee una propiedad de adherencia que provoca la presencia de cierta cantidad de fluido en la pared de la tubería, su cantidad no se pudo cuantificar y por lo tanto, se presentó la necesidad de incrementar el gasto del aceite para su remoción total de la línea. En la **Fig.4.3** se observa la cantidad remanente del fluido no Newtoniano adherida en las paredes de la parte inferior de la tubería.

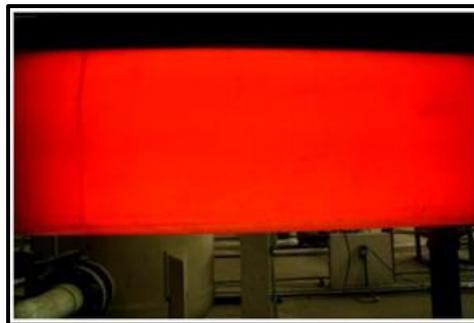


Fig.4.3 Fluido adherido a la tubería.

En los ductos que transportan hidrocarburo en donde se manejan gastos suficientes que no permiten grandes volúmenes de acumulación de lodo, el hecho de que capas de este fluido se queden adheridas en las paredes del ducto puede representar un riesgo pequeño de crecimiento de bacterias en dichas áreas.

Es trascendente mencionar que desde el momento en que la velocidad del aceite fue suficiente para comenzar a remover al fluido más denso, se apreció una acumulación mayor de fluido no Newtoniano en las partes posteriores de la tubería, sobre todo en las secciones en donde la geometría ya no era totalmente horizontal; es decir, cuando se presentaba una pequeña elevación respecto a la horizontal.

Por lo anterior, la longitud y configuración de una línea de transporte que involucre un fluido no Newtoniano es importante, ya que la velocidad del aceite necesaria para que ocurra una transición de patrones de flujo y por ende superar el punto de cedencia del lodo, no será la misma en tuberías horizontales e inclinadas.

Durante el proceso de limpieza de la tubería se pudo apreciar con más claridad la cantidad de fluido acumulado en secciones posteriores al punto de estudio, **Fig. 4.4**.



Fig.4.4 Fluido adherido en puntos posteriores al de estudio.

4.2 Datos experimentales para el sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano.

En la prueba experimental trifásica se establecieron cuatro puntos de medición para cuantificar las fracciones volumétricas de los fluidos. Se reportan gastos volumétricos y velocidades de los fluidos desplazados por las bombas de cavidades progresivas (agua y aceite), así como también colgamientos del agua y fluido no Newtoniano. Las variables restantes son las mismas que las reportadas en el sistema bifásico.

Se estableció una relación del gasto de agua del 10% respecto al gasto del aceite en todas las pruebas. En la Tabla 4.6 se muestran los datos del colgamiento inicial del fluido no Newtoniano, el colgamiento promedio fue de 15%.

La regulación de los gastos se manipuló desde los variadores de frecuencia, por lo que se reporta un incremento de frecuencia en todas las pruebas, caso contrario al sistema bifásico en donde el incremento de los gastos se operó desde la recirculación de la línea a partir de la segunda prueba.

Tabla 4.6 Datos iniciales de la prueba experimental.

Punto de medición	Interface	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN	0	0	121	2.289	2.156	1.574	0.204	-0.593	0.115	6.854	0.146
2	FNN	100	0	120	2.223	2.223	1.641	0.212	-0.575	0.122	7.273	0.155
3	FNN	150	0	120	2.223	2.223	1.641	0.212	-0.575	0.122	7.273	0.155
4	FNN	210	0	120	2.223	2.223	1.641	0.212	-0.575	0.122	7.273	0.155
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)				Velocidad (m/s)				Frecuencia (Hz)			
aceite	0				0				0			
agua	0				0				0			

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Se comenzaron a circular los fluidos al sistema por la impulsión de las bombas. Se estableció un gasto y velocidad de la mezcla de 29 L/min y 0.103 m/s, respectivamente. En la Tabla 4.7 se muestran los valores individuales de las condiciones operativas de cada fluido así como también la fracción volumétrica de los fluidos más densos (fluido no Newtoniano y agua). El colgamiento del aceite, que no se reporta en las tablas, se obtiene como resultado de la sustracción entre la unidad y la suma de los colgamientos de las fases reportadas. La temperatura registrada en las pruebas fue de 18.5°C.

Tabla 4.7 Prueba No.1 del sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interface	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN-agua	0	0	121	2.289	2.156	1.574	0.204	-0.593	0.115	6.854	0.146
	agua-aceite			100	0.772	3.673	3.091	0.400	-0.200	0.293	17.521	0.227
2	FNN-agua	100	0	120	2.223	2.223	1.641	0.212	-0.575	0.122	7.273	0.155
	agua-aceite			100	0.772	3.673	3.091	0.400	-0.200	0.293	17.521	0.219
3	FNN-agua	150	0	120	2.223	2.223	1.641	0.212	-0.575	0.122	7.273	0.155
	agua-aceite			100	0.772	3.673	3.091	0.400	-0.200	0.293	17.521	0.219
4	FNN-agua	210	0	121	2.289	2.156	1.574	0.204	-0.593	0.115	6.854	0.146
	agua-aceite			103	1.000	3.445	2.863	0.371	-0.259	0.265	15.806	0.191
Fluido	Gasto (m ³ /día)		Gasto de la mezcla(m ³ /día)		Velocidad (m/s)		Velocidad de la mezcla(m/s)		Frecuencia (Hz)			
aceite	37.44		41.76		0.092		0.103		11			
agua	4.32				0.011				6			

La medición del colgamiento promedio del FNN fue de 15 %; la velocidad de la mezcla obtenida en la primera prueba no tuvo ningún efecto en el fluido acumulado en el fondo de la tubería, por lo que fue necesario incrementar el gasto total para poder visualizar algún cambio en el fluido de interés.

En la segunda prueba, se comenzó a observar la propagación de olas en la interface FNN-agua, por lo que se apreció un fenómeno similar al generado en el sistema bifásico; el gasto total se incrementó en un 36.8% respecto al anterior, es decir, se operó con un gasto de 39.7 L/min o velocidad de 0.14 m/s.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

La velocidad de las fases fue suficiente para disminuir una parte del colgamiento, pero no la necesaria para que exista un efecto considerable sobre el fluido más pesado de tal forma que lo pueda desplazar totalmente.

En la Tabla 4.8 se reportan las fracciones volumétricas de las fases medidas en la prueba dos. La fracción volumétrica promedio del fluido no Newtoniano fue del 12%, por lo que la disminución del colgamiento leído a las condiciones de operación de esta prueba fue de un 20 % respecto al anterior.

El colgamiento en la sección de interés llegó a ser constante, por lo que ya no se percibió ninguna disminución de FNN conforme transcurrió el tiempo; es decir, el sistema se estratificó nuevamente por lo que fue necesario incrementar el gasto de los fluido con el fin de obtener una condición de operación suficiente para superar el punto de cedencia del fluido acumulado, remanente en el fondo de la tubería.

Tabla 4.8 Prueba No. 2 del sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano.

Punto de medición	Interface	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
1	FNN-agua	0	0	125	2.550	1.895	1.314	0.170	-0.660	0.089	5.287	0.113
	agua-aceite			100	0.772	3.673	3.091	0.400	-0.200	0.293	17.521	0.261
2	FNN-agua	100	0	122	2.355	2.090	1.508	0.195	-0.610	0.108	6.445	0.137
	agua-aceite			100	0.772	3.673	3.091	0.400	-0.200	0.293	17.521	0.236
3	FNN-agua	150	0	125	2.550	1.895	1.314	0.170	-0.660	0.089	5.287	0.113
	agua-aceite			100	0.772	3.673	3.091	0.400	-0.200	0.293	17.521	0.261
4	FNN-agua	210	0	125	2.550	1.895	1.314	0.170	-0.660	0.089	5.287	0.113
	agua-aceite			103	1.000	3.445	2.863	0.371	-0.259	0.265	15.806	0.224
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)	Gasto de la mezcla(m ³ /día)		Velocidad (m/s)		Velocidad de la mezcla(m/s)		Frecuencia (Hz)				
aceite	50.832	57.168		0.125		0.141		13				
agua	6.336			0.016				7				

En la prueba siguiente se incrementó el gasto en 30.35% respecto al anterior. Con el flujo total de 51.75 L/min o velocidad de 0.18m/s reportados en la Tabla 4.9 se pudo observar una transición de fases nuevamente y a su vez visualizar el desplazamiento total de FNN.

La transición de fases del sistema trifásico se presentó en una secuencia de olas que se generaban debido a que la velocidad de los fluidos fue tal que arrastraba al fluido estancado y formaba un exceso en la interface plana de los fluidos más densos, lo que provocó la formación de un tipo de olas con un desplazamiento lento. En esta etapa, el sistema ya no estaba en equilibrio; por esta razón, la velocidad de los fluidos barría al fluido estancado.

Por otra parte, de la misma forma que en el sistema bifásico, se observó una acumulación mayor de FNN después de la transición de fases en las secciones posteriores al punto de estudio, sobre todo en las partes ascendentes que formaban parte de la configuración. Con esto queda claro que en una configuración inclinada se necesita de condiciones de operación mayores para romper el equilibrio y poder arrastrar al fluido estancado. Cabe mencionar que al final de la prueba se observó cierta cantidad de fluido no Newtoniano adherida en el fondo de la tubería, debido a las características de adherencia del fluido.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla 4.9 Prueba No. 3 del sistema aceite-agua-fluido no Newtoniano.

Interface	Punto de medición	Longitud (cm)	Elevación (cm)	Ángulo de medición	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_{FNN} (cm)	\hat{h}_{FNN}	Factor C	\tilde{A}_{FNN}	A_{FNN} (cm ²)	Colgamiento
FNN-agua	1	0	0	Se superó el punto de cedencia del FNN remanente (remoción total del FNN)								
agua-aceite												
FNN-agua	2	100	0									
agua-aceite												
FNN-agua	3	150	0									
agua-aceite												
FNN-agua	4	210	0									
agua-aceite												
Fluido	Gasto medido(m ³ /día)		Gasto de la mezcla(m ³ /día)		Velocidad (m/s)	Velocidad de la mezcla(m/s)		Frecuencia (Hz)				
Aceite	67.680		74.52		0.167	0.184		15				
Agua	6.840				0.017					6		

En la **Fig. 4.5**, se muestra la configuración geométrica que se observó inicialmente y durante la experimentación del flujo trifásico. El patrón de flujo de las fases superiores (agua-aceite) se trata de un flujo estratificado con mezclado en la interfaz, donde a medida que se incrementaban los gastos, la interface se convertía en más turbulenta. El patrón de flujo generado entre los fluidos más densos (FNN-agua) fue estratificado, de interface plana con lecho inmóvil, de fluido no Newtoniano.

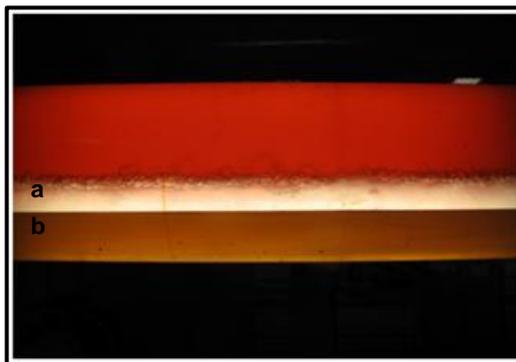


Fig.4.5 a) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz b) Flujo estratificado con lecho inmóvil de FNN.

Adicionalmente, se observó una segunda configuración geométrica de las fases, a la cual se le denominó flujo estratificado con mezclado en la interfaz entre las fases superiores (aceite-agua) y flujo estratificado con lecho móvil, de fluido no Newtoniano entre los fluidos más densos (FNN-agua).



Fig.4.6 Flujo estratificado con mezclado en la interfaz, b) con lecho móvil (generación de olas o dunas) de FNN.

En la **Fig. 4.7**, se muestra de forma secuencial el proceso de propagación de las olas del sistema trifásico. Sólo se presenta en este sistema debido a que el agua permite visualizar de manera más clara la propagación de las olas.

El oleaje se suscitó en una serie de etapas observándose cuatro diferentes casos que comprenden desde el rompimiento del equilibrio del sistema hasta llegar nuevamente a un equilibrio; esta secuencia se presentó en varias ocasiones hasta que las fases se estratificaron por completo, de tal forma que se procedía a incrementar la velocidad para que ocurra el mismo fenómeno.

En la **Fig. 4.7** parte a), se generó la primer ola a una velocidad de la mezcla suficiente para provocar el arrastre del fluido no Newtoniano. En la parte b) se aprecia que la propagación entre olas comienza a hacerse lenta, por lo que la distancia entre éstas no es corta además de ser plana. La parte c) muestra un desplazamiento de la última ola, observado durante la primera secuencia de olas formadas en el punto de estudio; se aprecia que conforme estos excesos se generan dejan una interface plana y finalmente en la figura d) se visualizó una estratificación total de sistema. Aparentemente el sistema está en equilibrio nuevamente; sin embargo, poco tiempo después a este estado, se observa de nuevo el caso a) a las mismas condiciones de operación, hasta que finalmente no es posible apreciar estas transiciones por lo que todo el sistema regresa a un equilibrio total permanente.

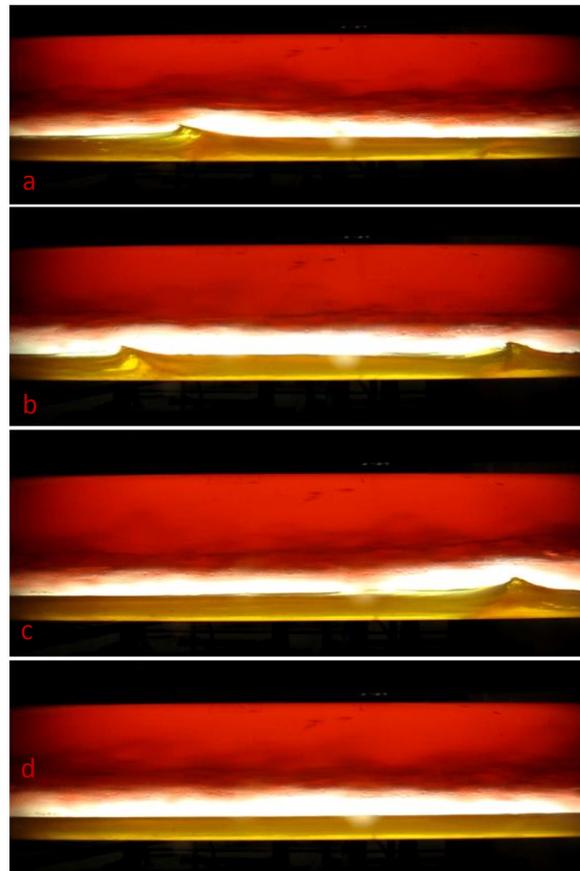


Fig.4.7 Desplazamiento de la primera ola b) Propagación lenta de más olas c) Desplazamiento de la última ola d) Flujo estratificado.

A diferencia del flujo bifásico, en este sistema se necesitó de una velocidad menor (45.4% menos respecto al bifásico) para desplazar al fluido no Newtoniano de forma casi total. En este caso, la presencia de agua (una fase adicional) fue de beneficio para la remoción del fluido estancado en la parte baja de la tubería.

CAPITULO V. Conclusiones, aportaciones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- 1) Se logró seleccionar un fluido no Newtoniano con características similares a los lodos acumulados en oleoductos.
- 2) Se recopilaron datos experimentales del flujo de un sistema bifásico y trifásico que involucran un fluido de Bingham.
- 3) Se generó una base nueva de datos experimentales de sistemas estudiados por vez primera.
- 4) La velocidad requerida del aceite en el sistema bifásico para desplazar por completo al FNN fue de 0.33 m/s, o un gasto correspondiente de 95.5 L/min; a estas condiciones es posible superar un punto de cedencia (0.02 Pa) del fluido no Newtoniano remanente.
- 5) La velocidad requerida de la mezcla de aceite-agua en el sistema trifásico para desplazar por completo al FNN fue de 0.18 m/s, por lo que a estas condiciones se superó un punto de cedencia del fluido no Newtoniano remanente de 0.02 Pa .
- 6) Se observaron dos patrones de flujo estratificados con lecho móvil (generación de olas) e inmóvil del fluido no Newtoniano, en el sistema bifásico.
- 7) Los patrones de flujo observados en el sistema trifásico fueron los siguientes:
 - a) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz entre el aceite-agua y flujo estratificado con lecho inmóvil, de FNN entre agua-FNN.

- b) Flujo estratificado con mezclado en la interfaz entre el aceite-agua y flujo estratificado con lecho móvil (generación de olas o dunas) de FNN entre agua-FNN.
- 8) El proceso de propagación de las olas generadas por el arrastre de la velocidad de los fluidos, consiste en una serie de cuatro etapas en donde el desplazamiento de las olas es muy lento.
- 9) A velocidades inferiores a 0.18m/s para la mezcla de agua-aceite en el sistema trifásico y menores a 0.33 m/s para el aceite en el sistema bifásico, no es posible la remoción total del fluido más denso.
- 10) Se requiere de una velocidad mayor (84.7 % superior a la velocidad del sistema trifásico) para desplazar el fluido acumulado en la tubería en el sistema bifásico, por lo que en este caso, la presencia de agua favorece el desplazamiento del fluido.
- 11) Se observó la acumulación e inmovilidad de fluido no Newtoniano en secciones posteriores a los puntos de estudio, en donde la configuración era ascendente, por lo que es claro que se necesita de condiciones de operación mayores para poder remover dicho fluido en secciones que involucren determinado ángulo de inclinación.
- 12) Se concluye que es de suma importancia conocer la velocidad que conlleva el desplazamiento de un fluido no Newtoniano, debido a que en la industria petrolera existe la acumulación de fluidos que se depositan en el fondo de oleoductos denominados “lodos”; por lo tanto se debe comenzar por conocer su comportamiento.

5.2 Aportaciones

- 1) Se realizó la visualización de patrones de flujo líquido-líquido no Newtoniano y líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.
- 2) El incremento en la velocidad del fluido (aceite y/o aceite-agua) resulta en una transición de flujo estratificado a ondulado, de tal forma que se provoca el movimiento del fluido no Newtoniano, que ocasiona una disminución en su colgamiento y posteriormente el sistema permanece como flujo estratificado con lecho inmóvil del fluido no Newtoniano.
- 3) La velocidad requerida para desplazar por completo al fluido no Newtoniano fue de 0.33 m/s en el sistema bifásico, mientras que en el sistema trifásico fue de 0.18 m/s.
- 4) Se demostró que se requiere mayor velocidad para desplazar el fluido no Newtoniano en el sistema bifásico respecto al trifásico.

5.3 Recomendaciones

- 1) Realizar un estudio experimental bifásico FNN-aceite y trifásico FNN-aceite-agua en tuberías inclinadas.
- 2) Reproducir de forma experimental diversos patrones de flujo de los sistemas estudiados en este trabajo, con el objetivo de recopilar las condiciones de operación a las cuales se generan las configuraciones geométricas de cada fase y realizar un mapa de patrones de flujo.
- 3) Desarrollar un modelo analítico y validarlo con los datos de los sistemas bifásicos y trifásicos reportados en este trabajo.
- 4) Se recomienda continuar con estudios experimentales de sistemas de flujo cuatrifásico FNN-agua-aceite-gas en tuberías horizontales e inclinadas, ya que estos también se presentan de forma común en la industria petrolera.
- 5) Reproducir los patrones de flujo del sistema cuatrifásico FNN-agua-aceite-gas en tuberías horizontales e inclinadas para generar un mapa de patrones de flujo.

APENDICE A. Datos registrados por aforo y transmisores de flujo

A.1 Registro de gastos volumétricos para aceite

En las tablas siguientes, se presentan los valores obtenidos durante el aforo y calibración de los transmisores de flujo. En la Tabla. A.1.1 se observa que el valor promedio para “*K*” corregida difiere mucho a los valores de las frecuencias mayores a 10 Hz. (ver tablas A.1.2-A.1.5), por lo tanto, se realizó un ajuste con una correlación matemática para el intervalo de frecuencias de 5 a 9 Hz.

Las Tablas A.1.2, A.1.3, A.1.4 y A.1.5 muestran los datos obtenidos para las frecuencias de 10,15, 20 y 25 Hz respectivamente, para estos datos es posible realizar un valor promedio de cada una y obtener una constante nueva “*K*” corregida. La constante nueva “*K*” corregida es el resultado del producto del factor *K* establecido inicialmente y el factor de corrección equivalente al valor leído en el sensor dividido entre el valor leído por aforo.

Tabla A.1.1 Datos de aforo y calibración para aceite a 5 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	252.25	50	25.5	29.81789	0.855191	36.66804
2	42.877	255.32	50	25.4	29.45935	0.862205	36.96876
3	42.877	255.03	50	25.6	29.49285	0.868007	37.21753
						Promedio	36.95145

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla A.1.2 Datos de aforo y calibración para aceite a 10 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	123.43	50	60	60.93787	0.984609	42.217094
2	42.877	124.53	50	60.3	60.39960	0.998351	42.806297
3	42.877	124.72	50	60	60.30758	0.994900	42.658316
						Promedio	42.560569

Tabla A.1.3 Datos de aforo y calibración para aceite a 15 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	81.07	50	93.4	92.77861	1.006698	43.164171
2	42.877	82.32	50	93.1	91.36980	1.018936	43.688929
3	42.877	82.13	50	93.7	91.58117	1.023136	43.869004
						Promedio	43.574035

Tabla A.1.4 Datos de aforo y calibración para aceite a 20 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	61.72	50	128.2	121.86588	1.051976	45.10558
2	42.877	62.02	50	128.2	121.27639	1.057089	45.32483
3	42.877	62.34	50	128.35	120.65386	1.063787	45.61199
						Promedio	45.34747

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla A.1.5 Datos de aforo y calibración para aceite a 25 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN N	K CORREGIDA
1	42.877	50.31	50	163.2	149.50431	1.091607	46.80485
2	42.877	49.5	50	163.4	151.95074	1.075348	46.10772
3	42.877	49.75	50	163	151.18717	1.078134	46.22714
						Promedio	46.37990

En las Tablas A.1.6, A.1.7, A.1.8, A.1.9 A.1.10 se reportan valores para frecuencias de 5, 6, 7,8 y 9 Hz respectivamente, tales valores se afectan por la correlación mostrada en la Fig. 4.3.

Tabla A.1.6 Datos de aforo y calibración para aceite a 5 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	44.473	254.63	50	24.3	29.5391	29.5563
2	44.473	255.1	50	24.6	29.4847	29.8503

Tabla A.1.7 Datos de aforo y calibración para aceite a 6 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	44.473	209.13	50	30.3	35.9659	35.3646
2	44.473	210.06	50	30.8	35.8067	35.8418

Tabla A.1.8 Datos de aforo y calibración para aceite a 7 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	44.473	179.1	50	37.5	41.9964	42.1349
2	44.473	178.35	50	37.7	42.1730	42.3198

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla A.1.9 Datos de aforo y calibración para aceite a 8 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	44.473	155.47	50	44.6	48.3795	48.5979
2	44.473	155.91	50	44.65	48.2429	48.6427

Tabla A.1.10 Datos de aforo y calibración para aceite a 9 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	44.473	137.91	50	51	54.5396	54.2424
2	44.473	139	50	51.2	54.1119	54.4160

Como se observa en las últimas cinco tablas, los valores obtenidos con la correlación de ajuste son muy aproximados a los obtenidos en el aforo volumétrico, por lo que se asegura una lectura correcta en los transmisores de flujo manejados en la experimentación.

Respecto a los datos obtenidos para frecuencias mayores a 10 Hz, el cálculo de la constante “*K*” corregida que se propuso para obtener una lectura correcta de los datos fue suficiente.

A.2 Registro de gastos volumétricos para agua

En las Tablas A.2.1, A.2.2, A.2.3, A.2.4 y A.2.5 se presentan los datos obtenidos en el aforo y calibración de los transmisores para agua, dichas tablas corresponden a frecuencias de 5, 10, 15, 20 y 25 Hz respectivamente.

En la Tabla A.2.1 se observa que el valor promedio para “K” corregida difiere mucho a los valores de las frecuencias superiores a 10 Hz. (ver Tablas A.2.1-A.2.5), por lo tanto, se realizó un ajuste con una correlación matemática para el intervalo de frecuencias de 5 a 9 Hz tal como se realizó para el aceite.

En las tablas siguientes, se presentan los valores obtenidos durante el aforo y calibración de los transmisores de flujo.

Tabla A.2.1 Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	252.19	50	33.48	29.82498	1.122549	48.13153
2	42.877	257.38	50	33.6	29.22357	1.149757	49.29813
3	42.877	252.97	50	33.59	29.73302	1.129720	48.43902
						promedio	48.62289

Tabla A.2.2 Datos de aforo y calibración para agua a 10 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	122.75	50	72.59	61.27545	1.184651	50.794262
2	42.877	124.09	50	72.6	60.61376	1.197748	51.355831
3	42.877	122.78	50	72.7	61.26048	1.186736	50.883667
						promedio	51.011253

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla A.2.3 Datos de aforo y calibración para agua a 15 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	81.75	50	111.3	92.00687	1.209692	51.867974
2	42.877	81.41	50	111.3	92.39113	1.204661	51.652254
3	42.877	81.12	50	111.3	92.72142	1.200370	51.468258
						promedio	51.662829

Tabla A.2.4 Datos de aforo y calibración para agua a 20 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	61.22	50	148.6	122.86119	1.209495	51.85952
2	42.877	61.56	50	148.61	122.18262	1.216294	52.15104
3	42.877	61.29	50	148.6	122.72087	1.210878	51.91882
						promedio	51.97646

Tabla A.2.5 Datos de aforo y calibración para agua a 25 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	FACTOR DE CORRECCIÓN	K CORREGIDA
1	42.877	47.22	50	188.8	159.28763	1.185277	50.82113
2	42.877	48.28	50	188.6	155.79043	1.210601	51.90693
3	42.877	47.85	50	187.9	157.19043	1.195365	51.25368
						promedio	51.32725

En las Tablas A.2.6, A.2.7, A.2.8, A.2.9 y A.2.10 se reportan los valores para frecuencias de 5, 6, 7, 8 y 9 Hz respectivamente, estos valores son afectados con la correlación mostrada en la figura 4.2.

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla A.2.6 Datos de aforo y calibración para agua a 5 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN N (L/min)
1	51.029	256.56	50	27.98	29.3169	29.3992
2	51.029	256.96	50	27.94	29.2713	29.3610

Tabla A.2.7 Datos de aforo y calibración para agua a 6 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	51.029	210.34	50	34.5	35.7590	35.6220
2	51.029	210.69	50	34.6	35.6996	35.7173

Tabla A.2.8 Datos de aforo y calibración para agua a 7 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	51.029	179.13	50	41.1	41.98940	41.9037
2	51.029	179.35	50	41.4	41.93790	42.1888

Tabla A.2.9 Datos de aforo y calibración para agua a 8 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	51.029	156.38	50	48.01	48.0979	48.4618
2	51.029	155.66	50	47.88	48.3204	48.3386

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

Tabla A.2.10 Datos de aforo y calibración para agua a 9 Hz.

PRUEBA	K	TIEMPO (s)	NIVEL DE AFORO (cm)	LECTURA DEL SENSOR (L/min)	LECTURA DE AFORO (L/min)	GASTO CORRELACIÓN (L/min)
1	51.029	138.09	50	54.2	54.4685	54.3204
2	51.029	138.25	50	54.6	54.4055	54.6985

APENDICE B. Cálculos de la fracción volumétrica de los fluidos

Con la finalidad de cuantificar el colgamiento de los fluidos manejados, se planteó una secuencia de cálculos correspondientes a las variables reportadas en las tablas de datos del análisis de resultados del capítulo V. Parte de éstos se basan en las expresiones utilizadas por Yemada y Dukler (1976). En este apéndice, se presenta el desarrollo del cálculo del colgamiento para el sistema aceite-fluido no Newtoniano. El colgamiento del agua en el sistema trifásico se realizó de la misma forma

En la siguiente figura, se observa la representación geométrica de una parte de la sección transversal de la tubería en donde se señalan las alturas de los fluidos que a continuación se determinaran:

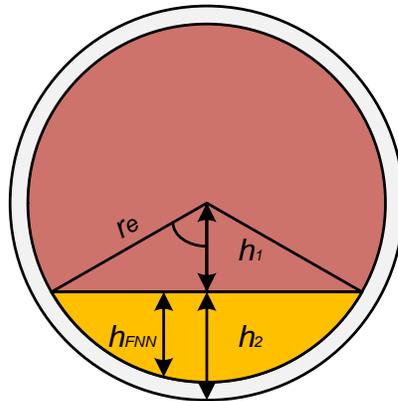


Fig.B.1 Representación geométrica de la altura de los fluidos dentro de la tubería.

Como primer paso, se calculó parte de la altura alcanzada por el aceite por medio de la expresión siguiente:

$$h_1 = r_e \cos(180 - \alpha). \quad (\text{B.1})$$

La altura o nivel del fluido más denso (fluido no Newtoniano) se obtiene por la forma siguiente:

$$h_2 = \frac{D_e}{2} - h_1. \quad (B.2)$$

La fracción volumétrica del FNN se calculó como sigue:

$$h_{FNN} = h_2 - \frac{e}{2}. \quad (B.3)$$

Para utilizar las expresiones planteadas en el trabajo de Yemada T. y Dukler, A.E. (1976), la variable calculada en el paso anterior se afectó por el diámetro interno de la tubería para obtener dichas expresión en unidades adimensionales:

$$\tilde{h}_{FNN} = \frac{h_{FNN}}{D_i}. \quad (B.4)$$

El área adimensional del área ocupada por el fluido no Newtoniano es:

$$\tilde{A}_{FNN} = 0.25[\pi - \cos^{-1}C + C(1 - C^2)^{0.5}]. \quad (B.5)$$

El factor C es equivalente a:

$$\text{Factor } C = 2h_{FNN} - 1. \quad (B.6)$$

Una vez calculada el área adimensional, ésta se afecta por el diámetro al cuadrado para obtenerla en unidades dimensionales. El cálculo del área en función área adimensional es expresa como:

$$A_{FNN} = \tilde{A}_{FNN} \times D_i^2. \quad (B.7)$$

Finalmente se obtiene la fracción volumétrica de los fluidos con la expresión siguiente:

$$H_{FNN} = \frac{A_{FNN}}{A_T}. \quad (B.8)$$

Nomenclatura

Símbolo	Definición	Unidades
A_{FNN}	Área ocupada por el fluido no Newtoniano,	(cm ²)
\tilde{A}_{FNN}	Área adimensional ocupada por el fluido no Newtoniano,	(adim)
A_T	Área total de la tubería,	(cm ²)
C	Factor correspondiente a $2h_{FNN}-1$,	(cm)
D_i	Diámetro interno de la tubería,	(cm)
D_e	Diámetro externo de la tubería,	(cm)
e	Espesor de la tubería,	(cm)
F	Factor de torsión del instrumento, con un valor de 5,	(adim)
h_{FNN}	Altura o nivel real alcanzado por el fluido no Newtoniano,	(cm)
\tilde{h}_{FNN}	Altura adimensional real del fluido no Newtoniano,	(cm)
h_1	Altura o nivel del aceite desde la interface de los fluidos hasta la parte central de la tubería,	(cm)
h_2	Altura o nivel alcanzado por el fluido no Newtoniano considerando el espesor,	(cm)
“K”	Factor para calibración de sensores de flujo,	(adim)
N	Velocidad del viscosímetro,	(rpm)

Estudio experimental de flujo bifásico líquido-líquido no Newtoniano y flujo trifásico líquido-líquido-líquido no Newtoniano en una tubería horizontal.

u	Velocidad del fluido en dirección y ,	m/s
α	Valor leído directamente en la tubería del equipo experimental,	(°)
γ	Velocidad nominal de corte,	1/s
θ	Lectura del viscosímetro en grados de deflexión,	(adim)
μ	Viscosidad del fluido,	(N s/m ²)
τ	Esfuerzo cortante,	(Dinas/cm ²)
τ_0	Esfuerzo de cedencia o punto de cedencia,	(N/m ²) o (lb/ft ²)

Referencias

- Ahmed, J., Prabhu, S.T., Raghavan, G.S.V. y Ngadi M. 2007. Physico-Chemical, Rheological, Calorimetric and Dielectric Behavior of Selected Indian Honey. *Journal of Food Engineering* **79** (4): 1207-1213. doi: [10.1016/j.jfoodeng.2006.04.048](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.048)
- Babbitt, H.E. y Caldwell, D.H. 1939. *Laminar Flow of Sludges in Pipes With Special Reference to Sewage Sludge*. Urbana, Illinois: Bulletin Series, University of Illinois, Engineering Experiments Station.
- Brenntagla Latin America*. 2011, <http://www.brenntagla.com/es/index.html>. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].
- Brill, J. P. y Mukherjee, H. 1999. *Multiphase Flow in Wells*. Monograph Series, SPE, Richardson, Texas **17**.
- Brown, K. E. y Beggs, H.D. 1977. *The Technology of Artificial Lift Methods*, Volumen 1. Tulsa Oklahoma: PennWell Publishing Co.
- Derrame de hidrocarburos en el mar. *Estrucplan on line* <http://www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?identrega=730>. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].
- Doron, P. y Barnea, D. 1995a. Experiments on the flow of solid-liquid mixtures in pipes. Proc., *Second International Conference Multiphase Flow*, Kyoto, Japan, Volumen 2.
- Doron, P. y Barnea, D. 1996. Flow Pattern Maps for Solid-Liquid Flow in Pipes. *International Journal of Multiphase Flow* **22** (2): 273-283. doi: [10.1016/0301-9322\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00071-2)
- Ductos, desgaste de más de 30 años, en el sureste mexicano más de la mitad se instalaron en los años 70*. *El Universal* (martes 1 de febrero 2005) http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/noticia.html?id_notas=121283&tabla=nacion. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].
- Dziubinski, M., Fraczak, M., Markowski, A.S. 2006. Aspects of Risk Analysis Associated with Major Failures of Fuel Pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **19** (5): 399-408. doi: [10.1016/j.jlp.2005.10.007](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.10.007)
- Fairuzov, Y.V. 2009. Apuntes de Clase "Flujo Multifásico Transitorio en Sistemas de Producción de Hidrocarburos". UNAM, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.

Fairuzov, Y.V., Arenas-Medina, P., Verdejo-Fierro, J. y González-Islas, R. 2000. Flow Pattern Transitions in Horizontal Pipelines Carrying Oil-Water Mixtures: Full-Scale Experiments. *Journal of Energy Resources Technology* **122** (4): 169-176. doi: [10.1115/1.1318204](https://doi.org/10.1115/1.1318204)

Farina, A. y Fasano, A. 1997. Flow Characteristics of Waxy Crude Oils in Laboratory Experimental Loops. Mathematical and Computer Modelling **25** (5): 75-86. doi: [10.1016/S0895-7177\(97\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(97)00031-9)

Feys, D., Gert, H., De Schutter, G., Verhoeven, R., Vandewalle, L. y Van Gemert, D. 2007. Comparison of Two Concrete Rheometers for Shear Thickening Behavior of SCC. 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium.

Goharzadeh, A. y Rodgers, P. 2009. Experimental Characterization of Solid Particle Transport by Slug Flow Using Image Velocimetry. *Journal of Physics: Conference Series* **147**(1). doi: [10.1088/1742-6596/147/1/012069](https://doi.org/10.1088/1742-6596/147/1/012069)

Gómez, M.T., Ancheyta, J., Marroquín, G., Alonso, F., Betancourt, G. y Centeno, G. 2003. *Formación de Sedimentos durante la Hidrodesintegración de Residuos del Petróleo*. *Revista de la Sociedad Química de México* **47** (3): 260-266.

Grassi, B., Strazza, D. y Poesio, P. 2008. Experimental Validation of Theoretical Models in Two-Phase High-Viscosity Ratio Liquid-Liquid Flows in Horizontal and Slightly Inclined Pipes. *International Journal of Multiphase Flow* **34** (10): 950-965. doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.03.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.03.006)

Hill, K.B. y Shook, C. A. 1998. Pipeline Transport of Coarse Particles by Water and by Fluids With Yield Stresses. *Particulate Science and Technology: An International Journal* **16** (2): 163-183. doi: [10.1080/02726359808906793](https://doi.org/10.1080/02726359808906793)

Kaminsky, R. D. 1998. Predicting Single-Phase and Two-Phase Non-Newtonian Flow Behavior in Pipes. *Journal of Energy Resources Technology* **120** (1-2): 1-6. doi: [10.1115/1.2795006](https://doi.org/10.1115/1.2795006)

Kryłów, M. y Fryźlewicz-Kozak, B. 2005. Rheological Properties of Wastewater Sludge. Rheological Properties of Wastewater Sludge. *Proc.*, Polish-Swedish Seminars, Cracow, March 17-18, Report no. 13 <http://www2.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/index.htm>. [Fecha de acceso 1 de marzo de 2011].

La corrosión de un oleoducto suspende el 8% de la producción de los EE.UU. *Crisis Energética, respuesta a los retos energéticos del SXXI* (lunes 8 de agosto de 2006) <http://www.crisisenergetica.org/article.php?story=20060807094828630>. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].

NRF-005-PEMEX-2000, Protección Interior de Ductos con Inhibidores. 2000. México, D.F.: PEMEX, Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.

Potter, M.C. y Wiggert, D. C. 2002. *Mecánica de Fluidos*, tercera edición. México, D.F.: International Thomson.

Rojas Figueroa, R.A. 2001. Análisis del Transporte de Inhibidores de Corrosión en Ductos que Transportan Mezclas de Crudo y Agua. Tesis de Maestría, UNAM, Facultad de Ingeniería, México, D.F.

Ruiz-Viera, M.J., Delgado, M.A., Franco, J.M., Sánchez, M.C. y Gallegos C. 2006. On the Drag Reduction for the Two-Phase Horizontal Pipe Flow of Highly Viscous Non-Newtonian Liquid/Air Mixtures: Case of Lubricating Grease. *International Journal of Multiphase Flow* **32** (2): 232-247. doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.09.003).

Rumiche P., F.A. e Indacochea B., J.E. Estudios de Caso de Fallas y Accidentes en Gasoductos y Oleoductos, <http://claridadpuertorico.com/documents/articles/01%20Gasoductos%20y%20oleoductos-%20estudio%20fallas.pdf>. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].

Russel, T. W.F., Hodgson, G.W. y Govier, G.W. 1959. Horizontal Pipelines Flow of Mixture of Oil and Water. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* **37** (1): 9–17. doi: [10.1002/cjce.5450370104](https://doi.org/10.1002/cjce.5450370104)

Sánchez M., A., Son de Dios, C., Benítez A., J.L., Martínez O., C. y Guzmán P., G. 2001. Desarrollo de un Inhibidor para el Control de la Velocidad de Corrosión Interior en la Red de Oleoductos de PEMEX Refinación, *Congreso Internacional de Ductos*, Mérida Yucatán, 14-16 de noviembre, www.pipetegrity.com/especialistas/item/download/62.html. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].

Shames, I.H. 1995. *Mecánica de Fluidos*. Santa Fe de Bogotá: McGraw Hill.

Smith, R.A. 1955. Experiments on the Flow of Sand-Water Slurries in Horizontal Pipes. *Transaction of the Institution of Chemical Engineers* **33**: 85-92.

Taitel, Y. y Dukler, A.E. 1976 . A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE Journal* **22** (1): 47-55. doi: [10.1002/aic.690220105](https://doi.org/10.1002/aic.690220105).

Thompson, N.G. *Gas and Liquid Transmission Pipelines*. Appendix E, <http://www.corrosioncost.com/pdf/gasliquid.pdf>. [Fecha de acceso 25 de enero de 2011].

Xu, X.-X. 2007. Study on Oil–Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **59** (1-2): 43-58. doi: [10.1016/j.petrol.2007.03.002](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2007.03.002).

Xu, J.-Y., Wu, Y.-X. y Li, D.-H. 2006. Effects of Liquid Phase Properties on Pressure Drop during Horizontal Gas-Liquid Intermittent Flow. *Chinese Journal of Process Engineering* **6** (2):161-166.

Xu, J.-Y., Wu, Y.-X., Li, D.-H. y Dong, H.-L. 2007. Effects of Non-Newtonian Liquid Properties on Pressure Drop During Horizontal Gas-Liquid Flow. *Journal of Central South University of Technology* **14** (Suppl. 1): 112-115. doi: [10.1007/s11771-007-0225-7](https://doi.org/10.1007/s11771-007-0225-7)

Xu, J.-Y., Wu, Y.-X., Li, H., Guo, J. y Chang, Y. 2009. Study of Drag Reduction by Gas Injection for Power-Law Fluid Flow in Horizontal Stratified and Slug Flow Regimes. *Chemical Engineering Journal* **147** (2-3): 235-244. doi: [10.1016/j.cej.2008.07.006](https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.006)

Xu, J.-Y., Wu, Y.-X., Shi, Z.-H., Lao, L.-Y. y Li, D.-H. 2007. Studies on Two-Phase Co-Current Air/Non-Newtonian Shear-Thinning Fluid Flows in Inclined Smooth Pipes. *International Journal of Multiphase Flow* **33** (9): 948-969. doi: [1016/j.ijmultiphaseflow.2007.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.03.008)