

**ANÁLISIS GERENCIAL DE LOS PROCESOS IMPLEMENTADOS PARA LA
RECUPERACIÓN DE CRUDO DE RESIDUOS ACEITOSOS PROVENIENTES
DE LAS DISTINTAS LABORES ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE
HIDROCARBUROS**

OSCAR HERNANDO MONTOYA GIRALDO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2013

**ANÁLISIS GERENCIAL DE LOS PROCESOS IMPLEMENTADOS PARA LA
RECUPERACIÓN DE CRUDO DE RESIDUOS ACEITOSOS PROVENIENTES
DE LAS DISTINTAS LABORES ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE
HIDROCARBUROS**

OSCAR HERNANDO MONTOYA GIRALDO

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

Director

JANNETH ORDUZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2013

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. MARCO REFERENCIAL	15
4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS	16
4.1.1 Clasificación según el origen de los residuos	16
4.1.2 Clasificación según la composición de los residuos	17
5. METODOLOGÍA	20
5.1 MÉTODO	20
5.2 TÉCNICA	20
6. RESIDUOS ACEITOSOS PARA RECUPERACIÓN DE HIDROCARBURO DURANTE LA PRODUCCIÓN	22
6.1 DESCRIPCIÓN	24
6.1.1 Borrás de producción	24
6.1.2 Emulsiones	26
6.2 TRATAMIENTO	27
6.2.1 Desorción térmica	27
6.2.1.1 Tipos de UDT	28
6.2.1.2 Proceso de desorción térmica	32
6.2.2 Reducción de volumen	34
6.2.2.1 Tipos de centrifugas	35
6.2.2.2 Proceso de reducción de volumen	37
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
7.1 ANÁLISIS TÉCNICO	39
7.1.1 Desorción térmica	39
7.1.2 Reducción de volumen decanter	40

7.1.3 Reducción de volumen tricanter	41
7.1.4 Comparación técnica de los sistemas	41
7.2 ANÁLISIS AMBIENTAL	43
7.2.1 Desorción térmica	44
7.2.2 Reducción de volumen decanter y tricanter	44
7.2.3 Comparación ambiental de los sistemas	45
7.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	46
7.3.1 Cotización de los sistemas de tratamiento de borras	46
7.3.2 Egresos	50
7.3.3 Ingresos.....	52
7.3.4 Cálculo del PayBack.....	53
7.3.5 Relación beneficio-costó	55
7.3.6 Flujo de caja acumulado.....	55
7.3.7 Comparación económica de los sistemas	59
7.4 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS	60
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Residuo aceitoso.....	15
Figura 2. Borrás de producción en una piscina.	25
Figura 3. Borrás provenientes de una tubería.	25
Figura 4. Tipos de calentamiento	29
Figura 5. Calentamiento por hornillas o estufas	29
Figura 6. Calentamiento por aceite térmico.....	30
Figura 7. Calentamiento eléctrico.....	31
Figura 8. Calentamiento por fricción.....	31
Figura 9. Unidad de desorción térmica.....	33
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de desorción térmica.....	34
Figura 11. Centrífuga decanter.....	36
Figura 12. Centrífuga tricanter.....	36
Figura 13. Diagrama de flujo de reducción de volumen con centrífuga decanter..	37
Figura 14. Diagrama de flujo de reducción de volumen con centrífuga tricanter...	38
Figura 15. Ganancias a futuro para los tres sistemas	54
Figura 16. Flujo de caja acumulado TDU por mes	56
Figura 17. Flujo de caja acumulado decanter por mes.....	57
Figura 18. Flujo de caja acumulado tricanter por mes.....	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los residuos según su composición	22
Tabla 2. Clasificación de los residuos según su origen	23
Tabla 3. Comparación técnica de los sistemas	42
Tabla 4. Comparación ambiental de los sistemas	45
Tabla 5. Composición de la borra a tratar	46
Tabla 6. Cotización del sistema TDU	47
Tabla 7. Cotización sistema de reducción decanter	47
Tabla 8. Cotización sistema de reducción tricanter	48
Tabla 9. Inversión inicial para cada sistema.....	48
Tabla 10. Eficiencia de cada sistema	49
Tabla 11. Aceite recuperado	49
Tabla 12. Ganancia por cada barril	52
Tabla 13. Ingresos diarios, mensuales y anuales.....	52
Tabla 14. PayBack para los tres sistemas	53
Tabla 15. Relación beneficio-costos	55

RESUMEN

TITULO:ANÁLISIS GERENCIAL DE LOS PROCESOS IMPLEMENTADOS PARA LA RECUPERACIÓN DE CRUDO DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS PROVENIENTES DE LAS DISTINTAS LABORES ASOCIADAS A LA PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS¹.

AUTORES: MONTOYA GIRALDO, Oscar Hernando**

PALABRAS CLAVE:Recuperación de crudo, Borrás de producción, Análisis técnico, Desorción térmica, Reducción de volumen, Centrifugación, Análisis económico, Análisis ambiental.

DESCRIPCIÓN

El principal objetivo de este proyecto consistió en realizar un análisis gerencial a los procesos de recuperación de crudo de residuos aceitosos que se generan durante la producción de un campo de petróleo.

Inicialmente se realizó la descripción de todos los tipos de residuos que se generan durante la actividad petrolera, clasificándolos según su origen y según su composición. A continuación se seleccionaron los tipos de residuo referentes a este estudio que son las borras de producción y se realizó la descripción de ellas además de una breve descripción de emulsiones. Una vez terminada esta descripción, se procedió a explicar los procesos de tratamiento utilizados en la industria petrolera para recuperar aceite de los residuos aceitosos provenientes de la producción de hidrocarburos. Esta descripción se hizo para tres escenarios diferentes: el sistema de desorción térmica, el sistema de reducción de volumen con centrífuga decanter y el sistema de reducción de volumen con centrífuga tricanter.

Finalmente, se procedió a realizar el análisis gerencial, dividido en el análisis técnico, el análisis ambiental y el análisis económico. Este análisis se realizó para cada uno de los tres sistemas descritos. Como conclusión se decidió que los sistemas de reducción por volumen decanter y tricanter son más eficientes técnica y económicamente con respecto al sistema de desorción térmica que resultó ser más eficiente ambientalmente.

1. Monografía.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director: Janneth Orduz.

ABSTRACT

TITLE: MANAGEMENT ANALYSIS OF THE IMPLEMENTED PROCESSES FOR OIL RECOVERY FROM WASTE OIL PRODUCED IN THE DIFFERENT TASKS ASSOCIATED TO HYDROCARBON PRODUCTION²

AUTHORS: MONTOYA GIRALDO, Oscar Hernando**

KEYWORDS: Oil recovery, Waste oil, Technical analysis, Thermal desorption, Volume reduction, Centrifugation, Economic analysis, Environmental analysis.

DESCRIPTION

The main objective of this monograph was to realize a management analysis to the recovery process of waste oil that is generated during the production of a crude oil field.

Initially, it was made the description of the types of waste that are generated during the oil activity, by doing a classification depending on its origin and composition. Then, they were selected the types of waste for this study that are the ones that are produced during the production. After that, it was described a brief theory of emulsions and the type of waste of interest. Once it was finished the description, it was made an explanation of the treatments for the waste oil from production. This description was made for three different sceneries: The thermal desorption system, the volume reduction with decanter centrifuge and the volume reduction with tricanter centrifuge.

Finally, it was proceeded to realize the management analysis. This analysis was divided in three independent analyses: technical, environmental and economic analysis. These individual analyses were made for the three treatments previously described. As a conclusion, it was decided that the best option for the oil recovery from oil waste is the volume reduction with decanter or tricanter. This two systems are reliable for technical and economic analyses but not for environmental analysis. Also, the thermal desorption system is reliable for environmental analysis but no for the other.

2. Monograph.

** Physico- Chemical Engineering Faculty, Petroleum Engineering School, Director: Janneth Orduz.

INTRODUCCIÓN

Durante la exploración y explotación de un campo de petróleo, se generan distintos residuos provenientes de la perforación, la producción y el transporte del hidrocarburo. Estos residuos generan impactos ambientales desfavorables para la sociedad y la industria debe ser responsable del tratamiento y disposición de estos residuos por ser la generadora de ellos.

Los residuos aceitosos varían dependiendo de su composición y origen. Existen residuos en los cuales predomina la presencia de agua, otros en los cuales predomina la presencia de sólidos y otros en los cuales predomina la presencia de aceite. Los tratamientos aplicados para estos residuos son diferentes dependiendo de la composición de las fases. Los residuos producidos durante la producción del crudo se encuentran principalmente en el fondo de los tanques de almacenamiento y en las tuberías de transporte y reciben el nombre de borras. Las borras contienen un alto porcentaje de hidrocarburo y de sólidos y en más bajo porcentaje de agua. Generalmente las borras presentan emulsiones estables debido al movimiento de los hidrocarburos a través de las facilidades de producción dificultando el proceso de recuperación del hidrocarburo.

El objetivo principal de la industria de los hidrocarburos es generar ganancias y partiendo desde este punto de referencia, es necesario recuperar el crudo presente en las borras de producción. Para esto, se han implementado diferentes sistemas de tratamiento de residuos aceitosos que deben tener la capacidad de recuperar la mayor cantidad de aceite posible de las borras, entre ellos se encuentran la desorción térmica y la reducción de volumen.

La recuperación eficiente de crudo de las borras de producción requiere del desarrollo de un proyecto que busque analizar los beneficios técnicos, ambientales y económicos de cada uno de los tratamientos para de esta manera, tomar la decisión más acertada con base en un estudio aplicado de los sistemas de tratamiento y de esta manera asegurar el éxito del proyecto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria del petróleo se denominan residuos aceitosos a todos aquellos residuos altamente viscosos conformados por agua, sólidos inorgánicos (arena, rocas, lodos de perforación), materia orgánica e hidrocarburos, especialmente de cadenas largas, que se sedimentan y aglomeran después de largos períodos de tiempo en zonas del proceso de extracción y transporte con velocidades reducidas.

La acumulación de borras causa graves problemas, pues generan una reducción de la capacidad instalada de almacenamiento así como un aumento de las pérdidas por taponamiento en tuberías, con el consiguiente aumento en el gasto energético de bombeo y una reducción del caudal operativo del mismo. Para evitar estos problemas, el mantenimiento regular de los tanques usados en almacenamiento y bombeo de crudo requiere de la extracción y posterior procesamiento de cantidades importantes de borras.

Como alternativa a la disposición final de las borras se ha sugerido el uso de tratamientos que permiten recuperar el crudo que forma parte de las mismas. La implementación de estos procesos permite simultáneamente reducir el volumen de borras y generar valor agregado con la recuperación de crudo, lo cual se traduce en beneficios económicos para el productor al mismo tiempo que se reduce la carga contaminante que debe soportar el medio ambiente.

Mediante un análisis gerencial de los procesos empleados para la recuperación de crudo de los residuos aceitosos se pueden establecer las alternativas más favorables para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos aceitosos generados en las actividades asociadas con la producción de hidrocarburos.

2. JUSTIFICACIÓN

La producción, el almacenamiento y el transporte de hidrocarburos está generalmente sujeto a problemas operacionales causados bien sea por fallas en los equipos de trabajo o por las condiciones físico-químicas del crudo que, mezclado con los sedimentos y el agua provenientes del yacimiento y con los residuos del lodo de perforación, forman compuestos complejos y de difícil manejo. Estos compuestos, disminuyen la gravedad API y aumentan la viscosidad del crudo lo que se transforma en otro problema puesto que dificulta la movilidad de los hidrocarburos y los convierte en residuos aceitosos.

Los residuos aceitosos o borras pueden contener altas cantidades de crudo que, dependiendo de su disposición final pueden generar pérdidas económicas y problemas ambientales que pueden desencadenar en inconvenientes para las empresas operadoras.

Existen diferentes tratamientos para la recuperación de crudo de los residuos aceitosos, algunos de ellos son considerados más costosos que otros y teniendo en cuenta que se debe seleccionar el proceso que sea ambiental, técnica y económicamente más viable, por el bien de la empresa, es indispensable realizar un análisis gerencial para tomar la mejor decisión en el momento de seleccionar un tratamiento para la recuperación de crudo de los residuos aceitosos.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis gerencial de los procesos tecnológicos para evaluar la viabilidad de recuperación de crudo de los residuos aceitosos provenientes de las distintas labores asociadas con la producción de hidrocarburos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una descripción de los residuos aceitosos con potencial de recuperación de crudo.
- Identificar los procesos tecnológicos para la recuperación de los residuos aceitosos.
- Diseñar y aplicar el análisis gerencial de los procesos implementados para la recuperación de crudo.
- Definir el proceso de recuperación de residuos aceitosos que sea económicamente más viable.

4. MARCO REFERENCIAL

Los residuos aceitosos se generandurante toda la actividad petrolera, partiendo desde la perforación de un yacimiento hasta la producción de un campo. Estos residuos están compuestos en su mayoría por hidrocarburo, agua, sólidos, sedimentos, lodos de perforación, entre otros.

Figura 1.Residuo aceitoso



Fuente: Tomado de <http://www.1800tankvac.com>

4. 1 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS³

Existen dos maneras de clasificar los residuos aceitosos, la primera por su origen y la segunda por su composición.

4.1.1 Clasificación según el origen de los residuos

- **Aguas contaminadas con crudo:** Este tipo de residuo se genera en los skimmers, trampas de grasa, entre otras facilidades de producción.
- **Fluidos aceitosos de la operación de workover y servicio a pozos:** Son líquidos aceitosos con bajo contenido de sólidos generados en completamientos y reactivación de pozos.
- **Geles, polímeros, espumas de limpieza, gomas y sus derivados y píldoras viscosas:** Producto del trabajo de estimulación a pozos basados en sustancias poliméricas o píldoras para corrección de pérdidas y control de pozos.
- **Fluidos aceitosos contaminados con sólidos y emulsiones estables:** Son fluidos de producción provenientes del gunbarrel y otras vasijas tales como free waterknockout o FWKO's.
- **Borras o fondos provenientes de la limpieza de vasijas en facilidades de producción:** Son sólidos y depósitos de fondo en vasijas que hacen parte de las facilidades de superficie, tales como separadores, tanques de prueba, skimmers, lechos de secado de plantas de inyección de agua, decantadores, gunbarrels, entre otras vasijas.

3CARDONA, V.; RODRÍGUEZ, N. "Propuesta para el diseño e implementación de un esquema de manejo, tratamiento integral y recuperación de crudo, aguas para reinyección y salmueras para reutilización, de los residuos aceitosos (contaminados con hidrocarburo), generados por la operación del campo petrolero ubicado en el corregimiento el centro, municipio de Barrancabermeja, Santander". UIS, 2011.

- **Material filtrante contaminado con sólidos e hidrocarburo:** Medios filtrantes provenientes de la limpieza de filtros de las plantas de inyección de agua.
- **Emulsiones, crudo sucio y lodo:** Crudo de retorno en mantenimiento de pozos, emulsión parafinita con alto contenido de sólidos que forma una nata y proviene de la interface de los tratadores térmicos.
- **Suelo y material vegetal contaminado de hidrocarburo:** Generados durante la limpieza de derrames de hidrocarburo proveniente de roturas por corrosión, situaciones operacionales y actos ilícitos, contaminaciones con hidrocarburo durante perforaciones a pozos y trabajos de retiro de arenas (estimulación de pozos).

4.1.2 Clasificación según la composición de los residuos

Esta clasificación considera la composición de los residuos y por tanto su respectivo tratamiento.

Grupo 1. Residuos aceitosos en los cuales predomina la presencia de agua.

- a. Fluidos acuosos contaminados con hidrocarburos.** Dentro de esta categoría se encuentran todos los fluidos con las siguientes características:
 - **Contenido de agua:** 90% a 99%.
 - **Contenido de sólidos y aceite:** Menor al 10%.
- b. Fluidos acuosos con alto contenido de cloruros contaminados con crudo provenientes de las actividades de reactivación y servicio a pozos.** Dentro de esta categoría se encuentran todos los fluidos con las siguientes características:

- **Contenido de agua:** 80% a 95%.
- **Máximo contenido de sólidos y aceite:** 20%.

El tratamiento para estos dos grupos es la unidad de tratamiento de aguas, UTA, que incluye tratamiento físico-químico y mecánico, a través de tanques, en los cuales se sella el fluido para garantizar de esta manera la separación de las fases aceitosas y posteriormente por decantación, floculación y depositación se garantiza la separación de los sólidos.

Grupo 2.Fluidos aceitosos, emulsiones y lodos. Dentro de esta categoría se encuentran todos los fluidos que tengan las siguientes características:

- **Contenido de aceite:** 20% a 80%.
- **Contenido de agua:** 0% a 80%.
- **Contenido de sólidos:** 0% a 25%.

El tratamiento para este grupo es la unidad de tratamiento de lodo, UTL, que incluye tratamiento físico-químico y mecánico, a través de piscinas donde se realiza la segregación por calidad de residuo, adicionando rompedores, calentamiento con gas natural y centrifugado de ser necesario, para lograr la separación del aceite, del agua y los sólidos.

Grupo 3.Borras y sólidos con igual o más del 10% de aceite. Dentro de esta categoría se encuentran todos los residuos que tengan las siguientes características:

- **Contenido de aceite:** 10% a 60%.
- **Contenido de agua:** 0% a 20%.
- **Contenido de sólidos:** 25% a 80%.

El tratamiento para este grupo se realiza a través de la unidad de desorción térmica, UDT, sometiendo el material a temperaturas superiores a 500°C para evaporar y posteriormente condensar los vapores generados (agua e hidrocarburo), separándolos por diferencia de densidades, dejando los sólidos totalmente inertes. Otro tratamiento disponible para este grupo es la centrifugación que aprovecha la velocidad generada por la rotación del equipo para separar las partículas, las cuales se sedimentan hacia el fondo de éste permitiendo la obtención del hidrocarburo para ser reutilizado.

Grupo 4. Residuos sólidos con contenido menor al 10% de hidrocarburo.

a. Suelo contaminado. Dentro de este grupo se consideran los residuos con las siguientes características:

- **Contenido de aceite:** Menor a 10%.
- **Contenido de agua:** 0% a 60%
- **Contenido de sólidos:** 30% a 90%.

Este tipo de residuo, por tener una cantidad de hidrocarburo insignificante en términos de recuperación, requiere un tratamiento diferente, para su disposición final. Para este caso, existen dos tratamientos diferentes, el primero consiste en la biorremediación a través del uso de bacterias y de fertilizantes o consorcios bacterianos (termófila) para la conservación de las cepas bacterianas, esto para reducir al máximo el residuo. El segundo tratamiento es el más antiguo y consiste en la incineración controlada del residuo, transformándolo en materiales inertes, no combustibles e inodoros.

5. METODOLOGÍA

La efectividad de un proceso de recuperación de crudo, puede valorarse a través del estudio independiente de cada uno de los factores que intervienen en el desempeño del sistema. Este estudio se realiza a través del análisis técnico, ambiental y económico del sistema, para poder evaluar los beneficios y las desventajas del mismo. El método y la técnica utilizados para dicha evaluación, se describen a continuación.

5.1 MÉTODO

El método es de carácter deductivo. Se emplearán 3 sistemas de recuperación de crudo, que difieren en su modo de operación y en los residuos finales que cada equipo aporta. Se realizará el estudio para tres análisis; técnico, ambiental y económico. El objetivo es encontrar el sistema que sea más conveniente para cada uno de los análisis con el fin de encontrar un sistema que sea tanto técnico, ambiental como económicamente viable.

5.2 TÉCNICA

El estudio será de carácter descriptivo y se fundamenta en la investigación comparativa. El procedimiento consistirá en comparar los sistemas de tratamiento de recuperación de crudo para cada uno de los análisis.

El procedimiento consiste en la descripción de tres sistemas, a saber, sistema de desorción térmica, sistema de reducción de volumen con centrífuga decanter y sistema de reducción de volumen con centrífuga tricanter. Posteriormente, se realizará el análisis técnico, el análisis ambiental y el análisis económico para los tres sistemas, a través de la comparación de ellos. En cada caso, el sistema que presente los mayores beneficios, será el sistema más viable y por tanto el sistema

que se seleccionará como el más apropiado para la recuperación de crudo de las borras de producción.

6. RESIDUOS ACEITOSOS PARA RECUPERACIÓN DE HIDROCARBURO DURANTE LA PRODUCCIÓN

En el capítulo 4 se describieron los tipos de residuos aceitosos generados durante los procesos implementados en la industria de los hidrocarburos como la perforación, la producción y el almacenamiento. La descripción de estos residuos se hizo a través de dos clasificaciones diferentes, la primera dependiendo del origen del residuo y la segunda dependiendo de la composición de éste. Uno de los objetivos de este trabajo es el estudio de los procesos implementados para la recuperación de crudo de los residuos aceitosos provenientes de las labores de producción de hidrocarburos. Para analizar este objetivo es necesario definir el tipo de residuo aceitoso a ser estudiado y esto se hace a través de las clasificaciones mencionadas previamente utilizando las siguientes tablas:

Tabla 1. Clasificación de los residuos según su composición

Tipo de residuo	Recuperación de crudo	Origen
Grupo 1: Fluidos acuosos	Máximo 10%	Producción
Grupo 2: Fluidos aceitosos emulsiones y lodos	Entre 20% y 80%	Perforación
Grupo 3: Borrás y sólidos	Entre 10% y 60%	Facilidades de producción
Grupo 4: Residuos sólidos	Menor al 10%	Derrames

Fuente: El autor.

De la tabla 1 se puede concluir que el grupo conveniente para el caso en estudio es el grupo 3 ya que la recuperación de aceite para el caso de las borras está entre el 10% y el 60% siendo una cantidad significativa de hidrocarburo y adicionalmente pertenece al área de producción, que es el interés de este estudio. El grupo 1 no se considera puesto que a pesar de pertenecer al área de producción, el máximo de aceite que se puede recuperar es del 10% por ser un

fluido acuoso donde predomina la presencia de agua. Para el caso del grupo 2 que contiene la más alta recuperación posible de aceite con un porcentaje entre 20% y 80% es descartado porque pertenece al área de perforación. Finalmente, los residuos sólidos no se consideran por tener una recuperación de aceite mínima.

Tabla 2. Clasificación de los residuos según su origen

Tipo de residuo	Origen
Aguas contaminadas con crudo	Skimmers, trampas de grasa
Fluidos aceitosos de la operación de workover y servicio a pozos	Completamiento y reactivación de Pozos
Geles, polímeros, espumas de limpieza, gomas y píldoras viscosas	Estimulación a pozo
Fluidos aceitosos contaminados con sólidos y emulsiones estables	Gunbarrel y FWKO's
Borras o fondos provenientes de la limpieza de vasijas en facilidades de producción	Separadores, tanques de prueba, skimmers, gunbarrels
Material filtrante contaminado con sólidos e hidrocarburos	Limpieza de filtros de plantas de inyección de agua
Emulsiones, crudo sucio y lodo	Perforación
Suelo y material vegetal contaminado con hidrocarburo	Derrames de hidrocarburos

Fuente: El autor.

A partir del análisis de la tabla 2 se puede concluir que las únicas opciones válidas para este estudio son los fluidos aceitosos contaminados con sólidos y emulsiones

estables que se generan en los gunbarrel y FWKO's y las borras provenientes de las facilidades de producción como separadores, tanques de prueba, skimmers, gunbarrels, etc.

6.1 DESCRIPCIÓN

Según el análisis realizado a partir de las tablas 1 y 2 este trabajo se centra en los residuos aceitosos generados en las facilidades de producción como las borras y las emulsiones estables. A continuación se realiza una descripción de estos tipos de residuos.

6.1.1 Borras de producción⁴

Las borras de producción son residuos aceitosos que se forman en los tanques de almacenamiento y las tuberías a partir de la sedimentación y aglomeración de diferentes componentes como hidrocarburos, sólidos, sedimentos entre los que se incluye roca y arena, además de materia orgánica y agua la cual genera una emulsión con el hidrocarburo.

Las aglomeraciones de hidrocarburo, la retención de sedimentos y la presencia de la emulsión producen una disminución en la gravedad API del crudo, llegando a valores menores a 10° API. Estos crudos forman masas densas y altamente viscosas que dificultan el transporte y el bombeo y que se depositan en el fondo de los tanques, disminuyendo su capacidad y causando taponamiento en las tuberías.

⁴SUÁREZ, L. "Desarrollo de un método químico para recuperación de crudo a partir de las borras generadas en los procesos de mantenimiento de tanques y tuberías en distritos de producción petroleros de Colombia". Universidad Nacional de Colombia, 2011.

Figura 2. Borrás de producción en una piscina.



Fuente: Tomado de SUÁREZ, L. “Desarrollo de un método químico para recuperación de crudo a partir de las borras generadas en los procesos de mantenimiento de tanques y tuberías en distritos de producción petroleros de Colombia”. Universidad Nacional de Colombia, 2011.

Figura 3. Borrás provenientes de una tubería.



Fuente: Tomado de SUÁREZ, L. “Desarrollo de un método químico para recuperación de crudo a partir de las borras generadas en los procesos de mantenimiento de tanques y tuberías en distritos de producción petroleros de Colombia”. Universidad Nacional de Colombia, 2011.

6.1.2 Emulsiones⁵

Una emulsión es un sistema líquido heterogéneo que consiste en la mezcla de dos líquidos inmiscibles donde uno de los líquidos está disperso en forma de pequeñas gotas en el otro. Una emulsión se diferencia de una dispersión simple de un líquido en otro por el hecho de que en una emulsión, la probabilidad de coalescencia de las gotas en contacto con las otras es muy reducida debido a la presencia de un emulsificante, que inhibe la coalescencia. Esta inhibición no está presente en una dispersión.

La estabilidad de la emulsión está controlada por el tipo y la cantidad de agentes emulsificantes. Estos agentes emulsificantes son los que previenen la coalescencia de las gotas.

Una emulsión está compuesta por dos fases, la fase continua y la fase dispersa, las cuáles también se conocen como fase externa y fase interna, respectivamente. La fase dispersa está representada por pequeñas gotas sobre la fase continua y por su parte, la fase continua se encuentra en mayor proporción en la emulsión.

Existen diferentes tipos de emulsiones de acuerdo con la distribución de las fases. Inicialmente se tienen las emulsiones directas (O/W) o emulsiones en las que la fase continua es el hidrocarburo y la fase dispersa es el agua. Este tipo de emulsión es la que normalmente se encuentra desde el yacimiento hasta el sistema de deshidratación de crudo. Otro tipo de emulsión corresponde a las emulsiones inversas (W/O) o emulsiones en las cuales la fase continua es el agua y la fase dispersa es el aceite. Este tipo de emulsión se encuentra frecuentemente en el sistema de tratamiento de agua de producción. Finalmente, se tienen las emulsiones duales (W/O/W), en las cuales se encuentran pequeñas gotas de agua dispersas en grandes gotas de crudo, que a su vez se encuentran dispersas en una fase continua de agua.

5ARNOLD, K.; SMITH, H.; BRADLEY, H. "Petroleum engineering handbook".Capítulo 19. Tercera edición. SPE, Texas USA.

6.2 TRATAMIENTO^{6y7}

Las borras aceitosas, dependiendo de su composición, pueden o no formar emulsiones. En la mayoría de los casos se forma la emulsión porque generalmente en los yacimientos hay presencia de agua. Para tratar las borras, es necesario utilizar equipos capaces de separar las partículas sólidas e impurezas del líquido y que adicionalmente puedan separar el agua del aceite.

Usualmente en la industria se utilizan dos tratamientos para estos tipos de residuos aceitosos basados en los principios de desorción térmica y reducción de volumen.

6.2.1 Desorción térmica

La desorción térmica es un proceso que utiliza temperaturas elevadas con el fin de volatilizar las fases de la emulsión presente en las borras de producción. El tratamiento se basa principalmente en un proceso de dos pasos donde se aplica calor a la borra aceitosa con el fin de vaporizar los fluidos en una corriente de gas que, en un segundo paso, es tratada para obtener el hidrocarburo recuperado. El tratamiento se realiza en la unidad de desorción térmica (UDT).

El método consiste en calentar el residuo a temperaturas elevadas que oscilan entre 315°C y 648°C dependiendo del punto de ebullición del compuesto más volátil. Como resultado se espera la separación de las fases de la emulsión, a través de un segundo proceso que puede ser condensación donde, por diferencia de densidades, se presenta la separación de las fases. Por otro lado, se espera la salida de ceniza, que es consecuencia de la incineración de algunos sólidos. Este

6CELY, J.; RODRÍGUEZ, S. "Estudio de factibilidad técnica y económica para la selección de un sistema de tratamiento de residuos aceitosos en campo Rubiales". UIS, 2012.

7 MONTES, E. "Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros". UIS, 2010.

tratamiento permite la separación tanto del agua como del aceite, sin embargo no permite la separación de algunos finos presentes en la emulsión.

Para aplicar este método, es indispensable tener pleno conocimiento de las propiedades de las borras de producción, esto porque se debe elevar la temperatura hasta el punto de ebullición del componente más volátil. Este sistema, dependiendo de la composición de la borra es o no eficiente, sin embargo, su eficiencia en casos reales generalmente es del 50%.

6.2.1.1 Tipos de UDT⁸

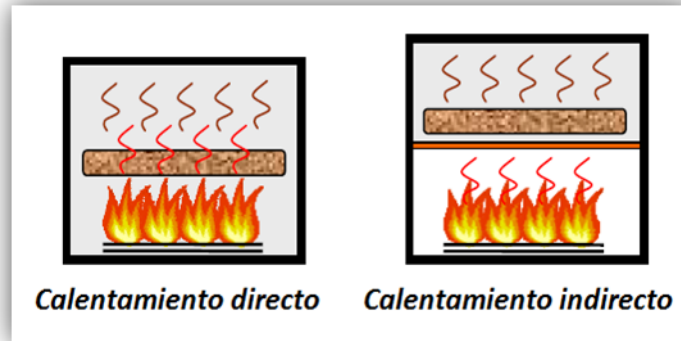
Existe una amplia variedad de sistemas de desorción térmica que han sido usados para el tratamiento de residuos aceitosos, los cuales varían dependiendo del método de calentamiento usado, de la fuente de calentamiento y del modo de operación. Las principales variaciones del sistema se describen a continuación:

a. De acuerdo al método de Calentamiento:

- **Directo:** El calor se aplica directamente al residuo. En este método no hay separación entre los gases de combustión y los gases del residuo generados por el calentamiento. Este método no es considerado una buena opción debido a esta mezcla de gases.
- **Indirecto:** El calor se aplica al exterior de una cámara de calentamiento y se transfiere a través de las paredes de la cámara a la borra de producción. En este caso, ni la fuente de calentamiento ni los gases de combustión entran en contacto con el residuo aceitoso vaporizado.

8ENVIRONMENT AGENCY.“Treating waste by thermal desorption”.
Primera edición.UnitedKingdom. 2011.

Figura 4. Tipos de calentamiento

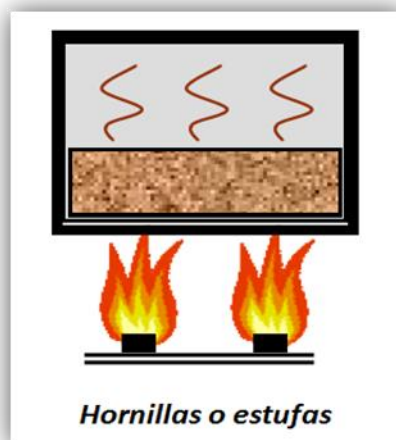


Fuente:Modificado de ENVIRONMENT AGENCY. "Treating waste by thermal desorption". Primera edición. UnitedKingdom. 2011.

b. De acuerdo a la fuente de calentamiento (sólo para sistema indirecto):

- **Hornillas o estufas:** Muchas hornillas o estufas alimentadas con gas natural o con gasoil se utilizan para calentar el exterior de la cámara de tratamiento. El calor se transfiere a través de la pared de la cámara al residuo que se encuentra dentro de ella.

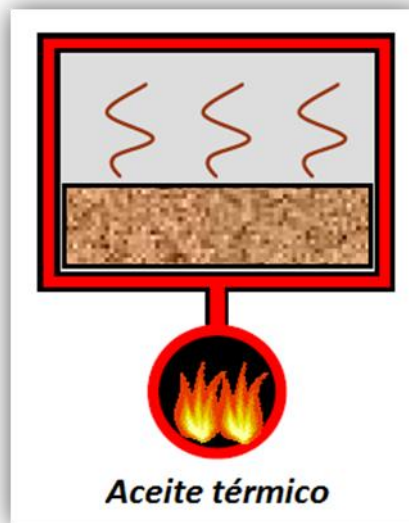
Figura 5. Calentamiento por hornillas o estufas



Fuente:Modificado de ENVIRONMENT AGENCY. "Treating waste by thermal desorption". Primera edición. UnitedKingdom. 2011.

- **Aceite térmico:** En este caso, en un hervidor se calienta aceite sintético y se bombea a la UDT donde usualmente circula a través de una chaqueta que rodea la cámara de calentamiento. El aceite actúa como un fluido de transferencia de calor que se calienta separadamente de la cámara de tratamiento.

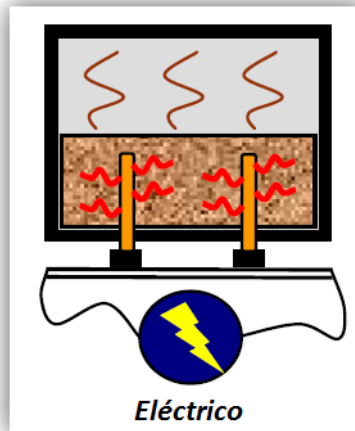
Figura 6. Calentamiento por aceite térmico



Fuente:Modificado de ENVIRONMENT AGENCY. "Treating waste by thermal desorption". Primera edición. UnitedKingdom. 2011.

- **Eléctrico (Infrarrojo o microondas):** En este caso, se insertan elementos de calentamiento eléctricos dentro del producto y la presión de vapor que se crea por el calor del infrarrojo permite volatilizar el residuo. Los elementos de calentamiento se deben proteger o aislar, para de esta manera asegurar que éstos no entran en contacto directo con el residuo aceitoso.

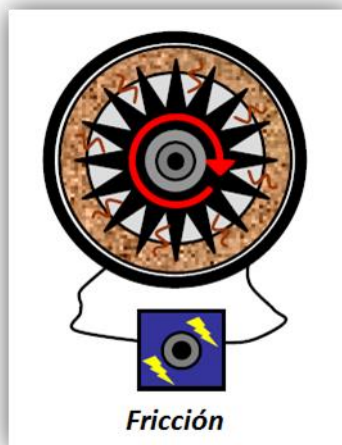
Figura 7. Calentamiento eléctrico



Fuente:Modificado de ENVIRONMENT AGENCY. "Treating waste by thermal desorption". Primera edición. UnitedKingdom. 2011.

- **Fricción:**Un motor conduce un molino circular dentro de la cámara, el cuál rota rápidamente en ella. Cuando las aspas entran en contacto con el residuo en la cámara, se genera una fricción que resulta en el calor requerido para incrementar la temperatura de la borra (típicamente una temperatura entre 250°C y 300°C). De esta manera se presenta la desorción del agua y los contaminantes volátiles.

Figura 8. Calentamiento por fricción



Fuente:Modificado de ENVIRONMENT AGENCY. "Treating waste by thermal desorption". Primera edición. UnitedKingdom. 2011.

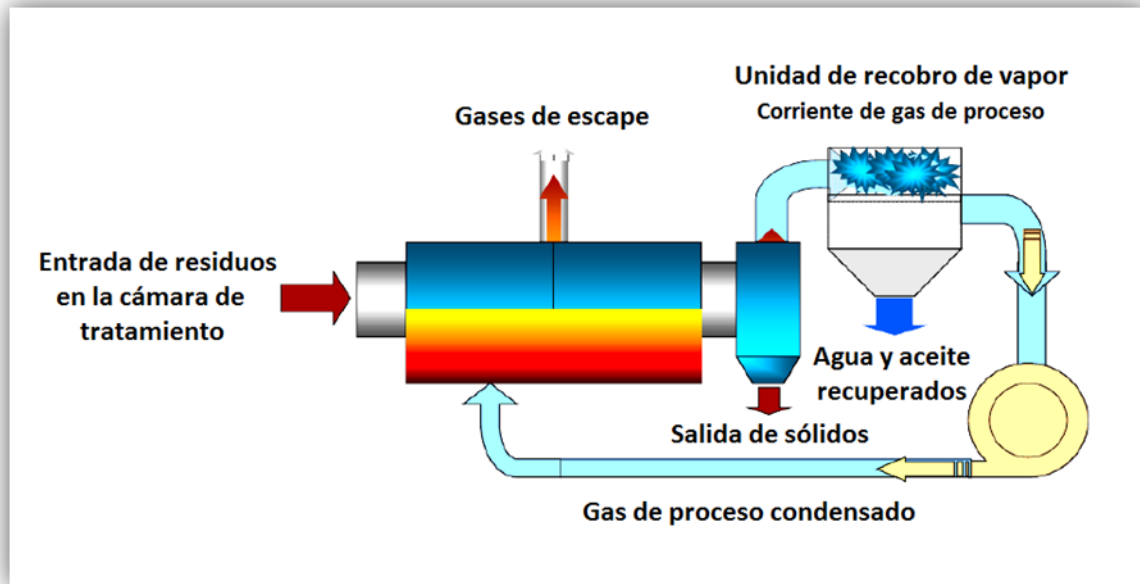
c. De acuerdo al modo de operación:

- **Baches:** Se realiza el tratamiento dividiendo el residuo en pequeños baches o lotes que son enviados a la cámara de calentamiento uno por uno. Una vez el bache ingresa a la cámara, ésta se sella durante el proceso. Cuando se finaliza el tratamiento, el material obtenido se remueve de la cámara y se recibe el siguiente bache para continuar con el proceso.
- **Continuo:** En este caso, el residuo debe ser pre-tratado en pequeños baches, sin embargo se debe alimentar y remover el material de la unidad en un proceso continuo y a una tasa controlada. Es vital que la planta sea operada de una manera que asegure que la temperatura y que el tiempo de estancia de la borra en la cámara de calentamiento sean adecuados para tratar el residuo completamente.

6.2.1.2 Proceso de desorción térmica

El tratamiento de borras y emulsiones por desorción térmica, además de la cámara de calentamiento, requiere otros equipos, como una unidad de recobro de vapor, donde se separan por condensación y se recuperan el aceite y el agua. La figura 9 representa la unidad de desorción térmica.

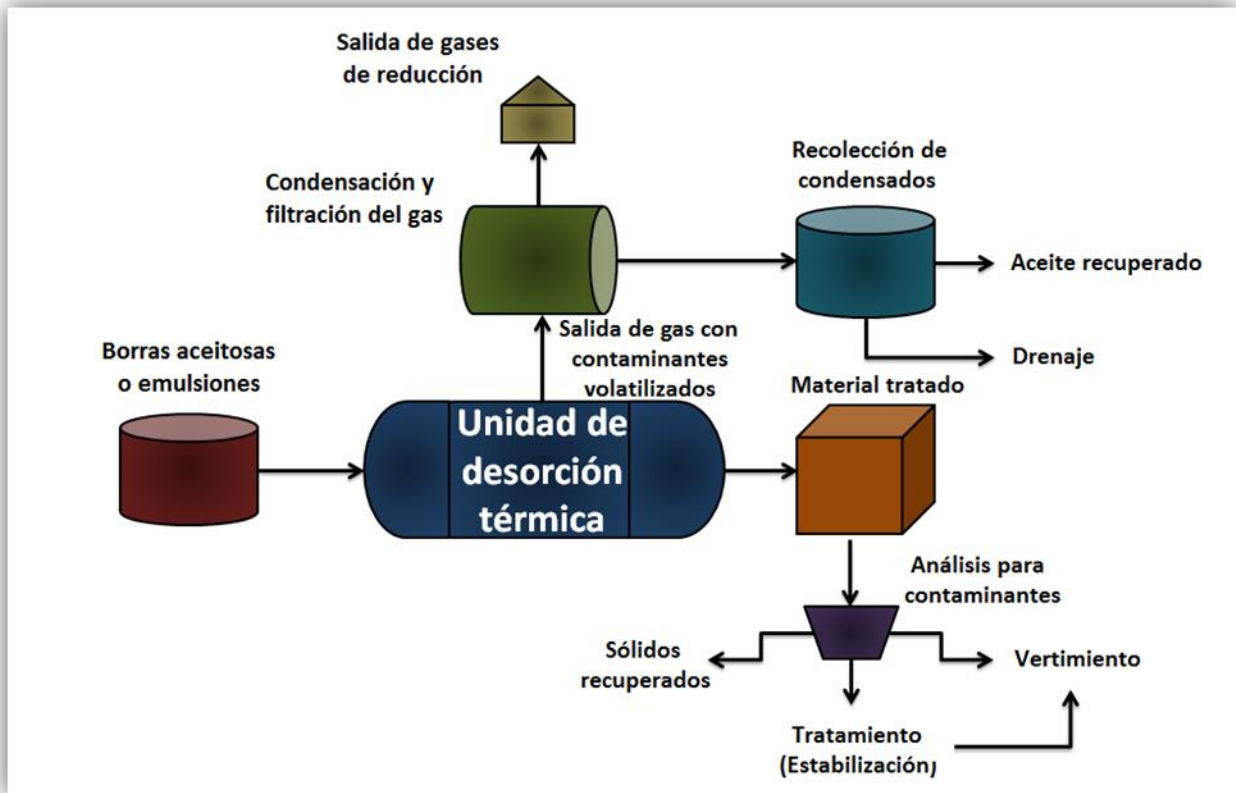
Figura 9. Unidad de desorción térmica



Fuente:Modificado de CELY, J.; RODRÍGUEZ, S. "Estudio de factibilidad técnica y económica para la selección de un sistema de tratamiento de residuos aceitosos en campo Rubiales". UIS, 2012.

La figura 10 representa el diagrama de flujo del proceso de desorción térmica. A través de este diagrama se puede observar la entrada del residuo a tratar, previamente almacenado en un tanque. Una vez el residuo ingresa a la UDT, se genera un ascenso de temperatura adecuado para que el líquido más volátil alcance su punto de ebullición, generando los gases de escape o de oxidación y simultáneamente el gas con los contaminantes volatilizados. Este gas sale de la cámara de calentamiento e ingresa a la unidad de recobro de vapor, donde toma lugar la condensación de los líquidos y por diferencia de densidades se recupera agua y aceite independientemente. Por otro parte, los sólidos y el material contaminante recuperados se recolectan y se lleva a cabo su disposición final.

Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de desorción térmica



Fuente: Modificado de ENVIRONMENT AGENCY. "Treating waste by thermal desorption". Primera edición. United Kingdom. 2011.

6.2.2 Reducción de volumen

El tratamiento aprovecha las fuerzas de rotación generadas por una centrífuga para separar las fases de la emulsión y a su vez los sólidos presentes en ella mediante el principio de separación gravitacional. En este proceso, a diferencia de la desorción térmica, es posible recuperar tanto aceite como agua y sólidos si se utiliza la centrífuga tricanter. Por otro lado, si se utiliza la centrífuga decanter, se obtiene al final del proceso dos corrientes, sólidos y fluidos.

El tratamiento por centrifugación debe estar acompañado de otros procedimientos que pueden ser previos a la centrifugación como el precalentamiento de la borra o pueden ir en conjunto con ella como la adición de químicos. La elección de estos procesos unitarios depende de la composición de la borra a tratar y son importantes ya que permiten que la separación de las fases sea más efectiva.

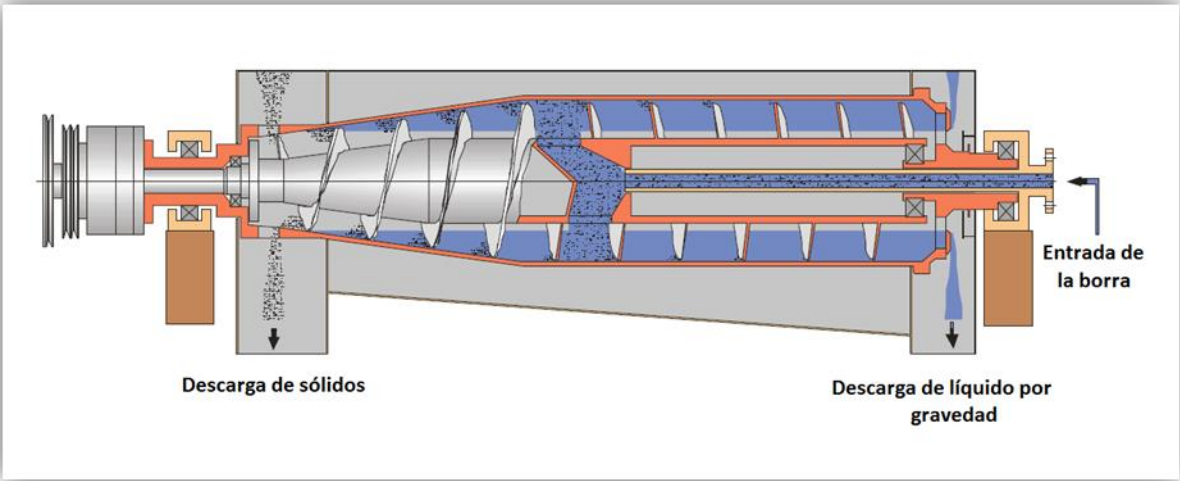
6.2.2.1 Tipos de centrífugas⁹

Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de centrífugas, la centrífuga decanter y la centrífuga tricanter. La diferencia entre ellas radica en que la decanter puede separar dos fases, sólidos y líquido y la tricanter es capaz de separar tres fases, líquido liviano, líquido pesado y sólidos.

El diseño y funcionamiento de las centrífugas es muy similar. La parte esencial de ellas es el rotor, el cual consiste en un tambor cilíndrico – cónico, con tornillo sinfín transportador incorporado, que gira con una velocidad diferencial. El rotor está accionado por un motor eléctrico y ambos se unen a través de correas y poleas. El residuo aceitoso ingresa al rotor a través de un tubo de alimentación central. Gracias a las boquillas de salida o toberas, que están situadas en el cuerpo del sinfín, el producto pasa al tambor, donde tiene lugar la separación por fuerza centrífuga. En el caso de la centrífuga decanter, el residuo se separa en una fase líquida (aceite y agua en emulsión) y una fase sólida. En el caso de la centrífuga tricanter, el residuo se separa en una fase líquida liviana (aceite), una fase líquida pesada (agua) y una fase sólida. En ambos casos la descarga del aceite y la emulsión se realiza por gravedad, sin embargo, la descarga del agua para la tricanter se realiza mediante una palanca excéntrica con presión. Finalmente el tornillo sinfín transporta los sólidos a la parte cónica para su descarga.

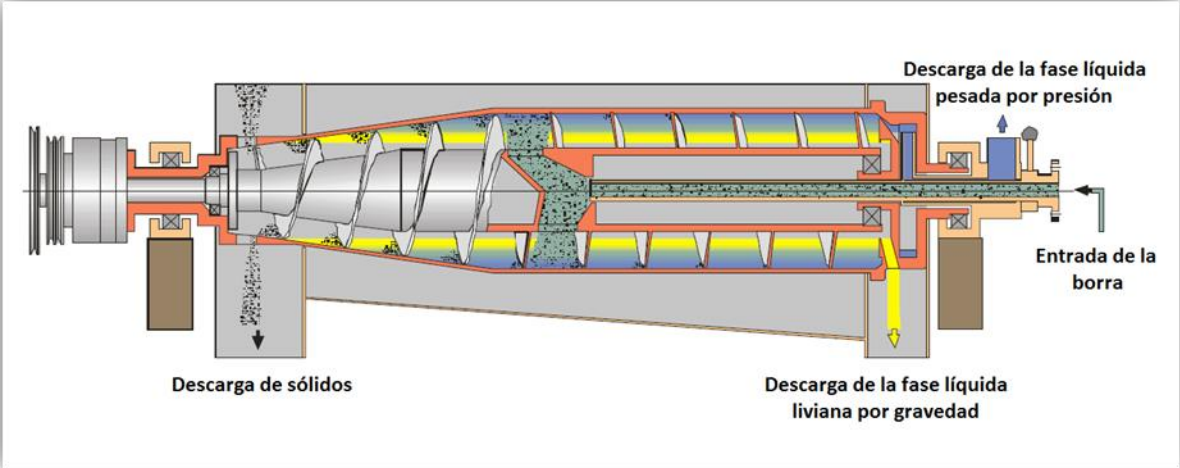
⁹ <http://www.huading-separator.com>.

Figura 11. Centrífuga decanter



Fuente: Modificado de <http://www.huading-separator.com>

Figura 12. Centrífuga tricanter



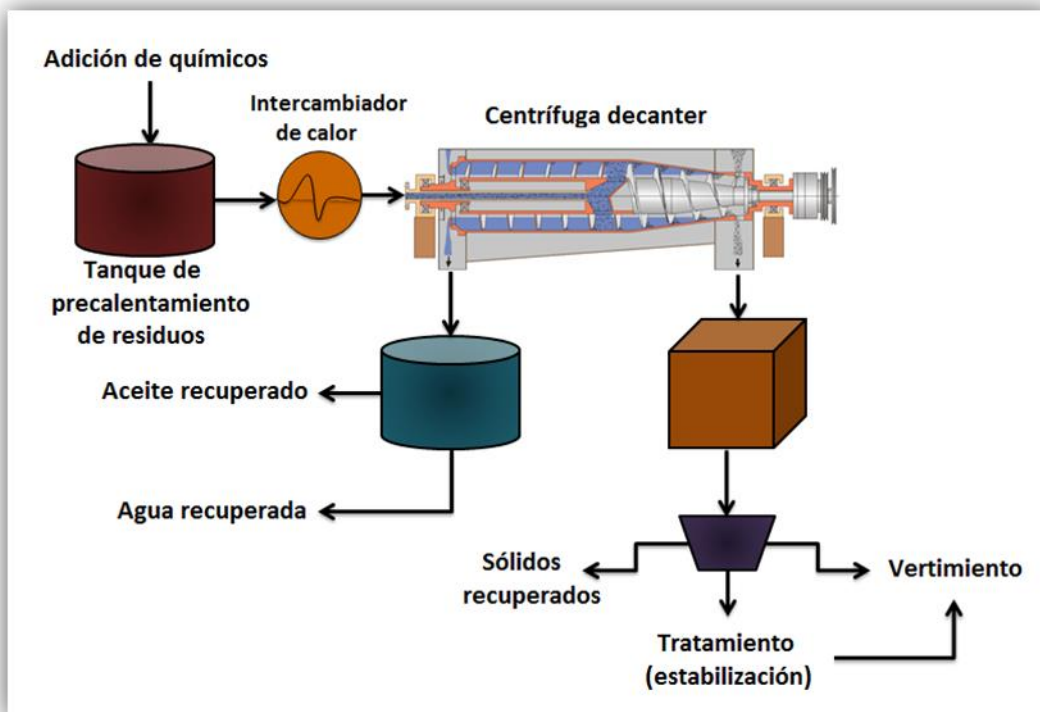
Fuente: Modificado de <http://www.huading-separator.com>

6.2.2.2 Proceso de reducción de volumen

Previamente se mencionó que el proceso de reducción de volumen depende de ciertos procesos unitarios que, formando un conjunto, permiten el tratamiento de las borras de producción. El proceso puede variar dependiendo de la composición de la borra de producción a tratar, sin embargo, el uso de la centrífuga es casi siempre esencial, debido a que permite la separación del líquido y de los sólidos. La eficiencia de los sistemas depende de la composición de la borra, no obstante, la eficiencia en casos reales para la centrífuga decanter es generalmente del 60% y para la centrífuga tricanter del 75%.

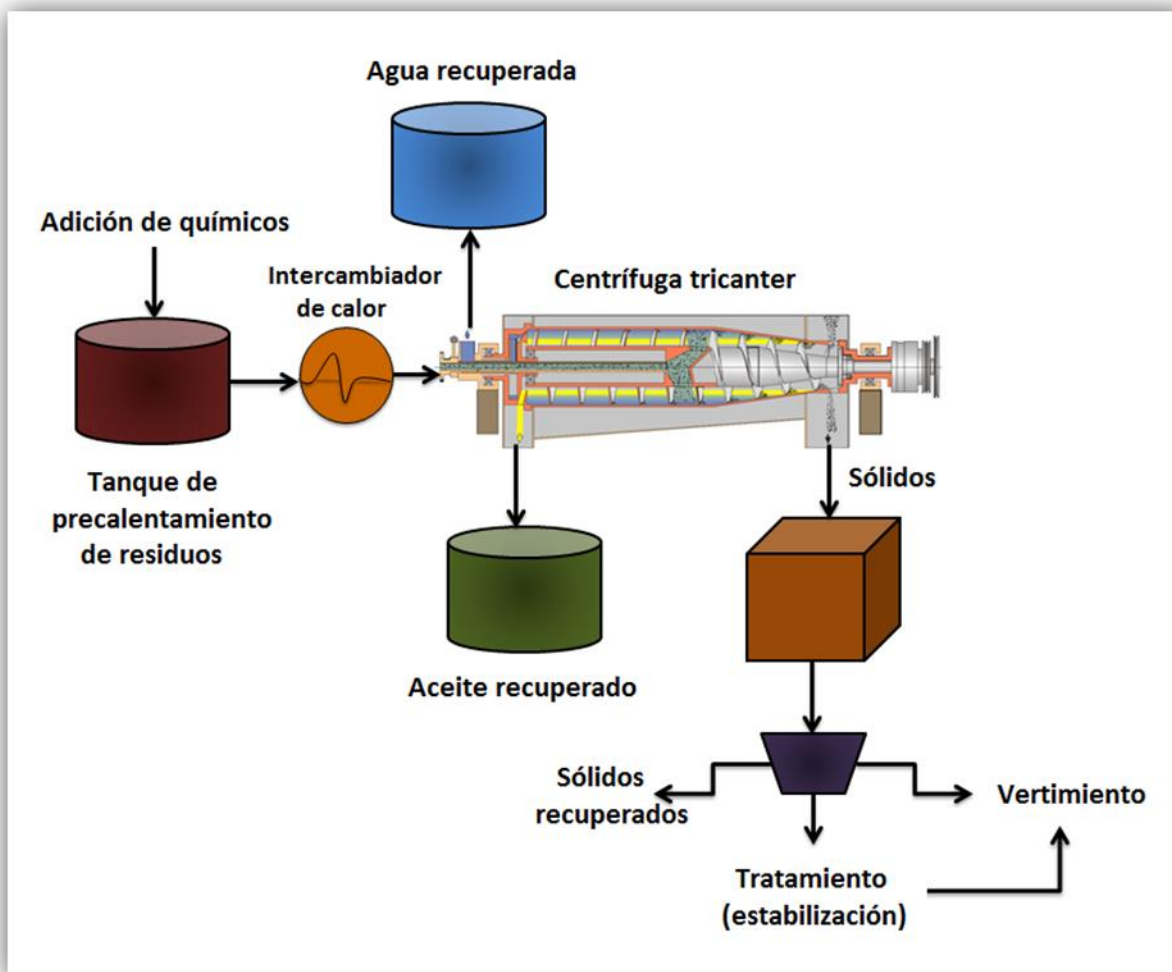
La reducción de volumen se puede realizar desde dos escenarios, el primero con una centrífuga decanter y el segundo con una centrífuga tricanter.

Figura 13. Diagrama de flujo de reducción de volumen con centrífuga decanter



Fuente: Modificado de CELY, J.; RODRÍGUEZ, S. "Estudio de factibilidad técnica y económica para la selección de un sistema de tratamiento de residuos aceitosos en campo Rubiales". UIS, 2012.

Figura 14. Diagrama de flujo de reducción de volumen con centrífuga tricanter



Fuente: Modificado de CELY, J.; RODRÍGUEZ, S. "Estudio de factibilidad técnica y económica para la selección de un sistema de tratamiento de residuos aceitosos en campo Rubiales". UIS, 2012.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados consiste en el estudio de cada uno de los factores involucrados en el diseño de un proceso. Para el análisis gerencial de un sistema de tratamiento de residuos aceitosos, se deben tener en cuenta tres análisis independientes que son el análisis técnico, el análisis ambiental y finalmente el análisis económico. La fusión de estos tres estudios, permite tener un punto de apoyo para tomar la decisión más conveniente para la empresa, obteniendo finalmente la opción gerencialmente más viable.

7.1 ANÁLISIS TÉCNICO

Es importante, durante el estudio de un proyecto, realizar el análisis técnico de las diferentes alternativas puesto que éstas difieren en su funcionamiento, dependiendo del material a tratar. Para este caso, se realizó un análisis técnico para cada uno de los sistemas descritos anteriormente y finalmente una comparación entre ellos.

7.1.1 Desorción térmica

Las condiciones de operación del sistema de desorción térmica son muy importantes y difieren entre sí dependiendo de la planta que se requiera. Se parte del análisis de una planta con calentamiento directo, en la cual su eficiencia es mayor porque la fuente de calentamiento está en contacto con el material, sin embargo, es un sistema peligroso, puesto que al estar en contacto directo con el residuo, se puede correr el riesgo de algún accidente. Esto indica que a pesar de ser más eficiente, se debe tener más cuidado en su manipulación. Adicionalmente, en este tipo de sistema los gases de combustión del equipo y los gases de

volatilización se mezclan generando un paso más en el tratamiento y residuos más contaminados.

Por otro lado, una planta de desorción térmica indirecta, a pesar de ser más segura –porque los materiales no están en contacto directo– es menos eficiente. En este caso, la eficiencia se evalúa desde el punto de vista del calentador. Teniendo calentamiento por combustible, la eficiencia debe ser mayor ya que el combustible ha sido a través de los años el quemador por excelencia pero tiene la desventaja de que su costo es elevado, generando costos adicionales. Si se analiza el calentamiento por electrodos, se va a incrementar el consumo de energía de la planta, ya que es un sistema eléctrico y además la eficiencia de este sistema es menor que con el combustible debido a que es más difícil realizar un calentamiento rápido y efectivo mediante electricidad.

7.1.2 Reducción de volumen decanter

El sistema de reducción de volumen con centrífuga en general es uno de los sistemas más efectivos pero en los dos procesos (decanter y tricanter) se ve restringido por la composición de la borra a tratar ya que su sistema requiere de condiciones especiales de BSW y de viscosidad, lo que implica que la centrífuga es sensible a la composición de la borra.

El diseño del sistema de reducción de volumen con centrífuga decanter depende de la composición del residuo, puesto que si éste posee una emulsión estable, se requiere de procesos adicionales a la centrifugación para su separación, como es el caso de la adición de químicos y el calentamiento del residuo. La desventaja de este sistema es que separa dos fases y se requiere un skimtank al final del proceso para lograr la separación de fases por gravedad del aceite y del agua. El motor de esta centrífuga tiene una potencia de 45 Kw lo que se traduce en un bajo consumo de energía.

7.1.3 Reducción de volumen tricanter

Este sistema es aún más efectivo que el decanter puesto que tiene la capacidad para separar tres fases, sólidos, aceite y agua, sin embargo también depende de la composición de la borra y de la estabilidad de la emulsión. Por tanto, es posible que este sistema requiera de la adición de químicos (rompedores de emulsión) y del calentamiento del residuo para que se recupere la mayor cantidad de aceite del proceso. Este sistema es igualmente sensible a la composición de la borra, lo que disminuye su eficiencia, no obstante, el poder de centrifugación es un aliado del proceso ya que aprovecha la velocidad para separar las fases. El motor de esta centrífuga tiene una potencia de 110 Kw lo que se traduce en un consumo de energía mayor comparado con la centrífuga decanter, con la ventaja de que es más potente.

7.1.4 Comparación técnica de los sistemas

Los tres sistemas analizados durante este trabajo son opciones técnicamente viables, sin embargo, se debe considerar que el objetivo es la mayor recuperación de aceite y esto se logra a través de una buena caracterización de la borra de producción. El sistema que debe arrojar mejores resultados es el sistema por reducción de volumen con centrífuga tricanter, ya que éste combina el aumento de temperatura para desestabilizar la emulsión y a su vez con el uso del químico, rompe la emulsión, facilitando la separación de las tres fases en la centrífuga.

Tabla 3. Comparación técnica de los sistemas

Sistema	Ventajas	Desventajas
Unidad de desorción térmica con calentamiento directo	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia que los demás sistemas. • No es sensible a la composición de la borra. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un sistema peligroso por estar en contacto directo con el residuo. • Se debe tener mucho cuidado en su manipulación. • Existe mezcla de gases de combustión y de volatilización. • Genera residuos contaminados. • Alto costo del combustible de calentamiento.
Unidad de desorción térmica con calentamiento indirecto	<ul style="list-style-type: none"> • Más segura que la UDT con calentamiento directo. • Los residuos que genera no están contaminados. • No existe mezcla de gases de combustión y volatilización. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menos eficiente que la UDT con calentamiento directo. • Alto costo del combustible de calentamiento.
Reducción de volumen con centrífuga decanter	<ul style="list-style-type: none"> • Menor consumo de energía que la tricanter. • No genera gases de 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a la composición de la borra. • Requiere un sistema

	combustión.	adicional de separación de sólidos. <ul style="list-style-type: none"> • El motor tiene una menor potencia que el motor de la tricanter.
Reducción de volumen con centrífuga tricanter	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere un sistema adicional de separación de sólidos. • El motor tiene una mayor potencia que el motor decanter. • No genera gases de combustión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a la composición de la borra. • Mayor consumo de energía que la decanter.

Fuente: El autor

7.2 ANÁLISIS AMBIENTAL

El análisis ambiental, se realiza teniendo en cuenta los lineamientos establecidos en la “Legislación Nacional del Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial” que es el documento donde se constituye la política de manejo de residuos aceitosos en Colombia. El decreto 4741 del 30 de Diciembre del 2005 contenido en este documento, responsabiliza al generador del residuo mediante el manejo y tratamiento, hasta la disposición final, en condiciones que garanticen la neutralización de la capacidad de impacto del desecho. Así mismo, este decreto define el manejo integral de los residuos peligrosos como la adopción de todas las medidas necesarias en las actividades de prevención, reducción y separación en la fuente, acopio, almacenamiento, transporte, aprovechamiento y/o valorización, tratamiento y/o disposición final, importación o exportación de residuos o desechos

peligrosos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para proteger la salud humana y el ambiente contra los efectos nocivos temporales y/o permanentes que puedan derivarse de tales residuos o desechos.

Teniendo en cuenta que el decreto 4741 del 2005 responsabiliza al generador del residuo de su tratamiento y su manejo integral, es necesario estudiar cada uno de los impactos que se pudieran generar a través del tratamiento por los tres sistemas mencionados anteriormente. Cabe resaltar que la recuperación de residuos aceitosos obedece al tratamiento de estos residuos, para minimizar los impactos ambientales generados por las operaciones de producción. Así mismo, es importante mencionar que el análisis que se va a realizar a continuación pertenece a los posibles impactos ambientales que los equipos utilizados en el tratamiento pudieran generar y a los impactos que pudieran generar los residuos obtenidos después del tratamiento.

7.2.1 Desorción térmica

El sistema de desorción térmica es considerado un sistema ambientalmente viable ya que a pesar de utilizar combustible y de generar emisiones a la atmósfera, estas emisiones son generalmente de vapor de agua. Por otro lado, este sistema contiene una descarga de sólidos convertidos en materia inerte, lo que disminuye el impacto ambiental permitiendo la disposición final de ellos y evita un tratamiento adicional de sólidos.

7.2.2 Reducción de volumen decanter y tricanter

El sistema de reducción de volumen tiene una desventaja considerable, y es que los sólidos una vez que salen de la centrífuga deben ingresar a un sistema de tratamiento, ya que ellos no son aptos para su disposición final pues van

acompañados de algunos contaminantes. Sucede lo mismo con el agua, que al salir del tratamiento, debe ser sometida a procedimientos adicionales para eliminar los contaminantes que la acompañan y así obtener un agua con las condiciones aptas para reinyección o el uso que se le pretenda dar. Esto implica que la salida de estos materiales con estas condiciones no es ambientalmente aceptable y requieren otros tratamientos.

7.2.3 Comparación ambiental de los sistemas

Ambientalmente, el sistema de desorción térmica es más viable, puesto que los productos obtenidos cumplen con los lineamientos establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente sobre disposición final de los residuos. Cabe resaltar que el sistema de recuperación de aceite se realiza en parte para generar menos impacto ambiental, realizando un tratamiento responsable de los sólidos y aprovechando las ganancias económicas adquiridas con éste.

Tabla 4. Comparación ambiental de los sistemas

Sistema	Ventajas	Desventajas
Unidad de desorción térmica con calentamiento indirecto	<ul style="list-style-type: none"> Los sólidos de la salida son material inerte y no contiene salida de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> Emisiones de vapor de agua y combustión a la atmósfera.
Reducción de volumen con centrífuga decanter	<ul style="list-style-type: none"> No genera gases de combustión a la atmósfera por ser un sistema eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere tratamiento adicional de agua y sólidos para su disposición final.
Reducción de volumen con centrífuga tricanter	<ul style="list-style-type: none"> No genera gases de combustión a la atmósfera por ser un sistema eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere tratamiento adicional de agua y sólidos para su disposición final.

Fuente: El autor.

7.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico es una herramienta indispensable en la toma de decisiones de un proyecto ya que a partir de los resultados obtenidos mediante este procedimiento se podrá observar la mejor alternativa para la empresa y de esta manera asegurar el éxito del proyecto.

Para realizar el análisis económico de los tres sistemas de tratamiento de residuos, se consideran las borras de producción generadas en un campo Colombiano. Este campo tiene una producción de residuos de 1000 bls/día y las borras están compuestas de la siguiente manera:

Tabla 5. Composición de la borra a tratar

Borra	Porcentaje(%)
Aceite	50
Agua	15
Sólidos	35

Fuente: El autor

7.3.1 Cotización de los sistemas de tratamiento de borras

El análisis parte de la cotización para la compra de cada uno de los sistemas de tratamiento de borras de producción. Mediante esta cotización se puede obtener la inversión inicial del proyecto. Para la selección de los sistemas, se tuvo en cuenta el volumen de borras a tratar (1000 bls), así, la UDT puede tratar hasta 4500 bls/día y los sistema por reducción de volumen decanter y tricanter pueden tratar hasta 3000 bls/día.

Cotización sistema de desorción térmica:

Tabla 6. Cotización del sistema TDU

Cantidad	Equipo	Precio unidad US \$
1	Sistema de desorción térmica completo. 30m3/h	975000
1	Costos adicionales*	500000
	Inversión inicial	1'475.000

Fuente: El autor

*Redes eléctricas, instalación, sistemas de transporte de fluidos tratados y recolectados, entre otros.

Cotización sistema de reducción de volumen con centrífuga decanter:

Tabla 7. Cotización sistema de reducción decanter

Cantidad	Equipo	Precio unidad US \$
1	Centrífuga decanter. Capacidad: 20 m3/h	120000
1	Intercambiador de calor	50000
1	Tanque de precalentamiento	60000
1	Skimtank	35000
	Subtotal	265000
1	Costos adicionales**	700000
	Inversión inicial	965000

Fuente: El autor

**Redes eléctricas, instalación y ensamblaje, válvulas, conectores macho, juntas, instrumentación para el monitoreo del proceso, sistemas de transporte de fluidos tratados y recolectados, entre otros.

Cotización sistema de reducción de volumen con centrífuga tricanter:

Tabla 8. Cotización sistema de reducción tricanter

Cantidad	Equipo	Precio unidad US \$
1	Centrífuga tricanter. Capacidad: 20 m3/h	240000
1	Intercambiador de calor	50000
1	Tanque de precalentamiento	20000
1	Tanque de almacenamiento del aceite	40000
	Subtotal	350000
1	Costos adicionales***	700000
	Inversión inicial	1'050.000

Fuente: El autor

***Redes eléctricas, instalación y ensamblaje, instrumentación para el monitoreo del proceso, sistemas de transporte de fluidos tratados y recolectados, entre otros.

De esta manera, la inversión inicial para cada uno de los sistemas es la siguiente:

Tabla 9. Inversión inicial para cada sistema

Sistema	Inversión inicial US \$
UDT	1'475.000
Reducción de volumen con centrífuga decanter	965.000
Reducción de volumen con centrífuga tricanter	1'050.000

Fuente: El autor

En este punto del análisis cabe recordar las eficiencias de cada uno de los equipos:

Tabla 10. Eficiencia de cada sistema

Sistema	Eficiencia (%)
UDT	50
Decanter	60
Tricanter	75

Fuente: El autor

A continuación, se calcula el aceite recuperado de los 1000 bls/día de borras de producción. Para esto, se tiene en cuenta el porcentaje de aceite que contiene cada borra y la eficiencia de cada sistema.

$$\text{Aceite recuperado TDU} = \left(\frac{1000 \text{ bls}}{\text{día}} * 0.5 \right) * 0.5$$

$$\text{Aceite recuperado TDU} = \frac{250 \text{ bls}}{\text{día}}$$

Tabla 11. Aceite recuperado

Tecnología	Volumen borras (Bls)	Porcentaje de aceite en cada borra	Eficiencia de cada sistema (%)	Aceite recuperado (Bls/día)
Desorción térmica	1000	50	50	250
Reducción de volumen decanter	1000	50	60	300
Reducción de volumen tricanter	1000	50	75	375

Fuente: El autor

Una vez calculada la cantidad de barriles recuperada por cada sistema se procede a calcular los egresos e ingresos.

7.3.2 Egresos

Para conocer los egresos del proyecto, es importante comprender que el precio del barril de residuo tiene un valor muy inferior comparado con el precio de venta de referencia para Colombia, esto sucede porque el residuo que se está tratando, a pesar de recuperar aceite, no tiene la misma gravedad API que el crudo de referencia y adicionalmente no puede ser usado para las mismas funciones que el aceite convencional retirado en los tanques de almacenamiento.

El precio del barril WTI es aproximadamente US \$90. Los residuos de producción por tanto, costarán aproximadamente un 30% del valor del barril. De esta manera se puede concluir que la borra tiene un costo por barril de US \$27. Este precio de barril no contiene los costos por tratamiento para cada sistema, ni tampoco las regalías y demás impuestos. Teniendo en cuenta que los tratamientos son diferentes y requieren distintos procesos, se debe asignar un valor de tratamiento por barril dependiendo del sistema y de los gastos que conlleve cada sistema para de esta manera poder definir las ganancias por cada barril restando los egresos.

Costos por cada barril para el sistema de desorción térmica:

Por cada barril se deben asumir los siguientes costos: Electricidad, combustible, mano de obra (Ingenieros, técnicos y operadores), regalías, impuestos, mantenimiento, entre otros.

El valor de tratamiento por cada barril será: US \$15

Como conclusión, para tratar un barril en la unidad de desorción térmica se requieren US \$15 y como el precio del barril de borras es de US \$27, se realiza la resta para conocer las ganancias por cada barril. De esta manera se llega a que por cada barril vendido se ganan US \$12.

Costos por cada barril para el sistema de reducción de volumen con centrífuga decanter:

Los cálculos en esta oportunidad son muy similares aunque difieren en el costo por cada barril:

Electricidad, Químicos (rompedores de emulsión), mano de obra (ingenieros, técnicos, operadores), regalías, impuestos, mantenimiento, entre otros.

El valor de tratamiento por cada barril será: US \$11.

Así, por cada barril en el sistema de reducción de volumen con centrífuga decanter se ganan US \$16.

Costos por cada barril para el sistema de reducción de volumen con centrífuga tricanter:

Los cálculos son muy similares aunque difieren en el costo por cada barril:

Electricidad, Químicos (rompedores de emulsión), mano de obra (ingenieros, técnicos, operadores), regalías, impuestos, mantenimiento, entre otros.

El valor de tratamiento por cada barril será: US \$13

Por cada barril en el sistema de reducción de volumen con centrifuga tricanter se ganan US \$14.

Teniendo en cuenta el costo de tratamiento de cada barril se calcula la ganancia por cada barril.

Tabla 12. Ganancia por cada barril

Sistema	Precio del barril US \$
UDT	12
Decanter	16
Tricanter	14

Fuente: El autor

7.3.3 Ingresos

Una vez encontrado el precio del barril, se procede a calcular los ingresos diarios, mensuales y anuales.

Tabla 13. Ingresos diarios, mensuales y anuales

Tecnología	Ganancias Diarias US \$	Ganancias mensuales US \$	Ganancias anuales US \$
UDT	3000	90000	1'080.000
Decanter	4800	144000	1'728.000
Tricanter	5250	157500	1'890.000

Fuente: El autor

7.3.4 Cálculo del PayBack

El cálculo del PayBack es muy importante, ya que a través de este valor se podrá saber un aproximado del tiempo en el que el proyecto se pagará.

$$\text{PayBack} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujo de Efectivo Anual}}$$

Para UDT

$$\text{PayBack} = \frac{1'475.000}{1'080.000}$$

$$\text{PayBack} = 1,36 \text{ años}$$

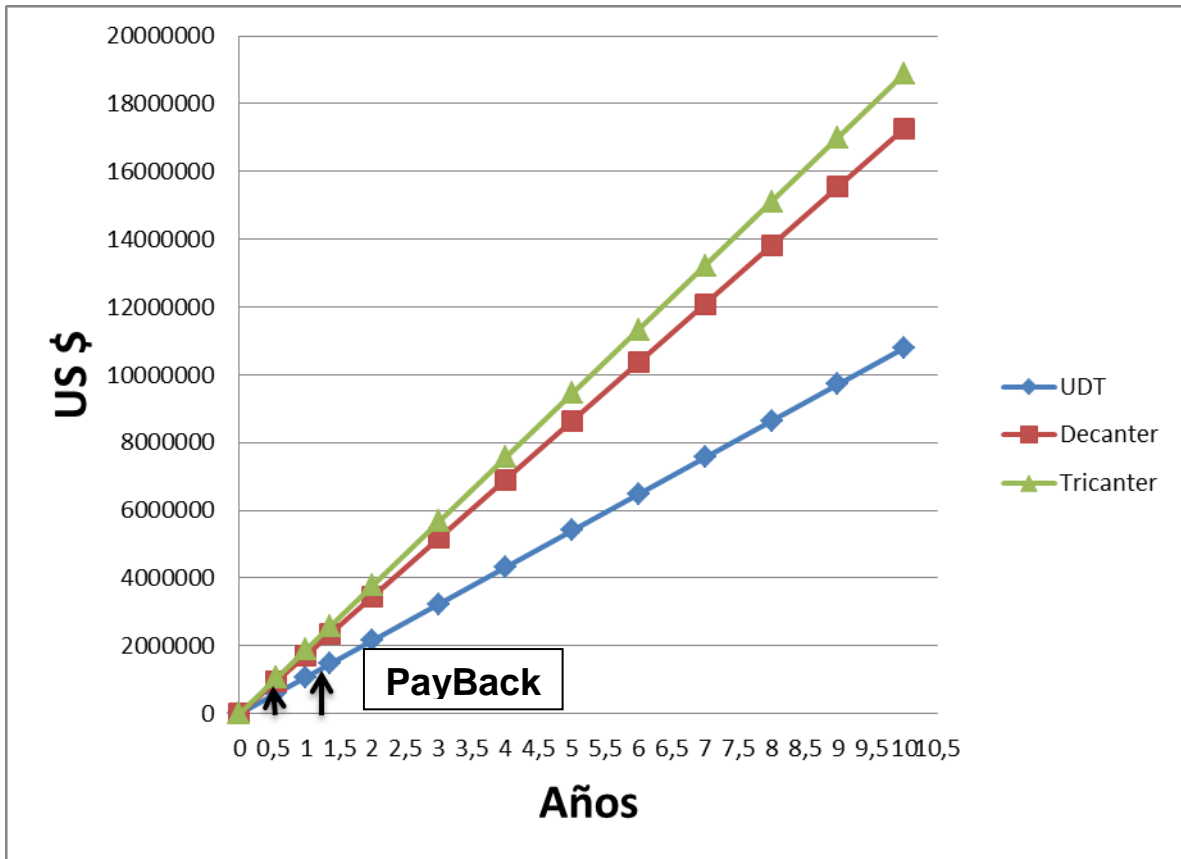
Este valor indica que en 1 año y 4 meses el proyecto estará pago y se pueden esperar ganancias en adelante.

Tabla 14. PayBack para los tres sistemas

Sistema	PayBack (años)
TDU	1,36
Decanter	0,5584
Tricanter	0,555

Fuente: El autor

Figura 15. Ganancias a futuro para los tres sistemas



Fuente: El autor

A partir de esta gráfica se puede observar que a pesar de que el sistema decanter y el sistema tricanter tienen un PayBack igual, el sistema de reducción por volumen con centrífuga tricanter será a futuro más rentable que los otros dos sistemas, siendo el de peor rentabilidad el sistema de desorción térmica.

7.3.5 Relación beneficio-costo

$$R \frac{b}{c} = \frac{U\$ \text{ ganados}}{U\$ \text{ invertidos}}$$

$$R \frac{b}{c} = \frac{1'080.000}{1'4750.000}$$

$$R \frac{b}{c} = 0.732 \text{ años}$$

Tabla 15. Relación beneficio-costo

Sistema	Relación beneficio-costo (años)
TDU	0.732
Decanter	1.79
Tricanter	1.8

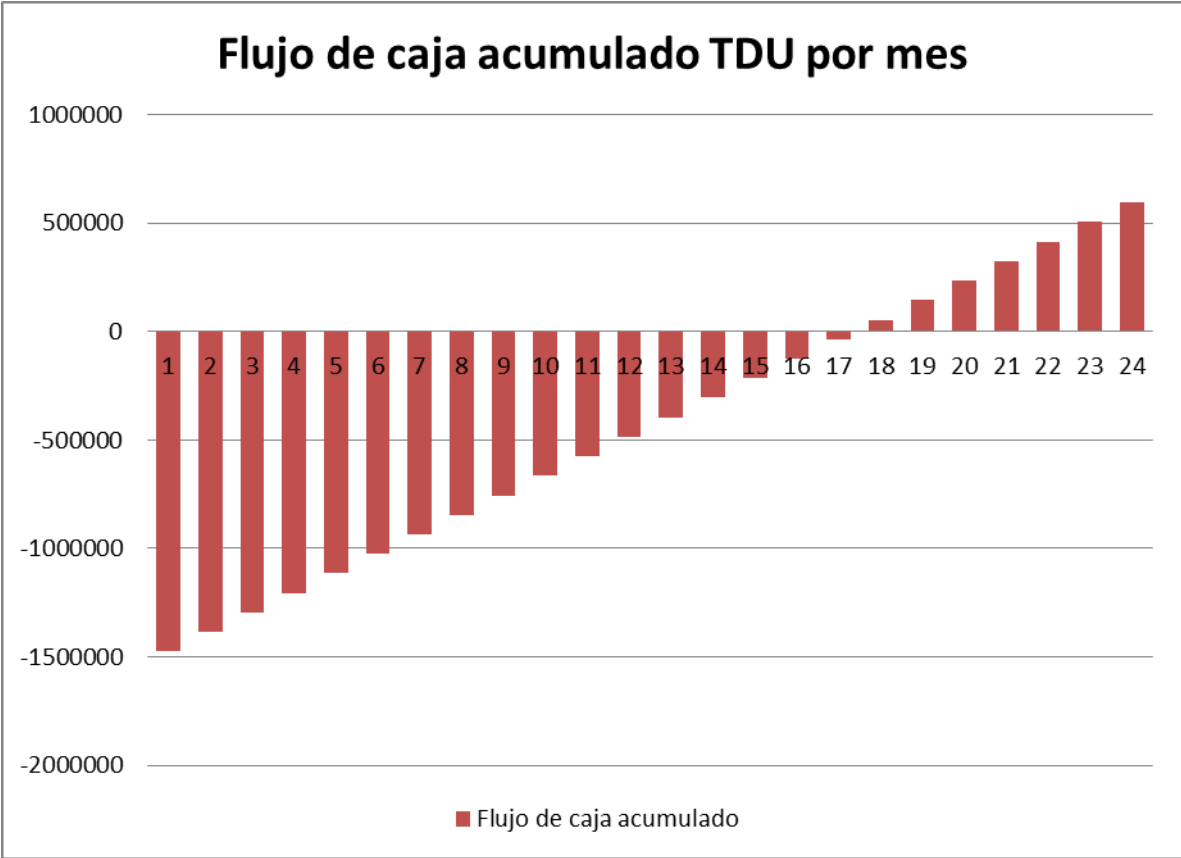
Fuente: El autor

7.3.6 Flujo de caja acumulado

El análisis de las siguientes gráficas, muestra el flujo de caja acumulado por mes durante dos años. A través de estas gráficas es posible observar el tiempo en el que el proyecto se pagará y de esta manera estimar las ganancias a futuro.

Flujo de caja acumulado en el sistema de desorción térmica:

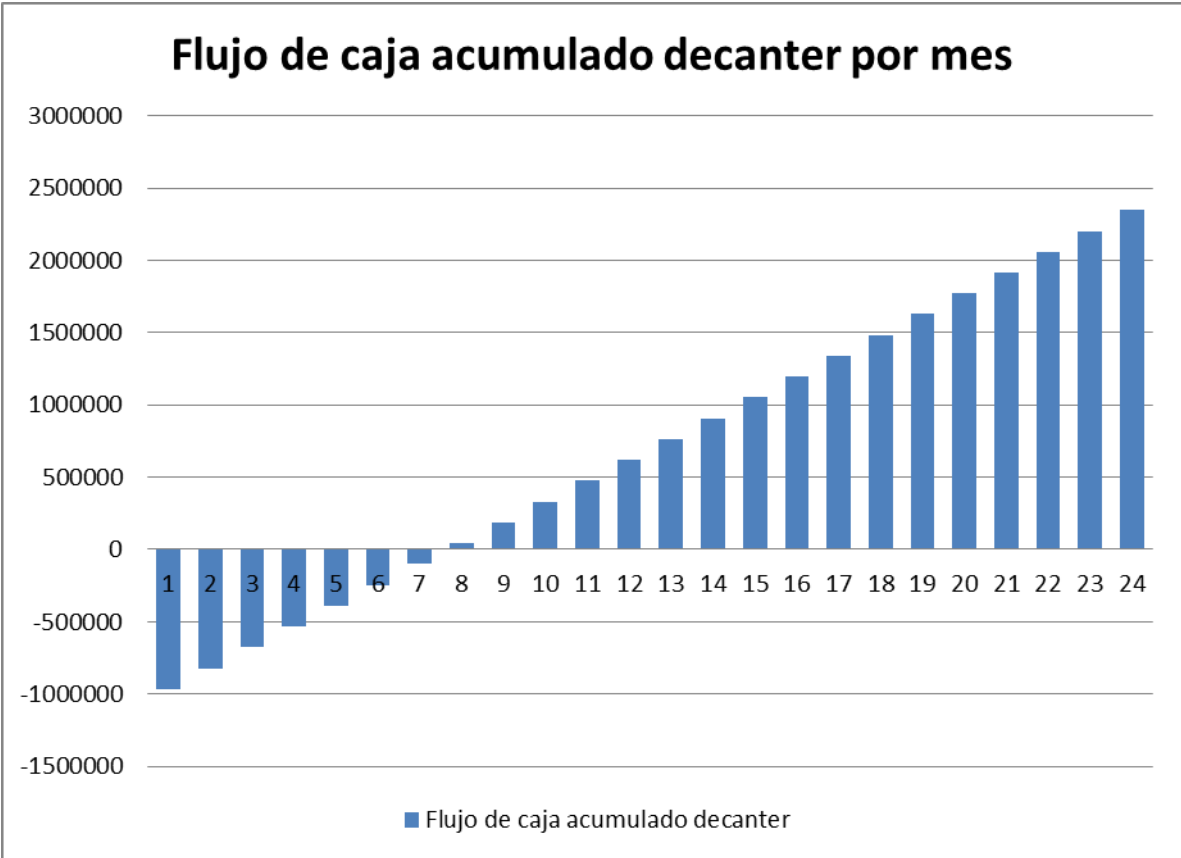
Figura 16. Flujo de caja acumulado TDU por mes



Fuente: El autor

Flujo de caja acumulado en el sistema de reducción por volumen con centrífuga decanter:

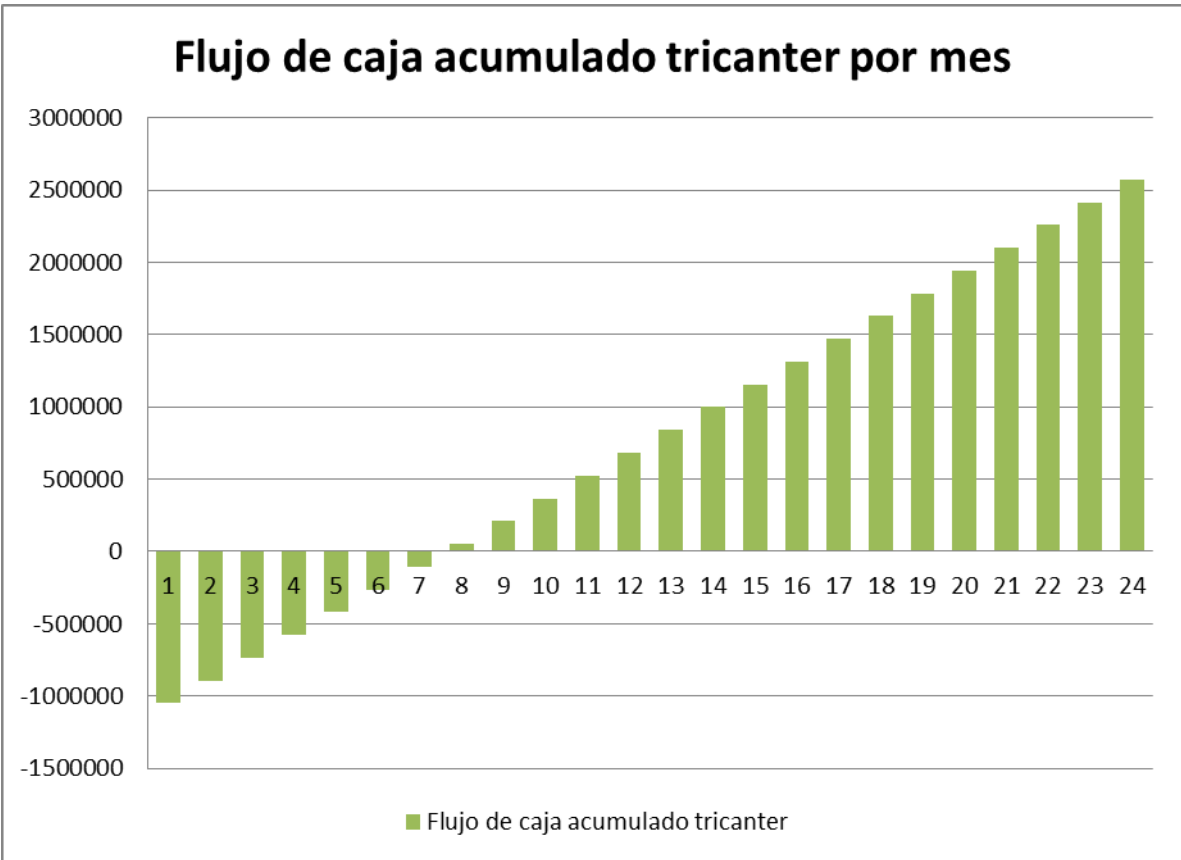
Figura 17. Flujo de caja acumulado decanter por mes



Fuente: El autor

Flujo de caja acumulado en el sistema de reducción por volumen con centrífuga tricanter:

Figura 18. Flujo de caja acumulado tricanter por mes



Fuente: El autor

7.3.7 Comparación económica de los sistemas

El análisis económico muestra que de los tres escenarios estudiados, el menos viable es el sistema de desorción térmica, puesto que no se paga en el primer año y a futuro las ganancias van a ser menores que con los otros dos sistemas.

El sistema económicamente más viable con el tiempo es el de reducción por volumen con centrífuga tricanter porque a pesar de que tiene un PayBack igual al de centrífuga decanter, el sistema obtiene unas ganancias mayores a 10 años, aunque en realidad la diferencia no es muy elevada.

Tabla 16. Comparación económica de los sistemas

Sistema	Ventajas	Desventajas
Unidad de desorción térmica con calentamiento indirecto		<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto se paga en más de un año. • Las ganancias a futuro son menores.
Reducción de volumen con centrífuga decanter	<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto se paga en menos de un año. • Las ganancias a futuro son mayores. 	
Reducción de volumen con centrífuga tricanter	<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto se paga en menos de un año. • Las ganancias a futuro son mayores. 	

Fuente: El autor.

7.4 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS

Tabla 17. Comparación de los sistemas

Sistema	Ventajas	Desventajas
Unidad de desorción térmica con calentamiento indirecto	<ul style="list-style-type: none"> • Es un sistema más efectivo. • No requiere tratamientos adicionales. • No se obtiene agua al final del proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> • El calentamiento es a través de combustible. • Emisiones de vapor de agua y de vapor de combustión a la atmósfera. • Es el sistema más costoso.
Reducción de volumen con centrífuga decanter	<ul style="list-style-type: none"> • Menor consumo de energía. • Es un sistema económicamente viable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Separa dos fases. • Se obtienen agua y sólidos al final del proceso. • Requiere tratamiento de sólidos y de agua adicional.
Reducción de volumen con centrífuga tricanter	<ul style="list-style-type: none"> • Separa tres fases. • El motor de este sistema es más potente. • Es un sistema económicamente viable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtienen agua y sólidos al final del proceso. • Requiere tratamiento de sólidos y de agua adicional. • Mayor consumo de energía.

Fuente: El autor.

Observando la tabla 17, se puede concluir que los sistemas de reducción de volumen con centrífuga decanter y tricanter tienen un mejor desempeño técnico y económico que la unidad de desorción térmica aunque se deben considerar los tratamientos adicionales para la disposición final de los sólidos y el agua. Igualmente, se puede apreciar que son los sistemas económicamente más viables ya que el proyecto estará pago antes de terminar el primer año de trabajo de los sistemas, lo cual adquiere una gran importancia puesto que se traduce en ganancias económicas mayores a futuro.

CONCLUSIONES

- Los sistemas de reducción de volumen decanter y tricanter ofrecen la mejor alternativa técnica y económica para el desarrollo de un proyecto de recuperación de aceite de borras de producción puesto que su inversión se pagará en menor tiempo que la inversión en un sistema de desorción térmica.
- El sistema de desorción térmica genera un impacto ambiental menor con respecto a los otros dos escenarios, sin embargo el desempeño técnico y económico no es favorable para la implementación de este sistema en un campo con producción de 1000 barriles de borras.
- Para el éxito de un proyecto de recuperación de aceite, es necesario realizar una caracterización minuciosa del residuo a tratar, puesto que la elección del sistema de tratamiento depende de la composición del mismo.
- Los análisis técnico, ambiental y económico son indispensables para la toma de decisiones con respecto a un proyecto pues a través de ellos se puede conocer el desempeño futuro de los sistemas analizados y los pros y contras del proyecto.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar el análisis gerencial a otros tratamientos como el de extracción por solvente.
- Realizar el análisis gerencial a los residuos generados durante otras actividades petroleras como la perforación, el transporte o el refinamiento.
- Desarrollar el análisis tomando como referencia borras con distinta composición para notar las diferencias en los diseños de los sistemas de tratamiento y su eficiencia operacional, ambiental y económica.

BIBLIOGRAFÍA

- ARNOLD, K.; SMITH, H.; BRADLEY, H. "Petroleum engineering handbook". Capítulo 19. Tercera edición. SPE, Texas USA, 1987.
- CABARIQUE, M.; ROJAS, M. "Estructuración del plan de gestión integral de residuos aceitosos de la superintendencia de mares (SMA) de ECOPETROL S.A. Universidad de la Salle, tesis de pregrado, 2006.
- CARDONA, V.; RODRÍGUEZ, N. "Propuesta para el diseño e implementación de un esquema de manejo, tratamiento integral y recuperación de crudo, aguas para reinyección y salmueras para reutilización, de los residuos aceitosos (contaminados con hidrocarburo), generados por la operación del campo petrolero ubicado en el corregimiento el centro, municipio de Barrancabermeja, Santander". UIS, monografía de posgrado, 2011.
- CASTELBLANCO, I.; NIÑO, J. "Manejo y tratamiento actual de residuos aceitosos en la industria petrolera Colombiana". UIS, tesis de pregrado, 2011.
- CELY, J.; RODRÍGUEZ, S. "Estudio de factibilidad técnica y económica para la selección de un sistema de tratamiento de residuos aceitosos en campo Rubiales". UIS, monografía de posgrado, 2012.
- ENVIRONMENT AGENCY. "Treating waste by thermal desorption". Primera edición. UnitedKingdom, 2011.
- MONTES, E. "Tecnologías de tratamiento de emulsiones en campos petroleros". UIS, monografía de posgrado, 2010.

- SUÁREZ, L. “Desarrollo de un método químico para recuperación de crudo a partir de las borras generadas en los procesos de mantenimiento de tanques y tuberías en distritos de producción petroleros de Colombia”. Universidad Nacional de Colombia, tesis de posgrado, 2011.
- <http://www.1800tankvac.com>. Fecha de revisión: 10 de Marzo de 2013.
- <http://www.alibaba.com>. Fecha de revisión: 18 de Marzo de 2013.
- <http://www.huading-separator.com>. Fecha de revisión: 14 de Marzo de 2013.