

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA SELECCIÓN
DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS EN CAMPO
RUBIALES**

**JUAN CARLOS CELY AVILA
SERVANDO RODRIGUEZ RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2012**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA SELECCIÓN
DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS EN CAMPO
RUBIALES**

**JUAN CARLOS CELY AVILA
SERVANDO RODRIGUEZ RODRIGUEZ.**

**Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Gerencia de
Hidrocarburos**

**Director
IVÁN ERNESTO BARRAGÁN GUTIERREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

"Damos gracias a nuestros Familiares y Amigos quienes nos acompañaron a lo largo de esta especialización y dedicamos este trabajo a ellos porque juntos logramos el objetivo"

Juan Carlos Cely Avila y Servando Rodríguez Rodríguez

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 14 |
| 2. JUSTIFICACION..... | 16 |
| 3. OBJETIVOS..... | 18 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL | 18 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 18 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 19 |
| 4.1 GENERALIDADES DE CAMPO RUBIALES | 19 |
| 4.1.1 Ubicación Geográfica | 19 |
| 4.1.2 Caracterización De Fluidos | 20 |
| 4.1.3 Historia de producción Campo Rubiales..... | 21 |
| 4.1.4 Sistemas de Levantamiento Artificial..... | 21 |
| 4.2 RESIDUOS ACEITOSOS PRODUCIDOS EN CAMPO RUBIALES | 22 |
| 4.3 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS A NIVEL MICROSCÓPICO | 23 |
| 4.4 GENERACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS DE PRODUCCIÓN EN CAMPO RUBIALES..... | 25 |
| 4.5 EMULSIONES | 27 |
| 4.5.1 Definición | 27 |
| 4.5.2 Características | 29 |
| 4.5.3 Formación de las Emulsiones | 29 |
| 4.5.4 Clasificación de las Emulsiones. | 31 |
| 4.5.4.1 Por la composición de las fases que la forman..... | 31 |
| 4.5.4.2 Relación de volúmenes de las fases. | 31 |
| 4.5.4.3 Naturaleza del emulsificante. | 32 |
| 4.5.4.4 Regla de Bancroft..... | 32 |
| 4.5.4.5 Por el tamaño de gotícula..... | 32 |
| 4.5.5 Agentes emulsificantes y estabilizadores. | 32 |
| 4.6 FACTORES QUE AFECTAN LA EMULSIÓN | 33 |
| 4.6.1 Tensión interfacial. | 33 |
| 4.6.2 Viscosidad de la fase externa..... | 33 |
| 4.6.3 Tamaño de la gota. | 33 |
| 4.6.4 Relación de volumen de fases. | 34 |
| 4.6.5 Temperatura. | 34 |
| 4.6.6 pH. | 34 |
| 4.6.7 Envejecimiento de la interfase..... | 34 |
| 4.6.8 Salinidad de la salmuera. | 35 |
| 4.6.9 Tipo de aceite..... | 35 |
| 4.6.10 Diferencia de densidad..... | 35 |
| 4.7 AGENTES EMULSIFICANTES..... | 35 |
| 4.7.1 Clasificación agentes emulsificantes. | 36 |
| 4.8 PRINCIPIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS | 36 |
| 4.8.1 Reducción de volumen..... | 37 |
| 4.8.2 Desorción térmica. | 37 |
| 4.8.3 Descripción del proceso de desorción térmica indirecto y características técnicas..... | 38 |
| 4.8.4 Beneficios del tratamiento por desorción térmica de residuos..... | 39 |

| | |
|--|----|
| 4.8.5 Extracción con solvente. | 42 |
| 4.8.6 Estabilización / Solidificación..... | 42 |
| 4.8.7 Utilización como combustible. | 42 |
| 4.8.8 Incineración..... | 43 |
| 4.8.9 Biotecnología. | 43 |
| 5. <i>TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS</i> | 44 |
| 5.2 ANÁLISIS DE LOS PRINCIPIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS | 44 |
| 5.2 CENTRIFUGACIÓN..... | 48 |
| 5.2.1 Centrifuga Horizontal..... | 48 |
| 5.2.2 Centrifuga vertical de discos. | 50 |
| 5.2.2.1 Procesos unitarios..... | 51 |
| 5.2.2.2 Proceso térmico | 51 |
| 5.2.2.3 Proceso químico | 52 |
| 5.2.2.4 Extracción por solvente | 52 |
| 5.2.2.5 Filtración | 53 |
| 5.3 DESORCIÓN TÉRMICA | 53 |
| 5.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS..... | 54 |
| 5.4.1 Reducción de Volumen | 54 |
| 5.4.2 Extracción por Solvente | 56 |
| 5.4.3 Sistema Combinado | 58 |
| 5.4.4 Volúmenes a Tratar..... | 61 |
| 6. <i>EVALUACIÓN TÉCNICA</i> | 64 |
| 6.1 DESORCIÓN TÉRMICA | 64 |
| 6.2 REDUCCIÓN DE VOLUMEN..... | 65 |
| 6.3 EXTRACCIÓN POR SOLVENTE..... | 66 |
| 6.4 SISTEMA COMBINADO | 67 |
| 6.5 ANÁLISIS EVALUACIÓN TÉCNICA | 68 |
| 7. <i>EVALUACIÓN FINANCIERA</i> | 70 |
| 7.1 CONDICIONES PARA EL ANÁLISIS..... | 70 |
| 7.1.1 Capacidad de tratamiento | 70 |
| 7.2 CAPEX | 71 |
| 7.3 OPEX PLANTA ADQUIRIDA | 72 |
| 7.4 OPEX PLANTA ALQUILADA | 73 |
| 7.4.1 Costo operación sistema de tratamiento adquirido..... | 75 |
| 7.4.2 Costo operación sistema de tratamiento alquilado | 76 |
| CONCLUSIONES..... | 78 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 79 |

TABLA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación geográfica Campo Rubiales..... | 19 |
| Figura 2. Muestra 1. Residuos aceitosos Campo Rubiales | 23 |
| Figura 3. Muestra 2. Residuos aceitosos Campo Rubiales | 23 |
| Figura 4. Muestra 3. Residuos aceitosos Campo Rubiales | 24 |
| Figura 5. Muestra 3. Residuos aceitosos Campo Rubiales | 24 |
| Figura 6. Celda de flotación..... | 26 |
| Figura 7. Filtros..... | 27 |
| Figura 8. Emulsión crudo-agua | 28 |
| Figura 9. Proceso de Desorción Térmica..... | 38 |
| Figura 10. Proceso de Reutilización y Recuperación de Aceites..... | 41 |
| Figura 11. Centrifuga Decanter..... | 49 |
| Figura 12. Centrifuga Tricanter | 50 |
| Figura 13. Centrifuga Vertical..... | 51 |
| Figura 14. Diagrama de proceso reducción de volumen | 55 |
| Figura 15. Diagrama de proceso extracción por solvente | 57 |
| Figura 16. Diagrama de proceso sistema combinado..... | 59 |
| Figura 17. Costo promedio tratamiento por barril tratado..... | 77 |
| Figura 18. Costo acumulado tratamiento por barril tratado..... | 77 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Datos básicos de yacimiento Campo Rubiales..... | 20 |
| Tabla 2. Cuadro de resumen análisis de principios de tratamiento | 47 |
| Tabla 3. Parámetros de operación del sistema de reducción de volumen | 55 |
| Tabla 4. Parámetros de operación del sistema extracción por solvente..... | 57 |
| Tabla 5. Parámetros de operación del sistema combinado | 60 |
| Tabla 6. Parámetros de operación del sistema combinado | 60 |
| Tabla 7. Parámetros de operación del sistema combinado | 60 |
| Tabla 8. Tabla años 2010 y 2011 volúmenes procesados | 62 |
| Tabla 9. Volúmenes procesados mes a mes año 2011 | 63 |
| Tabla 10. Volúmenes a procesar | 71 |
| Tabla 11. OPEX para planta adquirida por Metapetroleum Corp..... | 72 |
| Tabla 12. Personal requerido para la operación del sistema de tratamiento | 72 |
| Tabla 13. Personal requerido para la operación del sistema de tratamiento..... | 73 |
| Tabla 14. OPEX para planta alquilada por Metapetroleum Corp. | 73 |
| Tabla 15. Tabla OPEX a 10 años compra sistema de tratamiento de residuos aceitosos..... | 75 |
| Tabla 16. Tabla OPEX a 10 años alquiler sistema de tratamiento de residuos aceitosos..... | 76 |

RESUMEN

Título: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA PARA LA SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS EN CAMPO RUBIALES*

Autor(es): Cely Avila Juan Carlos, Rodriguez Rodriguez Servando **

Palabras Clave: Sistemas de Tratamiento, Residuos Aceitosos, Campo Rubiales, Emulsión.

La industria del petrolera ha impactado positivamente durante la última década el desarrollo económico del país, lo cual se evidencia en las cifras suministradas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH, presentadas en el informe de rendición de cuentas del año 2011, en el que se observa el aumento en adquisición de sísmica en cuencas a explorar, la cantidad de pozos exploratorios perforados y la alta tasa de éxito. Motivo por el cual, Colombia se ha convertido en un país que se encuentra a la vanguardia de nuevas tecnologías en optimización de procesos de producción y tratamiento en la industria petrolera.

Este documento busca presentar una evaluación técnico-económica, tomando en cuenta los diferentes equipos que se están utilizando en Campo Rubiales para el tratamiento de borras de producción. La evaluación técnica se llevo a cabo con diferentes opciones de equipos que cumplen con el requerimiento de procesamiento en volúmenes y calidad que exige el mercado actual, esencialmente en el área de transporte lo cual requiere cumplimiento de algunos estándares de calidad como viscosidad a la temperatura de referencia -ASTM D445 o D446-, presión de vapor -ASTM D323-, contenido de sal -ASTM D3230- y otras características importantes en la etapa del midstream. Adicionalmente, se realiza una evaluación económica mediante la cual se estudia la opción más viable y que represente un ahorro significativo en los costos operativos para la organización.

* Monografía para optar al título de Especialista en Gerencia de Hidrocarburos

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Ivan Barragan

ABSTRACT

Title: TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY STUDY FOR SELECTION TREATMENT SYSTEM OILY WASTE AT RUBIALES FIELD*

Author(s): Cely Avila Juan Carlos, Rodriguez Rodriguez Servando **

Keywords: Treatment Systems, Oil Waste, Rubiales Field, Emulsion.

The Oil Industry has positively impacted over the last decade the country's economic development, that is evident in the data provided by the National Hydrocarbons Agency, NHA, presented in the financial statement report of 2011, in which it is observed the increase of seismic acquisitions in river to explore, the number of exploratory wells that were drilled and the high success rate, Colombia has become an country that uses advanced technologies for the optimization of production processes and the treatment in the oil industry.

This paper presents a technical and economic evaluation, taking into consideration the different systems that are being used at the Rubiales Field production treatment. The technical evaluation was done with different equipment options that satisfy the processing requirements in volume and quality demanded by the actual market, mainly in the transport area, which requires compliance of certain quality standards like viscosity at the temperature of reference -ASTM D445 or D446- steam pressure -ASTM D323-, salt content -ASTM D3230- and other important features internationally regulated in this stage. Additionally, it is performed an economic evaluation to study the most viable option that represents a significant saving in the operating costs for the organization. In base of that, the best option is to invest in equipment.

* Project Degree

** Physicochemical Engineering Faculty. School of Petroleum Engineering. Director: Ivan Barragan

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la demanda energética a nivel mundial ha incrementado la producción de crudo y Colombia siendo uno de los países productores no ha sido rezagado de este crecimiento. Por lo tanto, las empresas operadoras líderes en el país han procurado llevar su producción a los niveles más altos en poco tiempo con un gran aprovechamiento de nuevas tecnologías.

Pacific Rubiales Energy, y su unidad de negocio, Metapetroleum Corp. considerando las exigencias del mercado en lo que respecta a la calidad del crudo producido y comprometida con la responsabilidad social corporativa, se ha preocupado por el tratamiento adecuado de las borras de producción, las cuales al no ser tratadas de la manera adecuada son un problema de gran magnitud. Por esta razón surge como una alternativa para la compañía el plantear este proyecto, cuyo propósito es desarrollar una evaluación precisa y crítica a los equipos en funcionamiento actualmente en Campo Rubiales partiendo de las experiencias y los estudios realizados anteriormente, que permita mejorar la calidad del crudo producido y la disposición de los residuos generados, afectando positivamente el retorno de capital efectivo.

Con el propósito de cumplir con el alcance planteado, este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: Inicialmente se describe el planteamiento del problema, la justificación y se plantean los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este trabajo. En el capítulo 3 se elaboró el marco teórico que fundamenta los conceptos básicos que permitirán comprender los diferentes sistemas de tratamiento. En los capítulos siguientes se realiza la evaluación técnica y económica de los diferentes sistemas. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado, en donde se plantea la mejor alternativa para el tratamiento de los residuos aceitosos en el Campo Rubiales.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo económico del país en la última década se ha visto fuertemente influenciado por el desarrollo de la industria petrolera e inversiones de capital extranjero así como lo indica la rendición de cuentas de la ANH 2011 donde se ve claramente el aumento en adquisición de sísmica en cuencas a explorar, la cantidad de pozos exploratorios perforados y su gran alta tasa de éxito por parte de empresas extrajeras y la estatal Ecopetrol, por lo cual se ha convertido en un país que se encuentra a la vanguardia de nuevas tecnologías y optimización de procesos, de producción y tratamiento en la industria petrolera.

Generalmente los yacimientos de crudo pesado tienen asociados otros elementos a su producción, como lo puede ser gas, agua y algunos sólidos como arenas. Aunque en condiciones –atmosféricas- el agua y el crudo no son miscibles al modificar esas condiciones por procesos inducidos, en algunas ocasiones pueden llegar a formar una emulsión bastante uniforme y estable, por lo es un problema de gran preocupación durante la etapa que vive el crudo en los CPF.

En Campo Rubiales se producen un crudo de bajo API (12 °API) con un BS&W alto (80%), las temperaturas altas durante el transporte por la líneas de flujo internas del campo, los sistemas de levantamiento artificial utilizados en cada uno de los pozos; son condiciones que generarán una emulsión de crudo y agua de una manera estable. Es por eso que el tratamiento de fluidos aceitosos o borras de producción en Campo Rubiales, se ha vuelto una preocupación constante en ámbitos técnicos, económicos y ambientales.

En ocasiones la evaluación errónea de factores técnicos, cómo las químicas utilizadas para la separación de las fases de las emulsiones o la evaluación correcta de la modificación de las propiedades físicas del crudo para insertar en un

proceso de tratamiento hace que el tratamiento de estos fluidos no sea el mejor y se produzca repetición en las etapas del tratamiento o un claro desaprovechamiento de los equipos adquiridos para este proceso; así como una repercusión económica en la utilización de capital para solucionar los problemas técnicos no previstos.

2. JUSTIFICACIÓN

La demanda de crudo que tiene el mercado internacional como lo reporta la British Petroleum en su Statistical Review 2011 con el crecimiento de la demanda energética a nivel mundial y el desbalance que hay en el consumo que tiene países desarrollados con respecto a su producción; el desarrollo económico que ha tenido el país desde que su economía migró al ámbito industrial con reformas a la contratación y especialmente la del petrolero los datos presentados por el Ministerio de Minas y Energía lo demuestra “Prueba del éxito de su gestión y de la confianza inversionista que ha generado el Gobierno Nacional, es el aumento de los Contratos de Exploración y Producción, E&P y de los Contratos de Evaluación Técnica, TEA, siendo especialmente sobresaliente el incremento de los primeros. Cuando para 2006 se habían asignado 84 contratos E&P, para 2010 la cuenta ya iba en 230, es decir, superamos en un 273% el número de contratos en tan solo 4 años. Por su parte, los TEA aumentaron de 47 a 80. Para el 2010 se estarán ofreciendo otros 225 Bloques representados en 52 millones de hectáreas.”¹ ; esto ha hecho que las empresas operadoras líderes en el país lleven su producción a niveles más altos en poco tiempo con un gran aprovechamiento de nuevas tecnologías.

Es por eso que Pacific Rubiales Energy, y su unidad de negocio, Metapetroleum Corp. como gran productora de crudo pesado en el país se ha visto con la necesidad de reevaluar proyectos existentes, equipos en funcionamiento y otros factores que den un crecimiento a su producción, considerando las necesidades del mercado en su exigencia frente a la calidad del crudo producido y también a la responsabilidad social corporativa implementada por la empresa con ocho objetivos estratégicos resaltando la operación en armonía con el medio ambiente ha generado el gran crecimiento de la empresa durante los últimos años.

¹ Tomado del Comunicado presentado por el Ministerio de Minas y Energía llamado: Hidrocarburos y biocombustibles: desarrollo económico del país.

La borrar de producción al no ser tratadas de una manera acorde con los estándares de calidad que puede necesitar el mercado, o exigencias ambientales son un problema de gran magnitud, es por eso que el proyecto se desarrolla con el fin de dar una evaluación precisa y crítica a los equipos en funcionamiento actualmente en Campo Rubiales basados en experiencias y estudios realizados anteriormente, obteniendo como resultado una mejora en la calidad de producción, en volúmenes, disposición de residuos y claramente un retorno de capital efectivo.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un estudio de Factibilidad Técnico y Económico que determine la viabilidad de implementar un sistema de tratamiento de residuos aceitosos en Campo Rubiales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las propiedades fisicoquímicas de los residuos aceitosos producidos en campo.
- Identificar y seleccionar sistemas de tratamiento de residuos aceitosos que satisfagan las condiciones de producción del campo.
- Evaluar resultados de pruebas piloto de los (3) diferentes tipos de sistemas de tratamiento seleccionados.
- Realizar la evaluación financiera de los diferentes sistemas de tratamiento de residuos aceitosos seleccionados.
- En cada una de las alternativas presentar el plan de inversiones
- Evaluar de acuerdo con los resultados la conveniencia de alquilar los equipos y pagar tarifa/barril tratado o realizar las inversiones para compra de equipos, instalación y puesta en marcha.
- Seleccionar el sistema de tratamiento de residuos aceitosos que técnicamente, ambiental y financieramente le convenga más al campo.

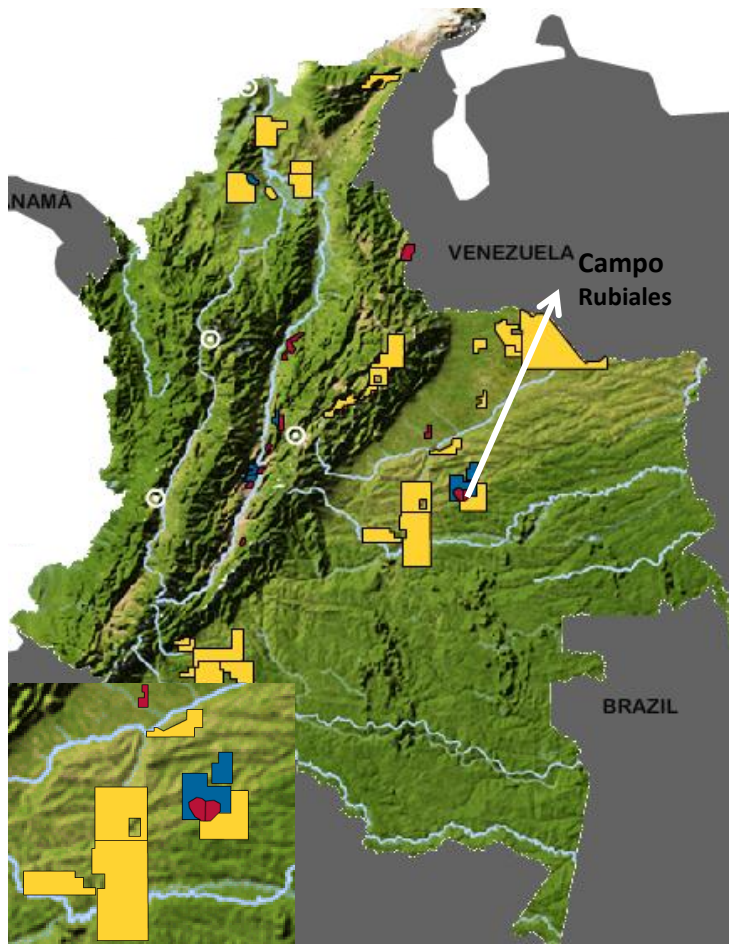
4. MARCO TEÓRICO

4.1 GENERALIDADES DE CAMPO RUBIALES

4.1.1 Ubicación Geográfica.

Campo Rubiales se encuentra en la zona sur de la cuenca de los Llanos Orientales, departamento del Meta. Campo Rubiales se encuentra bajo la jurisdicción del Municipio de Puerto Gaitán.

Figura 1. Ubicación geográfica Campo Rubiales



Fuente: Página Pacific Rubiales Energy 2012

La cuenca de los Llanos Orientales está ubicada con la frontera de Venezuela, limita al oeste con la Falla Frontal Llanera, al norte se extiende hasta el estado de Barinas (Venezuela) un poco más allá del Rio Arauca, al suroeste por la sierra de la Macarena y al sur y suroeste con afloramientos de rocas ígneas presentes.

4.1.2 Caracterización De Fluidos

La caracterización de los fluidos producidos y su yacimiento se muestran en la siguiente tabla, teniendo en cuenta aspectos relevantes para el proyecto.

Tabla 1. Datos básicos de yacimiento Campo Rubiales

| Datos de yacimiento | |
|---|--|
| ÁREA DE CAMPO | 56.900 Ha |
| FORMACIÓN PRODUCTORA | FORMACIÓN CARBONERA – UNIDAD ARENISCAS BASALES |
| PROFUNDIDAD PROMEDIO DE LA UNIDAD ARENISCAS BASALES | 2700 PIES TVD |
| POROSIDAD TOTAL | 20 a 34 % |
| POROSIDAD EFECTIVA | 25 a 32% |
| PERMEABILIDAD | 5 A 10 DARCYS |
| ESPESOR DE LA FORMACIÓN | 130-200 PIES |
| ESPESOR NETO PETROLIFERO | 10-70 PIES |
| GRAVEDAD DEL CRUDO | 12.5 |
| SWI | 25-30 % |
| PRESIÓN DE BURBUJA | 80 psi |
| VISCOSIDAD @ TEMP. YAC | 730.98 Cp @ 145 ° F (RB-53) |
| Características agua de formación | |
| RESISTIVIDAD DEL AGUA DE FORMACIÓN | 5.85 Ohm/m @ 60 ° F |
| SALINIDAD DEL AGUA DE FORMACIÓN | 900 – 1000 ppm |
| Características del petróleo | |
| RESISTIVIDAD ZONA PETRÓLEO | 60 hasta 2000 Ohm/m |
| RELACIÓN AGUA PETRÓLEO | 4.2 barriles agua por barril de petróleo |

Fuente: Pacific Rubiales Energy - MPC. Gerencia de yacimientos. Enero 2011.

4.1.3 Historia de producción Campo Rubiales.

Campo Rubiales comenzó su explotación con la perforación del pozo Rubiales-1, por la compañía Intercol una subsidiaria en Colombia de la Compañía Exxon. En el año de 1988, la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), y la Compañías Asociadas Tethys Petroleum, Turnsector y Astralstake (Las Asociadas), firman los contratos de Participación de Riesgo Rubiales y Asociación Pirirí.

En el año de 1995 se firmaron los contratos de Participación de Riesgo Rubiales y Asociación Pirirí, las Asociadas inician la explotación bajo la modalidad de Solo Riesgo, es decir, de manera autónoma.

La producción de Campo Rubiales desde sus inicios ha sido una producción rápida e intensa, en 2003 cuando Metapetroleum Corp. tomó el campo para operarlo con una producción diaria de 2.630 BOPD con un 69% de BS&W comenzó el inicio de una nueva era para la producción de petróleo en Colombia y para la empresa, en un año su producción ya alcanzaba los 5.040 BOPD con un BS&W de 70.8% y 21 pozos activos.

Progresivamente la empresa y el campo ha logrado metas de producción pasando por los 12K en el 2006, los 17K en el 2007 antes de lo previsto, finalmente en abril del 2011 cumple su meta de 200K un logro histórico para la empresa, el campo y el país.

4.1.4 Sistemas de Levantamiento Artificial

Uno de los factores determinantes en la producción de Campo Rubiales ha sido los diferentes tipos de levantamiento artificial utilizados en los pozos de este, inicialmente se trabajó con equipos de cavidades progresivas PCP, pero en el año 2002 entra el sistema de bombas electrosumergibles ESP, en 2003 se realiza una

prueba piloto sobre la instalación de este sistema y finalmente en 2004 se ponen en marcha 7 pozos migrando de PCP a ESP con muy buenos resultados.

Los pozos horizontales se determinan a completar con bombas electrosumergibles, y los pozos verticales con bombas de cavidades progresivas, dando un buen desarrollo en los cluster de producción.

4.2 RESIDUOS ACEITOSOS PRODUCIDOS EN CAMPO RUBIALES

Los residuos aceitosos o borras de producción son producidos en Campo Rubiales después de la clarificación del agua, durante el tratamiento que se le realiza, estas borras se caracterizan por ser una emulsión de alta estabilidad compuesta por agua, crudo y algunos finos que se filtran durante el tratamiento del agua.

La formación de estos residuos se da debido a fallas que puede surgir durante el tratamiento de agua, donde partículas de solidos de origen inorgánico se generan durante la clarificación del agua, así como partículas provenientes del crudo producido se impregnan de finos y otros materiales formando grandes floculos difíciles de romper.

La modificación de las propiedades físicas forzosamente por los procesos que hacen parte del tratamiento poco a poco lleva a que se forme una emulsión estable, una emulsión complicada con estabilización por su alta densidad y contenido de finos hace que definitivamente el tratamiento de este fluido sea un proceso de suma importancia para la empresa.

Es normal que dentro del tratamiento de agua se precipiten sólidos dado la adición de químicos para flocular y coagular las partículas.

4.3 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS A NIVEL MICROSCÓPICO

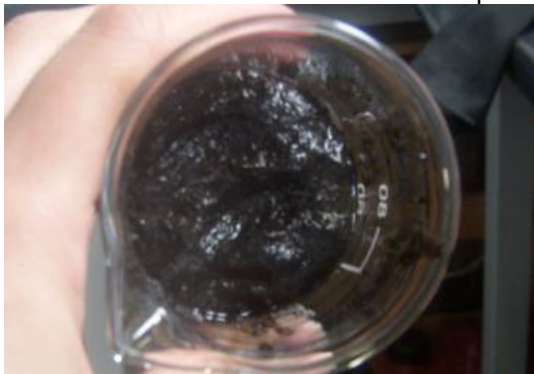
Los datos presentados en este análisis fueron tomados de estudios realizados previamente en Campo Rubiales, la muestra de fluidos tomada en una piscina de uno de los CPF, en la Muestra 1 se observó una gran cantidad de agua libre, con floculos de color negra en la parte superior e inferior del recipiente. La muestra 2 presentó una sola fase de color negro estable sin presencia de agua libre.

Figura 2. Muestra 1. Residuos aceitosos Campo Rubiales



Fuente: Estudio fluidos aceitosos Campo Rubiales. Área Tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

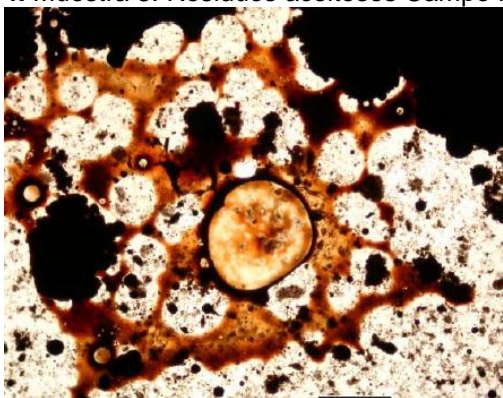
Figura 3. Muestra 2. Residuos aceitosos Campo Rubiales



Fuente Estudio fluidos aceitosos Campo Rubiales. Área Tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

Las vistas en de la Muestra 1, muestra claramente unas secciones de color negro en la parte superior relativamente homogéneas, en las cuales solo se observa una fase del fluido, esto corresponde a la mayor concentración de crudo presente en la solución analizada; como se muestra en la a continuación.

Figura 4. Muestra 3. Residuos aceitosos Campo Rubiales

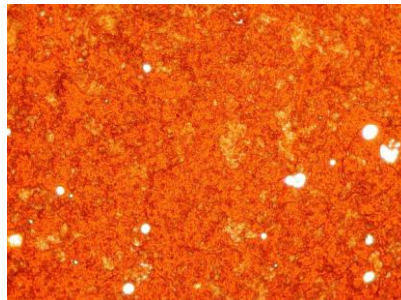


Fuente: Estudio fluidos aceitosos Campo Rubiales. Área Tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

Ahora bien esta fotografía es algo confusa pero se puede identificar que se presentan varias emulsiones directas e inversas en la misma muestra, en cuanto a la variación de colores en el fluido se debe al uso de polímeros en el tratamiento del agua. La utilización de polímeros en el agua como algún otro tipo de químico hace que las propiedades de este fluido cambien por eso se hace mención al cambio del color en el caso del agua el cual es producido por el polímero manejado en el proceso.

Ahora bien en la segunda muestra cambia drásticamente en panorama frente a la emulsión que se observa ya que es una emulsión estable, de agua dispersa en aceite parcialmente, identificando como fase continua el aceite y la dispersa el agua como se muestra a continuación.

Figura 5. Muestra 3. Residuos aceitosos Campo Rubiales



Fuente: Estudio fluidos aceitosos Campo Rubiales. Área Tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

De acuerdo con los análisis que fueron realizados se puede concluir que la solución producida, conocida como borras de producción, es una solución compleja con emulsiones directas e inversas, con diferentes compuestos aparte del agua y el aceite y química establecida para el tratamiento como polímeros.

4.4 GENERACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS DE PRODUCCIÓN EN CAMPO RUBIALES

En Campo Rubiales la relación de agua tratada por cada barril de aceite producido es de 4:2. Por esta razón el sistema de tratamiento de agua es de gran importancia ya que se tiene que cumplir con exigencias ambientales tanto para la disposición al ambiente como hacia el subsuelo como se indica en la Resolución 0318 de 2000 por la cual se establecen las condiciones técnicas para el manejo, almacenamiento, transporte, utilización y la disposición de aceites usados.

Se debe tomar en consideración en que parte del tratamiento se produce este tipo de residuos, que equipo finalmente los generan para poder realizar una evaluación crítica y concisa de lo que se quiere optimizar. Es por eso que se presenta una descripción de los equipos utilizados, parámetros de funcionamiento y capacidades de tratamiento.

Celdas de Flotación: Cada celda de flotación consta de 5 compartimientos con cuatro unidades de agitación, las cuales poseen unas cámaras por las cuales se les inyecta aire por la parte inferior del equipo, con el fin de que las burbujas asciendan el aceite a la superficie del fluido por la menor densidad al compararlo con el agua o los sólidos.

El aceite es recuperado en cajones laterales, los cuales tienen controladores por nivel alto y bajo desde el CCM.

El aceite recuperado en Campo Rubiales tiene dos opciones de tratamiento después de pasar por este equipo, el primero es enviarlo al manifold de producción donde se vuelve a iniciar el tratamiento de crudo, o enviarlo a las piscinas de retrolavado, este segundo paso se da cuando en el tratamiento posterior se utilizaron coagulantes o floculantes.

Las celdas de flotación utilizadas en Campo Rubiales tienen una capacidad que se encuentran entre 100.000 y 150.000 BWPD contando con cerca de 6 a 7 unidades por CPF.

Figura 6. Celda de flotación



Fuente: Manual de Operaciones CPF-2.

En la flotación provocada, se aprovecha la capacidad que tienen ciertas partículas sólidas o líquidas para unirse a burbujas de gas (generalmente, aire) y formar conjuntos partícula–gas menos densos que el líquido que constituye la fase dispersa.

La resultante de las fuerzas (gravedad, empuje de Arquímedes, fuerza de resistencia) conduce a un desplazamiento ascendente de los conjuntos partícula–gas que se concentran en la superficie libre del líquido.

Filtros: Los filtros instalados en Campo Rubiales son de lecho cascara de nuez; se debe tener en cuenta que por cada celda de flotación corresponden dos filtros en el caso de las celdas de 100.000 BWPD corresponderán dos filtros de 50.000

BWPD, mientras que para las celdas de 150.000 BWPD corresponderán tres filtros de 50.000 BWPD cada uno.

En los filtros se realizan varios procesos como lo son: filtración, retrolavado, agitación, decantación y normalización

Figura 7. Filtros



Fuente: Manual de Operaciones CPF-2

Decantadores: Los decantadores tienen asociados a los filtros directamente, cada filtro tienen tantos decantadores como sea necesario para poder tratar el volumen requerido. En este equipo se realiza un proceso de decantación donde por medio de gravedad los sólidos en suspensión se precipitan al fondo del tanque. Estos equipos tienen una capacidad de 50.000 BWPD.

4.5 EMULSIONES

4.5.1 Definición

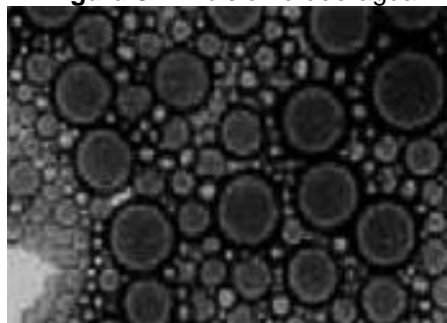
Una emulsión es una mezcla de líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante). Muchas emulsiones son de aceite/agua, con grasas alimenticias como uno de los tipos más comunes de aceites encontrados en la vida diaria. Ejemplos de emulsiones incluyen la mantequilla y la margarina, la leche y crema,

el espresso, la mayonesa, el lado fotosensitivo de la película fotográfica, el magma y el aceite de corte usado en metalurgia. En el caso de la mantequilla y la margarina, la grasa rodea las gotitas de agua (en una emulsión de agua en aceite); en la leche y la crema el agua rodea las gotitas de grasa (en una emulsión de aceite en agua). En ciertos tipos de magma, glóbulos de ferróníquel líquido pueden estar dispersos dentro de una fase continua de silicato líquido. El proceso en el que se preparan las emulsiones se llama emulsificación.

Las emulsiones son parte de una clase más genérica de sistemas de dos fases de materia llamada coloides. A pesar que el término coloide y emulsión son usados a veces de manera intercambiable, las emulsiones tienden a implicar que tanto la fase dispersa como la continua son líquidos.

Existen tres tipos de emulsiones inestables: la floculación, en donde las partículas forman masa; la cremación, en donde las partículas se concentran en la superficie (o en el fondo, dependiendo de la densidad relativa de las dos fases) de la mezcla mientras permanecen separados; y la coalescencia en donde las partículas se funden y forman una capa de líquido.

Figura 8. Emulsión crudo-agua



Fuente: Oilproductio.net

La emulsión es un sistema de dos fases que consta de dos líquidos parcialmente miscibles, uno de los cuales es dispersado en el otro en forma de glóbulos. La fase dispersa, discontinua o interna es el líquido desintegrado en glóbulos. El líquido circundante es la fase continua o externa.

4.5.2 Características.

El agua y el aceite son naturalmente inmiscibles, por lo tanto es habitual que coexistan pero en fases diferentes; en el caso del agua y los hidrocarburos sucede el mismo efecto, las solubilidades de los hidrocarburos son relativamente bajas y varían drásticamente de acuerdo a las cadenas carbonadas que posean, desde los 0.0022 ppm para el tetradecano hasta 1760 para el benceno en el agua. La solubilidad del agua se incrementa cuando hay presencia de dobles enlaces de carbono-carbono, sin embargo disminuye cuando el peso molecular de los hidrocarburos aumenta.

Generalmente en los campos de petróleo las emulsiones agua-aceite son llamadas emulsiones directas o regulares, y las emulsiones inversas aceite-agua son las emulsiones consideradas inversas. Algunas emulsiones pueden traer sólidos en suspensión o que suelen precipitar fácilmente por la densidad de las partículas suspendidas.

4.5.3 Formación de las Emulsiones.

La formación de las emulsiones se debe básicamente a tres factores críticos los cuales son: presencia de dos líquidos inmiscibles, con un periodo de agitación para dispersar un líquido sobre el otro y un emulsificador para estabilizar las gotas dispersas.

Las emulsiones son causadas por turbulencia, y regímenes de flujo altos los cuales no consideran la mezcla de los fluidos, ya que la gran velocidad y golpes de las moléculas de los fluidos contra las paredes de los recipientes o tuberías hace que se produzca una estabilización entre los fluido. Durante la producción de petróleo este fenómeno se hace presente en casi todas las etapas del proceso, la producción desde el yacimiento por métodos de levantamiento artificial como bombas PCP, bombas ESP y otros sistemas generando velocidad en el fluido e

impulsándolo por el tubing de producción, sumando los factores de presión y temperatura a los cuales el fluido se somete es un ambiente propio para la generación de emulsiones.

Sin embargo muchos de los procesos que pueden llegar a formar esta estabilización de las emulsiones pueden llegar a ser despreciables ya que en los diseños de estados mecánicos de pozos o en los métodos de levantamiento artificial son puestos a consideración los parámetros que puedes estabilizar la emulsión pero que finalmente no harán un gran aporte de manera individual.

Las emulsiones son causadas por agitación ya que los choques entre las partículas dispersan una de las fases en muchas gotas pequeñas. La tensión interfacial o superficial tienden a la coalescencia de gotas. Muchas gotas dispersas en una fase tienen una gran área colectiva interfacial, sin embargo, como las partículas coalescen, el área total disminuye. La tensión superficial es la cantidad de energía requerida para aumentar la superficie de un líquido por unidad de área es decir que el líquido se resiste a aumentar su superficie. Luego, la tendencia natural es que la coalescencia ocurra. Una tensión interfacial baja, disminuye la coalescencia de las gotas de la emulsión. Dos líquidos puros inmiscibles no pueden formar una emulsión estable sin la presencia de fuerzas estabilizadoras de la emulsión, pequeñas gotas se unirán nuevamente y decaerá el área interfacial, la energía total de la superficie y la energía libre de Gibbs del sistema.

Una tercera sustancia o agente emulsificante debe estar presente para estabilizar la emulsión. El típico emulsionador es un agente activo de superficie o surfactante. Las moléculas del surfactante son anfipáticas, es decir, una parte de su molécula es soluble en agua. Los surfactantes estabilizan las emulsiones por migración a la interfase aceite-agua y forman una película interfacial entre las

gotas. Las moléculas de surfactantes se alinean ellas mismas en la interfase polar hidrofílica en la fase acuosa y en la no polar hidrofóbica en la fase aceite.

4.5.4 Clasificación de las Emulsiones.

Las emulsiones se clasifican por la composición de las fases que la forman o por el tamaño de gotícula. A continuación se describe cada tipo:

4.5.4.1 Por la composición de las fases que la forman.

Debido a que la mayoría de los líquidos orgánicos son bastante miscibles entre sí, las emulsiones más comunes son las compuestas por agua es una de las fases y la otra un "aceite" (término general para designar cualquier líquido inmisible con agua). Se tienen dos tipos de emulsiones: aceite en agua (O/W) y agua en aceite (W/O). Para determinar el tipo de emulsión que se obtendrá se tienen en cuenta las siguientes características:

- Relación de volúmenes de las fases
- Naturaleza del emulsificante
- Regla de Bancroft
- Balance hidrofílico-lipofílico

4.5.4.2 Relación de volúmenes de las fases.

A medida que aumenta la proporción de un líquido que formará la emulsión, existe una mayor probabilidad de que constituirá la fase continua, aunque es posible producir emulsiones con 90% de fase dispersa.

4.5.4.3 Naturaleza del emulsificante.

Los jabones de metales alcalinos tienden a producir emulsiones O/W, mientras que los jabones de metales pesados (di- y trivalentes) favorecen las emulsiones W/O

4.5.4.4 Regla de Bancroft.

La fase continua será aquella en la que el emulsificante es más soluble.

4.5.4.5 Por el tamaño de gotícula.

Las emulsiones propiamente dichas tienen tamaños de gotícula por encima del intervalo coloidal. Pueden llegar a tamaños de gota de hasta 0.5 mm, aunque es difícil estabilizar una emulsión con gotas tan grandes. Existen también las llamadas microemulsiones, las cuales se definen como "dispersiones termodinámicamente estables de tipo micelar, donde el tamaño de la fase dispersa está comprendido entre 10 y 100nm. Como estas dimensiones son aproximadamente un cuarto de la longitud de onda de la radiación luminosa, las microemulsiones son completamente transparentes

4.5.5 Agentes emulsificantes y estabilizadores.

Hay que distinguir entre emulsificantes y estabilizadores de emulsión: un emulsificante facilita la formación de gotículas al reducir la tensión interfacial de los dos líquidos, mientras que un estabilizador evita la coalescencia (agregación) de gotículas. Muchos emulsificantes son también estabilizadores pero un estabilizador no necesariamente sirve como emulsificante.

Los surfactantes constituyen el tipo más importante de emulsificantes y estabilizadores. Para estabilizar emulsiones también se pueden usar aditivos poliméricos, soles y nuestra bien conocida doble capa eléctrica en la forma de iones adsorbidos. Los aditivos poliméricos pueden poseer en ciertos casos

actividad superficial, pero más frecuentemente actúan como agentes protectores, al igual que los soles, formando una barrera física al contacto y coalescencia de las gotículas. La doble capa eléctrica tiene una influencia estabilizadora, aunque el tamaño tan grande de las gotículas disminuye la importancia de la estabilización electrostática comparada con, p. ej., el caso de biomoléculas.

4.6 FACTORES QUE AFECTAN LA EMULSIÓN²

4.6.1 Tensión interfacial.

Una reducción de la tensión interfacial no es suficiente para aumentar la estabilidad de la emulsión. Se ha encontrado que para sistemas de tensión ultrabaja producen emulsiones inestables. Estudios de tensión interfacial dinámica entre crudo y agua muestran que la tensión disminuye con el tiempo y que se requieren varias horas de contacto para obtener un valor estable

4.6.2 Viscosidad de la fase externa.

Una viscosidad alta en la fase externa disminuye el coeficiente de difusión y la frecuencia de colisión de las gotas, por lo que se incrementa la estabilidad de la emulsión. Una alta concentración de las gotas también incrementa la viscosidad aparente de la fase continua y estabiliza la emulsión. Este efecto puede ser minimizado calentando la emulsión.

4.6.3 Tamaño de la gota.

Gotas muy pequeñas menores de 10 μm generalmente producen emulsiones más estables. Una amplia distribución de tamaños de partículas resulta en general en una emulsión menos estable.

² VEGA RON, Miguel. Deshidratación Electroestática en Hidrocarburos para la Facultad de Ciencias de la Ingeniería en la Escuela de la Tecnología de Petróleo. Quito, Ecuador. 2008.

4.6.4 Relación de volumen de fases.

Incrementando el volumen de la fase dispersa se incrementa el número de gotas y/o tamaño de gota y el área interfacial. La distancia de separación se reduce y esto aumenta la probabilidad de colisión de las gotas. Todos estos factores reducen la estabilidad de la emulsión.

4.6.5 Temperatura.

Usualmente, la temperatura tiene un efecto muy fuerte en la estabilidad de la emulsión. Incrementando la temperatura se reduce la adsorción de surfactantes naturales y disminuye la viscosidad de la fase externa, la rigidez de la película interfacial y la tensión superficial. Todos estos cambios reducen la estabilidad de la emulsión. En presencia de surfactantes aniónicos, un aumento de temperatura aumenta la afinidad de estos por la fase acuosa, mientras que lo inverso ocurre con surfactantes no-iónicos.

4.6.6 pH.

La adición de ácidos o bases inorgánicos cambia radicalmente la formación de películas de asfaltenos y resinas que estabilizan las emulsiones agua-aceite. Ajustando el pH se puede minimizar la rigidez de la película que estabiliza la emulsión y aumentar la tensión superficial. La estabilización de la tensión interfacial depende del pH de la fase acuosa, por lo cual la adsorción en la interfase presenta una histéresis que indica que las diferentes moléculas emulsionantes poseen cinéticas de equilibrio muy diferentes.

4.6.7 Envejecimiento de la interfase.

A medida que la interfase envejece la adsorción de los surfactantes se completa y debido a las interacciones laterales entre las moléculas aumenta la rigidez de la película hasta un valor estable en unas 3 a 4 horas. Esta película o piel alrededor de la gota llega a ser más gruesa, más fuerte y más dura.

4.6.8 Salinidad de la salmuera.

La concentración de la salmuera es un factor importante en la formación de emulsiones estables. Agua fresca o salmuera con baja concentración de sal favorecen la estabilidad de las emulsiones. Por el contrario, altas concentraciones de sal tienden a reducirla.

4.6.9 Tipo de aceite.

Los crudos con aceite de base parafínica usualmente no forman emulsiones estables, mientras que los crudos nafténicos y de base mixta forman emulsiones estables. Ceras, resinas, asfáltenos y otros sólidos pueden influenciar la estabilidad de la emulsión. En otras palabras, el tipo de crudo determina la cantidad y tipo de emulsionantes naturales.

4.6.10 Diferencia de densidad.

La fuerza neta de gravedad que actúa en una gota es directamente proporcional a la diferencia en densidades entre la gota y la fase continua. Aumentando la diferencia de densidad por incremento de la temperatura se logra aumentar la velocidad de sedimentación de las gotas y por ende, se acelera la coalescencia.

4.7 AGENTES EMULSIFICANTES

Dos líquidos puros inmiscibles no pueden formar un emulsión estable sin la presencia de fuerzas estabilizadoras en la emulsión, ya que las gotas se unirán nuevamente y decaerá la tensión interfacial. Una tercera sustancia presente en la emulsión es agente emulsificante.

4.7.1 Clasificación agentes emulsificantes.³

Los agentes emulsionantes son numerosos y pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Compuestos naturales surfactantes tales como asfáltenos y resinas conteniendo ácidos orgánicos y bases, ácidos nafténicos, ácidos carboxílicos, compuestos de azufre, fenoles, cresoles y otros surfactantes naturales de alto peso molecular.
- Sólidos finamente divididos, tales como arena, arcilla, finos de formación, esquistos, lodos de perforación, fluidos para estimulación, incrustaciones minerales, productos de la corrosión (por ejemplo sulfuro de hierro, óxidos), parafinas, asfáltenos precipitados. Los fluidos para estimulación de pozos pueden contribuir a formar emulsiones muy estables.
- Químicos de producción añadidos tales como inhibidores de corrosión, biocidas, limpiadores, surfactantes y agentes humectantes.

4.8 PRINCIPIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS

En la actualidad existen diversas opciones de tratamiento para las emulsiones, y especialmente para los residuos aceitosos en campos de crudo pesado. El tratamiento va directamente relacionado con la disposición que finalmente se le quiere dar; la alternativa que se seleccione dependerá del análisis técnico y económico que se haga y como se quiere disponer con los residuos.

Las tecnologías que se han utilizado en otros campos y las cuales han resultado factibles están:

³ VEGA RON, Miguel. Deshidratación Electrostática en Hidrocarburos para la Facultad de Ciencias de la Ingeniería en la Escuela de la Tecnología de Petróleo. Quito, Ecuador. 2008.

4.8.1 Reducción de volumen.

La reducción de volumen consiste en la aplicación de una o varias operaciones unitarias cuyo objetivo es concentrar los contaminantes con el uso de filtros prensa, filtros de banda y/o centrifugas.

El filtro prensa realiza una separación de las fases líquidas con respecto a las sólidas; en la centrifuga, se puede obtener dos o tres fases: si la centrífuga es decanter, una fase sólida y una líquida (mezcla de agua y aceite); si la centrífuga es tricanter, se obtienen tres corrientes a saber agua, aceite y sólidos. Dependiendo del comportamiento de los residuos se adiciona rompedor de emulsión antes o después de los procesos físicos para facilitar la separación de fases.

4.8.2 Desorción térmica.

Este proceso consiste en un secado para remover los sólidos que se encuentra en la emulsión; este opera a temperaturas menores que los equipos de incineración donde hay una ausencia de oxígeno, ya que uno de los objetivos no es calcificar los residuos.

El proceso de Desorción Térmica expone los lodos aceitosos a altos niveles de calor, vaporizando los contaminantes, los cuales son luego condensados para reutilización en los procesos o mezclados con producción para venta.

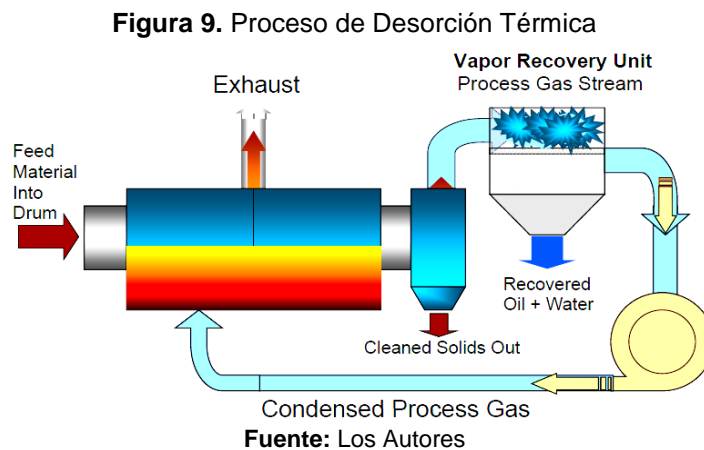
Una atmósfera inerte en el cilindro previene la oxidación de los Hidrocarburos presentes en la corriente de entrada.

Por otro lado se debe tomar en consideración que la desorción térmica solamente puede separar dos fases (agua – aceite), los finos considerados dentro de la emulsión no son tratados.

En cuanto al principio de reducción de volumen, a diferencia de la desorción térmica, permite recuperar tres fases por separado (agua, aceite y sólidos), dependiendo de las condiciones de salida.

La tecnología de desorción térmica tiene dos corrientes de salida claramente definidas: una fase gaseosa y una fase sólida; la primera es una mezcla de agua, aceite y una baja cantidad de sólidos, la segunda es una ceniza que en la mayoría de los casos cumple con los requisitos establecidos para su disposición final según la normatividad ambiental vigente para residuos sólidos y los lineamientos establecidos por el Protocolo de Louisiana 29 B.

La fase gaseosa es condensada y trasladada a tanques donde se separan las fases por gravedad, en algunas ocasiones se debe adicionar producto químico para facilitar la separación de las fases.



En la desorción térmica si es posible recuperar agua.

4.8.3 Descripción del proceso de desorción térmica indirecto y características técnicas

- Calentamiento indirecto de los residuos dentro de un tambor rotatorio.
- Vaporización de los contaminantes (aceite, agua) a medida que avanzan hacia la salida del tambor secador.

- Succión de los vapores del tambor.
- Filtración de los vapores en la casa de filtros para remover las partículas de polvo.
- Condensación de los vapores por intercambio de calor con agua como fluido de enfriamiento.
- Separación de la fase líquida en un sistema de separación de aceite y agua.
- Reutilización del agua y aceite recuperados nuevamente en el proceso.

4.8.4 Beneficios del tratamiento por desorción térmica de residuos

- Total remediación de los residuos elimina futuros riesgos ambientales al operador.
- Reutilización del suelo descontaminado.
- Recuperación y ahorro sustancial por reutilización del diesel en fluidos de perforación y otros usos.
- La planta térmica puede ser operada en el sitio reduciendo costos de transporte y almacenaje.
- Permite al operador perforar con fluidos base aceite en áreas ambientalmente sensitivas.
- Diseño en acero inoxidable para altas temperaturas.
- <10.000 ppm TPH in el material descontaminado.
- <0.1% Sólidos en el aceite recuperado.
- No se requiere tratamiento de aguas – el agua es reutilizada en el proceso.
- Calidad del aire cumple con EPA 1990 Clean Air Act Amendments.

La unidad hace uso del principio de transferencia de calor por intermedio de un cilindro rotatorio, el cual es calentado externamente por dos quemadores que generan la combustión de la mezcla combustible (ACPM, propano y/o gas natural)-oxígeno, hasta alcanzar temperaturas que garantizan la evaporación de los líquidos presentes en el material a descontaminar. Una vez

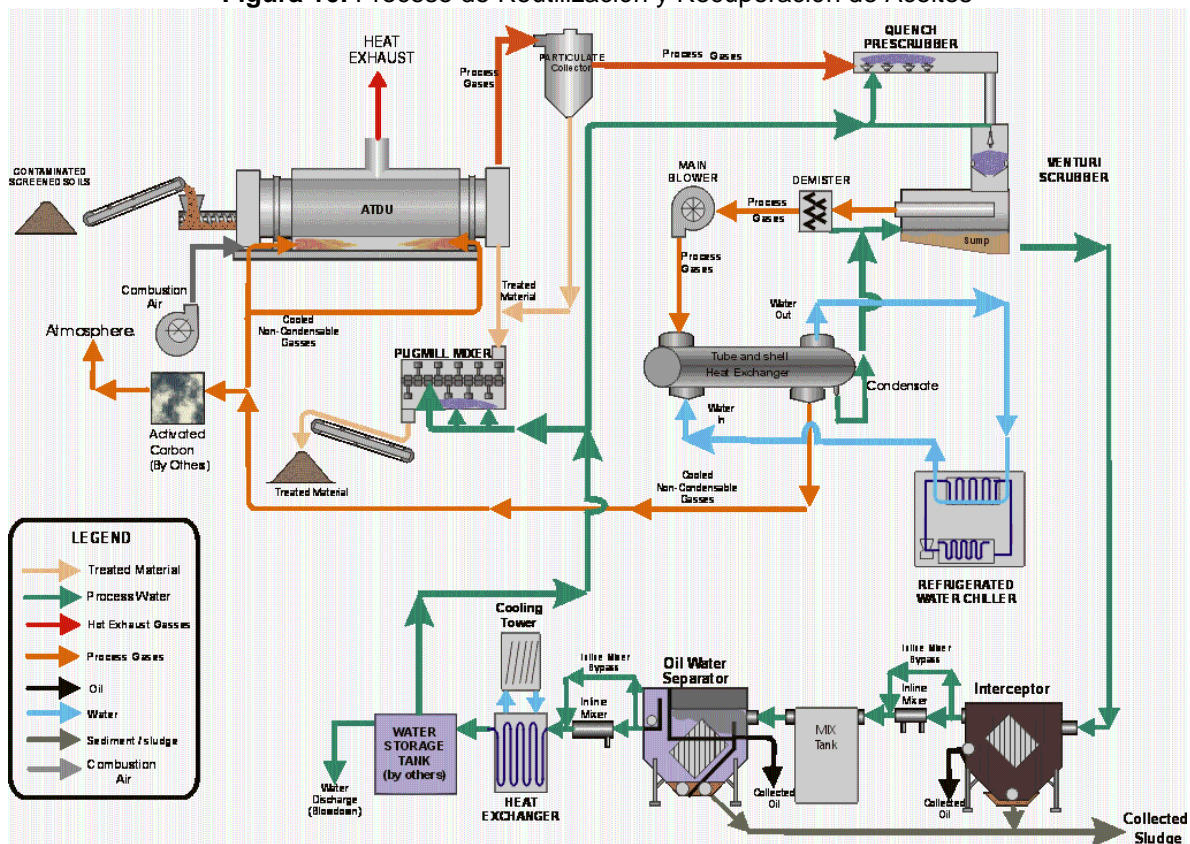
evaporados los líquidos, éstos son evacuados del cilindro por medio de una bomba de vacío. Los vapores son enfriados, condensados y enviados a un tanque de separación de fases agua-aceite.

El aceite recuperado puede ser usado como aditivo para preparar lodo de perforación, un porcentaje como combustible en los quemadores o simplemente, debido a su calidad (contenido de sólidos < 1%), para entregarlo a alguna batería de producción. El agua recuperada es usada para re-hidratar el material sólido tratado en su descarga final, esto con el fin evitar la contaminación atmosférica por material particulado – finos-.

En resumen la operación de la Unidad de desorción Térmica involucra las siguientes fases:

- Calentamiento indirecto de los residuos dentro de un tambor rotatorio.
- Vaporización de los contaminantes (aceite, agua) a medida que avanzan hacia la salida del tambor secador.
- Succión de los vapores del tambor.
- Filtración de los vapores en la casa de filtros para remover las partículas de polvo. Condensación de los vapores por intercambio de calor con agua como fluido de enfriamiento. Separación de la fase líquida en un sistema de separación de aceite y agua.
- Reutilización del agua y aceite recuperados nuevamente en el proceso.

Figura 10. Proceso de Reutilización y Recuperación de Aceites



Fuente: Los Autores

El material es tratado por medio de calor indirecto, esto hace que se separen las fases sólida y líquida, el material sólido se descarga por un tornillo que se encuentra al final del proceso de calentamiento, éste es acopiado en el área y después de verificar los niveles de TPH es enviado al sitio de disposición final.

Líquidos recuperados como el crudo pueden ser utilizados como combustible para los quemadores y el agua en el enfriamiento y retención de cenizas a la salida del sistema. En caso de presentarse exceso de agua esta podrá ser enviada a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales instalada en la Planta de Manejo Integrado o enviada a la facilidad de tratamiento más cercana por intermedio de un tercero legalizado ambientalmente para ello.

Al final del proceso se recupera el hidrocarburo y se obtiene un material con menos de 1% de contaminación, el cual se monitorea para evaluar que se encuentre dentro de las condiciones adecuadas para una segura disposición al medio ambiente.

4.8.5 Extracción con solvente.

Se debe aclarar que no es una técnica no muy desarrollada, y se basa en la adición de un solvente al fluido que generalmente es propano, con el fin de remover el crudo y otros compuestos orgánicos de la emulsión. Pero el solvente solamente suele remover los desechos orgánicos sin recoger y hacer una extracción efectiva los metales pesados como el plomo o el arsénico.

4.8.6 Estabilización / Solidificación.

Este proceso a diferencia de la extracción con solvente puede llegar a remover elementos metálicos pesados, por medio de agentes de estabilización como el Cemento Portland o Cal. Es un proceso en el cual el desecho es mezclado con el agente estabilizante para inmovilizar los residuos tóxicos.

4.8.7 Utilización como combustible.

Los desechos o hidrocarburos residuales pueden ser utilizados como combustibles en calderas para distintos procesos, estos residuos tienen una capacidad calorífica y pueden aportar generación de energía en este estado. Los hornos de cemento son una buena opción y si el horno no tiene restricción con que el combustible residual sea líquido o sólido puede funcionar correctamente, en el caso de tener restricción por sólidos, puede diluirse con otro tipo de combustible para que sea viable la utilización en este proceso.

4.8.8 Incineración.

La incineración aunque sea un proceso factible de disposición frente a su eficacia, es el más costoso de los métodos a analizar, por lo cual generalmente se recurre a otros tipos de procesos. La incineración de residuos se da en diferentes tipos de hornos, dependiendo su temperatura así mismo dependerá el tiempo de residencia en el horno. Algunos hornos trabajan con temperaturas cercanas a los 1200°C, donde el tiempo de residencia es bajo; en cambio incineradores que trabajan en temperaturas que oscilan entre los 732°C a 760°C los tiempos de residencia se aumentan significativamente.

4.8.9 Biotecnología.

El desarrollo de la ingeniería química ha hecho que la implementación de la biotecnología se desarrolle microorganismos biodegradadores para tratar hidrocarburos. En este caso los biosurfactantes, estos compuestos reducen la tensión superficial de las interfaces aceite/agua. Los microorganismos presentes en el subsuelo pueden ayudar a biodegradar los hidrocarburos si se utilizan de la forma correcta.

5. TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS

5.2 ANÁLISIS DE LOS PRINCIPIOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS

De acuerdo a estudios realizados producidos en Campo Rubiales tienen un alto contenido de crudo en la emulsión, cerca del 45% en volumen, por eso el sistema de tratamiento de borras de producción debe tener como objetivo principal recuperar la mayor cantidad de crudo posible.

La combinación de elementos y procesos para la recuperación del crudo es ideal, ya que resultará más eficiente su proceso, cabe mencionar que los volúmenes a tratar son considerablemente altos, el principio de evaporación al cual se apela seguidamente es uno de los más utilizados y efectivos pero el requerimiento energético que necesita este es alto, por lo cual la cantidad de combustible utilizado para realizar este proceso puede llegar a ser antieconómico.

Por otro lado se debe tomar en consideración que la desorción térmica solamente puede separar dos fases (agua – aceite), los finos considerados dentro de la emulsión no son tratados de manera eficaz.

En cuanto al principio de reducción de volumen, a diferencia de las desorción térmica, permite recuperar tres fases por separado (agua, aceite y sólidos), dependiendo de las condiciones de salida.

La centrifugación como otro proceso de interés, se debe considerar ya que en este se logra una reducción de volumen significativo; su principio se basa en la separación gravitacional, este proceso debe estar acompañado de un tratamiento

químico durante la separación para que este ayude a romper las fuerzas electrostáticas de la emulsión, de lo contrario sería complejo la ruptura de esta.

Adicionalmente a la centrifugación se podría considerar la utilización de un solvente el cual ayude a separar las fases acuosa, orgánica y sólida, aunque como consecuencia aumentarían los grados API del crudo al remover el contenido de asfaltenos presentes; esto puede ser viable siempre y cuando las pruebas químicas determinen el solvente indicado para el tipo de crudo y sin consecuencias adicionales como la dilución de componentes.

La adición de equipos que permitan la recuperación de los solventes utilizados es una suma significativa de tiempo y costos en el proceso que se debe asumir, esto se hace con el fin de recircula el solvente en el proceso.

La incineración y bio-remediación no son soluciones viables a implementar en Campo Rubiales, por lo cual no será tomadas en cuenta a desarrollar durante la presentación de los tipos de tratamiento a evaluar, estos dos tipos de procesos son procesos, que en el primero de los casos, es un proceso costoso el cual requiere de un tratamiento químico posterior agresivo los cuales aumentarán los costos de operación en el proceso, en cuanto al segundo mencionado es una tratamiento en el cual se permite romper la emulsión fácilmente pero no habría una recuperación de crudo; siendo este el objetivo principal del tratamiento.

La última opción de tratamiento y utilización sobre las borras de producción, es la implementación de esta emulsión como combustible complementario en los hornos y calderas; en cuanto a su implementación es algo dudosa, debido a que los requerimientos ambientales para usar como combustible son diferentes a como la emulsión se produce, por lo cual se debe realizar un tratamiento químico, en cuanto al poder calorífico que produce se sabe que no tiene la suficiente capacidad para operar de forma adecuada.

De acuerdo con lo mencionado se presenta un cuadro de análisis donde se ve el tipo de tratamiento y sus características en la separación de las fases, su recuperación y si requiere otro tipo de tratamiento adicional.

En los procesos a considerar que disminuyen claramente la formación de una emulsión resalta el proceso de desorción térmica ya que el aumento de la temperatura hace que parte de la fase acuosa considerada como agua se evapora en una porción colaborando a la detención de la formación de la emulsión.

Ahora las buenas prácticas en el transporte en las líneas de flujo dentro del Campo y el monitoreo constate por parte del personal de ingeniería de la compañía hace que este riesgo disminuya considerablemente sin ser eliminado.

Tabla 2. Cuadro de resumen análisis de principios de tratamiento

| PRINCIPIO | SISTEMA | SEPARACIÓN DE FASES | | RECUPERACIÓN | | | TRATAMIENTOS ADICIONALES | OBSERVACIONES |
|--|-------------------------------|---------------------|----------------|--------------|------|--------|---|---|
| | | LÍQUIDO-LÍQUIDO | LÍQUIDO-SÓLIDO | ACEITE | AGUA | SÓLIDO | | |
| 1. Reducción de Volumen | Centrifugación | OK | OK | OK | OK | OK | Tratamiento químico (rompedores de emulsión) y precalentamiento de la emulsión. | |
| 2. Desorción térmica | Torre de expansión | OK | NO | OK | NO | OK | Tratamiento químico (rompedores de emulsión) y precalentamiento de la emulsión. | |
| 3. Extracción por solvente | Extracción por solvente | OK | OK | OK | OK | OK | Tratamiento químico (rompedores de emulsión), centrifugación y recuperación del solvente. | La recuperación del solvente exige equipos adicionales. Para que sea rentable el contenido de asfáltenos en el crudo debe ser alto. |
| 4. Estabilización /Solidificación | Estabilización/Solidificación | NO | NO | NO | NO | NO | | Permite la inmovilización y disposición de metales. |
| 5. Incineración | Incinerados | NO | NO | NO | NO | NO | | Puede generar alta contaminación. |
| 6. Combustible suplementario | Hornos y calderas | NO | NO | NO | NO | NO | | La capacidad calorífica de la emulsión debe ser alta. |

Fuente: Los Autores

En cuanto a los últimos tres principios considerados en la tabla presentada anteriormente, no se puede resaltar y concluir mucho ya que no son considerados la evaluación técnica a profundidad, los puntos a tocar en la reducción con solvente claramente son pocos la que la acción del solvente sobre en la continuidad del proceso puede afectar parámetros operativos de los equipos al igual que en la desorción térmica.

Por el lado de la extracción con solvente cabe resaltar que aunque es eficaz los parámetros operativos de los equipos al igual que el mantenimiento será muy costoso.

5.2 CENTRIFUGACIÓN

El principio de centrifugación es el principio de tratamiento de residuos aceitosos, debe ser tomando en cuenta en todos los procesos en una serie de procesos unitarios que tendrán un orden lógico y secuencial. El principio de la centrifugación se basa en efecto de sedimentación aumentado por la revolución del fluido en un equipo que aumenta las fuerzas G o fuerzas de gravedad, el orden lógico del proceso se podría determinar a partir de las características del crudo y cual tratamiento que inicialmente facilitaría un tratamiento posterior, por un orden lógico con respecto a las propiedades los fluidos lo mejor inicialmente sería aumentar la temperatura del fluido para que la centrifugación sea un poco más eficaz.

La centrifugación de una emulsión puede realizarse en centrifugas horizontales o verticales.

5.2.1 Centrifuga Horizontal.

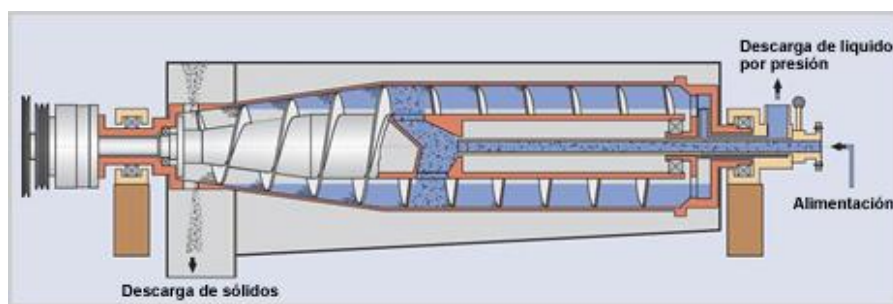
Las centrifugas horizontales, como su nombre lo indica su posición de funcionamiento es horizontal, este tipo de centrifugas son eficientes en la

separación de fases de emulsiones mediante las fuerzas G que tiene de capacidad cada una de ellas. La capacidad de tratamiento depende del proceso que se lleve a cabo y que tanto caudal se deba manejar.

En cuanto a la capacidad de separación de fases se pueden clasificar en centrifugas decanter o tricanter, esto indica que las primeras son capaces de separar una fase sólida de una fase líquida, en cuanto a las tricanter separan una fase sólida, líquida ligera y líquida pesada.

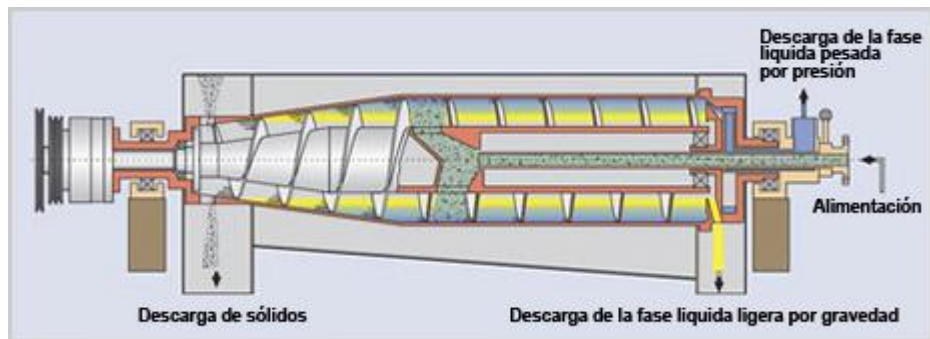
Las centrifugas horizontales son capaces en algunos casos de manejar de mejor manera contenido de sólidos que la verticales debido a su funcionamiento y poca precipitación de esos sólidos. El proceso consiste en un tornillo sin fin que se encuentra dentro de un cilindro cónico, el tornillo sin fin gira a una velocidad determinada permitiendo separar dos o tres fases al multiplicar las fuerzas G dentro de la centrifuga. El fluido entra por un tubo estacionario que lo acerca al rotor que suavemente entra al tornillo sin fin; cuando alcanza las boquilla de salida las fases ha sido separadas, los sólidos se desplazan hacia la punta del tambor y los fluidos, tanto fases líquidas como pesadas hacia el lado opuesto.

Figura 11. Centrifuga Decanter



Fuente: Flottweg, Catálogo de servicios. Centrifuga, prensas Banda y sistemas flottweg.

Figura 12. Centrifuga Tricanter



Fuente: Flottweg, Catálogo de servicios. Centrifuga, Prensas Banda y sistemas flottweg.

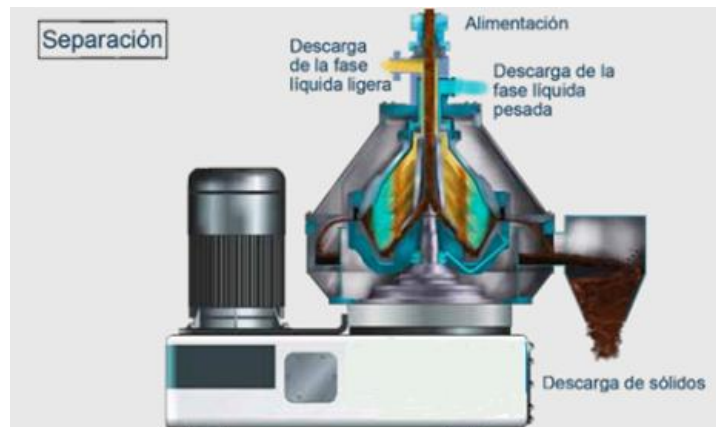
5.2.2 Centrifuga vertical de discos.

Estas centrifugas están compuestas por una serie de discos permitiendo la separación de sólido, líquido, líquido. Los sólidos separados se sitúan hacia las paredes de la centrifuga, permitiendo su acumulación y extracción, posteriormente se sitúa el agua y finalmente el crudo.

A diferencia de las centrifugas horizontales estas puede manejar un porcentaje bajo de sólidos, menor al 0,5%, esto se debe a que no tienen un espacio de acumulación considerable en su estructura.

Las variables que rigen la eficiencia de las centrifugas, excluyendo si son horizontales o verticales son, la viscosidad, la densidad y el porcentaje de BS&W del fluido.

Figura 13. Centrifuga Vertical



Fuente: Flottweg, Catálogo de servicios. Centrifuga, Banda y sistemas flottweg.

5.2.2.1 Procesos unitarios

Dentro de muchos procesos industriales que conciben la implementación de un sistema de centrifugación cabe la idea de adicionar un proceso unitario después de este, debido a que por condiciones del fluidos tratado en la centrifugación en necesario adicionar anterior o posteriormente a este proceso para adquirir los requerimientos de venta y ambientales, facilitar separación de la emulsión, tiempo de tratamiento entre otros.

En cuanto a los procesos unitarios en el tratamiento de residuos aceitosos podemos mencionar que se deben hacer procesos químicos para la contribución a la separación de la emulsión así como térmicos con un aumento de temperatura significativa. Los procesos unitarios que se utilizan conjuntamente con la centrifugación son:

5.2.2.2 Proceso térmico

Es una fase vital posterior a la centrifugación, porque el calentamiento de la emulsión genera expansión térmica en cada una de sus fases por lo cual será más cómoda la separación de fases ya que el aumento en la temperatura desestabilizada la emulsión.

El proceso térmico genera dos reacciones positivas para la centrifugación de la emulsión, primero la reducción de la viscosidad en el proceso hace que el fluido sea más fácil de movilizar dentro y fuera de la centrifuga; el siguiente beneficio es que puede aumentar considerablemente la diferencia de densidad entre el hidrocarburo y el agua que componen la emulsión, esta reducción eficaz dependiendo del contenido de sólidos presente en la emulsión.

El calentamiento de la emulsión puede realizarse mediante calderas o intercambiadores de calor, los cuales suministran la cantidad de agua necesaria para elevar la temperatura; es común encontrar intercambiadores antes que el fluido entre a la centrifuga. La precaución y buen manejo del proceso hace que no se considere el taponamiento de estos equipos aunque puede suceder por un gran alto nivel de uso sin un correcto mantenimiento preventivo.

5.2.2.3 Proceso químico.

Es un proceso importante en los trenes de tratamiento de residuos aceitosos pero no es un proceso indispensable en estos. Su aplicación está sujeta al tipo de emulsión que se desea tratar y a la eficiencia que componen el tratamiento.

Los químicos que se adicionan, generalmente son rompedores de emulsión que atacan directamente los agentes emulsificantes, provocando diferencias de polaridad y así una desestabilización en la emulsión. Los productos químicos generalmente quedan aferrados al agua, por lo cual el tratamiento posterior de este residuo es muy importante

5.2.2.4 Extracción por solvente.

La extracción por solvente es una alternativa para omitir el precalentamiento que se mencionó anteriormente para cumplir con requisitos en la centrifuga; la mezcla de la emulsión con el solvente causará reacciones similares como el

precalentamiento, como lo es la reducción de la viscosidad y disminuir las densidades entre las fases.

En la mayoría de los casos es necesario recuperar el solvente utilizado debido a que en los procesos siguientes no son tolerantes este tipo de residuos o para una reinyección en el inicio del proceso.

5.2.2.5 Filtración.

La filtración no es un proceso unitario que va de la mano con la centrifugación ya que no contribuye de una manera radical, pero si es un proceso complementario que la acompaña. La acumulación de los residuos aceitosos se lleva a cabo en piscinas las cuales se encuentran a la intemperie y es posible que adquieran sólidos de gran tamaño por lo cual es necesario llevar el proceso complementario de filtración. Este proceso se lleva en filtros verticales o zarandas.

5.3 DESORCIÓN TÉRMICA

Este proceso se basa en elevar la temperatura del fluido a tratar hasta que se alcance el punto de ebullición del compuesto más volátil, con el fin de lograr una separación de fases en la emulsión. Para hacer el proceso controlado este se lleva a cabo en hornos que tienen una gran resistencia a presiones y temperaturas elevadas evitando así la evaporación de los compuestos. Posteriormente el residuo se envía a torres que operan con presión atmosférica y de esta manera tiene lugar la evaporación del fluido.

Para que el proceso sea efectivo y se lleva a cabo con plenitud se debe tener pleno conocimiento sobre los compuesto presentes en la emulsión y cuáles son los compuestos más volátiles así como sus condiciones fisicoquímicas.

5.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS

Los tratamientos que se evaluaron se basan en pruebas realizadas en Campo Rubiales en el año 2009 por parte de las empresas Precco y Clariant, que nos presentan resultados como cantidades de agua iniciales y obtenidas, relación de fases, concentraciones de solventes y sólidos presentes.

5.4.1 Reducción de Volumen.

El proceso consiste en centrifugar los residuos precalentados y homogenizados en tanques de precalentamiento en temperaturas que oscilan entre 85-90°C, posteriormente deberán pasar por un intercambiador de calor para retirar impurezas y mantener la temperatura al ingresar a la centrifuga.

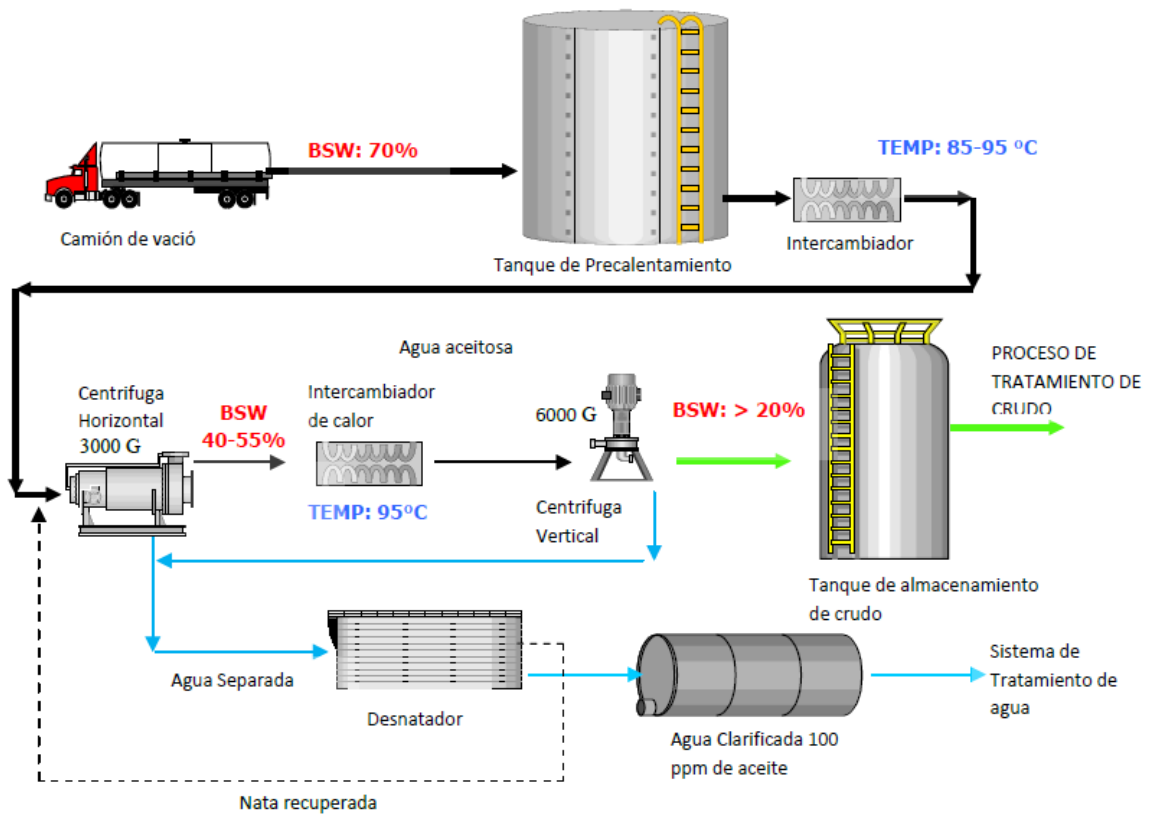
La centrifuga inicial a utilizar será horizontal, y puede llegar a generar 3000G; como resultado de la centrifugación inicial se obtienen dos subproductos, agua y crudo con un BS&W entre el 40 y 55%. El agua pasará a un tratamiento químico donde el requerimiento ambiental sea ajustado a los estándares de calidad necesario, su proceso iniciará en un desnatador y donde se obtendrá un agua con 100ppm de aceite, mientras que el crudo será centrifugado de nuevo a 6000G en una centrifuga vertical a una temperatura cercana a los 95°C y así obtener un crudo teóricamente de 0.5% de BS&W. La cantidad de BS&W obtenido y su caudal respectivo diario podrá ser variable de acuerdo a las cantidades de residuos aceitosos producidos diariamente.

Tabla 3. Parámetros de operación del sistema de reducción de volumen

| PARÁMETROS | TANQUES ALMACENAMIENTO | CENTRIFUGA TRICANTER | DISCOS CENTRIGUFA | DESNATADOR |
|-----------------------|------------------------|----------------------|-------------------|------------|
| BS&W | 70% | 40-50% | >10% | N/A |
| Temperatura °C | 95 | 95 | 95 | 70 |
| Presión Operación Psi | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 |

Fuente: Procesos de tratamiento residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

Figura 14. Diagrama de proceso reducción de volumen



Fuente: Procesos tratamientos residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

La utilización de un desnatador después de centrifuga horizontal es necesaria para iniciar el proceso del tratamiento del agua, en el desnatador inicia el

tratamiento del agua extraída de lodo de producción, ya que de nuevo se realiza en una limpieza o “desnatado” de lo centrifugado para iniciar correctamente el proceso de tratamiento de agua.

5.4.2 Extracción por Solvente.

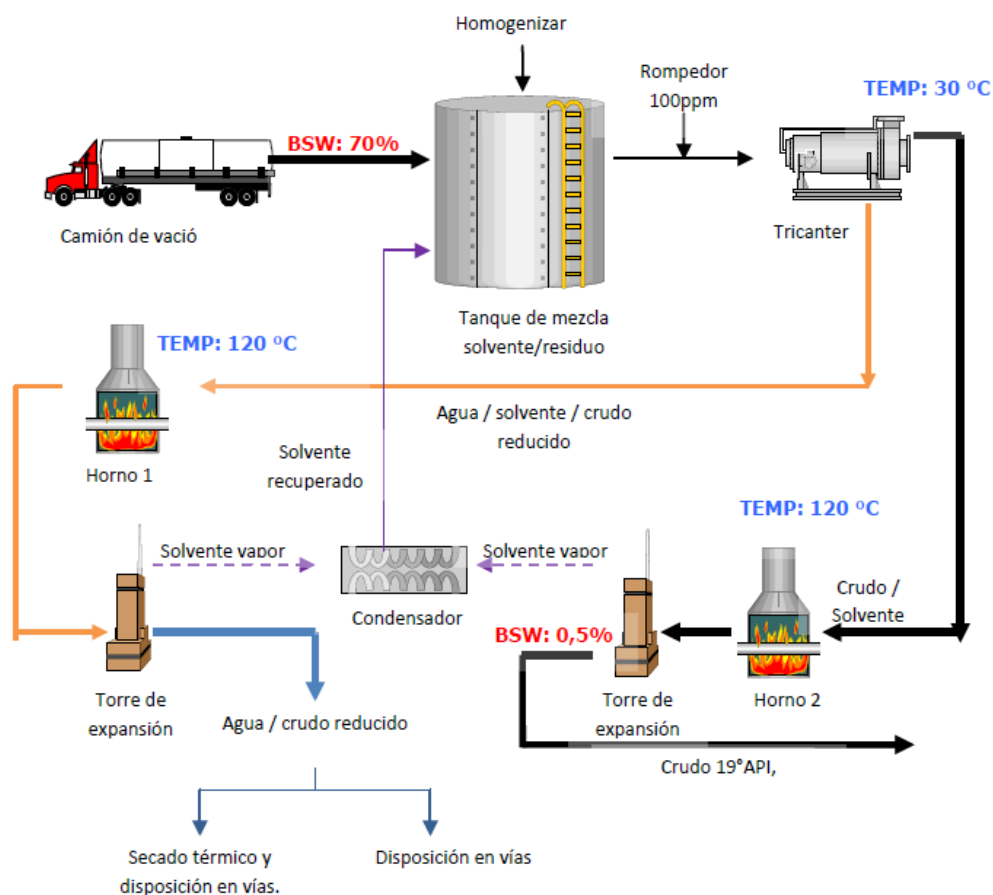
En todos los procesos de separación de emulsiones es muy importante homogenizar la emulsión por lo cual esta es la etapa inicial del proceso, por otro lado de realiza la adición de solvente en proporción 1:1 con 100ppm para facilitar el proceso de separación de las fases, se debe aclarar que el solvente utilizado en la pruebas llamado apiasol debe ser recuperado ya que por estándares ambientales en cuanto al proceso de agua, y estándares de calidad referentes al crudo se debe eliminar este.

Consecutivamente a la adición del solvente se debe centrifugar la emulsión, en una centrifuga tricanter a 30°C, la cual arroja dos componentes después de su proceso, primero la fase liviana compuesta por crudo de 19° API y solvente, y la fase pesada compuesta por gran cantidad de agua, solvente y crudo reducido.

El solvente como se dijo anteriormente debe ser retirado de las dos fases obtenidas después del proceso de centrifugación, por lo cual se procede a calentar las dos fases en hornos que están entre los 100 y 120°C donde el solvente se evapora y condensa, para ser reingresado al sistema en la etapa inicial del proceso de tratamiento de los residuos aceitosos.

En cuanto a la fase pesada, el análisis debe ser más profundo ya que el crudo reducido se debe disponer de alguna manera o reingresar a un tratamiento específico, este crudo presenta gran cantidad de asfáltenos por lo cual es necesario disponer de este de manera segura.

Figura 15. Diagrama de proceso extracción por solvente



Fuente: Procesos de tratamiento residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

Tabla 4. Parámetros de operación del sistema extracción por solvente

| PARÁMETROS | TANQUES ALMACENAMIENTO | CENTRIFUGA TRICANTER | HORNO | TORRE EXPANSIÓN |
|-----------------------|------------------------|----------------------|-------|-----------------|
| BS&W | 70% | 0,5% | 0,5% | 0,5% |
| Temperatura °C | 30 | 30 | 120 | 120 |
| Presión Operación Psi | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 |

Fuente: Procesos de tratamiento residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

5.4.3 Sistema Combinado

El tercer sistema a implementar sería la combinación de los anteriormente mencionados, inicialmente se llevaría a cabo la desorción térmica del crudo alcanzando temperaturas muy altas; en la segunda parte del proceso se lleva a cabo la reducción de contenido de BS&W de tal forma que alcance condiciones de venta el crudo y el agua condiciones ambientales requeridas en la disposición.

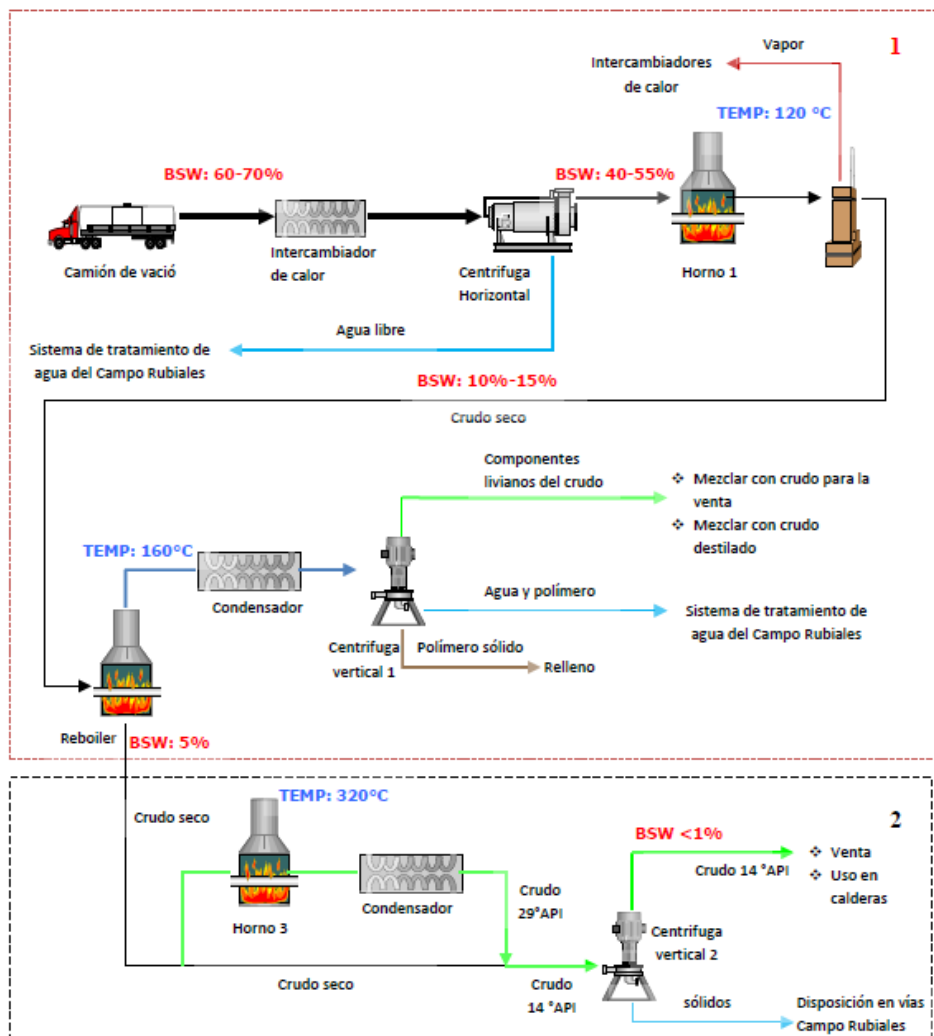
El proceso combinado se basa en el funcionamiento individual de cada uno de los sistemas anteriores pero instalando un orden eficaz unitario, inicialmente se calienta la emulsión para ser centrifugada, por medio de un intercambiador de calor; en el proceso de desorción térmica retirando grandes cantidades de agua libre, el agua separada como agua libre es enviada al sistema de tratamiento de agua de Campo Rubiales.

A continuación la temperatura del residuo obtenido se eleva hasta 120°C así se evaporará el agua que se encuentra emulsionada, sin embargo se evapora solamente el agua que está atrapada en el crudo, por lo cual esto tiene como consecuencia un aumento de la temperatura nuevamente hasta los 160°C donde el agua que forma parte de la emulsión más estable sufre evaporación. Los gases producidos en este proceso debe disponerse de manera segura ya que a los 130°C comienza a evaporarse los primeros compuestos livianos del crudo por lo cual no se deben descargar a la atmosfera ligeramente, así que para no disponer de ellos indiscriminadamente se condensan los gases y vapores obtenidos por medio de un condensador, estos se centrifugan y se obtienen dos fases la primera compuesta por los componentes livianos del crudo evaporados anteriormente y la segunda agua con polímero como –Floculante y Coagulante, utilizados para el proceso de clarificación del agua, el tipo de coagulante y floculante es reserva de la empresa prestadora de servicios– adicionado para modificar las propiedades de la emulsión y que queda asociado a e agua; el agua es enviada al sistema de

tratamiento de aguas de Campo Rubiales, y la fracción de crudo es mezclada con crudo seco.

Posteriormente se realiza un corte del crudo seco con un 5% de BS&W a 320°C lo cual permite obtener un fracción de crudo con 29°API. Esta fracción se mezcla con crudo seco para cumplir condiciones de viscosidad requeridas por la centrifuga. Finalmente se centrifuga para obtener como producto final un crudo con un grado API de 14° y un porcentaje de BS&W menor al 1%; la otra corriente obtenida es de agua que será enviada al tratamiento de agua de Campo Rubiales o si cumple con condiciones ambientales a riego de vías.

Figura 16. Diagrama de proceso sistema combinado



Fuente: Procesos de tratamiento residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

Tabla 5. Parámetros de operación del sistema combinado

| PARÁMETROS | CENTRIFUGA HORIZONTAL | HORNO 1 | HORNO 2 | CENTRIFUGA VERTICAL 1 |
|-----------------------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|
| BS&W | 45-55% | 10-15% | 5% | <0,5% |
| Temperatura °C | 95 | 120 | 160 | 195 |
| Presión Operación Psi | 13,8 | 100 | 100 | 13,8 |

Fuente: Procesos de tratamiento residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

Tabla 6. Parámetros de operación del sistema combinado

| PARÁMETROS | HORNO 3 | CONDENSADOR | CENTRIFUGA VERTICAL 2 |
|-----------------------|---------|-------------|-----------------------|
| BS&W | 0% | 0% | <1% |
| Temperatura °C | 320 | 180 | 95 |
| Presión Operación Psi | 13,8 | 13,8 | 13,8 |

Fuente: Procesos de tratamiento residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp.

Tabla 7. Parámetros de operación del sistema combinado

| SISTEMAS | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|-----------------------------|---|--|
| Desorción térmica | ✓ No se obtiene agua después del proceso. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Crudo con BS&W >10% que se debe reingresar al sistema de tratamiento de crudo producido. ✓ Producción de vapores que van a la atmosfera. ✓ No permite trata los volúmenes de residuos producidos. ✓ El consumo de combustible es el mismo sin discriminar la cantidad de volumen de aceite de producción tratado |
| Reducción de volumen | ✓ Separa agua libre. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Se recupera crudo con BW&S >20% que requiere de tratamiento adicional. ✓ Se obtiene agua aceitosa después de la centrifugación. ✓ Después del tratamiento aún hay residuo aceitoso sin separar. ✓ No permite el caudal de tratamiento |

| | | |
|--------------------------------|--|--|
| | | requerido. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Es sensible a los cambios de BS&W en el residuo, a la entrada del sistema. |
| Extracción por Solvente | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Crudo recuperado con 19° API y 1% BS&W. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ El solvente se debe utilizar en una proporción 1:1 por lo que el volumen a tratar se duplica. ✓ Se debe recuperar el solvente de la fase pesada y de la fase liviana, lo que implica uso de equipos adicionales. ✓ Requiere tratamientos adicionales para disponer los fluidos separados. |
| Sistema Combinado | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Crudo recuperado con 1% de BS&W. ✓ La fase pesada obtenida contiene porcentaje de agua. ✓ La separación de agua libre antes de secar el residuo disminuye la cantidad de agua a evaporar. ✓ El solvente utilizado se obtiene del crudo recuperado. ✓ No es necesario recuperar solvente. ✓ No es sensible a cambios en el porcentaje de BS&W. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Requiere mayor cantidad de equipos. ✓ Tratamientos adicionales para disponer de fluidos separados. ✓ Manejo de altas temperaturas que genera riesgos operacionales. ✓ Producción de vapores que va a la atmosfera. ✓ Se consume la misma cantidad de combustible independiente del volumen de residuo tratado. |

Fuente: Los Autores

Las condiciones de operación de cada proceso se encuentran en cada una de los procesos se encuentran al final de la descripción, en las tablas 3, 4, 5 y 6.

5.4.4 Volúmenes a Tratar.

Para establecer el caudal de tratamiento de los sistemas a evaluar se debe tener claro los volúmenes de residuos aceitosos a tratar, los que se espera generar en un futuro y los record de volúmenes producidos y procesados.

De acuerdo a los valores históricos de producción presentados por la contratista Clariant de Colombia; los volúmenes procesados total en el año 2010 fueron de 226.115 Barriles, mientras que en el año 2011 se tuvo un volumen muy por

encima con respecto al año anterior con 759.324 barriles. Estas cifras definitivamente superaron lo esperado por la empresa ya que en el 2009 un estudio sobre el comportamiento de producción de residuos aceitosos a futuro arrojó que para el año 2010 se producirían 500 Barriles diarios lo cual fue superado por 118 barriles, así aumentando la producción acumulada del año, en cuanto al 2011 no se tenían estudios precisos sobre esta producción esperada pero el reporte anual del área de tratamiento de químico recopila la información mostrando un aumento significativo de la producción el año pasado; a continuación se indica una tabla con valores de producción de residuos aceitosos en Campo Rubiales en los años 2010 y 2011.

Tabla 8. Tabla años 2010 y 2011 volúmenes procesados

| Año | Producción Año | Promedio Producción Mensual | Promedio Año Diario |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 2010 | 226.115 | 18.843 | 618 |
| 2011 | 759.324 | 63.277 | 2.075 |

Fuente: Seguimiento residuos aceitosos, área tratamiento químico, Metapetroleum Corp.

Que el desempeño esperado no se haya obtenido como se planteó en el estudio realizado en el 2009 se debe a diferentes causas, la inicial es el aumento drástico en la curva de producción durante los últimos años en Campo Rubiales y relación directa con respecto a la eficiencia de la clarificación del agua, de la química utilizada y de los equipos utilizados en el proceso.

A continuación se muestra una tabla con los volúmenes procesados de residuos aceitosos del año 2011 mensualmente:

Tabla 9. Volúmenes procesados mes a mes año 2011

| Año 2011 | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Mes | Producción Mensual | Promedio Volumen día |
| Enero | 46.972 | 1.540 |
| Febrero | 44.748 | 1.467 |
| Marzo | 54.045 | 1.772 |
| Abril | 48.505 | 1.590 |
| Mayo | 64.793 | 2.124 |
| Junio | 79.395 | 2.603 |
| Julio | 57.342 | 1.880 |
| Agosto | 83.828 | 2.748 |
| Septiembre | 68.622 | 2.250 |
| Octubre | 72.251 | 2.369 |
| Noviembre | 70.473 | 2.311 |
| Diciembre | 68.350 | 2.241 |
| Promedio Año Mensual | 63.277 | |
| Promedio Año Diario | 2.075 | |

Fuente: Seguimiento residuos aceitosos, área tratamiento químico, Metapetroleum Corp.

Teniendo en cuenta los volúmenes procesados vemos que en un solo año, está aumentando 700 barriles en el promedio de producción día aproximadamente.

6. EVALUACIÓN TÉCNICA

6.1 DESORCIÓN TÉRMICA

Fue el proceso inicialmente utilizado en Campo Rubiales y aunque actualmente es incapaz de manejar la carga de producción de residuos aceitosos su principio de tratamiento es una de los que permite obtener resultados aceptables de manera simple y limpia. Sin embargo el %BW&S del crudo recuperado es mayor al 10% y este porcentaje se podría disminuir utilizando otras condiciones de operación del sistema.

Por ser un sistema de evaporación no presenta diferencia a los cambios de composición y comportamiento del residuo aceitoso es así que si las condiciones de entrada al proceso cambian drásticamente por algún tipo de evento el proceso no se verá afectado.

Por otro lado en cuanto al consumo de combustible del proceso en su principal equipo, la caldera, no variará si el volumen tratado tiene fluctuaciones ya que su consumo es estático.

Este sistema es el que presenta menor impacto ambiental en comparación a los otros sistemas evaluados, aunque este sistema comprenda evaporación y emisión de vapores hacia la atmosfera, no genera un impacto ambiental con una gran envergadura ya que en su mayoría se produce vapor de agua, sin embargo el impacto ambiental es algo a reducir siempre en cualquier proceso.

6.2 REDUCCIÓN DE VOLUMEN

Es uno de los sistemas más eficientes, pero se ve restringido esencialmente por el funcionamiento de las centrifuga de discos, ya que su diseño y funcionamiento requiere de condiciones especiales de viscosidad de y porcentaje de BS&W lo que hace que el sistema sea muy sensible frente al cambio de condiciones de los residuos a tratar.

Las características de los residuos aceitosos producidos en Campo Rubiales y el caudal de operación requerido aseguran que utilizar una centrifuga de estas características como paso inicial no arrojaría un resultado apreciable.

Ahora bien y se implementan dos centrifugas que operen en serie, donde la primera centrifuga sea horizontal tricanter la cual acepta altos volúmenes de fluidos y altos porcentajes de BS&W; sin embargo esta centrifuga requiere de condiciones de viscosidad, que se alcanzan con el aumento de la temperatura. Esta centrifuga separa esencialmente agua libre, por lo que la disminución de BS&W alcanzada a la entrada de la centrifuga de discos no es muy representativa para asegurar su funcionamiento.

En comparación con otros sistemas evaluados, el sistema de reducción de volumen no presenta alguna ventaja significativa a la separación de agua libre. Esto se debe principalmente a la baja eficiencia de la centrifuga vertical, a las características de los residuos producidos en Campo Rubiales y a los caudales de operación requeridos.

Este sistema sería técnicamente viable si se adicionara un producto químico o un solvente anteriormente a la centrifugación; con el químico indicado se rompería las fuerzas que mantienen unidas las fases y así la obteniendo caudales de operación

a los deseados. La adición de solvente permite que el residuo alcance viscosidades requeridas para el buen funcionamiento de la centrifuga de discos.

Pruebas realizadas anteriormente por Clariant en el año 2009 demostraron un comportamiento anormal al que comúnmente acostumbran los residuos aceitosos producidos en Campo Rubiales por la adición de química y no se obtuvieron resultados positivos con esta prueba, pero si se concluyó que para que la química sea efectiva se debe tener una homogenización del fluido ya que el tratamiento es muy sensible al cambio de características del fluido

6.3 EXTRACCIÓN POR SOLVENTE

Con respecto a la utilización de extracción por solvente se obtienen resultados favorable con respecto al crudo recuperado, ya que se alcanza un API de 19° y un BS&W 5%. La recuperación de un crudo de mayor API que el producido por Campo Rubiales no es muy relevante, ya que el crudo recuperado se mezcla con el crudo producido y por la gran escala de producción no se ve mucha influencia sobre su grado API.

Para que la extracción por solvente tenga una buena eficiencia de operación se requiere que la proporción solvente-residuo sea de 1:1, lo que implicaría volúmenes de tratamiento al doble de los que se produce y de la acumulación por tratar que se tenga en el campo. El uso de un solvente implica una recuperación, por lo cual se requiere la instalación de equipos para recuperar el solvente que se empleó para llevar a cabo un proceso de destilación.

Después del tratamiento de solvente se obtiene una corriente que no es ambiental y económicamente favorable, inicialmente la razón ambiental se debe a que el crudo obtenido aún tiene sólidos en suspensión y no se puede disponer de él, por lo cual se debe realizar otro proceso a la corriente obtenida para que se alcancen

las condiciones necesarias de disposición, por otro lado la instalación de equipo adicionales incrementará los costos en el tratamiento.

Este sistema no es tan susceptible a los cambios de características de la muestra, sin embargo por las pruebas realizadas por Clariant se observó que el porcentaje de mezcla residuo-solvente, a las condiciones del residuos aceitoso producido siempre va ser del 50%, lo cual hace que el volumen de tratamiento sea elevado haciendo el manejo de los residuos no sea técnica ni tampoco ambientalmente viable.

Considerando que la producción de residuos aceitosos disminuyera un 20% sería una excelente opción de tratamiento donde las características del crudo obtenido serían de un BS&W menor al 1% y 19°API.

6.4 SISTEMA COMBINADO

El sistema combinado al implementar diferentes equipos se encuentra dentro de los que tiene mayor eficiencia durante el tratamiento.

Por las condiciones de la operación de la centrifuga se puede considerar que la separación de un porcentaje de agua libre antes de entrar a la evaporación es un proceso que ayuda al tratamiento del residuo aceitoso producido en Campo Rubiales.

La evaporación como un proceso subsiguiente al de centrifugado es lo más viable para el tratamiento, la mezcla puede llevar hasta los 120°C, para evitar la evaporación de componentes livianos del crudo, sin embargo los valores obtenidos de BS&W obtenidos con este sistema no son menores ni iguales al 10%. Se considera elevar la temperatura de la mezcla de nuevo hasta los 160°C de acuerdo con las pruebas de laboratorio realizadas por Clariant, donde se

determinó que la evaporación de los componentes livianos del crudo se inicia a los 130°C y que esto corresponde al 20% del crudo que inicialmente contiene el residuo aceitoso.

Después de la centrifugación, parte del solvente es separado de la fase del agua por lo tanto se reduce el contenido de polímero se separa en estado sólido, y así se reduce el volumen de agua que va a reingresar al sistema de tratamiento de agua de Campo Rubiales. El volumen de polímero sólido recuperado es mínimo por lo cual no se puede utilizar para relleno.

La partición o el recalentamiento del residuo inicialmente en una caldera a 120°C y después en un re-ebullidor a 160°C indica que se evapora más cantidad de agua que si se elevara en una sola caldera la mezcla a 160°C, sino que además se vuelve ambientalmente más viable considerando que entre 120°C y 160°C se produce la evaporación de los componentes livianos, así que de esta manera son fácilmente condensables.

Al implementar la centrifugación con solvente, se habla claramente de la segunda parte del sistema combinado, se debe realizar un tratamiento adicional para los sólidos y el agua separada. Este residuo obtenido se puede utilizar en la red vial de Campo Rubiales.

6.5 ANÁLISIS EVALUACIÓN TÉCNICA

De acuerdo a las consideraciones contempladas durante la evaluación técnica realizada se concluye que los sistemas de tratamiento por reducción de volumen y por extracción por solvente no son ni técnica ni ambientalmente aceptables para ser implementados, en cuanto al primero mencionado no es posible llevar a cabo su implementación porque su funcionamiento no tiene tolerancia a los cambios drásticos en la composición de la mezcla, y las centrifugas no tendrán un correcto

y el tratamiento no será eficiente y la recuperación de fluido y el retorno de inversión se verá truncado desde el inicio, ahora bien en cuanto a la extracción por solvente necesita una adición del solvente 1:1 como se mencionó anteriormente, así que el aumento de fluidos de tratamiento se duplicaría teniendo un problema de almacenamiento y manejo de estos fluidos; tomando en cuenta estos factores se decide no realizar un modelo de evaluación financiera para implementar el proyecto.

En cuanto al sistema combinado, correspondiente a la desorción térmica luego de la separación de agua libre, resulta un sistema de tratamiento ambientalmente posible a implementar para el tratamiento de los residuos aceitosos producidos en Campo Rubiales ya que cumple con la estabilidad en el proceso ya que si se presentar algún cambio en la composición del residuo tratado el proceso no se verá afectado y además no es necesario duplicar volúmenes o disponer de equipos extra para tratamientos complementarios.

En cuanto a la evaluación financiera se buscará concluir que alternativa de implementación es la más viable frente a un posible alquiler de equipo o la compra de estos con un pronto retorno de la inversión.

7. EVALUACIÓN FINANCIERA

Para realizar la evaluación financiera del sistema de tratamiento de residuos aceitosos combinado, es necesario establecer las condiciones que se tendrán en cuenta para realizar los cálculos.

7.1 CONDICIONES PARA EL ANÁLISIS

7.1.1 Capacidad de tratamiento.

El sistema de tratamiento a evaluar deber tener como mínimo una capacidad de tratar 1.000 1.500 barriles de residuo por día. El sistema de tratamiento combinado, tiene la capacidad de tratar 1.000 barriles de residuo por día, por lo que únicamente se necesita la instalación de una unidad de tratamiento.

- **Vida útil del proyecto.** La vida útil del proyecto está determinada en el cual se trate la totalidad de residuo aceitoso acumulado y el aumento de estos residuos a futuro o hasta que las características del fluido cambien drásticamente.
- **Escenarios de evaluación.** Con el efecto de evaluar los sistemas a las diferentes condiciones de precio de crudo y variaciones de los costos en la operación, se plantean dos posibles escenarios: pesimista y actual.

Considerando que el escenario pesimista surge de con respecto al descenso drástico del crudo con una cotización del crudo muy baja y unos costos de operación bastante altos.

El escenario actual considera la actual venta del crudo producido en Campo Rubiales y unos costos de operación muy bajos.

- **Variación de costos.** IPC Índice precio al consumidor
- **Precios del petróleo.** Para la evaluación financiera del proyecto se toma la variación de crudo para establecer los diferentes escenarios del desarrollo del proyecto. El crudo de Campo Rubiales se vende con referencia WTI cotizado en dólares, por lo cual la TRM a utilizar será la
- **Regalías.** Las regalías a pagar corresponden al 20% de la producción gravable.
- **Volúmenes de tratamiento a 2020.** La siguiente gráfica presenta los volúmenes considerados desde la instalación de la plata de sistema de tratamiento de residuos aceitosos considerando el tiempo de construcción desde inicio de año y con 90 días de tratamiento en el año de su construcción en adelante.

Tabla 10. Volúmenes a procesar

| Año | Diario | Anual |
|-------------|---------------|--------------|
| 2012 | 1000 | 90000 |
| 2013 | 1000 | 365000 |
| 2014 | 1000 | 365000 |
| 2015 | 1000 | 365000 |
| 2016 | 1000 | 365000 |
| 2017 | 1000 | 365000 |
| 2018 | 1000 | 365000 |
| 2019 | 1000 | 365000 |
| 2020 | 1000 | 365000 |

Fuente: Los Autores

7.2 CAPEX

La inversión inicial para la elaboración del proyecto será de \$ 5.341.290 pesos Colombianos COP. Considerando la compra de los activos fijos del sistema de tratamiento de residuos aceitosos con capacidad de tratamiento de 1000 BPD, este valor toma en cuenta la construcción de redes eléctricas dentro del sistema

de tratamiento, la instrumentación para el correcto monitoreo del proceso, los mecanismos rotatorios como válvulas, juntas, conectores macho, ahora bien los mecanismos estáticos como vasijas, intercambiadores, centrifugas, tanques, calderas y todas las tuberías de conexión entre equipos y transporte de fluidos tratados y recuperados.

7.3 OPEX PLANTA ADQUIRIDA

En el OPEX presentado se encuentra analizado a 10 años, en cuanto al personal que debe estar en el proceso se toma en cuenta los dos turnos o Back up de turno en los valores reportados.

Tabla 11. OPEX para planta adquirida por Metapetroleum Corp

| Año | Insumos y químicos, US\$/Bls | Mantenimiento, 3% Inversión inicial | Costo operacional | Total costos operacionales |
|------------|-------------------------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|
| 2012 | 108.000,00 | 40.059,68 | 149.052,63 | 297.112,31 |
| 2013 | 438.000,00 | 160.238,70 | 460.572,63 | 1.058.811,33 |
| 2014 | 438.000,00 | 160.238,70 | 474.389,81 | 1.072.628,51 |
| 2015 | 438.000,00 | 160.238,70 | 488.621,50 | 1.086.860,20 |
| 2016 | 438.000,00 | 160.238,70 | 503.280,15 | 1.101.518,85 |
| 2017 | 438.000,00 | 160.238,70 | 518.378,55 | 1.116.617,25 |
| 2018 | 438.000,00 | 160.238,70 | 533.929,91 | 1.132.168,61 |
| 2019 | 438.000,00 | 160.238,70 | 549.947,81 | 1.148.186,51 |
| 2020 | 438.000,00 | 160.238,70 | 566.446,24 | 1.164.684,94 |
| 2021 | 438.000,00 | 160.238,70 | 583.439,63 | 1.181.678,33 |

Fuente: Los Autores

Tabla 12. Personal requerido para la operación del sistema de tratamiento

| Opex | Turno | Personal requerido por barril tratado | Salario Integral, \$/mes | Total salario, \$/mes | Total salario, US\$/mes | Total salario, US\$/año |
|----------------------|-------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ingeniero Supervisor | 1 | 1 | \$10.000.000 | \$10.000.000 | \$5.263 | \$63.158 |
| Operadores | 3 | 6 | \$7.600.000 | \$45.600.000 | \$24.000 | \$288.000 |
| Técnico | 1 | 2 | \$7.600.000 | \$15.200.000 | \$8.000 | \$96.000 |
| | | 8 | | \$70.800.000 | \$37.263 | \$447.158 |

Fuente: Los Autores

7.4 OPEX PLANTA ALQUILADA

Al ser una planta en alquiler los costos de personal varían de acuerdo a la cantidad de fluido tratado, en cuanto a la generación de energía o adquisición de combustible debe ser asumido por Metapetroleum Corp. por lo cual los costos de este ítem varían de acuerdo a la cotización.

Tabla 13. Personal requerido para la operación del sistema de tratamiento.

| OPEX | \$/Barril | US\$/Barril | Fluido a tratar |
|----------|-----------|-------------|-----------------|
| Personal | 11700 | 6,16 | < 2000 BPD |
| Global | 9360 | 4,93 | >2000 BPD |

Fuente: Los Autores

Tabla 14. OPEX para planta alquilada por Metapetroleum Corp.

| Año | Fluido a proceso | | Costo Global Total US\$ |
|------|------------------|------------|----------------------------|
| | BPD | BPA | |
| 2012 | 1000 | 90.000,00 | 554.210,53 |
| 2013 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2014 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2015 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2016 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2017 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2018 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2018 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2019 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |
| 2020 | 1000 | 365.000,00 | 2.247.631,58 |

Fuente: Los Autores

7.4.1 Costo operación sistema de tratamiento adquirido

La siguiente tabla resume el costo de operación del proyecto con la plata de tratamiento adquirida

Tabla 15. Tabla OPEX a 10 años compra sistema de tratamiento de residuos aceitosos

| OPEX | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|--------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Opex fijos | \$ 149.053 | \$ 460.573 | \$ 474.390 | \$ 488.622 | \$ 503.280 | \$ 518.379 | \$ 533.930 | \$ 549.948 | \$ 566.446 |
| Opex variables | \$ 148.060 | \$ 598.239 | \$ 598.239 | \$ 598.239 | \$ 598.239 | \$ 598.239 | \$ 598.239 | \$ 598.239 | \$ 598.239 |
| Depreciación 1 (25%) | \$ 333.831 | \$ 1.335.323 | \$ 1.335.323 | \$ 1.335.323 | \$ 1.001.492 | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - |
| TOTAL OPEX US\$/AÑO | \$ 630.943 | \$ 2.394.134 | \$ 2.407.951 | \$ 2.422.183 | \$ 2.103.011 | \$ 1.116.617 | \$ 1.132.169 | \$ 1.148.187 | \$ 1.164.685 |
| TOTAL OPEX US\$/AÑO | \$ 630.943 | \$ 3.025.077 | \$ 5.433.028 | \$ 7.855.210 | \$ 9.958.221 | \$ 11.074.838 | \$ 12.207.007 | \$ 13.355.194 | \$ 14.519.879 |
| COSTO/BARRIL TRATADO US\$/BLS | \$ 7,01 | \$ 6,56 | \$ 6,60 | \$ 6,64 | \$ 5,76 | \$ 3,06 | \$ 3,10 | \$ 3,15 | \$ 3,19 |

Fuente: Los Autores

7.4.2 Costo operación sistema de tratamiento alquilado

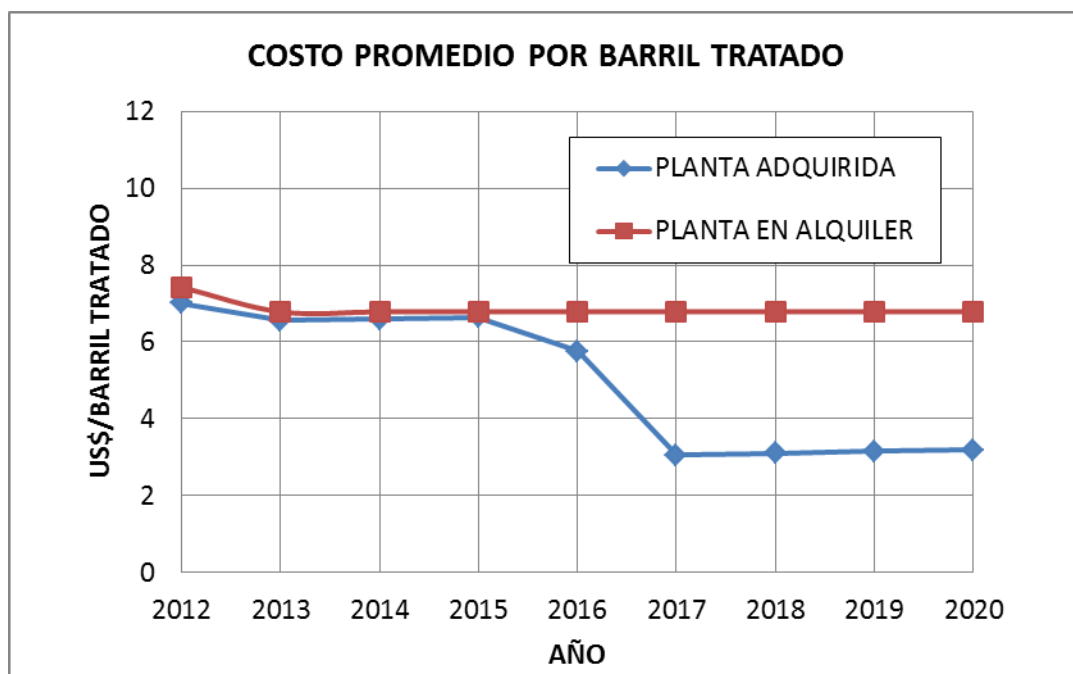
La siguiente tabla resume el costo de operación del proyecto con la plata de tratamiento alquilada

Tabla 16. Tabla OPEX a 10 años alquiler sistema de tratamiento de residuos aceitosos

| OPEX | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|--------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Opex Globales | \$ 554.211 | \$ 2.247.632 | \$ 2.247.632 | \$ 2.247.632 | \$ 2.247.632 | \$ 2.247.632 | \$ 2.247.632 | \$ 2.247.632 | \$ 2.247.632 |
| Opex PRE Combustible | \$ 114.023 | \$ 228.045 | \$ 228.045 | \$ 228.045 | \$ 228.045 | \$ 228.045 | \$ 228.045 | \$ 228.045 | \$ 228.045 |
| TOTAL OPEX US\$/AÑO | \$ 668.233 | \$ 2.475.677 | \$ 2.475.677 | \$ 2.475.677 | \$ 2.475.677 | \$ 2.475.677 | \$ 2.475.677 | \$ 2.475.677 | \$ 2.475.677 |
| TOTAL OPEX ACUMULADO US\$ | \$ 668.233 | \$ 3.143.910 | \$ 5.619.586 | \$ 8.095.263 | \$ 10.570.940 | \$ 13.046.617 | \$ 15.522.293 | \$ 17.997.970 | \$ 20.473.647 |
| COSTO/BARRIL TRATADO US\$/BLS | \$ 7,42 | \$ 6,78 | \$ 6,78 | \$ 6,78 | \$ 6,78 | \$ 6,78 | \$ 6,78 | \$ 6,78 | \$ 6,78 |

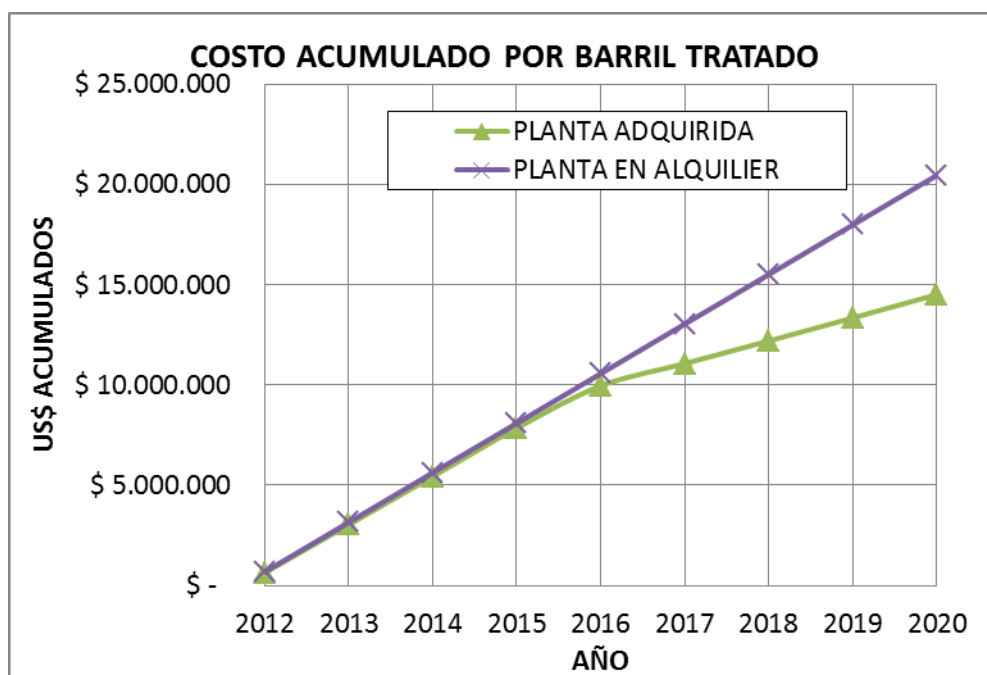
Fuente: Los Autores

Figura 17. Costo promedio tratamiento por barril tratado.



Fuente: Los Autores

Figura 18. Costo acumulado tratamiento por barril tratado



Fuente: Los Autores

CONCLUSIONES

- Los residuos aceitosos producidos en Campo Rubiales no son homogéneos, donde se distinguen agua libre y aceite de apariencia lodosa.
- Los fluidos aceitosos producidos en Campo Rubiales se caracterizan por ser una emulsión compleja, no se puede clasificar como emulsión directa o inversa. Por su comportamiento atípico pero los tratamientos revisados de alguna manera dan una solución al problema que causan las borras de producción.
- Los cambios de características en los residuos aceitosos nos obliga a realizar la implementación de diferentes tipos de procesos para poder tratar los residuos de manera adecuada y a su vez que pueda manejar cambios en la composición del fluido a tratar.
- Para lograr un tratamiento óptimo de los residuos aceitosos producidos en Campo Rubiales es indispensable tener conocimiento y aplicación de tres principios básicos de tratamientos descritos en los capítulos anteriores: desorción térmica, reducción de volumen y extracción por solvente.
- El resultado de la evaluación económica arroja que la opción más viable es comprar los equipos y operarlos con personal propio de esta manera hay un ahorro significativo en los costos operativos.

BIBLIOGRAFÍA

BUSCADOR DE INFORMACIÓN SCRIB. <http://es.scribd.com/doc/24999051/Emulsiones-de-Agua-en-Petroleo-Crudo>

CLASIFICACIÓN DE EMULSIONES. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10577/Capitulo3.pdf>

ICONTEC-Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Normas colombianas para la presentación de trabajos de investigación.

Manual de operación CPF-2 Campo Rubiales. Área producción. Metapetroleum Corp-

Procesos de tratamiento residuos aceitosos. Área tratamiento químico. Metapetroleum Corp

Shirley MARFISI y Jean Louis SALAGER. Deshidratación de Crudo – Principios y Tecnología

Sunil L. Kokal. Crude Oil Emulsions – Chapter 12 , Saudi Aramco

VEGA RON, Miguel. Deshidratación Electrostática en Hidrocarburos para la Facultad de Ciencias de la Ingeniería en la Escuela de la Tecnología de Petróleo. Quito, Ecuador. 2008.