

**REVISION Y ADECUACION DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS PARA LA
VALIDACION DEL FENÓMENO ELECTROKINÉTICO CAUSANTE DE LA
PRECIPITACIÓN DE ASFALTENOS EN SISTEMAS DINÁMICOS**

JULIA JINETH HERRERA QUINTERO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA
2009**

**REVISION Y ADECUACION DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS PARA LA
VALIDACION DEL FENÓMENO ELECTROKINÉTICO CAUSANTE DE LA
PRECIPITACIÓN DE ASFALTENOS EN SISTEMAS DINÁMICOS**

JULIA JINETH HERRERA QUINTERO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Químico**

EMILIANO ARIZA LEON

**Magíster en Hidrocarburos; Profesor Cátedra Asociado, Escuela de Ingeniería de
Petróleos Director por parte de la UIS**

ZARITH DEL PILAR PACHON

Magíster en Química Director por parte del ICP

JORGE ALBERTO ROJAS PLATA

Ingeniero de Petróleos Co-director por parte del ICP

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2009

Gracias a Dios por darme la sabiduría para alcanzar esta meta. A mis padres y hermanos gracias por el esfuerzo, el apoyo y la compañía brindada para que este sueño se hiciera realidad.

A Julián, simplemente gracias por recorrer junto a mí este camino, gracias por su comprensión, paciencia y cariño, gracias por ser la persona que ilumina mi vida con todo su amor.

A mis amigos y a todas las personas que creyeron en mí, gracias por el apoyo y la colaboración brindada, gracias por compartir hoy este triunfo junto a mí.

Julia Jineth Herrera Quintero

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue posible gracias al apoyo económico del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP-ECOPETROL).

A la Universidad Industrial de Santander por su formación integral, ética y profesional.

Al Laboratorio de Daños a la Formación del Instituto Colombiano del Petróleo y a todo su personal.

A la Magíster Zarith del Pilar Pachón por su dirección y orientación durante el desarrollo de esta investigación.

Al Magíster Emiliano Ariza León por su orientación y colaboración en el desarrollo de cada etapa de esta investigación.

Al Ingeniero Jorge Alberto Rojas Plata por su colaboración y apoyo en el Laboratorio de Daños a la Formación.

Al Físico Jaime Rodríguez por su orientación y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

Al Magíster Wilson Cañas Marín por los aportes y conocimiento brindados para que esta investigación se llevara a cabo.

A todas aquellas personas que me brindaron su apoyo y confianza para llevar a cabo este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. FUNDAMENTOS TEORICOS.....	4
1.1 DEFINICIÓN, ESTRUCTURA MOLECULAR Y PROPIEDADES DE LOS ASFALTENOS	4
1.2 COMPORTAMIENTO DE FASES DE LOS ASFALTENOS	5
1.2.1 Presión.....	5
1.2.2 Temperatura	6
1.2.3 Composición	6
1.2.4 Fenómeno electrocinético.....	7
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	9
2.1 REVISIÓN, VERIFICACIÓN Y ADECUACIÓN DE CADA UNA DE LAS SECCIONES DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS	9
2.2 METODOLOGIA PROPUESTA PARA CARACTERIZAR Y SELECCIONAR MUESTRAS REPRESENTATIVAS A EVALUAR EN EL LOOP DE ASFALTENOS	13
2.3 METODOLOGIA DE PRUEBA PROPUESTA PARA LA VALIDACIÓN DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS	17
3. EVALUACION DE RESULTADOS.....	19
3.1 PRUEBAS DE ELECTRODEPOSITACIÓN	19
3.2 PRUEBA DE REVERSIBILIDAD.....	23
3.3 DETERMINACIÓN DEL ONSET DE FLOCULACIÓN A CONDICIONES ESTÁTICAS Y DE YACIMIENTO.	24
3.4 VALIDACIÓN DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS.....	25
CONCLUSIONES	32
RECOMENDACIONES	34
BIBLIOGRAFIA.....	35
ANEXOS.....	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fenómenos Electrocinéticos. (20).	8
Figura 2. Diagrama de Bloques diseño experimental	9
Figura 3. Diagrama de bloques de la metodología de prueba propuesta para la validación del Equipo Loop de Asfaltenos	18
Figura 4. Depósito encontrado en el cátodo del crudo Santa Clara Suria 8	21
Figura 5. Depósito encontrado en el ánodo crudo Colorado 38.....	22
Figura 6. Infrarrojo del depósito encontrado en el cátodo del crudo Santa Clara Sur 8.....	22
Figura 7. Infrarrojo del depósito encontrado en el ánodo del crudo Colorado 38 ..	22
Figura 8. Onset de Precipitación de Asfáltenos del crudo Cantagallo-24 a condiciones estáticas.....	25
Figura 9. Comportamiento de presiones en el Loop de Asfaltenos con crudo muerto cantagallo-24	28
Figura 10 Medidores de diferencial de presión del equipo.....	29
Figura 11. Diferenciales de presión de la sección de detección	30

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Contenido de Asfáltenos y °API de las muestras seleccionadas	19
Tabla 2. Resultado de pruebas de electrodeposición de crudos colombianos ...	20
Tabla 3. Caracterización de los asfáltenos del crudos Cantagallo-24.....	23
Tabla 4. Resultados de la prueba de Reversibilidad.....	24
Tabla 5. Establecimiento de las condiciones de prueba a ejecutar en la validación del equipo Loop	26

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A.....	38
TEORIA DE LA DOBLE CAPA ELECTRICA INTERFACIAL	38
ANEXO B.....	42
POTENCIAL DE FLUJO	42
ANEXO C.....	46
DESCRIPCION DE LAS SECCIONES Y COMPONENTES DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS	46
ANEXO D.....	55
DIFERENCIALES DE PRESION EN MEMBRANAS A DIFERENTES CAUDALES	55
ANEXO E.....	56
CALIBRACION BOMBA ELDEX BBB4-VS	56
ANEXO F	57
DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA PROPUESTA PARA LA VALIDACION DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS	57
ANEXO G	61
INFRARROJO ASFALTENO DE REFERENCIA DE FONDO DE VACIO	61
ANEXO H.....	62
PROPIEDADES FLUIDO CANTAGALLO-24.....	62
ANEXO I	65
RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24	65
Líder (e) Lab. PVT-OPC	65
Recombinación del fluido.....	77
ANEXO J	79
PRESIÓN DE BURBUJA DEL FLUIDO CANTAGALLO-24.....	79
ANEXO K.....	81

ESTADO MECANICO DEL POZO Y CALCULOS PARA ENCONTRAR EL
POTENCIAL DE FLUJO GENERADO POR ASFALTENOS DE CRUDO
CANTAGALLO-24.....81
ANEXO L84
DISEÑO DE LOS PISTONES LIBRES DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS..84

RESUMEN

TITULO: REVISION Y ADECUACION DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS PARA LA VALIDACION DEL FENÓMENO ELECTROKINÉTICO CAUSANTE DE LA PRECIPITACIÓN DE ASFALTENOS EN SISTEMAS DINÁMICOS.*

AUTORES: HERRERA QUINTERO, Julia Jineth**

PALABRAS CLAVES: Asfaltenos, Precipitación, Electrodeposición, Electrocinético

CONTENIDO

El objetivo de este trabajo consistió en la Revisión y Adecuación del Equipo Loop de Asfaltenos diseñado y construido⁽¹⁾ en el Instituto Colombiano del Petróleo, verificando el funcionamiento de las secciones del mismo con el fin de asegurar la corrida exitosa de muestras de crudo representativas para validar por medio de una metodología propuesta si el equipo reproduce adecuadamente la influencia de variables como la presión y el efecto que causa un campo eléctrico inducido en la precipitación de asfaltenos a condiciones dinámicas. En la etapa inicial del proyecto se realizó una evaluación al estado mecánico del equipo, observándose la ausencia de los electrodos de oro que formaban parte de la sección electrocinética; además de los pistones libres de la sección de llenado, circulación y bombeo del equipo los cuales estaban en mal estado. En una etapa paralela se desarrolló una metodología para la selección de las muestras a evaluar en el Loop de Asfaltenos y la validación del mismo. De este procedimiento experimental se seleccionó un crudo recombinado Cantagallo-24, utilizado para la validación del equipo mediante la metodología de prueba propuesta. Durante la evaluación experimental con la muestra recombinada se presentaron inconvenientes mecánicos en el equipo que causaron su pérdida. Debido a los costos que implicaba un nuevo muestreo en pozo y posterior recombinación no se pudo desarrollar esta metodología para verificar el efecto electrocinético. Sin embargo cada sección del equipo fue puesta a prueba con una muestra de crudo cantagallo-24 muerto, con lo cual se verificó que el equipo queda condiciones adecuadas para en una siguiente fase ejecutar el procedimiento propuesto para determinar el onset de precipitación de asfaltenos a condiciones dinámicas y la influencia de un campo eléctrico inducido en este.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Director EMILIANO ARIZA. Magíster en Hidrocarburos.

ABSTRACT

TITLE: Revision and adaptation of the Asphaltenes Loop equipment for the validation of electrokinetic phenomenon caused the precipitation of asphaltenes in dynamical systems.*

AUTHOR:
HERRERA QUINTERO, Julia Jineth**

KEYWORDS: Asphaltenes, Precipitation, Electrodeposition, electrokinetic

The aim of this work was in the Revision and adaptation of the asphaltenes Loop equipment previously designed and constructed(1) in the Petroleum Colombian Institute, to check the operation of its sections in order to ensure the successful running of representative samples of a raw for validate through a proposed methodology if the equipment well reproduce the influence of variables such as pressure and the effect caused by one electric field induced in the asphaltenes precipitation in dynamic conditions. At the initial stage of the project, we evaluated the mechanical state of the equipment, we observed the absence of the gold electrodes that were part of the electrokinetics section; in addition, the free aluminum pistons of the filling section, circulation and pumping of the equipment, which were in poor condition. In a parallel phase, we developed a methodology for selecting the samples to assess using the asphaltenes Loop and for its validation too. From this experimental procedure we selected one sample of recombinant crude Cantagallo-24, used for the validation of the equipment through the testing methodology proposed. During the experimental evaluation with the recombined sample we observed some mechanical problems on the equipment that caused their loss. Due to the costs involved in sampling a new well and its subsequent recombination, we could not develop this methodology for verifying the electrokinetic effect. However, each section of the equipment was tested with a sample of crude Cantagallo-24 died, and we verified that the equipment is adequate for a next phase in implementing the proposed procedure for determining the onset of asphaltenes precipitation in dynamic conditions and the influence of one electric field induced in this.

* Draft Grade

** Physical Chemistry Faculty of Engineering. Director EMILIANO ARIZA. Masters in Hydrocarbons.

INTRODUCCION

La precipitación de los asfaltenos es un problema presente en muchos campos productores de hidrocarburos en Colombia y el mundo. Esta precipitación puede ocurrir dentro de la formación productora, pozos, tuberías y equipos de producción ocasionando múltiples dificultades como son: reducción de permeabilidad, formación de emulsiones de alta viscosidad, cambios en la mojabilidad y taponamiento de líneas y otras facilidades de producción ⁽²⁾. Estos inconvenientes generan un gran incremento en los costos de producción, debido a los tratamientos requeridos para prevenir la precipitación y remover los depósitos formados, lo cual afecta la economía de los proyectos.

Se ha determinado que la precipitación de asfaltenos se debe a cambios en variables termodinámicas como: Temperatura, Presión ⁽³⁾ y Composición las cuales alteran la estabilidad coloidal de los asfaltenos causando su posterior precipitación, igualmente se presenta el fenómeno electrocinético el cual está asociado al movimiento de los asfaltenos en el crudo y es propio de las suspensiones coloidales.

Un método para evaluar la tendencia de precipitación de asfaltenos, es la determinación de la envolvente de depositación de asfaltenos (EDA)⁽⁴⁾ a condiciones estáticas. No obstante la EDA solo proporciona información que permite estimar las condiciones de presión, temperatura y composición a las cuales se pueden esperar problemas por depositación de asfaltenos durante el proceso de producción de un pozo, sin tener en cuenta el efecto electrocinético.

El fenómeno electrocinético es conocido; sin embargo, pocos autores lo han estudiado a condiciones dinámicas, el primer intento fue realizado por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP)¹ en el año 2000 en el que se hizo el diseño y

construcción de un equipo denominado “LOOP DE ASFALTENOS” desarrollado con el propósito de simular el fenómeno, con base en la naturaleza eléctrica de los asfaltenos, y el modelo coloidal propuesto inicialmente por Leontaritis⁽⁵⁾ y continuado por otros autores⁽⁶⁻⁸⁾, donde la fase dispersa (en nuestro caso los asfaltenos) posee una carga eléctrica positiva⁽⁹⁻¹³⁾ y cumplen las propiedades básicas de las partículas coloidales como son la movilidad inducida por un campo eléctrico, es decir, la electroforésis^(11,13) y la electrodeposición^(10,12,14,15). Entre los años 2001 y 2003 se realizaron pruebas con muestras de crudo recombinado y de fondo para determinar la validez del equipo pero los resultados obtenidos no fueron registrados, lo cual genera una incertidumbre sobre el funcionamiento del mismo. Desde el año 2004 no hubo operación alguna en el LOOP DE ASFALTENOS; sólo hasta el año 2007 cuando se adecua el equipo para pruebas de desplazamiento, con las cuales se evalúa la interacción roca-fluido (COREFLOODING).

Un equipo similar al Loop de Asfaltenos fue diseñado y construido por la Compañía Schlumberger en el año 2007, llamado RealView⁽¹⁶⁾, el cual evalúa la depositación de asfaltenos ocasionada por cambios en variables como la presión, temperatura, composición, tipo de superficie y el régimen de flujo, en fluidos vivos a condiciones de campo, pero no evalúa el efecto electrocinético.

El propósito principal de este trabajo consistió en revisar, adecuar y verificar el funcionamiento de los componentes y secciones del Loop de Asfaltenos; paralelamente se ejecutó una metodología propuesta para seleccionar muestras de crudo vivo adecuadas, que serán evaluadas en el Loop, y finalmente se propone una metodología de prueba para validar el equipo, que pretende satisfacer la necesidad tecnológica de determinar a condiciones dinámicas la presión umbral de precipitación de asfaltenos y la influencia que tiene un potencial de flujo inducido en ésta, lo cual sería útil para prevenir o solucionar problemas operacionales en producción y transporte, ya que sí se conocen las condiciones

dinámicas a las cuales ocurre la floculación de asfaltenos se podrá hacer ajustes en las condiciones de operación ó se evaluará la aplicación de inhibidores orgánicos.

A continuación se expondrán los fundamentos teóricos básicos para el desarrollo de este trabajo.

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 DEFINICIÓN, ESTRUCTURA MOLECULAR Y PROPIEDADES DE LOS ASFALTENOS

A pesar de la diversidad de criterios que se adoptan al definir los asfaltenos, se ha llegado a un consenso al catalogarlos como la fracción de crudo soluble en tolueno (ó benceno) e insoluble en un exceso de n-parafinas (pentano o heptano). Desde el punto de vista químico, los asfaltenos son un ensamble de moléculas muy complejas, con estructuras y propiedades que dependen del tipo de petróleo y del procedimiento para separarlos, por lo tanto es imposible definir una estructura molecular exacta de ellos. De acuerdo con las evidencias experimentales, estarían formados por sistemas asociados de capas poliaromáticas con cadenas laterales de tipo alquílico. Presentarían adicionalmente heteroátomos como O, N, S, metales como Ni, V, Fe y grupos polares y no polares⁽¹⁶⁾.

Se han propuesto diferentes tipos de estructuras que representan las moléculas de asfaltenos, entre los más reconocidos están el tipo continental en donde los asfaltenos son representados como una región central de aromáticos con algunos heteroátomos y grupos alquilo en sus bordes y el tipo archipiélago, donde los asfaltenos son representados por pequeñas regiones aromáticas conectadas por puentes de grupos alquilo⁽¹⁷⁾.

Una propiedad importante de los asfaltenos es el peso molecular el cual no está dado por un solo valor y es difícil de determinar por la asociación entre las moléculas individuales de los asfaltenos. Experimentalmente el valor del peso molecular se puede determinar por medio de varias técnica como son:

Espectrometría de masas, Osmometría de Fase Vapor (VPO), y técnicas de dispersión como son la dispersión de neutrones ⁽¹⁸⁾.

1.2 COMPORTAMIENTO DE FASES DE LOS ASFALTENOS

El comportamiento de fase de los asfaltenos puede ser descrito a partir de dos teorías básicas: la Teoría Termodinámica Molecular, que asume que los asfaltenos se comportan como moléculas de polímeros y cumplen con las leyes del calor de mezclas y la Teoría Termodinámica Coloidal que plantea que los asfaltenos están suspendidos en el crudo debido a la adsorción de resinas y que se encuentran cargados positiva o negativamente.

A la fecha no se ha comprobado ni llegado a definir cuál de estas dos teorías es la cierta, muchos autores proponen modelos físicos basados en la teoría termodinámica molecular propuesta por Hirscheberg⁽¹⁸⁾ y otros se fundamentan en la teoría coloidal propuesta por Leontaritis ⁽⁶⁾ para realizar sus modelos físicos; es importante saber que el diseño y construcción del equipo Loop de Asfaltenos se cimentó en la teoría coloidal para evaluar el fenómeno electrocinético. De acuerdo con estas dos teorías que modelan el comportamiento de fase de los asfaltenos se ha llegado a comprobar la existencia de variables termodinámicas que ejercen un efecto directo y provocan la desestabilización de éstos en el crudo, entre ellas están la presión, la temperatura, la composición y el fenómeno electrocinético.

1.2.1 Presión. La presión es una de las variables que más afecta la precipitación de asfaltenos; estudios realizados muestran que al reducir la presión de petróleos subsaturados durante la producción del pozo se disminuye la densidad del fluido y con ella la disminución de la solubilidad de los asfaltenos (disminución interacción resinas-asfaltenos) lo que causa la precipitación, en donde la mayor cantidad de asfalteno precipitado se presenta cuando se alcanza un punto cercano a la presión de burbuja. Conforme la presión continúa reduciéndose por debajo de la presión

de burbuja, el gas en solución es removido del petróleo, debido a que los hidrocarburos volátiles se evaporan desde el líquido causando un incremento en la densidad del petróleo lo que conduce a la redisolución o solubilidad de los asfaltenos precipitados en el crudo.

1.2.2 Temperatura. Es importante saber que el efecto de la temperatura sobre la precipitación de asfaltenos no se puede generalizar, pero muchos estudios demuestran que a medida que se aumenta la temperatura del sistema crudo-asfalteno, disminuye la solubilidad de los asfaltenos en el petróleo ⁽³⁾, ya que ocurre una disminución de la concentración de resinas, hasta tal punto que el agente peptizante puede no ser suficiente para cubrir la superficie total del asfalteno, permitiendo que estos interactúen y formen flóculos que van creciendo en tamaño hasta precipitar.

1.2.3 Composición. La precipitación de asfaltenos puede ocurrir durante la inyección de químicos orgánicos incompatibles, inyección de CO₂, inyección de gases ricos usados en levantamiento artificial, tratamientos de estimulación con ácidos, solventes, surfactantes y álcalis, los cuales afectan la composición del crudo debido a la adición de compuestos con moléculas que difieren fuertemente de las resinas y de los asfaltenos en términos de tamaño y estructura y por consiguiente en el parámetro de solubilidad, cambiando el equilibrio que existe en las partes no polares del petróleo causando que las resinas se desorban de la superficie de los asfaltenos; con el objetivo de re-establecer el equilibrio termodinámico que existía en el crudo, la desorción de las resinas peptizantes causa que los asfaltenos se aglomeren formando micelas que posteriormente precipitaran para reducir la energía libre superficial.

Otra variable que desestabiliza los asfaltenos en el crudo es el efecto electrocinético; para un mejor entendimiento de este fenómeno, se presentan

algunos conceptos teóricos en el anexo 1, los cuales están basados en la Teoría Termodinámica Coloidal.

1.2.4 Fenómeno electrocinético. El fenómeno electrocinético es la descripción general que se da al estudio del fenómeno resultante cuando un campo eléctrico interactúa con una carga superficial (asfalteno) inmersa en una solución de electrolitos “petróleo”. Hay cuatro fenómenos relacionados que describen el movimiento relativo de las partículas cargadas (asfaltenos) en un medio líquido (crudo) y la diferencia de potencial que se asocia, las cuales se pueden agrupar así:

Si se aplica un campo eléctrico externo (E aplicado) tangencialmente a la superficie cargada, se ejerce una fuerza (F) sobre la superficie cargada y el material que esté adsorbido (capa de Stern), obligándolos a moverse (Velocidad Inducida, V_{IND}) en la dirección apropiada, mientras que los iones de la parte móvil de la doble capa (capa difusa) muestran una migración neta en la dirección opuesta, llevando solvente con ellos, causando su flujo. En este caso se presentan dos fenómenos:

Electroforesis: describe el movimiento de una superficie cargada más el material adsorbido a través de un líquido estacionario (figura 1a).

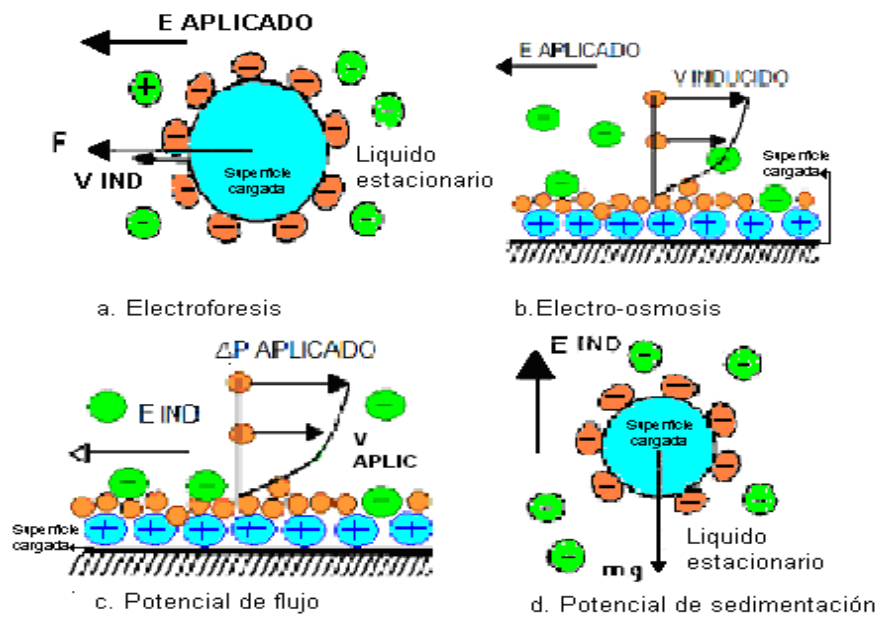
Electro-osmosis: describe el movimiento de líquido relativo a una superficie cargada estacionaria (figura 1b).

El segundo caso es cuando se genera un campo eléctrico (E inducido) debido a que se obliga a que la superficie cargada y la capa difusa se muevan (Velocidad Aplicada) una con relación a la otra, se presentan dos fenómenos:

Potencial de flujo: se crea un campo eléctrico (E inducido) debido a que el líquido se mueve con respecto de una superficie cargada estacionaria (figura 1c)

Potencial de Sedimentación: se genera un campo eléctrico (E inducido) cuando la superficie cargada se mueve con relación a un líquido estacionario (figura 1d)

Figura 1. Fenómenos Electrocinéticos. (20).

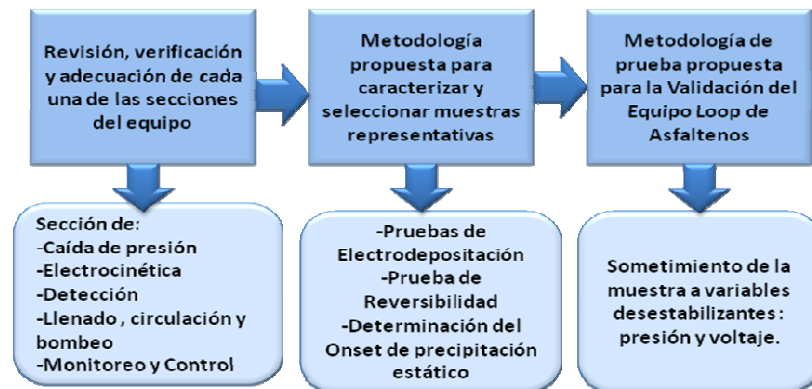


Dentro del fenómeno electrocinético está contemplado el fenómeno conocido como potencial de flujo mencionado anteriormente, que por ser importante en este trabajo se describe en el anexo 2.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El desarrollo del proyecto se inició como se observa en la figura 2 con la revisión, verificación, y adecuación de cada uno de los componentes y secciones del Loop de asfaltenos. De acuerdo con la necesidad tecnológica que el equipo debería satisfacer, se realizó una metodología experimental orientada a caracterizar y seleccionar muestras representativas para evaluarlas en el Loop de Asfaltenos. Adicionalmente se planteó una metodología de prueba para la validación del Equipo LOOP DE ASFALTENOS que permitiera determinar la presión onset de precipitación de asfaltenos y la influencia de un campo eléctrico inducido en este onset de precipitación.

Figura 2. Diagrama de Bloques diseño experimental



2.1 REVISIÓN, VERIFICACIÓN Y ADECUACIÓN DE CADA UNA DE LAS SECCIONES DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS

El equipo Loop de Asfaltenos es un circuito formado por cinco secciones principales: Sección de caída de presión, sección electrocinética, sección de detección, sistema de bombeo, llenado y circulación y la sección de monitoreo y control. En el Anexo 3 se describe cada una de las secciones mencionadas. En la revisión y verificación de las mismas hubo la necesidad de adecuar y cambiar

algunos componentes que se encontraban en mal estado los cuales se presentan a continuación:

1. Sección de Caída de Presión: El objetivo principal de esta sección es permitir la simulación de diferentes caídas de presión, de manera similar a lo que ocurre con el crudo durante su recorrido en un tramo de tubería en el pozo. Esta sección está formada por un tramo de línea de $\frac{1}{4}$ " de diámetro y 40 cm de longitud en el cual se encuentran ubicadas 3 válvulas manuales de aguja con vástago proporcional no rotante que resisten una presión de 11500 psi, a las cuales fue necesario cambiar los empaques de los vástagos para garantizar un perfecto sello, verificando que soportaran una presión igual a 11500 psi; la caída de presión originada por estas válvulas es monitoreada por medio de dos transductores de presión diferencial, de rango 0-360 psi y 0-3600 psi, estos transductores fueron calibrados para obtener datos precisos durante la prueba.

2. Sección Electrocinética: Esta sección permite el modelamiento del efecto electrocinético que se presenta a condiciones de producción debido al flujo de partículas cargadas (asfaltenos) a través de tuberías de producción, lo cual genera un potencial eléctrico capaz de causar la precipitación de los asfaltenos obstruyendo el flujo normal. Este circuito no escala la variable geométrica, ya que no es posible implementar la longitud de tubería necesaria para simular el fenómeno electrocinético (potencial de flujo), razón por la cual se hace necesaria la aplicación de un potencial externo para simular el generado en campo, mediante la implementación de dos electrodos de oro (ya que este metal evita la polarización de cargas en la superficie del electrodo) rebajados con plata para proporcionarle una mayor resistencia al electrodo debido a la ductilidad del metal puro, estos electrodos tienen forma de fósforo, con un diámetro de 2.5 mm en la cabeza y una longitud del vástago igual a 45 mm y 2 mm de diámetro, ubicados dentro de un cuerpo de válvula de aguja marca Hoke maquinada, sellada y aislada eléctricamente. Se observó la ausencia de estos electrodos en el equipo por lo

que fue necesaria su fabricación conservando el diseño descrito anteriormente. El potencial es suministrado a los electrodos por una fuente de voltaje variable de 0-600 voltios d.c. que dispone una potencia máxima de 1020 w; igualmente fue necesario comprobar el buen funcionamiento de la fuente con la revisión eléctrica de la misma.

3. Sección de detección: Esta sección sirve como mecanismo de detección de la precipitación de asfaltenos producida durante el recorrido del crudo a través de todo el circuito y consiste en tres filtros en paralelo con membranas de 0,45 μm hechas en Mixed Cellulose Esters; se realizó una consulta al proveedor⁽²¹⁾ sobre la caída máxima de presión que soportan estas membranas siendo 1000 psi. Para verificar los datos suministrados por el proveedor se evaluaron las membranas por medio de una correlación hallada experimentalmente en el Laboratorio la cual utiliza la viscosidad y la densidad del crudo y propiedades de la membrana como diámetro, la permeabilidad, área efectiva y espesor para calcular la tasa de flujo a circular por las membranas y la caída de presión generada. En anexo 4 se muestran los resultados obtenidos, los cuales muestran que los diferenciales de presión generados no se aumentan en gran proporción con los caudales. Sin embargo se considera que el máximo caudal a circular por los filtros sea 5 cm^3/min para evitar el rompimiento de la membrana por caídas de presión superiores a 1000 psi, así se garantiza el buen estado de estos filtros y se evita detener la prueba por fallas de las membranas. Adicionalmente esta sección posee dos medidores de diferencial de presión 0-360 psi y de 0-3600 psi los cuales se calibraron para garantizar medidas precisas.

4. Sistema de Bombeo y Circulación: Esta sección tiene como objetivo permitir el llenado y continua circulación de la muestra en el sistema, a las condiciones de presión y tasa de flujo deseadas, para esto consta de una bomba marca Eldex BBB4-VD que maneja caudales de 0-100 cm^3/min y permite el manejo de presiones dentro del rango de 0-5000 psi; fue necesaria la calibración de esta

bomba debido a la imprecisión de caudales que estaba manejando (Anexo 5); esta bomba maneja presiones que son insuficientes para las condiciones de operación requeridas, limitando el rango de operación del equipo con muestras que poseen presiones de yacimiento superior a 5000 psi. Esta sección posee dos cilindros de pistones libres fabricados en acero inoxidable de 25 cm de longitud efectiva y 500 cm³ de capacidad, dotados de un indicador de final de carrera y un sensor de proximidad que permiten monitorear la posición del pistón dentro del cilindro. Debido al mal estado de los pistones libres fue necesario su fabricación en aluminio con sus respectivos finales de carrera en acero inoxidable, provistos de un empaque de Vitón. Para realizar el desplazamiento de la muestra, el equipo está dotado de electroválvulas de tres vías las cuales poseen un sistema de apertura On-Off, una entrada y dos salidas, operadas neumáticamente con una presión de aire entre 85 y 115 psi que es suministrada por válvulas solenoides accionadas eléctricamente; a estas electroválvulas se les revisó el sistema de apertura On- Off y su accionamiento desde el computador.

El equipo cuenta con un sistema de regulación de contrapresión (backpressure) que cumple la función de mantener constante la presión de trabajo, este sistema fue desmontado, limpiado y probado, encontrando fallas mecánicas en manejo de tasas de flujo superiores a 30 cm³/min por lo cual durante la prueba se recomienda el manejo de caudales inferiores a éste. Por otro lado el circuito cuenta con una válvula relief por donde se realiza el desfogue de nitrógeno y parte de la muestra en el procedimiento de llenado, esta válvula fue revisada y se adecuó para trabajar a la presión de la muestra a evaluar en el equipo.

Sección de Monitoreo y Control: El objetivo de esta sección es permitir el control de cada uno de los componentes del equipo mediante el computador, y a la vez monitorear y registrar cada una de las variables físicas que intervienen en el proceso de depositación. La sección de monitoreo y control se operó inicialmente con el software LabView 5.0 y el Hardware de National Instruments, el cual

posteriormente fue cambiado por el Software Opto 22 y El Hardware de Control y Adquisición de Datos, que está conformado por un Controlador que usa interfase de comunicación serial, y dos Unidades I/O las cuales están compuestas por su correspondiente tarjeta madre que consta de diversas posiciones con conectores especiales, o slots. Este sistema de control se verificó encontrándose necesario un cambio en la programación de los medidores de caída de presión de alta y de baja del equipo debido al mal funcionamiento de las electroválvulas que los protegen; además se encontraron algunas fallas en el software opto 22 como lo es el no envío de señales que ordenen el accionamiento de válvulas y del dispositivo de acción análoga de la bomba durante las pruebas realizadas.

Para finalizar la revisión y adecuación del equipo Loop se procedió al llenado de este con nitrógeno para comprobar la ausencia de puntos de fuga y de acumulación de gas; se llevó a cabo una limpieza del equipo para garantizar una composición constante en la muestra, evitando su combinación con otras sustancias y se verificó en conjunto el funcionamiento de todas las secciones del equipo utilizando como fluido desplazado, nitrógeno y fluido desplazante, agua; al igual se comprobó que el horno mantuviera constante la temperatura de trabajo; de esta manera se concluye esta etapa inicial dejando el equipo Loop de Asfaltenos en condiciones adecuadas para su validación en las siguientes etapas.

2.2 METODOLOGIA PROPUESTA PARA CARACTERIZAR Y SELECCIONAR MUESTRAS REPRESENTATIVAS A EVALUAR EN EL LOOP DE ASFALTENOS

El planteamiento de la siguiente metodología de ensayo se fundamentó en los conceptos teóricos utilizados para el diseño del equipo, en referencias bibliográficas y en las recomendaciones de personas que han trabajado en esta área y tienen un amplio conocimiento y experiencia al respecto. La metodología

propuesta consta de 3 etapas que permitieron caracterizar y seleccionar muestras representativas a evaluar en el equipo Loop de Asfaltenos. En la ejecución de estas etapas fue necesario utilizar el método de Análisis Gravimétrico el cual determina el porcentaje másico de asfaltenos presentes en la muestra, por medio de la Norma ASTM D3279, esta norma se basa en la definición de los asfaltenos como la fracción insoluble en solvente n-heptano.

ETAPA 1. Pruebas de Electrodeposición

El objetivo de esta etapa es seleccionar muestras de crudos que presenten problemas de precipitación de asfaltenos en pozo, a las cuales se les evalúa el comportamiento de los asfaltenos al estar sometidos a la acción de un campo eléctrico, con el fin de obtener el signo de la carga que poseen los asfaltenos, el tiempo y el voltaje mínimo que induce la precipitación de los mismos. Estos valores pueden servir de base para fijar las condiciones de evaluación en el Loop de Asfaltenos. Las pruebas de electrodeposición se realizaron a diferentes crudos muertos colombianos a los cuales previamente se les midió el porcentaje de asfaltenos mediante análisis gravimétrico; la metodología planteada para esta etapa se basó en el procedimiento establecido por Lichaa⁽¹⁰⁾ hace algunos años con algunas modificaciones; este procedimiento se describe a continuación:

En una celda de 250 ml se colocaron 200 mL de crudo muerto a evaluar. Se lavaron con etanol dos placas de acero inoxidable, y se introdujeron a la estufa a temperatura de 50°C por 15 minutos, suficientes para eliminar cualquier remante de solvente empleado. Por otro lado con ayuda de tapones de teflón se mantuvieron rígidas y paralelas las placas de acero inoxidable separadas a una distancia aproximada de 2mm. Las placas conectadas a una fuente de voltaje actúan como ánodo y cátodo. En la celda de electrodeposición se colocaron las placas paralelas verificando que quedaran cubiertas con crudo, después se aplicaron voltajes entre 120 y 600 voltios d.c y una corriente de 1mA constante durante un periodo de 24 a 200 horas, la prueba se realizó a presión atmosférica.

Luego de finalizado el tiempo de prueba, los electrodos o placas fueron removidos, inspeccionados y puestos en un vaso de precipitado durante 24 horas para que el exceso de crudo fuera decantado, al final se observa el electrodo en el cual ocurrió la deposición. Del material depositado en alguna de las placas se reportó el tipo de precipitado observado y se lavó con n-heptano y disolvió con tolueno, seguidamente se re-precipitaron con n-heptano y se pasaron por un filtro de 0.45µm, este filtro se colocó en la estufa durante media hora, a las partículas que quedaron en el filtro se les realizó un análisis infrarrojo, a través de un Espectrofotómetro (Equipo IR Prestige-21 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer), con el fin de identificar el tipo de depósito.

Las etapas siguientes, al igual que la prueba en el Loop se deben realizar con muestras de fondo de pozo (crudo con gas en solución), las cuales son representativas para evaluar el fenómeno de precipitación de asfaltenos, ya que en este tipo de muestra los asfaltenos inestables aún están presentes. Sin embargo debido al costo de este tipo de muestras, se recurrió al uso de muestras de crudo recombinadas, garantizando inicialmente el estado coloidal de los asfaltenos presentes.

ETAPA 2. Prueba de Reversibilidad

Las muestras seleccionadas en la Etapa 1, pasan a una segunda etapa denominada “prueba de reversibilidad”, la cual tiene como objetivo determinar la precipitación de los asfaltenos a medida que la presión disminuye y si los asfaltenos precipitados pueden regresar a su estado coloidal después de estar sometidos a un proceso de expansión (reversibilidad). Si la muestra presenta problemas de precipitación de asfaltenos por cambios en la presión podrá ser evaluada en la Etapa 3 y por consiguiente en el Loop de Asfáltenos, de lo contrario se debe seleccionar una nueva muestra. A continuación se expone el procedimiento utilizado en la prueba de reversibilidad:

Inicialmente se caracterizó la muestra recombinada seleccionada en la etapa 1, para esto se tomaron dos muestras de 10mL del crudo recombinado. La toma de la muestra 2 se hizo a través de un filtro de 0.45 μ m para verificar que todos los asfaltenos de la muestra recombinada estuvieran en estado coloidal realizando una comparación entre el contenido de asfaltenos de la muestra 1 y la 2. Después se realizó la prueba de reversibilidad en el equipo Bulk Volume; en el cual un volumen de 60mL de la muestra recombinada fue transferido a la celda del equipo Bulk, la cual se encuentra a presión y temperatura de yacimiento. Esta celda permite la toma de muestras a través de un filtro de 0.45 μ m. A estas condiciones, se tomó una primera muestra de crudo y se midió el contenido de asfaltenos. Posteriormente, se realizó una expansión isotérmica y se tomó una segunda muestra a un valor de presión cercano a la presión de burbuja, P_b , donde la precipitación es más severa. Una disminución en el contenido de asfaltenos con respecto a la muestra 1, indica que los asfaltenos precipitaron a medida que la presión disminuye quedando retenidos en el filtro. Finalmente, se regresa a las condiciones de yacimiento mediante una compresión isotérmica y se toma una tercera muestra; la comparación entre las muestra 2 y 3, permite determinar la reversibilidad del fenómeno. La cuantificación de los asfaltenos en las muestras tomadas se realizó mediante análisis gravimétrico.

ETAPA 3. Determinación del onset de floculación en estado estático

El objetivo de esta prueba fue encontrar la presión Onset u Umbral de floculación de los asfaltenos presentes en la muestra mediante la detección de cambios microscópicos que ocurren en la distribución del tamaño de la micela de asfalto que se agregan formando floculos debido a la disminución de la presión. Con la determinación de la presión Onset se plantean las presiones a operar en el Equipo Loop, para esta determinación se utilizó el equipo Near Infrared y se realizó el siguiente procedimiento:

Un volumen de 60 mL de muestra recombinada del crudo seleccionado en la etapa 1 fue transferido desde el reservorio a una celda a presión y temperatura de

yacimiento; la celda fue agitada 4 horas para homogenizar el volumen de muestra transferido y se dejó en reposo durante 15 horas. El equipo cuenta con un sistema de emisión y detección de luz infrarroja, en el cual inicialmente se estableció un valor de referencia del 100% con la muestra de fluido a condiciones de yacimiento. A continuación se disminuyó la presión y una vez alcanzado el equilibrio termodinámico se midió el porcentaje de luz que pasa a través de la muestra. De esta manera, se sometió el fluido a una expansión a composición constante en varias etapas, y se midió en cada una de ellas el porcentaje de transmitancia.

2.3 METODOLOGIA DE PRUEBA PROPUESTA PARA LA VALIDACIÓN DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS

En esta sección se propone una metodología experimental con la cual se busca poner en marcha el equipo Loop de Asfaltenos. Como se mencionó anteriormente existen equipos que determinan la Envolvente de Precipitación de Asfaltenos a condiciones estáticas (Near Infrared), sin embargo se ha encontrado que el Onset de precipitación de asfaltenos reportado por esta técnica difiere del presentado en campo. El equipo Loop de asfaltenos fue construido para determinar la variación en la presión Onset a condiciones dinámicas. Para la evaluación de muestras en este equipo se planteó la siguiente metodología, la cual permitirá la determinación de la Presión Onset de precipitación de los asfaltenos a condiciones dinámicas y a presión y temperatura de yacimiento, debido a variaciones en la presión y a la influencia de un campo eléctrico aplicado. Para encontrar este Onset dinámico se propone seguir las etapas presentadas en la figura 3:

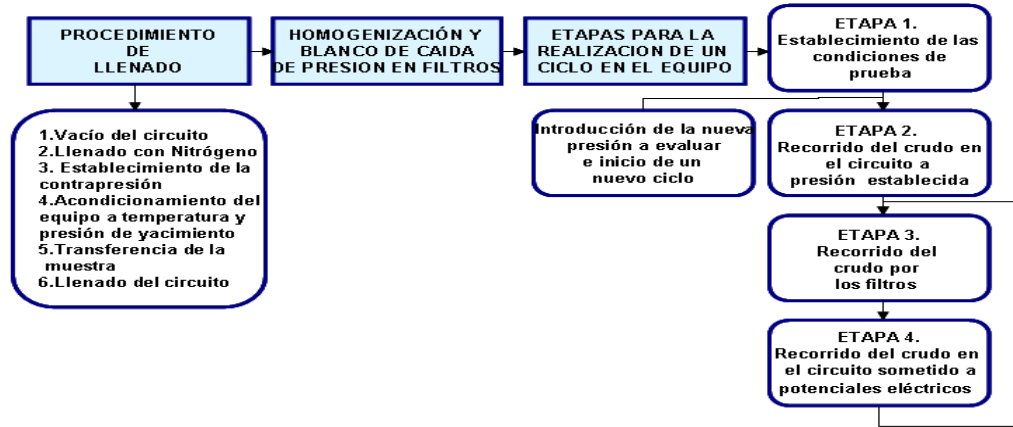


Figura 3. Diagrama de bloques de la metodología de prueba propuesta para la validación del Equipo Loop de Asfaltenos

La descripción de cada una de las etapas necesarias para realizar un ciclo en el equipo se presenta en el Anexo 6.

3. EVALUACION DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de la ejecución de las metodologías propuestas para validar el equipo Loop de Asfaltenos:

3.1 PRUEBAS DE ELECTRODEPOSITACIÓN

Para la selección de las muestras de crudo a evaluar se realizó una revisión de los pozos que han presentado precipitación de asfaltenos; de estos pozos encontrados y contando con la disponibilidad de estas muestras en el laboratorio se seleccionaron 6 crudos presentados en la tabla 1 como posibles candidatos a evaluar en las siguientes etapas. A estas muestras se les determinó el porcentaje de asfaltenos y su gravedad API. Con las pruebas de electrodeposición realizadas a estos crudos se observó que el crudo Santa Clara Sur 8 y Colorado-38 a condiciones de 120 voltios y un tiempo de 24 horas presentaron depósitos en el ánodo y el cátodo respectivamente (tabla 2).

MUESTRA	°API	% DE ASFALTENOS
Santa Clara suria 8	12.7	17.914
La Gloria	16.2	6.44
Yaragua	22.1	6.28
Colorado 38	38	0.58
Rio Chitamena E2	29.8	0.3
Cantagallo 24	20.5	5.8

Tabla 1. Contenido de Asfáltenos y °API de las muestras seleccionadas

En la figura 4 y 5 se observó que el precipitado obtenido era grumoso y de color café oscuro, estos depósitos fueron insolubles en n-heptano y solubles en tolueno y se les realizó un análisis infrarrojo. El espectro del depósito del crudo Santa Clara (figura 6) fue comparado con un espectro de asfáltenos tomado de fondo de vacío (ver anexo 7), encontrando que en los rangos de frecuencia de 740-690 cm^{-1} se presentan 2 bandas de tipo vibraciones de deformación del anillo aromático y el asfalteno de vacío presenta 3 bandas de este tipo en ese intervalo de frecuencia, por otro lado a rangos de frecuencia de 2958-2920 cm^{-1} se presentan bandas de tipo alargamiento asimétrico características de grupos alifáticos similares a los asfaltenos puros, por lo cual se cree que en la membrana hay presencia de asfaltenos solapada por algún remanente de solvente. Respecto al depósito encontrado en el ánodo del crudo Colorado 38, se determinó que eran residuos de óxido (figura 7) posiblemente por un proceso de deterioro en las placas debido a su uso.

CRUDO	VOLTAJE APLICADO (voltios)					ELECTRODO AL CUAL SE DEPOSITO
	120	150	380	500	600	
Santa Clara Sur 8	X	X	X	X	X	Cátodo(120 V-24h)
La Gloria	X	X	X	X	X	Ninguno
Yaragua	X				X	Ninguno
Colorado 38	X		X		X	Ánodo (120V-24h)
Rio Chitamena E2	X				X	Ninguno
Cantagallo-24	X	X	X	X	X	Ninguno

Tabla 2. Resultado de pruebas de electrodeposición de crudos colombianos

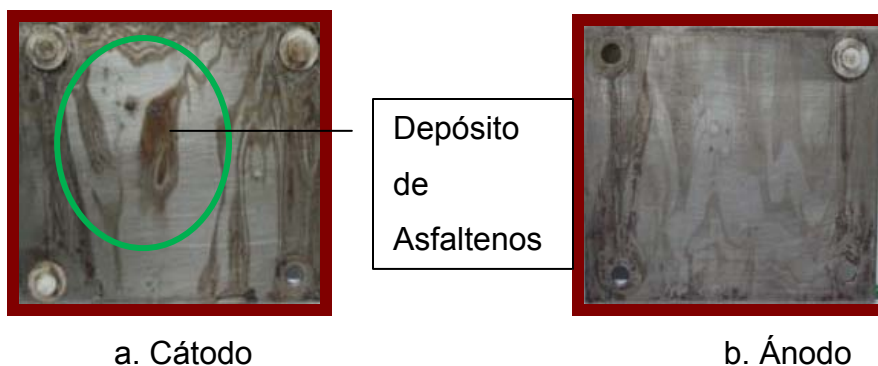


Figura 4. Depósito encontrado en el cátodo del crudo Santa Clara Suria 8

Al crudo Santa Clara se le realizaron más pruebas de electrodeposición variando el voltaje hasta 600 voltios durante un periodo máximo de 200 horas, en estas pruebas no se observó depósitos en ninguna de las placas, por tanto se cree que los grupos aromáticos y alquilos encontrados en el análisis infrarrojo eran residuos de tolueno y n-heptano, utilizados como solventes en el lavado de las placas.

Los resultados de las pruebas de electrodeposición deben interpretarse con cautela, teniendo en cuenta que el crudo utilizado en estas pruebas es crudo muerto, es decir un crudo tomado en cabeza de pozo que ya ha perdido sus volátiles y en el cual los asfaltenos inestables pueden haber precipitado quedando retenidos en la tubería de producción o en la formación por lo que sería de esperar que los asfaltenos remanentes en las muestras de crudo se consideraran estables y la influencia del campo eléctrico por sí solo no sea suficiente para desestabilizarlos

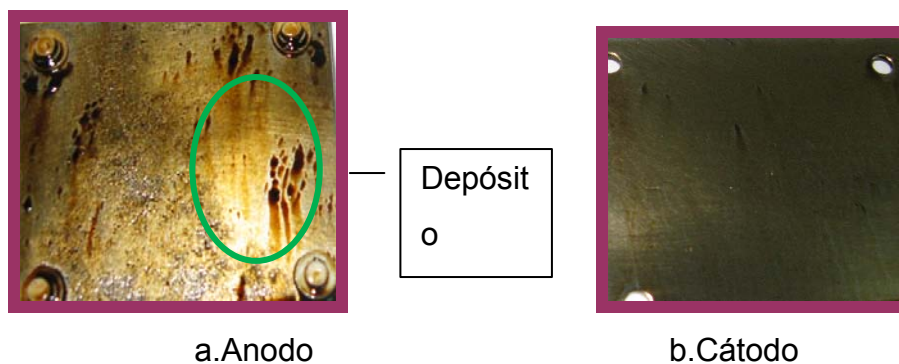


Figura 5. Depósito encontrado en el ánodo crudo Colorado 38

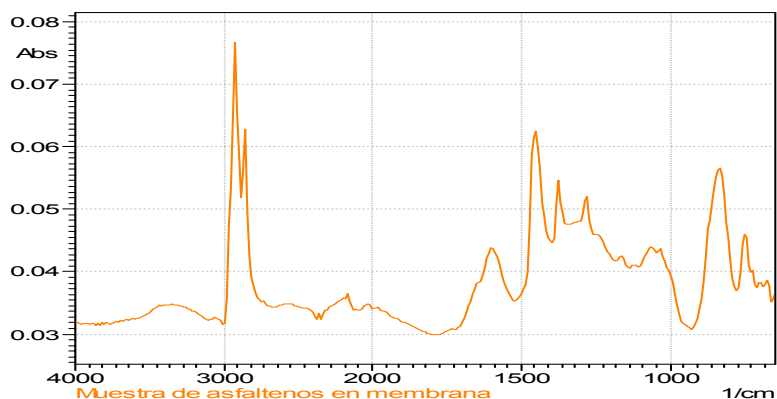


Figura 6. Infrarrojo del depósito encontrado en el cátodo del crudo Santa Clara Sur
8

Teniendo en cuenta la falta de contundencia de las pruebas de electrodeposición, para proseguir con la selección de la muestra a evaluar en las siguientes etapas se investigó cuáles de las muestras presentadas en la tabla 2 han mostrado problemas de precipitación y deposición de asfaltenos en tuberías de producción, en la formación, bombas, en líneas de flujo, en las instalaciones de superficies entre otros y que teniendo en cuenta los costos de muestreo serían factibles de obtener. Con estos criterios se eligió la muestra Cantagallo-24 para ser evaluada en las siguientes etapas.

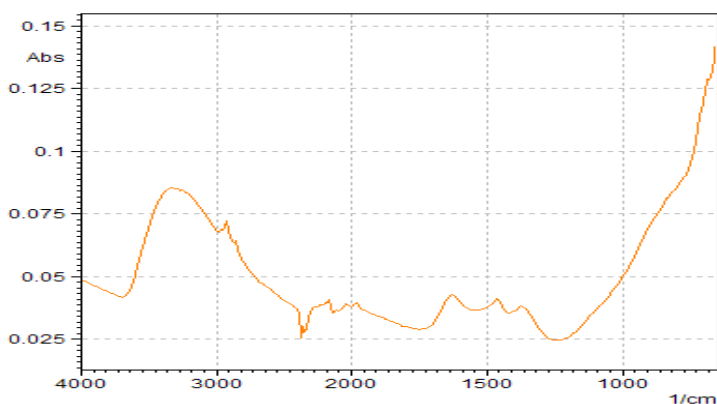


Figura 7. Infrarrojo del depósito encontrado en el ánodo del crudo Colorado 38

3.2 PRUEBA DE REVERSIBILIDAD

A partir de la selección del crudo del pozo Cantagallo-24, a la que se le caracterizaron algunas propiedades y de la que se conoce las condiciones del yacimiento (Anexo 8), para proseguir la evaluación se optó por el uso de una muestra re combinada ante la imposibilidad de obtener muestra de fondo (muestra tomada del fondo del pozo con muestreador especial que conserva las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentra el fluido). Con este fin se realizó un muestreo de gas y crudo de este pozo una vez los fluidos llegan al separador. Mediante un proceso de recombinación de las dos fases (Anexo 9) a condiciones de yacimiento (3500 psi y 138.5°F), se obtuvo una muestra que represente el fluido presente en el yacimiento.

En la tabla 3 se presenta los resultados obtenidos, los cuales indican que el contenido de asfaltenos en la muestra Cantagallo-24 es de 5.3% y que estos se encuentran en estado coloidal ya que al pasar la muestra por un filtro de 0.45µm no quedo retenido ningún precipitado lo cual se refleja en la no alteración de el porcentaje de asfaltenos. En estas condiciones la muestra es adecuada para desarrollar tanto la prueba de reversibilidad de asfaltenos como las etapas siguientes:

MUESTRA	PRESION (psi)	TEMPERATURA(°F)	FILTRO (0.45µm)
Sin filtro	3500	138.5	5.3
Con filtro	3500	138.5	5.3

Tabla 3. Caracterización de los asfáltenos del crudos Cantagallo-24

En la prueba de Reversibilidad realizada a la muestra Cantagallo-24, se determinó que al disminuir su presión desde la presión de yacimiento hasta una presión cercana a la presión de burbuja (ver anexo 10) floculan 1.2 % de asfaltenos, y al

llevar nuevamente la muestra hasta sus condiciones de yacimiento se obtuvo que el 33% de los asfáltenos precipitados regresan a su estado coloidal (tabla 4).

MUESTRA #	PRESION psi	TEMPERATURA °F	FILTRO 0.45µm
1	3500	138.5	5.4
2	1200	138.5	4.2
3	3500	138.5	4.5

Tabla 4. Resultados de la prueba de Reversibilidad

Con esta prueba se demostró que la muestra Cantagallo-24, aunque sea una muestra re combinada aún contiene asfáltenos inestables por cambios de presión por lo que es adecuada para continuar con la ejecución de la metodología propuesta.

3.3 DETERMINACIÓN DEL ONSET DE FLOCULACIÓN A CONDICIONES ESTÁTICAS Y DE YACIMIENTO.

En la figura 10 se observa que el Onset o Presión Umbral de precipitación de los asfáltenos del crudo Cantagallo-24 encontrada a condiciones estáticas y de yacimiento es de 2800 psi ya que por debajo de este valor de presión el porcentaje de transmitancia decae, indicando la presencia de flóculos de asfáltenos que obstruyen el paso de la luz. De manera coherente con la prueba de reversibilidad se confirma que pesar de ser una muestra re combinada presenta asfáltenos que se desestabilizan por cambios termodinámicos como lo es la presión.

Con los resultados obtenidos en ésta etapa se plantean las presiones a operar en el Equipo Loop de asfáltenos para evaluar la muestra Cantagallo-24, las cuales fueron establecidas en la metodología propuesta para la validación del mismo (ver anexo 6), los valores de estas presiones son: En el primer ciclo se inicia la prueba con una presión de 200 psi por encima de la presión onset estática encontrada en

el Near Infrared es decir 3000 psi, los ciclos siguientes se realizan disminuyendo en 50 psi la presión del ciclo anterior hasta llegar a evaluar la presión onset estática es decir 2950, 2900, 2850 y 2800 psi. Si no se presenta precipitación de asfaltenos a estas presiones se evalúan las siguientes presiones 2750, 2700, 2650, 2600, 1900, 1200 psi. La evaluación de estas presiones es suficiente para determinar la presión Onset en condiciones dinámicas y la influencia que tendría un potencial eléctrico en esta.

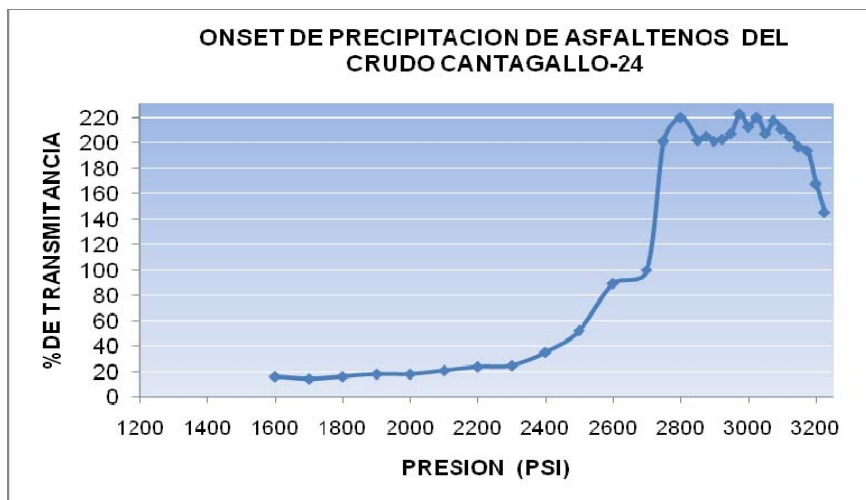


Figura 8. Onset de Precipitación de Asfaltenos del crudo Cantagallo-24 a condiciones estáticas

3.4 VALIDACIÓN DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS

Para llevar a cabo el desarrollo de la metodología propuesta se intentó evaluar dos muestras de Cantagallo-24 re combinadas con las cuales solo fue posible llegar hasta la segunda etapa de esta metodología debido a inconvenientes de tipo mecánico que se presentaron en el equipo en ambas ocasiones. A continuación se describe el desarrollo de la prueba con cada una de las muestras mencionadas.

Muestra Cantagallo-24 Recombinada 1

Se inicio la ejecución de la metodología con la etapa 1 donde se establecieron las condiciones de prueba; en esta etapa se determinó el voltaje intermedio aplicando las relaciones matemáticas presentadas en el anexo 2 y desarrolladas en el anexo

11, siendo el valor encontrado 160 voltios como campo eléctrico generado por el movimiento de los asfaltenos en la tubería de producción. El voltaje mínimo propuestos es de 120 voltios el cual es un voltaje menor al potencial de flujo hallado y es el voltaje mínimo reportado por Lichaa en pruebas de electrodeposición y el voltaje máximo propuesto para la prueba es el campo eléctrico máximo que proporciona la fuente, es decir 600 voltios. Las demás condiciones de prueba se presentan en la tabla 5.

ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE PRUEBA				
Condiciones estables durante la prueba		Condiciones variables durante la prueba		
Temperatura (°F)	138.5	PRESIÓN (psi)	Ciclo 1: 3000	Ciclo 6: 2750
Caudal de Prueba(cm ³ /min)	10		Ciclo 2: 2950	Ciclo 7: 2700
Caudal circular por filtros(cm ³ /min)	5		Ciclo 3: 2900	Ciclo 8: 2650
			Ciclo 4: 2850	Ciclo 9: 2600
			Ciclo 5: 2800	Ciclo 10:1900
			Ciclo 11:1200	
Tiempo del crudo sometido a las variables desestabilizantes (horas)	24	VOLTAJES (voltios)	Vmínimo=120	
Caída de presión máxima filtros (psi)	800		Vintermedio=160	
			Vmáximo=600	

Tabla 5. Establecimiento de las condiciones de prueba a ejecutar en la validación del equipo Loop

Posteriormente se realizó el procedimiento de llenado llevando el circuito a condiciones de yacimiento de 3500 psi y 138.5 °F y se homogenizó la muestra durante un periodo de 6 horas. Luego se intento realizar el blanco de caída de presión en los filtros el cual sería el valor de referencia de caída de presión para continuar con la Etapa 2 de la prueba, lo cual no se logró por un daño en una válvula manual debido a que el empaque del vástago no soportó las condiciones

de presión y temperatura aplicadas, lo cual ocasionó la despresurización de la muestra. Este daño llevó a la finalización anticipada del procedimiento de prueba impidiendo la ejecución de las etapas siguientes. Con la pérdida de esta muestra, fue necesario realizar una nueva recombinación de la muestra Cantagallo-24 con la cual se realizó nuevamente la ejecución de la prueba; una vez se hizo el cambio de todas las válvulas manuales que forman parte del circuito.

Muestra Cantagallo-24 Recombinada 2

Esta segunda muestra recombinada fue transferida y homogenizada en el equipo, al igual que con la muestra 1 el procedimiento de prueba propuesto no se logró ejecutar, debido a un inconveniente mecánico que presentaron los pistones de los cilindros del sistema de bombeo, llenado y circulación, lo cual ocasionó la contaminación de la muestra de crudo recombinado Cantagallo-24 con el fluido desplazante (agua) utilizado por la bomba, al igual que el fluido desplazante se contaminó con crudo Cantagallo-24, lo cual ocasionó el taponamiento del sistema de contrapresión. Este daño hizo que tanto la muestra como el equipo no estuvieran en condiciones adecuadas para continuar con el procedimiento, por lo cual se procedió a desmontar la muestra y realizar la limpieza correspondiente del equipo. Los pistones fueron revisados encontrándose que los o-ring de viton estaban rotos, por lo tanto se cambiaron los o-rings y se realizaron pruebas de desplazamiento a altas presiones lo cual ocasionó nuevamente el rompimiento de los mismos, por consiguiente se pudo observar que el diseño de los pistones fabricados no era el adecuado, por lo que se hizo necesario retomar los pistones del diseño original del equipo los cuales se acondicionaron para ser instalados.

Con estos inconvenientes presentados se hizo necesario un tercer intento con el objetivo de verificar en conjunto el funcionamiento de todas las secciones y dispositivos del equipo utilizando como muestra crudo muerto de Cantagallo-24 debido a la pérdida de las dos muestras recombinadas y a los altos costos necesarios para la consecución de otra muestra. A continuación se presentan los

resultados obtenidos al simular cambios de presión para verificar el funcionamiento de todas las secciones del equipo:

En la figura 9 se observa que la presión Inicial de operación fue de 3600 psi, presión a la cual se acondicionó la muestra en el equipo y la contrapresión. Cuando se inició el recorrido del crudo por el circuito a esta presión, se observó que la presión de la bomba y por consiguiente la presión de la muestra se aumentó hasta 5000 psi, lo cual se debió a un taponamiento en el sistema de contrapresión. Para aliviar este aumento de presión se procedió a disminuir la contrapresión hasta 2900 psi, notando que el sistema de contrapresión empieza a funcionar permitiendo que tanto la presión de la bomba como la de la muestra lleguen al valor establecido de presión. De igual forma se observa que al disminuir la presión del equipo hasta 2900 y 1200 psi, se presenta un aumento de 300 psi por encima de estos valores; este aumento en la presión del circuito se debe a que la válvula del cilindro de nitrógeno que presiona el sistema de contrapresión está permitiendo el paso de este gas, lo cual causa el aumento en la contrapresión y por consiguiente en todo el circuito.

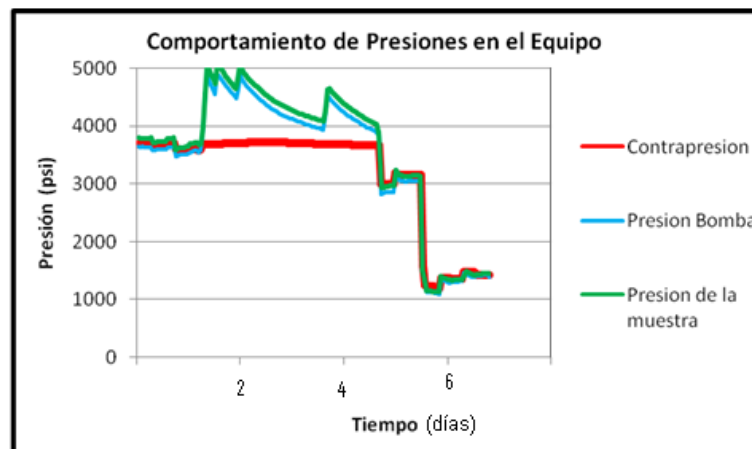


Figura 9. Comportamiento de presiones en el Loop de Asfaltenos con crudo muerto cantagallo-24

Durante el desarrollo de la prueba los sensores de diferencial de presión del equipo no reportaron valores exactos de medición, ya que se esperaba que los diferenciales de alta y de baja presión en la sección de caída de presión estuvieran cercanos a cero, y se observa en la figura 10 que el diferencial de alta se mantiene en un valor de 3800psi y el de baja oscilo entre un valor de 0 y 382 psi. De igual manera en la sección de detección se esperaba que el medidor de baja reportara valores desde cero aumentando progresivamente hasta llegar a un valor constante por encima de 11 psi de acuerdo con los resultados obtenidos en la verificación y adecuación de la sección de detección del equipo, sin embargo como se observa en la figura 10 el diferencial de baja reportó valores completamente aleatorios durante toda la prueba. Este comportamiento se debió a que el equipo contenía gran cantidad de agua remanente de las fallas presentadas en el equipo, la cual altera la mojabilidad de las membranas ya que estas son hidrofílicas.

Estos sistemas de medición de caída de presión son altamente sensibles a cualquier cambio de presión brusco que se presente en la prueba debido a alguna falla en el equipo; por lo que es necesario calibrar estos sistemas de medida al inicio de la prueba y tener precaución durante la ejecución de la misma. Por otro lado se observó durante la ejecución de la prueba que el sistema de control presenta fallas de comunicación entre el software y el elemento final de control.

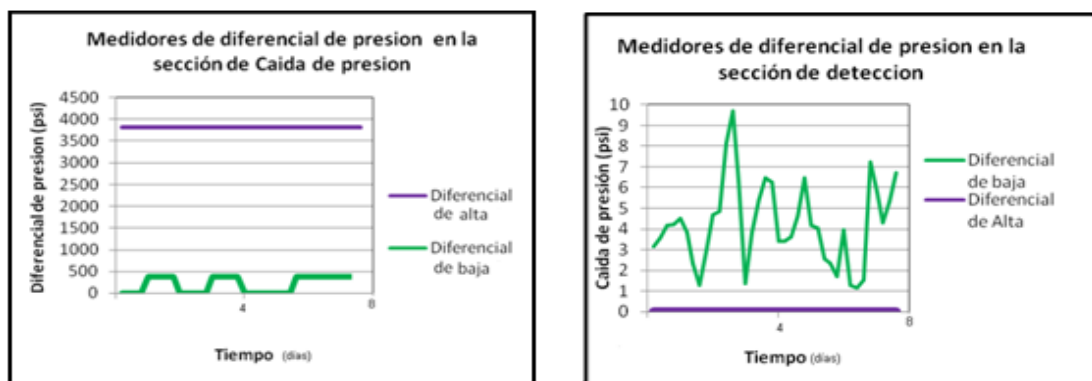


Figura 10 Medidores de diferencial de presión del equipo.

Posteriormente se adecuó una válvula nueva al cilindro de nitrógeno para garantizar que las presiones en el circuito sean constantes. Se calibraron todos los medidores de caída de presión del equipo y se realizaron mediciones de diferencial de presión en la sección de detección con aceite Klearol. Inicialmente el aceite se hizo circular por el filtro 1 y luego por el filtro 3, encontrándose un diferencial de caída de presión en el filtro 1 igual a 90 psi y en el filtro 3 de 60 psi y un tiempo de estabilización de 2 horas en el filtro 1 y en el filtro 3 un tiempo menor a 2 horas. Estos valores reportados corresponden al comportamiento esperado, ya que en el filtro 1 quedaron las partículas superiores a $0.45 \mu\text{m}$ por lo que el filtro 3 alcanza más rápido la estabilidad y genera una caída de presión menor. El filtro 2 fue inicialmente mojado con agua para observar el comportamiento del diferencial de presión en el tiempo, comprobando que el agua altera la mojabilidad de la membrana, por lo cual es recomendable verificar que el equipo y los portafiltros estén libres de agua.

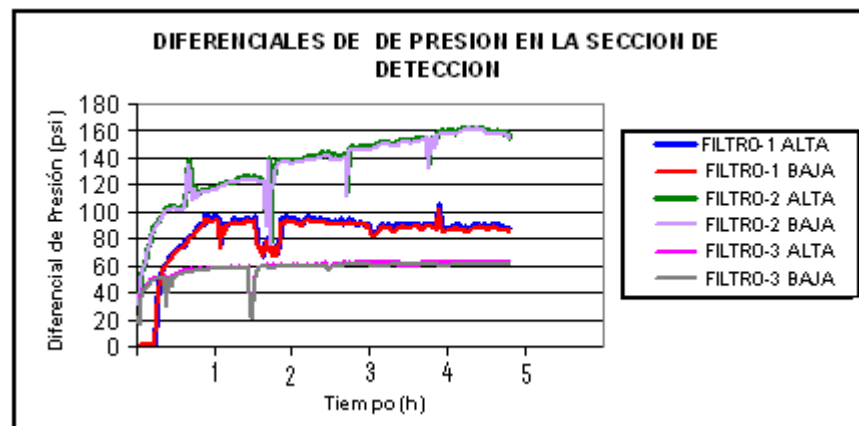


Figura 11. Diferenciales de presión de la sección de detección

Finalmente con estas modificaciones y pruebas realizadas, el equipo Loop de Asfaltenos se encuentra en condiciones de trabajo adecuadas para que una vez se pueda volver a obtener una muestra recombinada de Cantagallo 24 se evalúe en una siguiente fase aplicando el procedimiento de prueba propuesto, para de esta manera verificar si el equipo reproduce adecuadamente el Onset de

precipitación a condiciones dinámicas y la influencia del fenómeno electrocinético en este para de esta manera catalogarlo como una herramienta tecnológica útil que ayude en el proceso de optimización en la producción de petróleo en campo.

CONCLUSIONES

1. Después de realizar la metodología experimental para seleccionar las muestras, y de los resultados obtenidos es preciso concluir que las pruebas de electrodeposición no constituyen un criterio para decidir si la muestra es evaluada o no en el Loop; debido a que en esta técnica se utiliza crudo muerto el cual no es representativo para evaluar la precipitación de asfaltenos. El criterio fundamental para la selección de la muestra es que en el pozo productor de petróleo se presenten problemas de precipitación de asfaltenos ya que el objetivo del equipo Loop es evaluar el fenómeno de precipitación y determinar las condiciones a las que ocurre.
2. Durante el desarrollo experimental se encontró que un paso importante para la evaluación de muestras en el equipo Loop de Asfaltenos es determinar en una etapa preliminar el Onset o Presión Umbral de precipitación de los asfaltenos a condiciones estáticas, el cual se realiza en el equipo Near Infrared, de esta manera se establecen los valores de presión a trabajar en el equipo Loop.
3. Con la revisión y verificación de las secciones del equipo Loop y debido a los inconvenientes técnicos presentados al intentar evaluar la muestra seleccionada, se observó que este equipo posee un alto grado de complejidad en su operación por lo que se hace necesario que todas las secciones y componentes que lo conforman estén en óptimas condiciones ya que si alguno de estos componentes sufre un daño durante la ejecución de la prueba se hace imposible finalizar la misma debido a que la muestra utilizada sufre un daño irreversible, y se tendría que realizar nuevamente la prueba lo cual implica costos adicionales en muestreo, reparación del componente dañado y limpieza de todas las unidades del equipo. De igual forma se hace necesario que los portafiltros y en general todo el equipo

no presente trazas de agua ya que esta sustancia altera la mojabilidad de las membranas impidiendo tomar medidas precisas en la ejecución de la prueba.

4. La muestra de Cantagallo 24, a pesar de ser una muestra recombinaada aún contiene asfaltenos inestables por cambios de presión, lo cual se verificó con la prueba de reversibilidad y con la determinación del Onset de precipitación estático. Teniendo en cuenta estos resultados y que todas las secciones del equipo con sus respectivos componentes se encuentran en condiciones adecuadas se sugiere que en una siguiente fase se realice la metodología propuesta con una muestra de crudo Cantagallo-24 recombinaada.

RECOMENDACIONES

1. De acuerdo con los inconvenientes presentados durante la validación del equipo Loop de Asfaltenos, se hace necesario la adecuación de una válvula relief en paralelo al sistema de contrapresión que se posee actualmente. De esta manera si se presentan problemas mecánicos que ocasionan una sobre presión en el circuito, esta se podrá liberar por medio de esta válvula, permitiendo continuar con la ejecución de la prueba, aunque hay que tener en cuenta que la instalación de este dispositivo al equipo sería un alivio parcial en la prueba. Por otro lado se recomienda filtrar y des-airear el agua utilizada como fluido desplazante, de esta manera se contribuiría a el buen funcionamiento del equipo, evitando taponamientos tanto en las líneas como en el sistema de contrapresión causadas por suciedades presentes en el fluido desplazante (agua).

2. Debido a las fallas presentadas en la sección de monitoreo y control se hace necesario una evaluación exhaustiva de la comunicación entre el software Opto 22 y el elemento final de control, verificando de esta manera tanto el envío de señales como el accionamiento del elemento final de control.

3. Teniendo en cuenta todos los inconvenientes presentados con la ejecución de la prueba en el Equipo Loop, es necesario la elaboración de nuevos pistones libres en aluminio provistos de un empaque compacto especial marca DBM 236173 de 60mm de diámetro, en el anexo 12 se presenta el diseño de los pistones a fabricar.

BIBLIOGRAFIA

1. Ottero Patiño Anette, Sierra Juan Alberto, "Mecanismos Asociados a la Precipitación de Asfáltenos en Sistemas Dinámicos" ECOPETROL (Instituto Colombiano del Petroleo) 2002.
2. Leontaritis and G.A. Mansoori, "Asphaltene Deposition. A Survey of field Experiences and Research Approaches" J. Petrol. Sci. Eng., 1, 229, 1988.
3. Centeno G., Trejo F., Ancheyta J., Carlos A. "Precipitación de asfaltenos del crudo Maya en un sistema a presión" *Rev. Soc. Quím. Méx.* 2004, 48, 179-188.
4. Leontaritis, K.J. "The Asphaltene and Wax Deposition Envelopes" Fuel Sci. Tech. Int'L.14 (1&2), p. 13, 1996.
5. Leontaritis K. J, Mansoori G. A. "Asphaltene Flocculation During Production and Processing: A Thermodynamic Colloidal Model" SPE Paper 16258/1987
6. Buen Rostro-Gonzales E, Lira Galeana C., Gil Villegas A and Wu J. "Asphaltene Precipitation in Crude Oils: Theory and Experiences" *AIChE Journal* Vol 50 p 2552-2570, 2004.
7. Alexeey Victorov and Abbas Firoozabadi, *Thermodynamic AIChE Journal*, Junio de 1996, Vol 42 No. 6, 1753-1764.
8. Wu J., J M. Prausnitz and A. Firoozabadi "Molecular Thermodynamic Framework for Asphaltenes-Oil crude Equilibri" *AIChE Journal* Vol. 44 p. 1188 1998.
9. Wu J., J M. Prausnitz and A. Firoozabadi "Molecular Thermodynamic of Asphaltene Precipitation in Reservoir Fluids" *AIChE Journal* Vol. 46 p.197 2000.
10. Lichaa, Pierre m. Electrical and Other Effects Related to the formation and Prevention of Asphaltene Deposition Problem in Venezuelan Crudes. SPE, paper #5304, 1975.

11. Wright, J. R., Minesdinger, R. R., "The Electrophoretic Mobility of Asphaltenes in Nitromethane," J. of Coll. Int, Sci., 18: 223-236, 1963.
12. Kokal S.; Tung. Scharamm L, "Electrokinetic and adsorption properties of Asphaltenes" Colloids and Surfaces, 94; 253-265; 1995.
13. Rogel Deza, Estrella; Leon Vera, Olga; Torres Silva, Gustavo Adolfo, Espidel Mamud, Youssef Evelio, "Estabilidad, auto-agregación y propiedades eléctricas de los asfáltenos" PDVSA INTEVEP 1998.
14. Saad F. Alkafeef " Investigation of The Stability of Colloidal Asphaltene in Petroleum Reservoirs" SPE 65018, Petrophysics and Surface Chemistry Research Laboratory, College of Technological Studies, Shuwaik, Kuwait 2001.
15. Taylor, S.E. "The Electrodeposition of Asphaltenes and Implications for Asphaltene Structure and Stability in crude and Residual Oils" Fuel 77; 821; 1998.
16. RealView Studies "Measure Wax and Asphaltene Deposition from live reservoirs fluids at field conditions" Schlumberger, www.slb.com/welltesting
17. Mullins Oliver C., "Review of the Molecular Structure and Aggregation of Aphaltenes and Petroleomics" SPE 95801, 2008.
18. Mullins Oliver C., "Asphaltenes, Heavy oils, and Petroleomics" Springer, 2007.
18. Hirschberg, A., Hermans, L.: "Asphaltene phase behavior: a molecular thermodynamic model. Characterization of Heavy Crude Oils and Petroleum Residues", presented at 1984 Symposium Intemational, Lyon, France, June 25-27, 492-497
19. Sandoval Y. L., Montellano P. L., Piña S. M., Sanchez G. L. O. "Potencial Zeta como una Herramienta para Determinar la Aglomeración de las Partículas en la Reducción del Volumen del Lodo a disponer" Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua.
20. Salager Jean Louis "Fenómenos Electrocinético" F.I.R.P Mérida-Venezuela, versión # 1, 1988
21. <http://www.millipore.com/catalogue/module/c263>
21. Mullins Oliver, Akbarzadeh Kamran, "Los Asfaltenos: Problemáticos pero ricos en potencial" Oilfield Review, Otoño 2007.

22. R:B: De Boer and Klaas Leerlooyer, Screening of crude Oils for Asphalt Precipitation: Theory, Practice, and the Selection of Inhibitors.

24.ASTM. Standard Test Method for n-Heptane Insolubles. ASTM D 3279-07
Norma Técnica

ANEXOS

ANEXO A

TEORIA DE LA DOBLE CAPA ELECTRICA INTERFACIAL

El primer modelo introducido sobre la teoría de la doble capa eléctrica fue por Helmholtz en 1879 este modelo fue inadecuado por tanto se desarrolló una alternativa por Gouy-Chapman en 1913, años más tarde Stern combina las dos teorías mencionadas anteriormente y propone un nuevo modelo, conocido como el modelo de Stern el cual se explica a continuación:

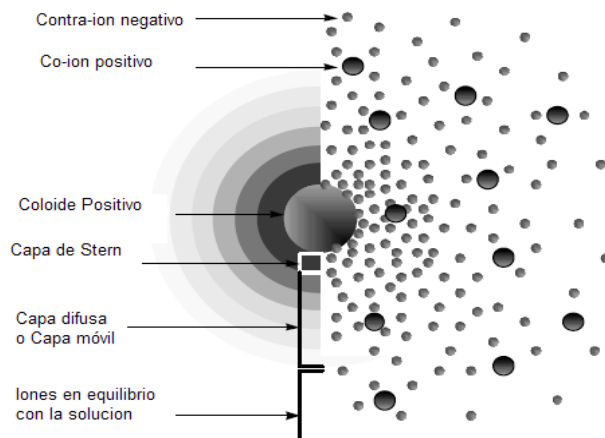
Modelo de Stern

El hecho de que los asfaltenos se consideren en el grupo de los coloides implica la existencia de una doble capa eléctrica superficial definida como una atmósfera iónica alrededor de la partícula coloidal (asfaltenos), la cual ayuda a explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión ⁽¹⁾. Es posible entender este modelo como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un coloide positivo (asfaltenos).

En la siguiente figura se observa cómo la atracción del coloide positivo hace que algunos iones negativos formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del coloide; esta capa de contra-iones (resinas) es conocida como la *capa de Stern* o la capa fija adherida a la superficie coloidal (asfaltenos) que llega hasta un plano llamado el plano de Stern, y cuyo espesor es el del radio del ión específicamente adsorbido a la superficie, otros contra-iones adicionales son todavía atraídos por el coloide, pero estos son ahora rechazados por la capa de Stern, así como otros iones que intentan acercarse al coloide. Este equilibrio dinámico resulta en la formación de una *capa difusa* o *capa móvil* de contra-iones, que tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual disminuye

gradualmente con la distancia, hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contra-iones en el seno de la disolución.

En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones positivos, llamados *co-iones* pues tienen la misma carga que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones negativos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos. La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan.



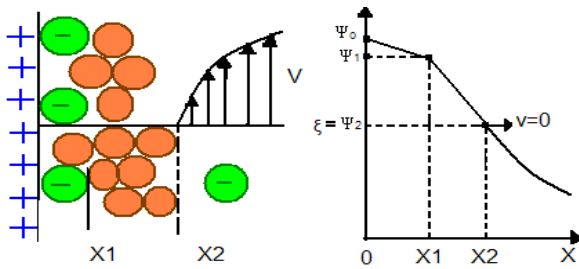
Doble Capa Eléctrica Interfacial (19)

La capa difusa matemáticamente se trata como una distribución de cargas puntuales de un solo tipo de electrolito de valencia Z que se organizan según una distribución de Boltzmann. El medio dispersante se considera que no tiene mayor influencia aparte de la constante dieléctrica de éste. La carga de la superficie genera un campo eléctrico alrededor suyo que se traduce en un potencial eléctrico, que es el trabajo necesario para atraer una carga unitaria desde el

infinito hasta una distancia X , y se denota por Ψ . En la superficie de la partícula este potencial se denota con Ψ_0 , y se considera que este potencial disminuye en forma aproximadamente exponencial, excepto en cercanías de la superficie donde este descenso es más drástico, hasta alcanzar el cero en la capa difusa. El potencial que se presenta en el plano de Stern se denomina *potencial de Stern*. El término $1/k$ se denomina espesor de la doble capa o longitud de Debye-Huckel λ y se adoptó su uso al demostrar matemáticamente que a bajos potenciales, la doble capa tiene la misma capacitancia de un condensador de placas paralelas con una distancia de separación entre placas de $1/k$.

Potencial Electrocinético o Zeta (ξ)

En los fenómenos electrocinéticos mencionados en los fundamentos teóricos de este trabajo, una de las capas se desplaza respecto a la otra, y el potencial implicado en el cálculo de las fuerzas electromotrices y electroviscosas es el potencial electrocinético llamado potencial zeta (ξ), el cual corresponde al potencial que se genera cuando se afecta la parte móvil de la doble capa eléctrica. El potencial electrocinético o también conocido como potencial zeta (ξ) no es por lo tanto igual al potencial de la superficie (Ψ_0) ni al potencial de la capa de Stern (Ψ_1) (observar siguiente figura), es el potencial (Ψ_2) a distancia X_2 de la superficie, en la capa móvil de la doble capa eléctrica. Si hay poca adsorción y si la doble capa es bastante extendida (espesor de doble capa $\gg X_2$) el potencial zeta es aproximadamente igual al potencial de la superficie, sin embargo en otros casos el potencial zeta puede ser considerablemente diferente del potencial de superficie. En efecto las moléculas de una o de ambas fases pueden estar ligadas a la interfase, e incluso estar adsorbidas, además la capa adsorbida puede inmovilizar la capa de moléculas de solvente (solvatación).



Potencial Zeta (20)

La distribución de potencial en la capa difusa móvil, es por lo tanto:

$$\psi = \psi_2 \exp\left(\frac{[x-x_2]}{\lambda}\right) \quad (1)$$

En donde $\lambda = 1/k$, espesor de la doble capa eléctrica. A distancia suficientemente grande $x = N\lambda$ (donde N es típicamente 5 ó 10), el potencial es esencialmente cero; se puede considerar que la capa difusa no se extiende más allá de esta distancia y que $X = N\lambda$ es el límite exterior de la capa difusa y cuando $X = X_2$ se tiene la superficie en la que es afectada la capa móvil. El fluido situado entre estos dos límites es móvil y posee una densidad de carga no nula, al no aplicarse ninguna fuerza mecánica externa sobre el fluido; no existirá un gradiente de velocidad de la capa difusa, teniendo un valor de cero.

ANEXO B

POTENCIAL DE FLUJO

La transferencia de partículas de asfáltenos cargadas con el flujo de petróleo, es equivalente a una corriente neta ó corriente de flujo (I_s), y por tanto a una diferencia de potencial que se opone a la transferencia mecánica de cargas. Este potencial, en el caso de partículas cargadas positivamente, será negativo corriente arriba y positivo corriente abajo, con el fin de oponerse al flujo de partículas de asfáltenos cargadas ⁽¹⁾.

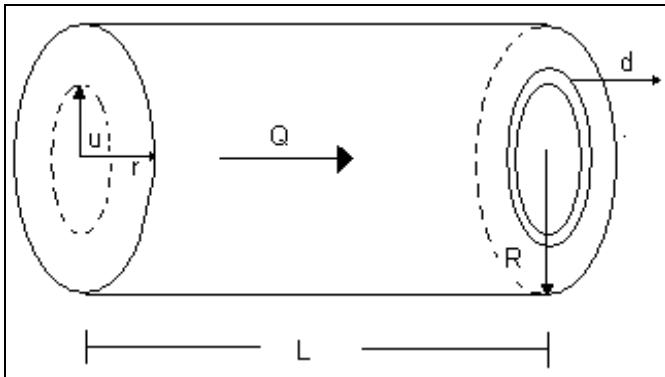
El potencial mencionado causa en las partículas una tendencia a fluir en reversa por difusión iónica y en menor medida por electroósmosis. La transferencia de cargas debido a este flujo en reversa y a la electroósmosis se conoce como corriente de fuga.

La diferencia de potencial de flujo aparece cuando las partículas permanecen estacionarias debido al balance entre fuerzas opuestas, tanto mecánicas como eléctricas. El potencial de flujo es aquella diferencia de potencial generado por el paso del flujo en el cual la corriente de flujo (I_s) y la corriente de fuga son iguales.

Derivación de la corriente de Flujo

La siguiente figura ilustra el modelo físico que es visualizado para el desarrollo de las ecuaciones asociadas con la corriente de flujo.

Designando la densidad de carga por unidad de volumen en el aceite debido a las partículas de los asfáltenos cargados como ρ_c y la rapidez de flujo de aceite como Q , entonces la corriente de flujo I_s debido al flujo de las partículas de asfaltenos se daría por :



Corriente de flujo

$$I_s = \int \rho_c dQ$$

donde dQ es la rata de flujo a través de la capa cilíndrica de grosor dr.

$$dQ = 2\pi r u_r dr$$

La ecuación de Poiseuille para flujo laminar es

$$U_r = \frac{\Delta P (R^2 - r^2)}{4\mu L}$$

Reemplazando esta ecuación en la expresión para dQ y asumiendo que ρ_c es constante se tiene:

$$I_s = \frac{\Delta P \rho_c \pi R^4}{8\mu L}$$

Por otro lado la corriente de fuga se debe al potencial de flujo y se puede representar así:

$$I_L = \left(\frac{E}{R} \right) = E \left(\frac{A}{\rho_r L} \right) = Ek \left(\frac{A}{L} \right) = Ek \left(\frac{pR^2}{L} \right)$$

Donde -A es el área del canal

-k es la conductividad del crudo y la pared

-L es la longitud del canal de flujo

- R es la resistencia del medio y pared del tubo
- ρ_r Resistividad del medio y pared del tubo

En estado estacionario las corrientes de flujo y la de fuga son iguales, entonces se tiene:

Después de utilizar la matemática apropiada para simular este fenómeno es posible calcular el potencial de flujo en el régimen laminar y turbulento según las ecuaciones mostradas a continuación respectivamente:

$$\frac{E}{\Delta P} = \frac{\rho_c R^2}{8\mu k}$$

Esta expresión es para flujos laminares, en términos de la velocidad promedio en el conducto, esta ecuación puede ser modificada usando la clásica ecuación de caída de presión para flujos laminares

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\mu u_{prom}}{d^2} = \frac{8\mu u_{prom}}{R^2}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$E = \frac{\rho_c u_{prom} L}{K}$$

Esta es la ecuación final para calcular el potencial de flujo en régimen de flujo laminar.

Para el régimen de flujo turbulento se sugiere la siguiente ecuación de caída de presión

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{0.1584 \rho^{0.75} \mu^{0.25} u_{prom}}{d}$$

sustituyendo se obtiene:

$$E = 4.95 * 10^{-3} \left[\frac{\rho_c L d^{0.75} \rho^{0.75}}{\mu^{0.75} K} \right] u_{prom}$$

Donde:

- ρ es la Densidad del fluido
- K es la conductividad del crudo y la pared
- L es la longitud del canal de flujo
- ρ_c Densidad de carga
- E es la Intensidad del campo eléctrico o potencial de flujo
- μ_{prom} es la Viscosidad promedio del medio

Esta es la ecuación final para calcular el potencial de flujo en el regimen de flujo turbulento, siendo el orden para mirar si un flujo es laminar o turbulento el numero de Reynolds

$$Re = \frac{d u_{prom} \rho}{\mu}$$

Siendo el orden para mirar si un flujo es laminar o turbulento el numero de Reynolds, para flujos laminares $1 < Re < 2100$, y para flujos turbulentos $Re > 2100$.

ANEXO C

DESCRIPCION DE LAS SECCIONES Y COMPONENTES DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS

Este equipo fue diseñado hace 6 años con el fin de evaluar la precipitación de los asfaltenos a condiciones dinámicas, nuestro trabajo consistió en la adecuación del mismo y en realizar una prueba con un crudo A previamente recombinado. El equipo simula las condiciones de presión y temperatura. También maneja tanto el escalamiento de algunas variables del yacimiento y de la tubería de producción como las variables evaluadas a condiciones estáticas: presión, composición y temperatura y la variable de potencial de flujo, incluida dentro del fenómeno electrocinético.

El equipo consiste en un circuito fabricado con tubería de acero inoxidable de ¼" y volumen de fluido de 330 cm³, ubicado dentro de un horno con el fin de simular la temperatura del yacimiento, a través del cual circula la muestra de crudo, a una tasa que puede ser variada entre 0 y 145 cm³/min. La presión máxima de trabajo es de 5000 Psia, la cual se mantiene constante mediante un sistema de regulación de contrapresión. La selección del diámetro de la línea obedece a limitaciones de volumen inherentes a las muestras de fondo.



Esquema simplificado del equipo

Una vez cargada la muestra de crudo, se pueden variar independientemente la presión, la temperatura, la composición y el potencial de flujo, similar a los eventos que ocurren en el campo. La precipitación de asfáltenos es detectada mediante un sistema de filtros en paralelo. De esta manera, se puede correlacionar con las condiciones de producción y determinar las condiciones críticas, a las cuales ocurre el problema de precipitación de asfáltenos.

El circuito está formado por cinco secciones principales:

1. Sección de caída de Presión
2. Sección Electrocinética
3. Sección de Detección
4. Sistema de bombeo, llenado y circulación.
5. Sección de Monitoreo y control

El equipo está sobre un panel construido en lámina de aluminio perforada, montado en cuatro ejes de acero inoxidable que permiten el desplazamiento el panel ubicado dentro de un horno de circulación forzada de aire Marca Blue –M modelo 1406 que permite manejar temperaturas hasta un máximo de 650 °F y de dimensiones internas 120cm x 90cm x 60cm.

Sección de caída de Presión

Esta sección permite la simulación de diferentes caídas de presión a partir de la presión del circuito, de manera similar a lo que ocurre con el crudo desde el yacimiento hasta superficie.

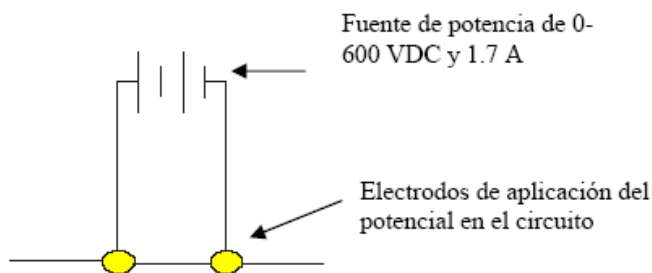
Para simular esta caída de presión se emplearon válvulas manuales de aguja marca Autoclave Engineers SW4081 con vástago proporcional no rotante, las cuales resisten una presión de 11500 psi.

Con el fin de monitorear el diferencial de presión, a la entrada y salida de la sección se encuentran ubicados dos transductores, de rango 0-360 psi y 0-3600 psi, marca Smar, cuyo principio se basa en la medición de la capacitancia entre dos diafragmas. Algunas ventajas que ofrecen son: permitir el monitoreo directo desde el computador mediante una señal análoga de 4-20 mA, tienen un led indicador, son de fácil calibración y de gran precisión.

Sección Electrocínética

Esta sección permite el modelamiento del efecto electrocinético que se presenta debido a la naturaleza coloidal de los asfaltenos en flujo y consta básicamente de una sección de línea de $\frac{1}{4}$ " de diámetro y de 20 cm de longitud, en la cual se encuentran ubicados dos electrodos de oro, esféricos y removibles. Estos tienen una forma de fósforo, con un diámetro 2.5 mm y 2.0 mm en la cabeza y vástago respectivamente, y con una longitud del vástago igual a 45 mm. Los electrodos son utilizados para aplicar un potencial dado al sistema con el fin de generar un campo eléctrico capaz de desestabilizar a las partículas de asfalto. Estos electrodos están ubicados dentro de un cuerpo de válvula de aguja marca Hoke maquinado debidamente y sellado en la parte superior por un tapón de Baquelita que actúa como aislante eléctrico y con empaques internos y externos para evitar fugas.

El potencial a ser aplicado sobre los electrodos para generar el campo eléctrico es suministrado por una fuente de voltaje variable de 0 a 600 Vdc marca Sorensen DCS600-1.7 que dispone de una potencia máxima de 1020 w y permite el control del mismo desde el sistema de monitoreo. La fuente permite el control y monitoreo de corriente y voltaje de manera independiente mediante señales análogas con señal digital superpuesta o con interfase digital RS232,RS285 o IEE488.

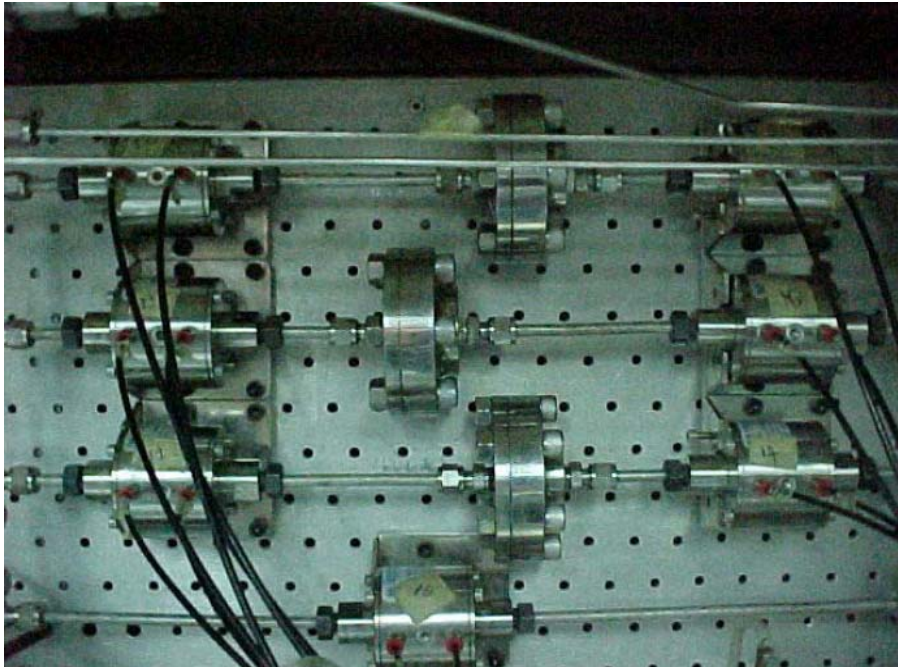


Sección Electrocinética

Sección de Detección

Esta sección sirve como dispositivo o mecanismo de detección de la precipitación de asfáltenos producida durante el recorrido del crudo a través de todo el circuito, especialmente en las secciones de caída de presión y electrocinética.

Consiste en un tren de filtros con membranas de 0.45μ ubicados en paralelo. Adicionalmente, está dotado de detectores de diferencial de presión con el objeto de monitorear la caída de presión que se presenta en el filtro, y que debe aumentar en el momento en que la membrana se comienza a obstruir debido a la presencia de asfáltenos precipitados. A continuación se muestra una foto y un esquema de esta sección.



Sistema de detección

Sección de bombeo, llenado y circulación

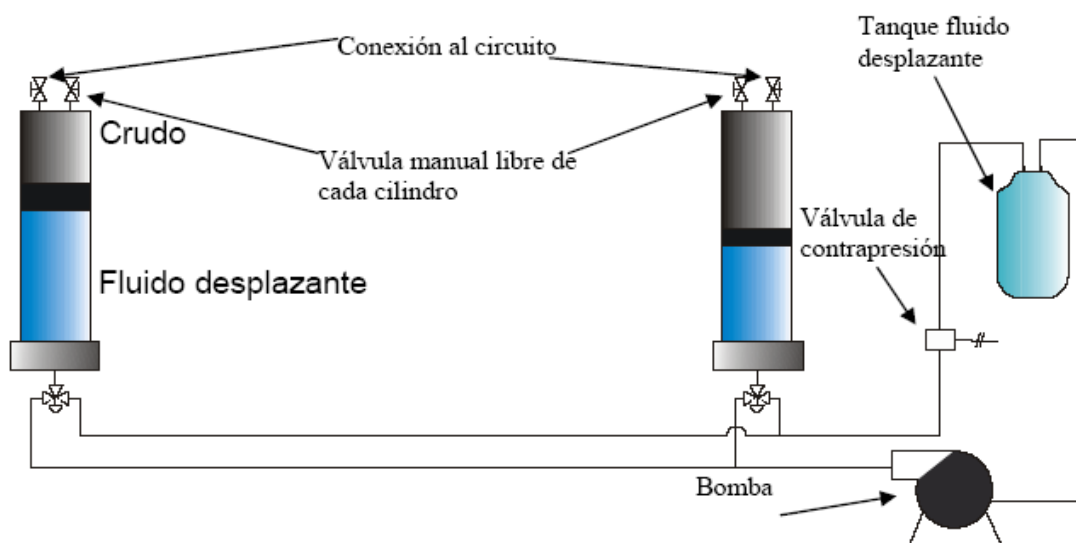
Esta sección permite el llenado y continua circulación de la muestra en el sistema, a las condiciones de presión y tasa de flujo deseadas.

Consta de una bomba de desplazamiento positivo que es el corazón del sistema, la cual permite el manejo de presiones dentro del rango de 0-5000 psi y tasas de flujo de 0-145 cm³/min. Para efectos de desplazamiento, el equipo consta de dos cilindros de pistón libre fabricados en acero inoxidable de 25 cm de longitud efectiva y 500 cm³ de capacidad, dotados de un indicador de final de carrera y un sensor de proximidad, los cuales permiten monitorear la posición del pistón dentro del cilindro. Cuando éste ha llegado al final, se invierte el desplazamiento con el fin de evitar la sobre presurización del circuito. El pistón libre evita que se pongan en contacto el crudo a analizar y el fluido que circula a través de la bomba. Durante el desplazamiento de la muestra, el mecanismo de trabajo del final de carrera y el sensor es el siguiente:

El sensor de proximidad detecta la posición del final de carrera del cilindro que a su vez es accionado por la posición del pistón dentro del mismo. La señal arrojada por el sensor de proximidad es recibida por un amplificador y transmitida al sistema de monitoreo, el cual suspende el movimiento en un sentido y permite el movimiento en el otro.

La muestra de crudo es tomada por la bomba Eldex de un recipiente de acero inoxidable con capacidad para 2.5 litros que se encuentra fuera del horno de calentamiento. Es decir, que la restauración de la muestra se debe realizar en otro equipo. Mientras un cilindro se está desplazando, el otro está recibiendo el crudo que circula por el sistema. Al finalizar el desplazamiento, se invierte el sentido de trabajo de los cilindros. Para tal efecto, se utilizan las válvulas de tres vías marca Vindum CV510S para alta temperatura.

Adicionalmente, al realizar el llenado del loop, se utiliza una bomba para hacer vacío completo al sistema y luego llenar con un gas inerte como el nitrógeno. Con la ayuda del sistema de contrapresión y la bomba se alcanza la presión deseada, máximo hasta 5000 psi. Posteriormente se desplaza el Nitrógeno con la muestra de crudo y de esta manera se conserva la presión durante la transferencia.

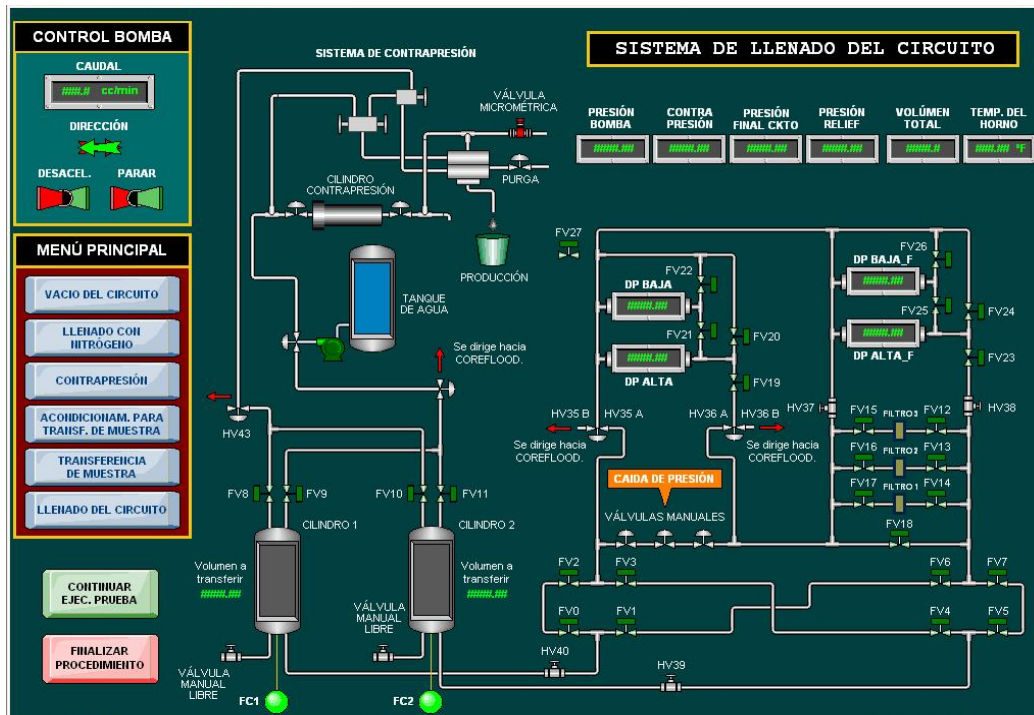


Sección de Bombeo, Llenado y Circulación.

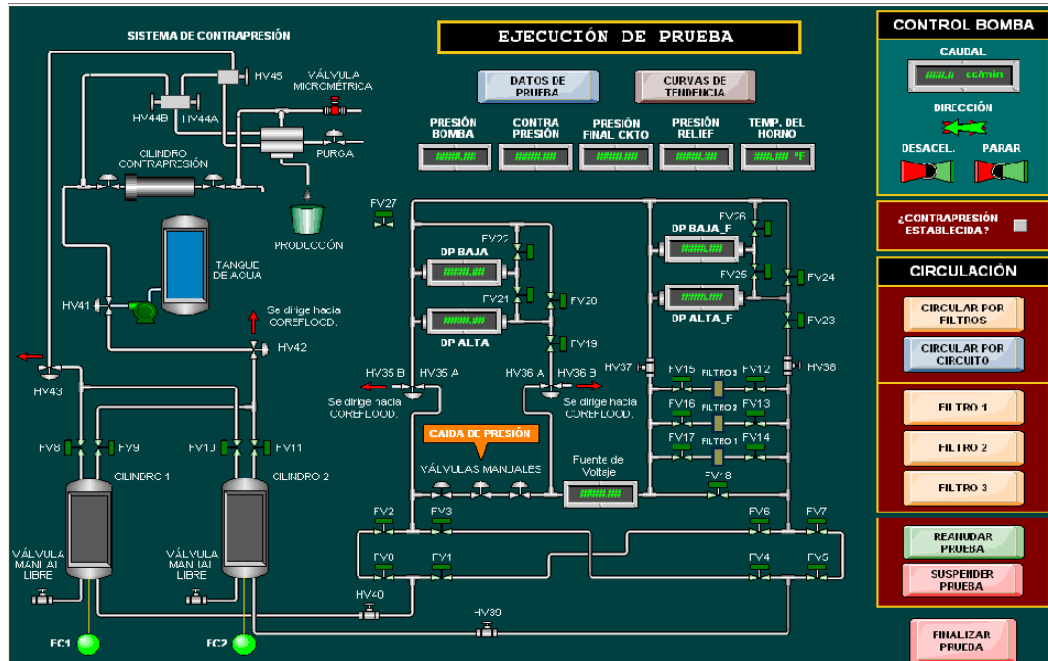
Sección de Monitoreo y Control

El objetivo es permitir el control de cada uno de los componentes del equipo de Precipitación de asfáltenos mediante el computador, y a la vez monitorear o registrar cada una de las variables físicas que intervienen en el proceso de depositación. La sección de monitoreo y control fue modificada, cambiando el Software LabView 5.0 por Opto 22 debido a disposiciones hechas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

El Hardware de Control y Adquisición de Datos implementado para el equipo LOOP DE ASFALTENOS / COREFLOODING está conformado por un Controlador que usa interfase de comunicación serial, y dos Unidades I/O las cuales están compuestas por su correspondiente tarjeta madre que consta de diversas posiciones con conectores especiales, o slots, sobre los cuales se encuentran dispuestos un cerebro serial y los módulos de entradas/salidas de datos, de tipos análogo y digital, la recepción de una señal en milivoltios (mV) enviada por una termocupla, la recepción de señales de 4-20 mA enviadas por transductores de presión, así como también el envío de señales que ordenen el accionamiento de válvulas y de dispositivos de acción análoga.



Llenado del circuito



Ejecución de Prueba

La tabla mostrada a continuación presenta los dispositivos OPTO 22 instalados para realizar la adquisición de la información del proceso y el correspondiente control sobre el mismo, además de la cantidad de cada uno de ellos.

Cantida	Concepto
1	Controlador OPTO 22 SNAP LCM4
1	Tarjeta de Red M4SENET-100
1	Cerebro Análogo/Digital OPTO 22 SNAP B3000, con Protocolo Mystic/Optomux
1	Cerebro Digital OPTO 22 SNAP BRS Digital, con Protocolo Mystic
5	Modulo OPTO 22 SNAP AIMA-i
1	Modulo OPTO 22 SNAP AITM-i
1	Modulo OPTO 22 SNAP AOV-27
1	Modulo OPTO 22 SNAP IDC5MA
8	Modulo OPTO 22 SNAP ODC5-i
1	Rack OPTO 22 SNAP B16M
1	Rack OPTO 22 SNAP B8M
1	Fuente de Alimentación OPTO 22 SNAP DS5
1	Fuente de Alimentación MEAN WELL DR-120-24

ANEXO D

DIFERENCIALES DE PRESION EN MEMBRANAS A DIFERENTES CAUDALES

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos al extrapolar una correlación que utiliza la ley de Darcy, la cual fue obtenida experimentalmente utilizando como fluido desplazante agua y las propiedades de la membrana, para de esta manera calcular los diferenciales de presión generados a diferentes caudales.

MUESTRA	Crudo Muerto	DIAMETRO (cm)	2,53
ÁREA (cm ²)	5.03	VISCOSIDAD(cP)	10
LONGITUD (cm)	0.015	DENSIDAD (g/cm ³)	0,9
CAUDALmL/min	ΔP (psi)	k (DARCY)	k DARCY(corregida)
1,00	2,27	3,22	3,22
5,00	11,35	3,22	3,22
10,00	22,70	3,22	3,22
20,00	45,30	3,22	3,22

Caída de presión en membranas a diferentes caudales

Ley de Darcy
$$K = (Q \cdot \mu \cdot \text{Longitud} \cdot \Delta P) / A$$

Donde V = velocidad del fluido desplazante

K = permeabilidad de la membrana

ΔP = Caída de presión en la membrana

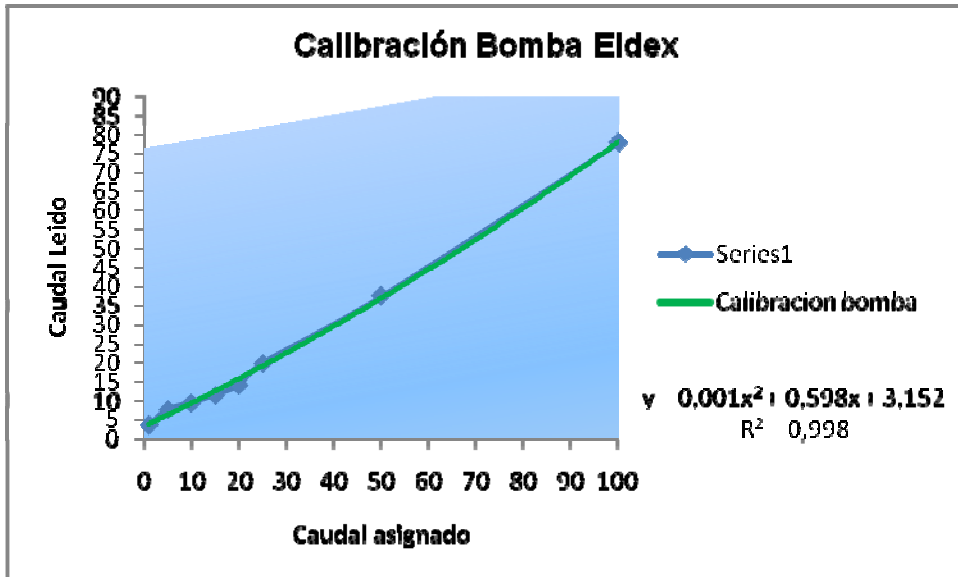
L =longitud de la membrana

A = área de la membrana

μ = viscosidad del fluido desplazante

Q=tasa de flujo del fluido desplante

ANEXO E
CALIBRACION BOMBA ELDEX BBB4-VS



Ecuación polinómica de tendencia:

$$y=0.001X^2 + 0.598X + 3.152$$

ANEXO F

DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA PROPUESTA PARA LA VALIDACION DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS

ETAPA 1. Establecimiento de las condiciones de prueba:

Temperatura: La temperatura de operación en el equipo es la temperatura de yacimiento de la muestra a evaluar, la cual permanece constante durante toda la prueba.

Caudal de prueba: Esta restringido por el sistema de contrapresión (backpressure) que de acuerdo a especificaciones técnicas de fabrica la tasa de flujo de operación es de 0-32 cm³/min. Se determina operar a un caudal de 10 cm³/min, el cual se considera pertinente para garantizar el funcionamiento operativo del equipo.

Tiempo de recorrido del crudo en el sistema, sometido a las variables desestabilizadoras: Se propone un tiempo de 24 horas, tiempo mínimo utilizado en las pruebas de electrodeposición, este tiempo se considera prudencial para producir la precipitación de los asfaltenos.

Diferencial de presión máximo permisible en los filtros durante la etapa de detección: De acuerdo a la complejidad de la prueba se recomienda un diferencial de caída de presión permisible en las membranas inferior o igual a 800psi, para proteger la integridad de las mismas.

Caudal para efectuar el recorrido del crudo por los filtros: El caudal debe ser 5cm³/min para garantizar el buen estado de las membranas durante la ejecución de la prueba.

Presión: En el primer ciclo se inicia la prueba con una presión de 200 psi por encima de la presión onset estática encontrada en el Near Infrared. Los ciclos siguientes se realizan disminuyendo en 50 psi la presión del ciclo anterior hasta llegar a evaluar la presión onset estática, en el caso de no presentarse precipitación de asfaltenos se continua disminuyendo la presión en 50 psi hasta 200 psi por debajo de la presión onset estática; si aún no se presenta precipitación de asfaltenos, se continua disminuyendo la presión en diferenciales mayores hasta

encontrar precipitación de asfaltenos o en su defecto llegar a un valor de 200 psi por encima de la presión de burbuja de la muestra. Se considera que estas presiones son suficientes para determinar el onset dinámico y la influencia que tendría un potencial eléctrico en este.

Potencial eléctrico a aplicar al crudo durante su recorrido: Los voltajes establecidos a evaluar en cada presión propuesta son: un voltaje mínimo, un voltaje intermedio y finalmente un voltaje máximo. Los tres voltajes son aplicados en cada ciclo de menor a mayor. La justificación del establecimiento de estos se explica más adelante.

Antes de iniciar la etapa 2 (ver figura 3) se debe homogenizar la muestra durante un periodo de 4 horas, después se realiza un blanco de caída de presión en los filtros el cual sería el valor de referencia de caída de presión que genera la muestra en los filtros a presión de yacimiento y sin la aplicación de un potencial eléctrico.

ETAPA 2. Recorrido del crudo por el circuito a la presión establecida

En esta etapa se hace circular la muestra por el circuito sólo a la presión establecida, después se verifica en la ETAPA 3 mediante la variación de la caída de presión en los filtros si se ocasionó precipitación de asfaltenos, debido a la influencia que tiene el movimiento del fluido (condiciones dinámicas) teniendo en cuenta que los asfaltenos podrían generar por sí solos un potencial de flujo capaz de causar esta precipitación. Las presiones a establecer en cada ciclo se mencionan en la ETAPA 1, estas presiones son suficientes para determinar el onset dinámico el cual se estima que esta por encima del onset estático debido a las condiciones de movimiento y a la influencia del campo eléctrico inducido.

ETAPA. 3. Recorrido del crudo por el sistema de filtros

En esta etapa se hace circular la muestra por los filtros para la detección de la precipitación de asfaltenos; el parámetro que establece esta precipitación es el

comportamiento o la variación del diferencial de presión en los filtros con el tiempo comparado con el valor de referencia que se tomó inicialmente, no se establece un tiempo límite para que se finalice esta etapa, las condiciones que lo detendrían son las siguientes: primero cuando se sobrepasa el diferencial máximo de presión en un filtro, este se deshabilita y se abre el filtro siguiente; si esto ocurre en el tercer filtro, como ya no hay más filtros habilitables, el recorrido se detiene. Segundo cuando el usuario responsable de la prueba estima que se puede finalizar el recorrido por los filtros y lo detiene manualmente ya sea porque se presentó o no precipitación. Finalizada la etapa de detección, el sistema continúa con la etapa 4.

ETAPA 4. Recorrido del crudo en el circuito sometido al campo eléctrico

En esta etapa se somete el crudo a la acción de un campo eléctrico inducido y se observa la influencia de este voltaje sobre la precipitación de asfaltenos, además de determinar si la presencia de un potencial desplaza o afecta el valor onset de presión; para determinar si se presentó precipitación de asfaltenos se retorna el sistema a la etapa 3 con lo cual se comprobará, debido al cambio en la caída de presión, la floculación de los asfaltenos. Esta etapa se finaliza cuando el usuario encargado de la prueba estime que se presentó precipitación de asfaltenos con alguno de los voltajes establecidos en las condiciones de trabajo, o por el contrario que no se presentó precipitación de asfaltenos. Se establecen tres voltajes a aplicar basados en las siguientes premisas:

1. Voltaje Mínimo: Este voltaje puede ser el voltaje mínimo encontrado en las pruebas de electrodeposición, o si en algún caso la muestra no presenta electrodeposición a condiciones estáticas este voltaje será de 120 voltios, voltaje mínimo encontrado en pruebas de electrodeposición realizadas por Lichaa¹⁰. Con este voltaje mínimo aplicado se determinará si los asfaltenos precipitan con un voltaje menor al que ellos mismos generan “potencial de flujo”.
2. Voltaje Intermedio: Es el campo eléctrico generado por el movimiento de los asfaltenos de la muestra a través de la tubería, este campo eléctrico es conocido

como “Potencial de flujo” y se determina mediante el modelo matemático presentado en el anexo 2; con la aplicación de este voltaje se evaluaría la influencia del fenómeno electrocinético en la precipitación de asfaltenos.

3. El voltaje máximo: Es el campo eléctrico máximo proporcionado por la fuente, así se podrá estimar que al potencial máximo de la fuente no existe precipitación de asfaltenos o por el contrario que al aumentar el voltaje aplicado en la muestra se observan cambios en el porcentaje de precipitación de asfaltenos, lo cual se evidenciaría en el aumento del diferencial de presión en los filtros.

Finalizada esta etapa se reinicia el ciclo y se establece en las condiciones de trabajo la nueva presión a trabajar.

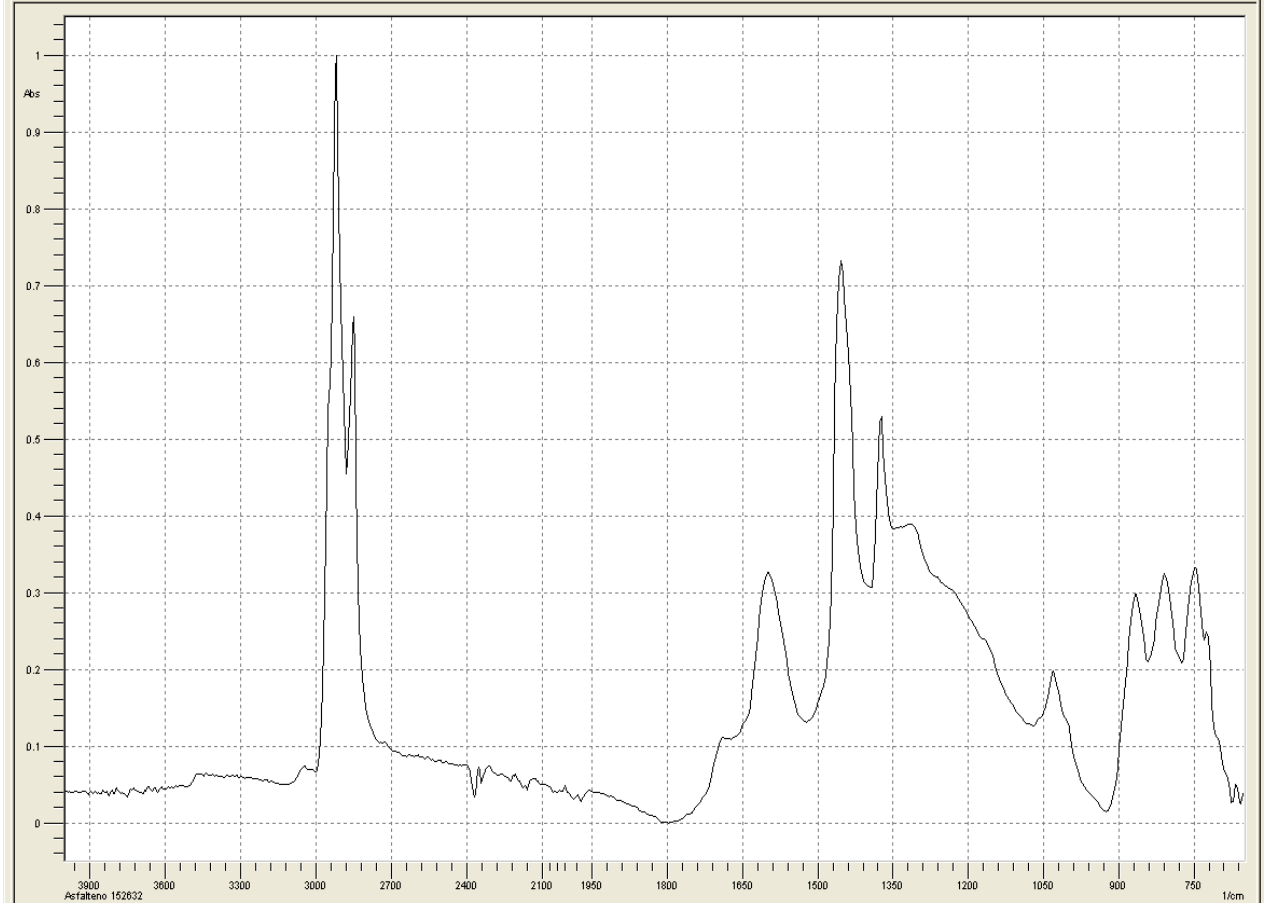
Procedimiento de Llenado del Equipo Loop de Asfaltenos

Antes de aplicar la metodología propuesta para validar el efecto electrocinético en el equipo Loop, se debe realizar el procedimiento de llenado el cual se describe a continuación:

Primero se realiza el vacío del circuito, luego se hace llenado con nitrógeno, seguidamente se establece la contrapresión a trabajar, la cual es la presión de yacimiento, después se lleva el circuito que contiene Nitrógeno a las condiciones de presión de yacimiento y la temperatura del horno hasta la temperatura de yacimiento para transferir la muestra y se observa que la presión bomba, presión relief, presión circuito permanezcan iguales a la contrapresión, esto indica que el sistema no se está sobre presurizando. Finalmente se transfiere un volumen mínimo de muestra al cilindro 2 de 450 cm^3 y un volumen al cilindro 1 (ver anexo 3, sección de bombeo, llenado y circulación) tal que sumado al transferido al 2 sea igual o menor a 830 cm^3 ; con esta muestra se realiza el llenado del circuito desplazando volúmenes para cada tramo de línea.

ANEXO G

INFRARROJO ASFALTENO DE REFERENCIA DE FONDO DE VACIO



ANEXO H

PROPIEDADES FLUIDO CANTAGALLO-24

RESUMEN DE DATOS DEL YACIMIENTO

CAMPO YARIGUI-CANTAGALLO-Bloque V

PROPIEDAD	FUENTE	FECH A	DATO
Datum (pies) TVDss	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	7000
°API	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	20.5
BSW actual (%)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	27
Presión de Yacimiento actual (Psia)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	1800/1350/900
Temperatura de Yacimiento (°F)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	138.5
Presión inicial del yacimiento (Psia)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	3250
Presion de burbuja inicial Psi	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	3015
Viscosidad del crudo a Ty	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	10
Sw actual (Fracción)			
So actual (Fracción)			
Sor (Fracción)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	0.306
Sw prom inicial(%)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	0.22
Permeabilidad promedia (md)	Eval.Integrada	Dic-02	105

	Yaci		
Porosidad promedio (%)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	0.2
Tipo de formación	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	Litoarenas/Arcillas
Espesor neto prom (Pies)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	300
Profundidad Prom (ft)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	4800-7950
Salinidad agua formación (ppm Cl)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	
Viscosidad del agua Cp			
Capa gas presente	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	Secundaria-Sur
GOR actual (cf/bbl)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	560
Factor Volúmetrico del petróleo	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	1.12
Formación Productora	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	CG/C/
MECANISMO DE PRODUCCION	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	Combinadogs-w
Buzamiento MAX. Zona de interés			
Pozos corazonados			
Area productiva (Acres)			
Contenido de arcillas promedio (%)			
Gravedad del gas			

Espaciamiento (acres)	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	34
Viscosidad del gas (Cp)			
Pozos inactivos	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	13
Pozos Activos	Eval.Integrada Yaci	Dic-02	47
Endpoint relative permeability, oil			
Endpoint relative permeability, gas			
Vertical permeability, kv			
Horizontal permeability, kh			
Anisotropy (kv/kh)			

ANEXO I
RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

PREPARADO PARA
LABORATORIO DE DAÑOS A LA FORMACIÓN

Reporte No. PVT - ID0157- 100

Fecha de reporte: 02 de Febrero de 2009

Realizado por:

Libia Sofia Sandoval R.

Ing. laboratorio PVT

Aprobado por:

Ing.Qco. Msc. Hernando Bottia

Líder (e) Lab. PVT-OPC

Aprobado para entrega:

Msc. Juan Eduardo Rivera de la Ossa

Coordinador de Laboratorios de Producción y Exploración

El laboratorio de Análisis PVT está acreditado por
la Superintendencia de Industria y Comercio
mediante Resolución 35720 de Noviembre 7 de
2002.

CONTENIDO

	Página
CONTENIDO	2
LISTA DE TABLAS	3
INTRODUCCION	4
INFORMACION DEL MUESTREO	5
RESULTADOS	5
PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	16
Control de calidad de las muestras	
Recombinación del fluido	
Análisis del fluido recombinado	

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Análisis de las muestras de gas de separador	7
Tabla 2: Análisis de la muestra de aceite de separador (gas)	9
Tabla 3: Análisis de la muestra de aceite de separador (aceite)	10
Tabla 4: Composición total del aceite de separador	11
Tabla 5: Análisis de la muestra recombinaada (gas)	12
Tabla 6: Análisis de la muestra recombinaada (aceite)	10
Tabla 7: Composición total del fluido recombinaado	11

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

INTRODUCCION

Este reporte presenta los resultados experimentales de la recombinación del fluido Cantagallo 24, muestreado el día 26 de diciembre de 2008; el muestreo fue realizado por personal del laboratorio PVT – OPC del Instituto Colombiano del Petróleo.

Dos muestras de aceite de separador (cilindros EOS-01 y EOS-02) y tres muestras de gas de separador (cilindros A-2882, A-2980 y A-3127) fueron traídas al Laboratorio PVT y sometidas a control de calidad.

A la muestra de gas de separador (cilindro A-3127) se le realizó una cromatografía de gas extendido para determinar su composición, adicionalmente se le determinaron sus propiedades (Tabla 1).

La muestra de aceite de separador analizada (cilindro EOS-01) tiene una densidad de 0.9414 g/cc a 1000 psi y 65.8 °F. Una prueba de liberación instantánea de gas permitió determinar la relación gas-aceite y la composición total del aceite de separador. Mediante la prueba se encontró que el fluido contiene 12.2 pies cúbicos de gas a 14.7 psia y 60 °F por barril de petróleo residual a 60 °F. El gas obtenido de la liberación fue recogido y cuantificadas sus propiedades y composición mediante cromatografía de gas extendido (Tabla 2). Al líquido obtenido de la liberación se le determinó su densidad y composición mediante técnica de cromatografía (Tabla 3). A partir de las composiciones de gas y líquido y su relación másica se obtuvo mediante recombinación matemática la composición total del fluido muestreado (Tabla 4).

Posteriormente se tomaron los cilindros A-3127 y EOS-01 para llevar a cabo la recombinación tomando como referencia una relación gas-aceite de 114 scf/STB. Al fluido obtenido se le realizó una densidad y una liberación instantánea de gas para validar la recombinación realizada. Mediante la prueba se encontró que el fluido recombinado tiene una densidad de 0.9179 g/cc a 3500 psi y 135.8 °F y que contiene 109.8 pies cúbicos de gas a 14.7 psia y 60 °F por barril de petróleo residual a 60 °F. El gas obtenido de la liberación instantánea fue recogido y determinada su composición mediante cromatografía de gas extendido (Tabla 5). Al líquido obtenido de la liberación se le determinó su composición mediante técnica de cromatografía (Tabla 6). A partir de las composiciones de gas y líquido y su relación másica se obtuvo mediante recombinación matemática la composición total del fluido (Tabla 7).

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

INFORMACION DEL MUESTREO

Proyecto:	Cantagallo 24
Fecha de Muestreo :	26 de Diciembre de 2008
Tipo de Muestra :	GAS ACEITE
Punto de muestreo	Separador

CONDICIONES DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN SEPARADOR

PRESION (psi)	TEMPERATURA (°F)	GAS # CILINDRO
60	104	A-2882
60	104	A-2980
60	104	A-3127

PRESION (psi)	TEMPERATURA (°F)	ACEITE # CILINDRO
60	104	EOS-01
60	104	EOS-02

RESULTADOS

A continuación se relacionan los datos de las pruebas de control de calidad realizadas a los cilindros muestreados.

En la tabla 1 se muestran los resultados del análisis de la muestra de gas de separador y sus propiedades.

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24**CONTROL DE CALIDAD DE LAS MUESTRAS****GAS DE SEPARADOR**

NUMERO CILINDRO	CONDICIONES DE MUESTREO		APERTURA EN LABORATORIO	
	PRESION Psig	TEMPERATURA °F	PRESION Psig	TEMPERATURA °F
A-2882	60	104	56	65
A-2980	60	104	56	65
A-3127	60	104	56	65

ACEITE DE SEPARADOR

NUMERO CILINDRO	CONDICIONES DE MUESTREO		APERTURA EN LABORATORIO	
	PRESION Psig	TEMPERATURA °F	PRESION Psig	TEMPERATURA °F
EOS-01	60	104	56	65
EOS-02	60	104	56	65

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24**Tabla 1. Análisis de la muestra de gas de separador**

Componentes	A3127
Nitrógeno	0.3313
Dióxido de Carbono	0.5379
Metano	88.7385
Etano	4.3631
Propano	4.1746
Isobutano	0.3828
Normal Butano	0.5065
Isopentano	0.2304
Normal Pentano	0.2189
Hexanos	0.1731
Heptanos	0.1413
Octanos	0.0854
Nonanos	0.0436
Decanos	0.0193
Undecanos	0.0078
Dodecanos	0.0037
Tridecanos plus	0.0016
Benzeno	0.0050
Tolueno	0.0350

Propiedades calculadas con base en el análisis composicional

	A3127
MW (lb/lbmol)	19.1
G.E	0.658
GPM C3+ (Gal/MPC)	1.811
BTU Bruto (Bruto/PC)	1151.4
BTU Neto (Neto/PC)	1041.6

A continuación se muestra el resumen de los datos obtenidos en la prueba de liberación instantánea de gas realizada a la muestra de aceite de separador.

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

RESUMEN DE LA PRUEBA REALIZADA

Liberación Instantánea del Aceite de separador

Cilindro :	EOS-01
Densidad del Aceite (Sat) *	0.9414 g/cc
G.O.R. :	12.2 SCF/STB
Densidad del Aceite (dead):	0.9327 g/cc
Gavedad Especifica del gas	0.6684
Peso Molecular C30+ Utilizado	580 g/mol

* Determinada a 1000 psig y 65.8 °F

En las tablas 2 y 3 se encuentran los análisis de las muestras de gas y líquido obtenidas a partir de la liberación de gas realizada al aceite de separador. La tabla 4 muestra la composición total del aceite de separador muestreado.

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

Tabla 2. Análisis de la muestra de aceite de separador (gas)

Componentes	Mol %
Nitrógeno	0.0000
Dióxido de Carbono	0.5323
Metano	56.7819
Etano	9.1788
Propano	16.6712
Isobutano	2.1338
Normal Butano	7.7537
Isopentano	1.3681
Normal Pentano	1.8703
Hexanos	1.4191
Heptanos	1.0348
Octanos	0.6349
Nonanos	0.2273
Decanos	0.0952
Undecanos	0.0403
Dodecanos	0.0187
Tridecanos plus	0.0089
Benzeno	0.0406
Tolueno	0.1901

Propiedades calculadas con base en el análisis composicional

MW (lb/lbmol)	31.1
G.E	1.074
GPM C3+ (Gal/MPC)	10.463
BTU Bruto (Bruto/PC)	1794.8
BTU Neto (Neto/PC)	1642.0

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

Tabla 3. Análisis de la muestra de aceite de separador (aceite)

Componentes	Wt %
Nitrógeno	0.0000
Dióxido de Carbono	0.0000
Metano	0.0000
Etano	0.0000
Propano	0.0311
Isobutano	0.0169
Normal Butano	0.1037
Isopentano	0.0578
Normal Pentano	0.1048
Hexanos	0.2993
Heptanos	1.0894
Octanos	1.4307
Nonanos	1.5619
Decanos	1.5691
Undecanos	1.6459
Dodecanos	1.8258
Tridecanos	2.3194
Tetradecanos	2.1352
Pentadecanos	2.3948
Hexadecanos	2.3067
Heptadecanos	2.3706
Octadecanos	2.6238
Nonadecanos	2.6721
Eicosanos	2.3612
Henicosanos	2.2952
Docosanos	2.3042
Tricosanos	2.2291
Tetracosanos	2.1599
Pentacosanos	2.2293
Hexacosanos	1.8820
Heptacosanos	2.1787
Octacosanos	1.9141
Nonacosanos	2.1590
Triacotanos plus	51.6505
Benzeno	0.0174
Tolueno	0.0605

Sample Molecular Weight	319.57	lb/lb-mol
Sample Density @ 60 °F	0.9327	g/cc
°API of Residual Oil	20.21	

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24
Tabla 4. Composición total del aceite de separador

Componentes	Wt %	Mol %	MW	Densidad a 60 °F (g/cc)
Nitrógeno	0.0000	0.0000	28.01	0.8080
Dióxido de Carbono	0.0023	0.0161	44.01	0.8270
Metano	0.0888	1.7203	16.04	0.3000
Etano	0.0269	0.2781	30.07	0.3560
Propano	0.1026	0.7235	44.1	0.5080
Isobutano	0.0289	0.1546	58.12	0.5630
Normal Butano	0.1473	0.7878	58.12	0.5840
Isopentano	0.0672	0.2897	72.15	0.6250
Normal Pentano	0.1176	0.5068	72.15	0.6310
Hexanos	0.3100	1.1472	84	0.6850
Heptanos	1.0957	3.5478	96	0.7220
Octanos	1.4330	4.1628	107	0.7450
Nonanos	1.5598	4.0069	121	0.7640
Decanos	1.5655	3.6315	134	0.7780
Undecanos	1.6415	3.4709	147	0.7890
Dodecanos	1.8206	3.5148	161	0.8000
Tridecanos	2.3125	4.1074	175	0.8110
Tetradecanos	2.1287	3.4825	190	0.8220
Pentadecanos	2.3876	3.6026	206	0.8320
Hexadecanos	2.2997	3.2199	222	0.8390
Heptadecanos	2.3634	3.0997	237	0.8470
Octadecanos	2.6159	3.2394	251	0.8520
Nonadecanos	2.6640	3.1485	263	0.8570
Eicosanos	2.3541	2.6608	275	0.8620
Henicosanos	2.2882	2.4441	291	0.8670
Docosanos	2.2972	2.3411	305	0.8720
Tricosanos	2.2223	2.1722	318	0.8770
Tetracosanos	2.1533	2.0221	331	0.8810
Pentacosanos	2.2225	2.0024	345	0.8850
Hexacosanos	1.8763	1.6246	359	0.8890
Heptacosanos	2.1721	1.8052	374	0.8930
Octacosanos	1.9083	1.5287	388	0.8960
Nonacosanos	2.1524	1.6643	402	0.8990
Triacontanos plus	51.4938	27.5963	580	1.0711
Benzeno	0.0177	0.0704	78.1	0.8840
Tolueno	0.0620	0.2091	92.2	0.8720

PROPIEDADES DE LAS FRACCIONES PESADAS

Fracción Plus	Wt %	Mol %	MW	Densidad a 60 °F (g/cc)
C7 +	99.091	94.376	327.3	0.9482
C10+	94.940	82.379	358.2	0.9588
C20+	73.141	47.862	475.0	1.0070
C30+	51.494	27.596	580.0	1.0711

Sample Molecular Weight **310.83** lb/lb-mol
Sample Density @ 60 °F **0.9327** g/cc
°API of Residual Oil **20.21**

A continuación se muestra el resumen de los datos obtenidos en la prueba de liberación instantánea de gas realizada a la muestra recombinada.

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

RESUMEN DE LA PRUEBA REALIZADA

Liberación Instantánea del Fluido Recombinado

Cilindros utilizados :	A-3127 Muestra de gas EOS-01 Muestra de aceite
Densidad del Aceite (Sat) *	0.9179 g/cc
G.O.R. :	109.8 SCF/STB
Densidad del Aceite (dead):	0.9313 g/cc
Gavedad Especifica del gas	0.7142
Peso Molecular C30+ Utilizado	580 g/mol

* Determinada a 3500 psig y 135.8 °F

En las tablas 5 y 6 se muestran las composiciones del gas y líquido obtenidos en la liberación instantánea realizada a la muestra recombinada; en la tabla 7 se muestra la composición total del fluido recombinado.

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

Tabla 5. Análisis de la muestra recombinada (gas)

Componentes	Mol %
Nitrógeno	0.9979
Dióxido de Carbono	0.5169
Metano	85.1838
Etano	4.2368
Propano	5.0909
Isobutano	0.5776
Normal Butano	0.9962
Isopentano	0.5651
Normal Pentano	0.5821
Hexanos	0.4536
Heptanos	0.3465
Octanos	0.2212
Nonanos	0.0900
Decanos	0.0351
Undecanos	0.0138
Dodecanos	0.0068
Tridecanos plus	0.0027
Benzeno	0.0136
Tolueno	0.0693

RECOMBINACIÓN FLUIDO CANTAGALLO 24

Tabla 6. Análisis de la muestra recombinada (aceite)

Componentes	Wt %
Nitrógeno	0.0000
Dióxido de Carbono	0.0000
Metano	0.0000
Etano	0.0000
Propano	0.0538
Isobutano	0.0205
Normal Butano	0.1098
Isopentano	0.0659
Normal Pentano	0.1132
Hexanos	0.2629
Heptanos	1.0093
Octanos	1.4221
Nonanos	1.4574
Decanos	1.6630
Undecanos	1.7884
Dodecanos	1.8857
Tridecanos	2.2667
Tetradecanos	2.0584
Pentadecanos	2.2994
Hexadecanos	2.2626
Heptadecanos	2.3060
Octadecanos	2.5291
Nonadecanos	2.5958
Eicosanos	2.2877
Henicosanos	2.2307
Docosanos	2.2322
Tricosanos	2.2071
Tetracosanos	2.0420
Pentacosanos	2.1887
Hexacosanos	1.8232
Heptacosanos	2.0608
Octacosanos	1.9672
Nonacosanos	2.1221
Triacotanos plus	52.6049
Benzeno	0.0172
Tolueno	0.0461

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Control de Calidad de las Muestras

Las muestras de gas y aceite de superficie fueron chequeadas para verificar la representatividad de las muestras de acuerdo al *Procedimiento Técnico de Ensayo*

ICP- PTE-157005. Un volumen pequeño de muestra de aceite de separador (12 cc) se desplazó a un cilindro evacuado, a una presión establecida de 1000 psig, para medición de la densidad y análisis composicional.

La muestra de gas se llevó a condiciones de una sola fase, calentándola a una temperatura mayor y luego desplazando un volumen pequeño con el fin de ejecutar análisis cromatográfico.

Recombinación del fluido

El fluido fue recombinado usando como parámetro la relación gas – aceite (GOR) dada por el cliente. El equipo utilizado para la recombinación fue la celda de recombinación DBR–JEFRI, donde la muestra de líquido de separador se inyectó a 1000 psig.

La densidad del gas se calculó a partir del análisis composicional y se determinó el volumen de gas a inyectar en la celda, gas de separador a 65°F fue comprimido para llevarlo a 2000 psig y posteriormente fue transferido a la celda de recombinación Jefri.

El fluido fue recombinado, agitado y estabilizado a 3500 psig y a temperatura de yacimiento (135.8°F).

Análisis del Fluido recombinado

El Análisis del fluido recombinado fue obtenido separando un pequeño volumen de muestra recombinada en fases gas y líquido a condiciones estándar.

Dicho análisis se llevó a cabo realizando una liberación Instantánea simple, donde una porción del fluido (15 cc) se desplazó a un cilindro pequeño de 75 cc. El

cilindro se conectó al sistema de separación y a través de una válvula de flujo controlado el gas liberado se capturó dentro de un pyc.

Después de que el sistema alcanzó el equilibrio completamente y no se presentó mas liberación de gas de la solución, el volumen de gas y condensado se midió, se corrigió a condiciones estándar y se determinó su densidad.

Se realizaron análisis cromatográficos del gas y del líquido con el fin de obtener la composición total del fluido mediante recombinación matemática de las composiciones del gas y del líquido de acuerdo a la relación obtenida en la liberación instantánea.

ANEXO J

PRESIÓN DE BURBUJA DEL FLUIDO CANTAGALLO-24



RESULTADOS PRESIÓN DE BURBUJA CANTAGALLO 24

Fecha de reporte:

Febrero 16 de 2009

Realizado por:

Libia Sofia Sandoval R.

Ing. laboratorio PVT

PRESIÓN DE BURBUJA CANTAGALLO 24

Este reporte presenta los resultados experimentales obtenidos para el fluido recombinado del pozo Cantagallo 24, muestreado el día 26 de diciembre de 2008, por personal del laboratorio PV-OPC del Instituto Colombiano del Petróleo.

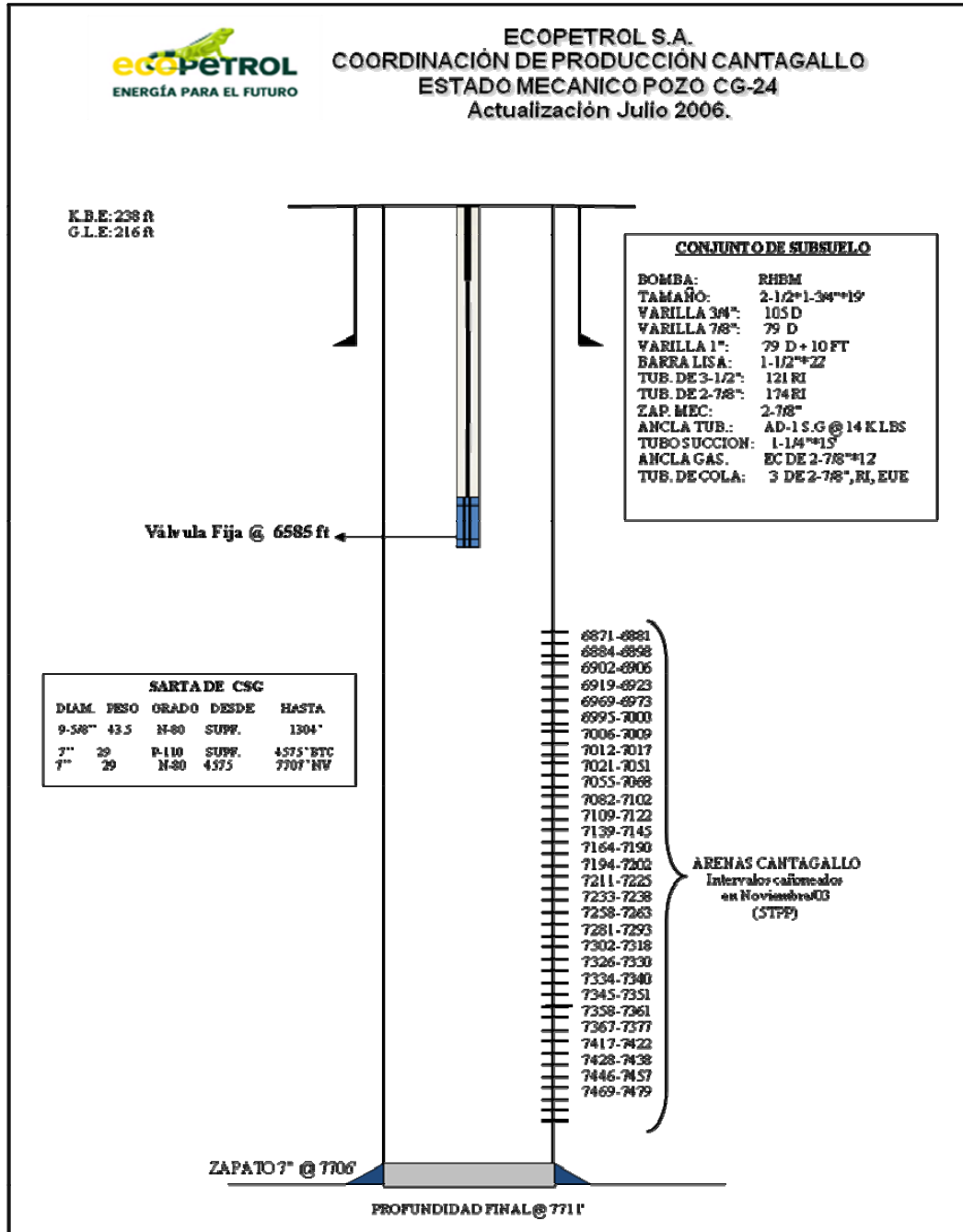
La muestra recombinada se sometió a expansión isobárica a 4000 psi desde la temperatura de laboratorio hasta la temperatura de yacimiento (138.5 °F) con lo

cual se logró determinar el Coeficiente de expansión térmica Isobárica en **0.0002957** (1/°F).

Una prueba de expansión a composición constante realizada al fluido recombinado permitió establecer la presión de burbuja en **964** psia a la temperatura de yacimiento (138.5°F) y adicionalmente determinar la compresibilidad del fluido en **1.15397E-05** (1/psi), desde una presión de 4000 psi hasta la presión de burbuja.

ANEXO K

ESTADO MECANICO DEL POZO Y CALCULOS PARA ENCONTRAR EL POTENCIAL DE FLUJO GENERADO POR ASFALTENOS DE CRUDO CANTAGALLO-24



PROPIEDADES CRUDO CANTAGALLO-24		
°API		20.5
Caudal (m3/s)		4.4775E-4
Área transversal (m2)		2.4828E-2
Velocidad promedio en tubería (m/s)	v_{prom}	1.8033E-2
Diámetro de la tubería (m)	d	0.1778
Viscosidad de crudo (Pa.s)	μ	0.01
Densidad del crudo (Kg/m3)	ρ_{crudo}	930.92
Constante dieléctrica	D	2.46
Diámetro de partícula de asfalteno (m)	d_p	16.89E-06
Potencial zeta (voltios)	Z	0.524
Carga de partícula (Coulombios)	q_p	1.3512E-16
Longitud del conducto (m)	L	2007.108
Conductividad eléctrica del crudo	k	50E-12
Densidad de carga (Kg/m3)		2.199E-10
$\rho_{c\ arg\ a}$		
% de asfaltenos	W_A	5.3

$$Re = \frac{d v_{prom} \rho_{crudo}}{\mu} = 299.63$$

Se tiene un número de Reynolds menor a 2100 por tanto el flujo en el pozo Cantagallo-24 es totalmente laminar, y se utiliza la siguiente relación para hallar el Potencial de flujo que se genera en este pozo.

$$E = \frac{\rho_{c\ arg\ a} v_{prom} L}{k} = 159.84 \text{ Voltios}$$

Para hallar el potencial de flujo se necesita hallar la densidad de carga, que es igual a:

$$\rho_{c\ arg\ a} = q_p \rho_{crudo} \left(\frac{6W_A}{\rho_A \pi d_p^3} \right) = 2.199E-10 \text{ Coulombios/m}^3 \text{ de crudo}$$

La magnitud de carga de la partícula de asfalteno q_p es obtenida mediante relaciones matemáticas a partir del valor de potencial zeta y tamaño de partícula d_p , esta relación es la siguiente:

$$q_p = 4\pi Z D d_p = 1.3512E-16 \text{Coulombios}$$

ANEXO L

DISEÑO DE LOS PISTONES LIBRES DEL EQUIPO LOOP DE ASFALTENOS

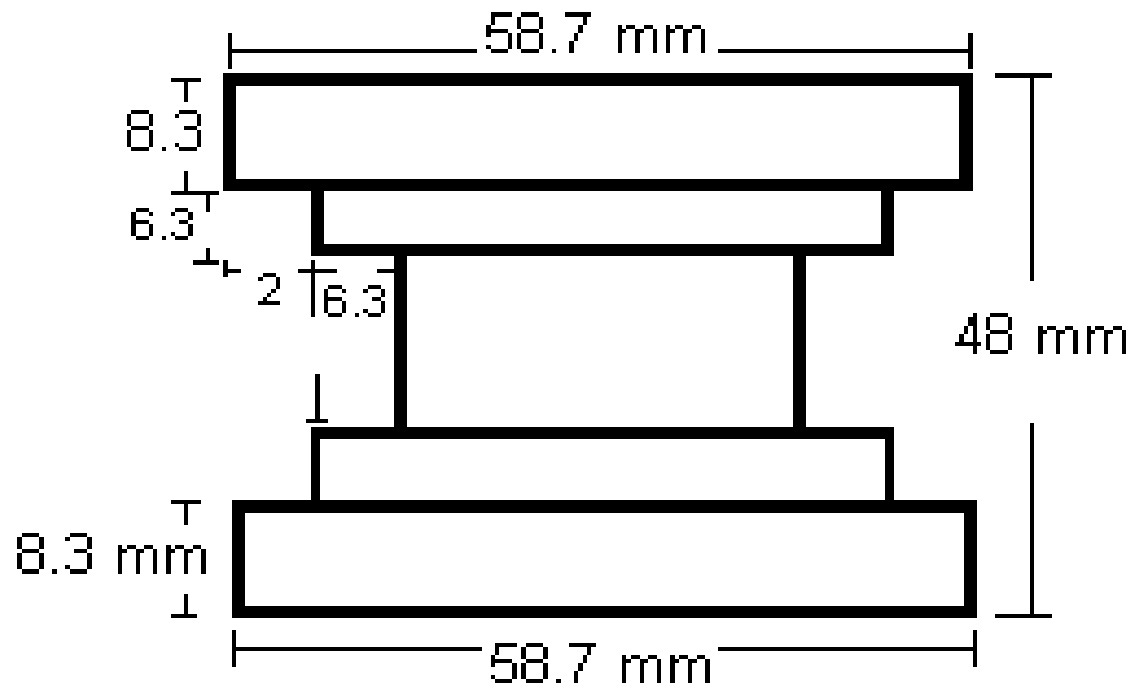


EMPAQUES



MATERIAL DEL PISTON: Acero Inoxidable

REFERENCIA COMERCIAL DEL EMPAQUE: Empaque compacto de 60 mm
DBM 236173



Plano del pistón

El pistón es asimétrico, y las medidas mostradas en el plano están dadas en milímetros.

DIAMETRO DEL PISTON: 58.7 mm

ANCHO DEL PISTON: 48 mm