

**ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUO
“LODO ACEITOSO” PROVENIENTE DE LOS PROCESOS DE REFINACIÓN**

IVAN ELIAS CARVAJAL JIMÉNEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2014

**ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUO
“LODO ACEITOSO” PROVENIENTE DE LOS PROCESOS DE REFINACIÓN**

IVAN ELIAS CARVAJAL JIMÉNEZ

Monografía para optar por el título de Especialista en Ingeniería Ambiental

Asesor:

**PhD. Crisóstomo Barajas Ferreira
INGENIERO QUÍMICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A mis amados hijos Juan Jose y María Lucia y mi amada esposa Sandra Milena
Todos ellos, prueba del amor de Dios hacia mí.

AGRADECIMIENTOS

Por la orientación en aspectos de la metodológicos al Profesor Crisóstomo Barajas Ferreira.

A los Ingenieros Nubia Esperanza Ramirez, Martha Yolanda Herrera, Alejandra Tavelli, Victor Julio Echeverria, Mauricio Cardeñosa y Ramón Cardona quienes en calidad de expertos colaboraron compartiendo su conocimiento y experiencias.

A los Ingenieros Gladys Ofelia Monsalve e Ivan Guerrero por su gran apoyo para permitir mi dedicación en el desarrollo del plan de estudios.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN Y DIAGNÓSTICO | 15 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 15 |
| 2. ESTRUCTURACIÓN DEL PROBLEMA Y OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN | 20 |
| 2.1. PRINCIPALES ASPECTOS DEL PROBLEMA | 20 |
| 2.2. OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN | 20 |
| 3. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE | 21 |
| 3.1. OBJETIVO GENERAL | 21 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 21 |
| 3.3. ALCANCE | 21 |
| 4. METODOLOGÍA GENERAL | 23 |
| 5. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LA LITERATURA | 25 |
| 5.1. FUENTES DE GENERACIÓN DE LODOS ACEITOSOS | 25 |
| 5.1.1. LOS PROCESOS DE REFINACIÓN | 26 |
| 5.1.1.1. LA DESTILACIÓN DE CRUDOS | 26 |
| 5.1.1.2. CRACKING CATALÍTICO | 27 |
| 5.1.1.3. ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS | 28 |
| 5.1.1.4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES | 30 |
| 5.1.2. INTEGRACIÓN DE LOS PROCESOS DE REFINACIÓN | 33 |
| 5.2. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE LODOS ACEITOSOS EN REFINACION | 34 |
| 5.2.1. TRATAMIENTOS MECÁNICOS | 35 |
| 5.2.1.1. FILTROS DE CORREAS O BANDAS | 35 |
| 5.2.1.2. FILTROS DE PLACAS | 37 |
| 5.2.1.3. FILTRO DE TAMBOR ROTATORIO DE VACÍO | 40 |
| 5.2.1.4. FILTRO CENTRÍFUGO | 42 |
| 5.2.1.5. SEPARACIÓN POR CENTRIFUGACIÓN | 47 |
| 5.2.2. EXTRACCIÓN CON SOLVENTE | 50 |
| 5.2.3. TRATAMIENTOS TÉRMICOS | 52 |
| 5.2.3.1. PROCESO TÉRMICO | 53 |
| 5.2.3.2. DESORCIÓN TÉRMICA | 57 |
| 5.2.3.3. PIRÓLISIS | 59 |

| | |
|---|----|
| 5.2.4. FIJACIÓN (ENCAPSULAMIENTO)..... | 61 |
| 5.2.5. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS. | 63 |
| 5.2.6. TECNOLOGÍAS EXPERIMENTALES..... | 65 |
| 5.2.6.1. CONGELAMIENTO Y DESCONGELAMIENTO | 65 |
| 5.3. CONTEXTO DE LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA GESTION AMBIENTAL DE RESIDUOS | 68 |
| 5.4. MÉTODO DELPHI PARA CONSULTA A EXPERTOS | 69 |
| | |
| 6. DISEÑO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ESPECÍFICA PARA LA CONSULTA A EXPERTOS EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS..... | 72 |
| 6.1. GRUPO DE EXPERTOS | 72 |
| 6.2. DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS..... | 72 |
| 6.3. PRESELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO..... | 73 |
| | |
| 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 76 |
| | |
| 8. CONCLUSIONES | 77 |
| | |
| 9. RECOMENDACIONES..... | 78 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 79 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Resumen del desempeño del proceso de filtro de correas a presión de vacío | 37 |
| Tabla 2. Resumen del desempeño del proceso de filtro de platos..... | 39 |
| Tabla 3. Resumen del desempeño del proceso de filtro rotario de vacío | 42 |
| Tabla 4. Resumen del desempeño de los procesos de filtración centrífuga | 46 |
| Tabla 5. Resumen del desempeño de los proceso de centrifugación..... | 50 |
| Tabla 6. Resumen del Desempeño de la Extracción con Solvente..... | 52 |
| Tabla 7. Resumen del desempeño de los procesos de tratamiento térmico..... | 56 |
| Tabla 8. Resumen del desempeño del proceso de desorción térmico..... | 58 |
| Tabla 9. Resumen del desempeño del proceso de Pirólisis | 61 |
| Tabla 10. Resumen del desempeño del proceso estabilización/solidificación | 63 |
| Tabla 11. Valores Típicos Biotratamiento de Lodos..... | 65 |
| Tabla 12 Valores típicos Congelamiento Descongelamiento | 68 |
| Tabla 13. Categorización de diferentes costos de un proyecto de inversión | 70 |
| Tabla 14. Datos de los Expertos que participaron en esta investigación | 72 |
| Tabla 15. Procesos y secuencias de proceso para el tratamiento de lodos aceitosos..... | 74 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Generación de residuos en 2009 y 2010 | 16 |
| Figura 2. Generación de residuos peligrosos y no peligrosos en el año 2010 | 17 |
| Figura 3. Asignación de recursos para contrato de manejo y disposición de residuos en la Refinería | 18 |
| Figura 4. Diagrama de la metodología del proyecto de investigación | 23 |
| Figura 5. Esquema de la destilación de crudos. | 26 |
| Figura 6. Esquema del craqueo catalítico | 28 |
| Figura 7. Esquema del almacenamiento en instalaciones de refinación | 29 |
| Figura 8. Esquema del tratamiento de aguas residuales en refinación | 33 |
| Figura 9. Diagrama de procesos de una refinería de complejidad media | 34 |
| Figura 10. Esquema general de un filtro de vacío de correas con correas auxiliares de presión | 36 |
| Figura 11. Esquema general de la etapa de llenado en un filtro de platos | 38 |
| Figura 12. Esquema general de la etapa de filtración en un filtro de platos | 38 |
| Figura 13. Esquema general de la etapa de apertura en un filtro de platos | 39 |
| Figura 14. Esquema general de un filtro rotatorio de vacío | 41 |
| Figura 15. Esquema general de un filtro centrífugo de canasta vertical | 43 |
| Figura 16. Esquema general de un filtro de cono | 45 |
| Figura 17. Esquema general de una centrifugadora de tazón tubular | 48 |
| Figura 18. Esquema general de una centrifugadora de tazón de discos | 49 |
| Figura 19. Esquema general de un sistema de centrifugación con descarga de rodillo | 49 |
| Figura 20. Diagrama del proceso de Extracción con Solvente | 51 |
| Figura 21. Esquema general del proceso de tratamiento térmico | 53 |
| Figura 22. Esquema general de un secador rotatorio | 54 |
| Figura 23. Esquema general de un secador de tornillo | 55 |
| Figura 24. Esquema general de un secador de bandas | 56 |
| Figura 25. Esquema general del proceso de desorción térmica | 58 |
| Figura 26. Esquema general del proceso de Pirólisis | 59 |
| Figura 27. Diagrama de estabilización solidificación | 61 |
| Figura 28. Disposición en planta de una instalación para Biotratamiento en Refinería | 64 |
| Figura 29. Sistemas de congelamiento | 66 |
| Figura 30. Diagrama de método Delphi | 71 |
| Figura 31. Importancia de los criterios para la selección de alternativas según los expertos | 73 |
| Figura 32. Proceso de pre-selección por parte de los expertos | 75 |
| Figura 33. Secuencias de proceso seleccionadas por los expertos | 75 |

RESUMEN

TÍTULO: ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DEL RESIDUO “LODO ACEITOSO” PROVENIENTE DE LOS PROCESOS DE REFINACIÓN

AUTOR: IVÁN ELIAS CARVAJAL JIMENEZ**

PALABRAS CLAVES: toma de decisiones, gestión de residuos, tratamiento de residuos, lodos aceitosos.

La toma de decisiones para gestión ambiental en las empresas es un asunto de vital importancia, dado que debe equilibrar el cumplimiento de los compromisos legales de las empresas petroleras con la sostenibilidad financiera del negocio. El presente trabajo desarrolla las fases del diseño y la ejecución de una metodología para definir a partir de una identificación de las alternativas tecnológicas maduras para el tratamiento de residuos aceitosos generados por los procesos de refinación, que están disponibles en mercado y que son aplicables a los objetivos del tratamiento ambiental solicitados por la ley colombiana; como resultados se obtiene una selección preliminar de alternativas utilizando una metodología de consulta a expertos en tratamientos ambientales en la industria petrolera, basada en la metodología Delphi, que involucró la evaluación de criterios específicamente técnicos y de eficiencia de los procesos de tratamiento. La implementación de la técnica de consulta a expertos redujo el grupo inicial de veintisiete (27) secuencias de proceso posibles técnicamente viables para realizar el tratamiento a siete (6) secuencias, lo anterior representa una reducción del 78%. Los expertos identificaron los riesgos de implementación de las tecnologías derivados sus propias experiencias y conocimientos. Como beneficio de la implementación de esta metodología en fases tempranas es posible disminuir el riesgo de selección de paquetes tecnológicos que no permitan a las compañías del sector petrolero lograr los resultados esperados por los usuarios.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director Crisóstomo Barajas Ferreira

ABSTRACT

TITLE: TECHNOLOGY ALTERNATIVES FOR THE TREATMENT OF WASTE "OIL SLUDGE" FROM THE REFINING PROCESS.*

AUTHOR: IVÁN ELIAS CARVAJAL JIMENEZ**

KEY WORDS: making decision, environmental management, waste treatments, oily sludges.

Decision making for environmental management in enterprises is a matter of vital importance, since it must balance the compliance with legal commitments from oil companies to the financial sustainability of the business. This paper develops the phases of design and implementation of a methodology to define from an identification of mature technological alternatives for the treatment of oily waste from refining processes, which are available in market and are applicable to environmental objectives of treatment required by Colombian law; results as a preliminary selection of alternatives is obtained using a methodology of consulting experts in environmental treatments in the oil industry, based on the Delphi methodology, specifically involved the assessment with efficiency of treatment processes and technical criteria. The implementation of the technical expert consultation reduced the initial group of twenty (27) possible sequences technically feasible process for treatment to seven (6) sequences, this represents a reduction of 78%. They identified the risks of implementing the technologies derived their own experiences and knowledge. As a benefit of the implementation of this methodology in the early stages may reduce the risk of selection of technology packages that do not allow the oil sector companies achieve the results expected by the users.

* Degree work.

** Physicochemical Faculty of Engineering. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Director Chrysostom Barajas Ferreira

INTRODUCCIÓN

La refinación de hidrocarburos es una actividad generadora de impactos ambientales al agua, aire y suelos. Por esta razón la gestión de residuos es un factor de importancia en el que hacer de las refinerías. Estas empresas deben establecer planes y programas dentro de la organización que garanticen su adecuado aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los residuos.

Las empresas también deben definir los criterios que aplican para los procesos de toma de decisión asociados a la gestión de los residuos, entre otros, los criterios técnicos y financieros que definirán las mejores alternativas.

Por otra parte, en un marco donde se asuma la correcta operación de los procesos seleccionados, el factor tecnológico pasa a ser una de las variables de incidencia en la toma de decisiones de los procesos para la gestión de residuos, dado que cada tecnología presenta diferencias en la capacidad de remoción de contaminantes, la eficiencia energética, los insumos y los servicios industriales requeridos; incluso como factor determinante de la tecnología está la disponibilidad de la tecnología en el nicho donde opera la organización.

En el presente documento, se identifican las tecnologías y procesos de manejo de residuos, al igual que las posibles combinaciones de las mismas que garanticen el tratamiento completo del lodo aceitoso en condiciones requeridas desde el punto de vista legal.

Para todos los efectos de citación de ahora en adelante, en este documento ECOPETROL S.A. se denominará “la Empresa”. A su vez, dentro de la cadena de valor, la Empresa cuenta con una instalación dedicada a los procesos de

refinación y petroquímica en la ciudad de Barrancabermeja. Esta instalación, se denominará de ahora en adelante “la Refinería”.

1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN Y DIAGNÓSTICO

1.1. ANTECEDENTES

La Empresa, en el ámbito corporativo, cuenta con una política integral con la cual establece los lineamientos de Salud Ocupacional, Seguridad Industrial y Ambiente (por sus siglas en inglés: HSE). Para hacer operativa esta política, la Empresa genera y mantiene instrumentos en cada uno de sus elementos de la cadena de valor desde la exploración hasta la refinación y petroquímica (Tordo, Tracy, & Arfaa, 2011). Los instrumentos principales establecidos en la actualidad son manuales y procedimientos asociados a la gestión de residuos industriales.

La Refinería cuenta con un manual para la gestión de residuos industrial actualizado. A través de este documento se guía el manejo y la disposición de los residuos industriales. En el manual se definen las bases del sistema, el cual tiene como objeto:

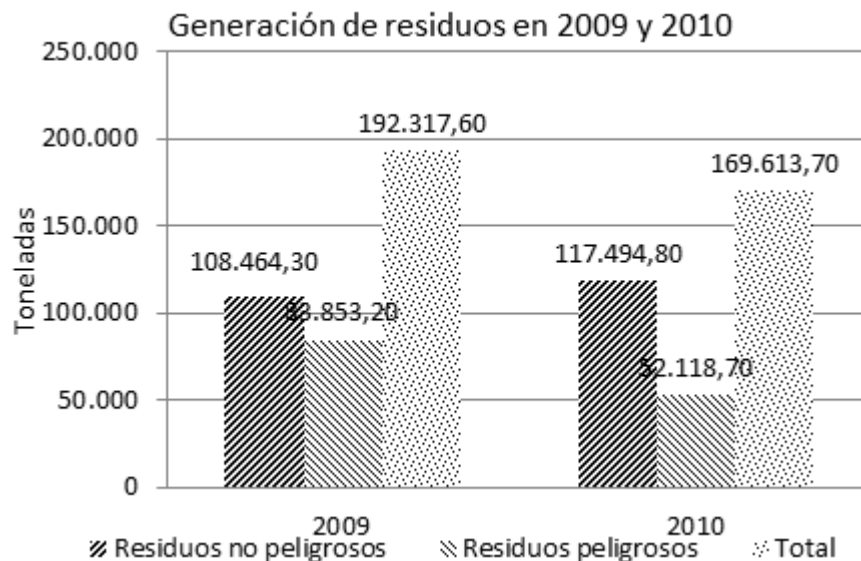
- El aseguramiento del conocimiento técnico de la gestión de los residuos.
- La identificación oportuna de tratamientos para la disposición final de los residuos.
- Definir las responsabilidades de las personas en cada etapa y nivel jerárquico.
- Establecer los mecanismos de trazabilidad desde la “cuna a la tumba” (Cheremisinoff, 2006) de los residuos industriales.

En otro orden de ideas, se procede a establecer la línea base de la Empresa a través de las cantidades y costos de disposición de residuos industriales como las principales variables de esta dinámica.

La Empresa en el desarrollo de sus diferentes actividades durante el año 2009 produjo desechos “peligrosos” y “no peligrosos” por un total de 192,3 kilotoneladas (kt) de residuos. En contraste, en el año 2010, la generación fue de 169,6 kt. A su vez, para estos mismos periodos, los residuos “peligrosos” generados por la Empresa fueron aproximadamente de 84 y 52 kt, respectivamente, como se muestra en la siguiente figura.

En el periodo 2010, la distribución de los residuos generados por los componentes de la cadena de valor de la Empresa, tuvo a la Refinación y Petroquímica como el primer generador de residuos, con una producción aproximada de 113,9 kt, de las cuales 3,7 kt corresponden a desechos Peligrosos. Se destaca también, que el principal generador de residuos peligrosos es la Exploración y Producción, con 42,2 kt.

Figura 1. Generación de residuos en 2009 y 2010



Fuente: Ecopetrol, Vicepresidencia de Servicios y Tecnología. Taller de Residuos 2011. Marzo 17 de 2011. Piedecuesta, Santander.

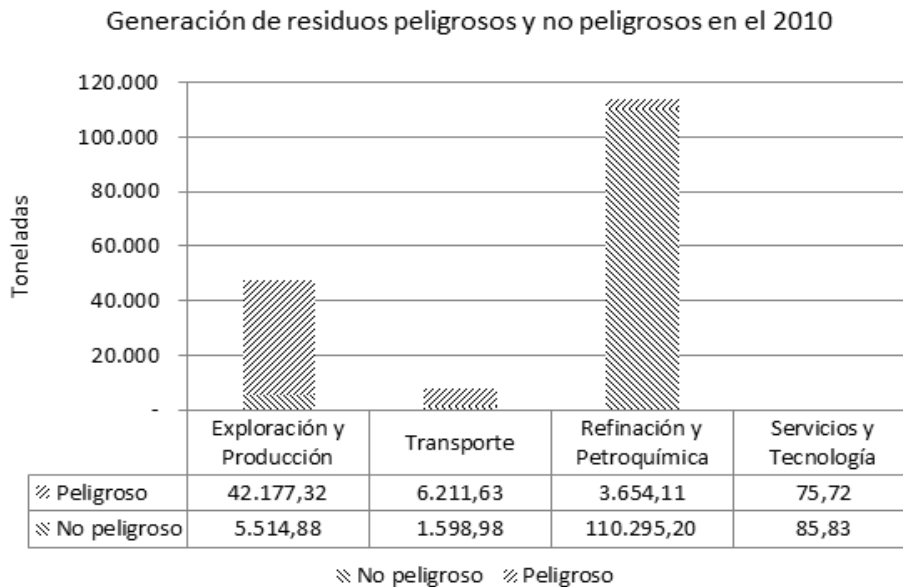
En la siguiente figura se presentan las distribuciones de generación de residuos en los componentes de la cadena de valor de la Empresa para el año 2010.

El principal residuo peligroso generado corresponde a los lodos aceitosos. Antes y durante el año 2010 este desecho fue tratado vía biodegradación.

En la Refinería, la ejecución de contratos para servicios de manejo y disposición de residuos Peligrosos y No Peligrosos del periodo de 2007 a 2010, alcanzó un valor aproximado de 13.645 millones de pesos colombianos. De dicha contratación, el 76% correspondió a residuos peligrosos. En la próxima figura se presentan los valores de los costos en el servicio de manejo y disposición de los residuos de la Refinería.

Así mismo, según los inventarios del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), respecto a la generación de los residuos industriales por la Refinería para el año 2005, estableció que la generación de residuos industriales fue de 25,8 kt, mientras el total de los lodos aceitosos llegó a ser de 13,9 kt. En el mismo inventario se establece que los lodos aceitosos provienen de:

Figura 2. Generación de residuos peligrosos y no peligrosos en el año 2010



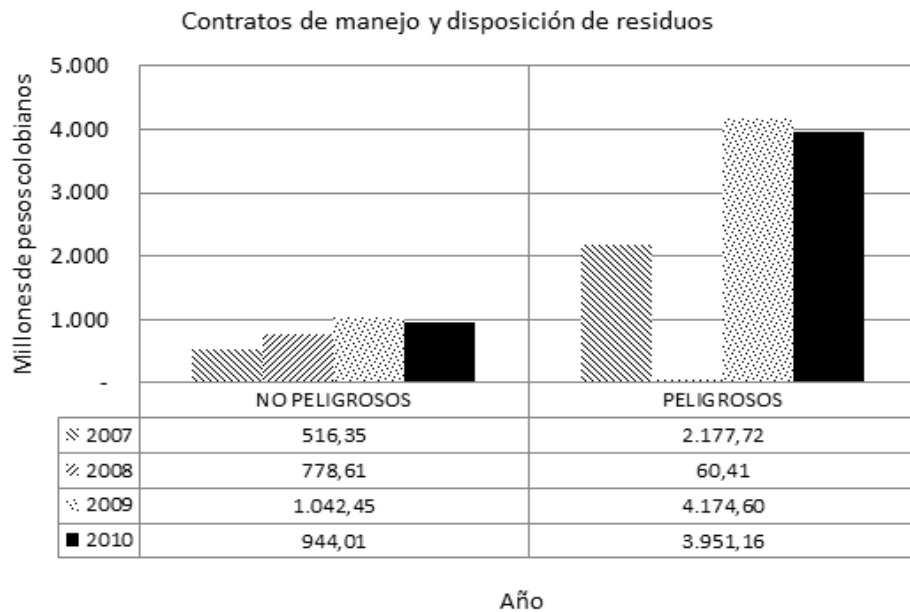
Fuente: Ecopetrol, Vicepresidencia de Servicios y Tecnología. Taller de Residuos 2011. Marzo 17 de 2011. Piedecuesta, Santander.

- El tratamiento de aguas residuales aceitosas.
- El mantenimiento de los separadores de aguas aceitosas.
- El mantenimiento de los tanques de materias primas (crudos), productos (livianos, medianos y pesados) y residuales (“slop”).

Para justificar la definición del presente caso de estudio, se tuvo en cuenta el elemento de la cadena de valor, donde se presenta la mayor generación de residuos, que corresponde a 113,9 kt generados en 2010 por la Refinación y Petroquímica.

Igualmente, el principal residuo industrial de la Refinería corresponde a los lodos aceitosos, con un 53,8% de la participación sobre el total de los residuos industriales. De esta manera los lodos aceitosos generados en la Refinería serán el caso de estudio del presente trabajo.

Figura 3. Asignación de recursos para contrato de manejo y disposición de residuos en la Refinería



Fuente: Sistema de información SAP® de ECOPETROL S.A. búsqueda realizada por el autor.

En resumen, la cantidad de recursos para el manejo de residuos consolidan a este aspecto como importante de la gestión financiera de la Empresa, en consecuencia la toma de decisiones para la asignación de recursos en los procesos de gestión ambiental de residuos deben ser estructurados con criterios adecuados que garanticen la optimización del costo y los riesgos.

Por otra parte, al hacer una revisión de los documentos que soportan la decisiones de inversión de la Empresa, incluidas las inversiones de carácter ambiental, en su mayoría se remiten a parámetros asociados al criterio financiero, como por ejemplo Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno, Relación de Beneficio-Costo y Eficiencia de Inversión (ECOPETROL S.A., 2011).

En la práctica se realizan revisiones periódicas a los aspectos financieros de los contratos, sin embargo no se realiza una revisión de la efectividad de la alternativa tecnológica implementada.

2. ESTRUCTURACIÓN DEL PROBLEMA Y OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

2.1. PRINCIPALES ASPECTOS DEL PROBLEMA

La práctica generalizada en las empresas de la selección de alternativas para procesos contratación de servicios y de procesos de inversión de carácter ambiental, se basa en criterios que buscan el ahorro de los costos en sacrificio de la confiabilidad a largo plazo para la reducción del impacto ambiental (Cheremisinoff, 2006), que es lo que originalmente se busca.

Los aspectos centrales del problema están en la integración de los criterios técnicos, financieros y de impacto ambiental en una sola herramienta para la evaluación de alternativas que garanticen el cumplimiento de los objetivos de la contratación de servicios y los proyectos de inversión ambiental.

2.2. OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se establecieron como fuentes de información necesaria, las siguientes:

- Documento API Evaluation of Treatment Technologies for Listed Petroleum Refinery Waste. American Petroleum Institute por G. Rowe, para la comparación de las diferentes tecnologías de tratamiento de los lodos aceitosos residuos en el contexto de las refinerías. Al igual que documentos académicos y comerciales con la descripción de tecnologías para el tratamiento de lodos aceitosos.
- Entrevistas y juicio de expertos.

3. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

3.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar y evaluar por expertos las tecnologías para el tratamiento del residuo “lodo aceitoso” generado por la industria de refinación.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las fuentes generadoras de los residuos aceitosos en los proceso de refinación.
- Realizar las revisiones bibliográficas de las tecnologías de tratamiento de lodos aceitosos.
- Desarrollar una metodología para realizar la preselección de tecnología o combinación de tecnologías aplicables para el tratamiento de los lodos aceitosos provenientes de los procesos de refinación

3.3. ALCANCE

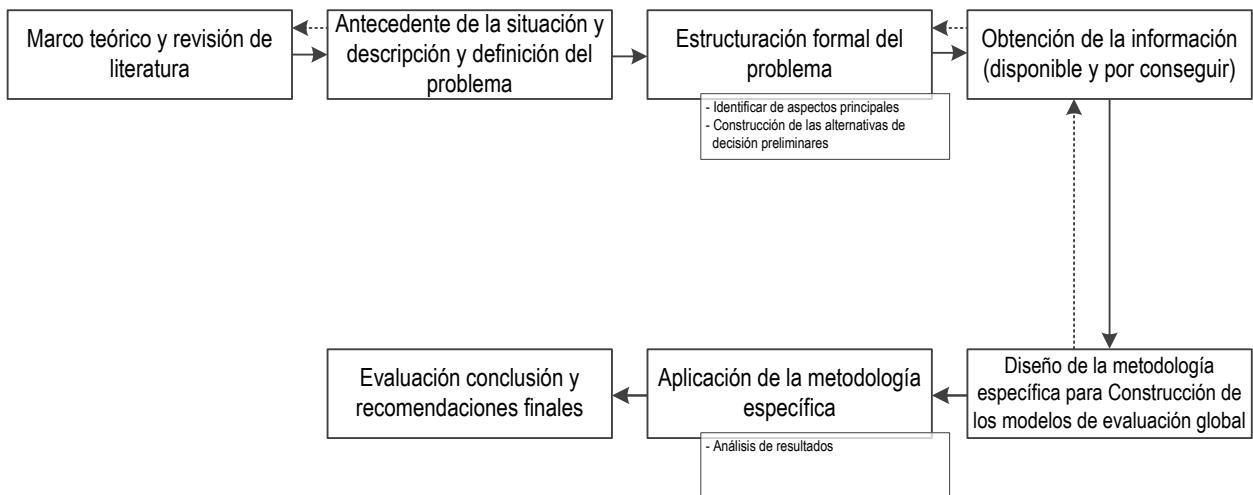
Esta investigación se desarrollará para las fuentes generadoras de lodos aceitosos de la Refinería, y busca establecer una preselección de los proceso de tratamiento de lodos aceitosos. Alineado con la estrategia ambiental implantada en el Grupo Empresarial ECOPETROL.

El presente trabajo no está orientado a la maximización de las utilidades empresariales a partir de un cambio en la estrategia ambiental del grupo empresarial, la cual ya está establecida.

4. METODOLOGÍA GENERAL

Este trabajo se basó en la metodología que presenta Castillo (2006), para el desarrollo de una toma de decisiones, la metodología es una guía general y flexible, mediante unos pasos principales los cuales deben ser ajustados y modificados de acuerdo con las características de problema.

Figura 4. Diagrama de la metodología del proyecto de investigación



Fuente: modificación del Autor de Castillo (2006) y Pusey & Castillo (2013)

La metodología general se basa en un conjunto de actividades que se pueden describir de la siguiente manera:

- El desarrollo del marco teórico y la ejecución de la revisión de la literatura en los siguientes aspectos:
 - Fuentes de generación de lodos aceitosos
 - Tecnologías para el tratamiento de lodos aceitosos
 - Herramienta para consultas a expertos

- Alternativas tecnológicas de tratamiento de lodos aceitosos en la industria del petróleo y gas y en ECOPETROL S.A. Esta etapa comprende el acopio y análisis de información existente en la Empresa, entrevistas con el personal experto para establecer las principales oportunidades de los procesos ambientales.
- La estructuración formal del problema consiste en identificar y describir los principales aspectos y elementos que intervienen en el problema.
- La obtención de la información se debe realizar basado en las variables relevantes establecidas.
- Diseño y aplicación de la metodología específica para la preselección de alternativas para el tratamiento de lodos aceitosos,. con el apoyo de expertos familiarizados con el problema.
- Análisis de resultados y recomendaciones.

5. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

5.1. FUENTES DE GENERACIÓN DE LODOS ACEITOSOS

Aproximadamente el 80% de los residuos de hidrocarburos generados en una refinería son regenerados y reciclados; y el restante 20% son eliminados por algún método de disposición (American Petroleum Institute (API), 2010).

Por otra parte, según API (2010), dentro de los procesos de refinación de petróleos a partir de los cuales se generan residuos de aceitosos se encuentran:

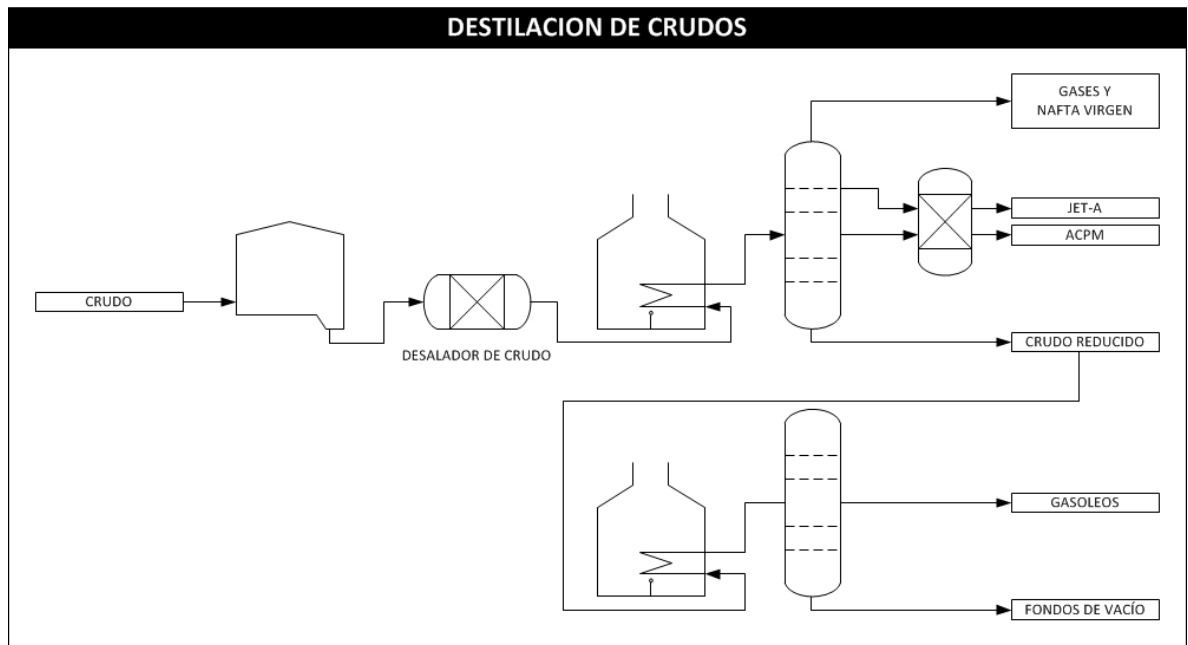
- Separadores de lodos
- Material flotante de los sistemas de tratamiento de flotación por aire disuelto (DAF)
- Sólidos del “*slop*”
- Fondos de tanques
- Lagunas de sedimentación
- Lodos de flotación y floculación
- Fondos de sistemas de desalado de crudos (desaladores)
- Aceites y solventes residuales
- Varios lodos de aceite

A continuación, se presentará una breve explicación de los procesos de refinación y sus aspectos principales, de manera que provea unas sencillas bases de conocimiento de los procesos.

5.1.1. Los procesos de refinación

5.1.1.1. La destilación de crudos: La destilación primaria (atmosférica) es una de las primeras etapas del procesamiento de los crudos. Inicialmente, se realiza una remoción de las sales que acompañan al crudo. Estas sales son causantes, principalmente, de eventos de corrosión en los sistemas subsecuentes; a este proceso se le conoce como “desalado”. A continuación se presenta un esquema de las principales operaciones del proceso de destilación de crudos.

Figura 5. Esquema de la destilación de crudos.



El siguiente paso, consiste en realizar un calentamiento del crudo, y posteriormente en torres de fraccionamiento, se realiza la separación de los productos más livianos como son la nafta, el Jet-A, el Queroseno, el ACPM y los gasóleos. Estos componentes constituyen cerca del 50% del crudo; el restante sale por el fondo de la torre y se denomina crudo reducido.

El crudo reducido, que constituye la parte pesada del petróleo, la cual no se puede separar en la destilación a presión atmosférica, se somete a una destilación a presión de vacío para recuperar otros productos como los gasóleos y los destilados. Estos últimos productos se emplean para la obtención de bases lubricantes y parafinas.

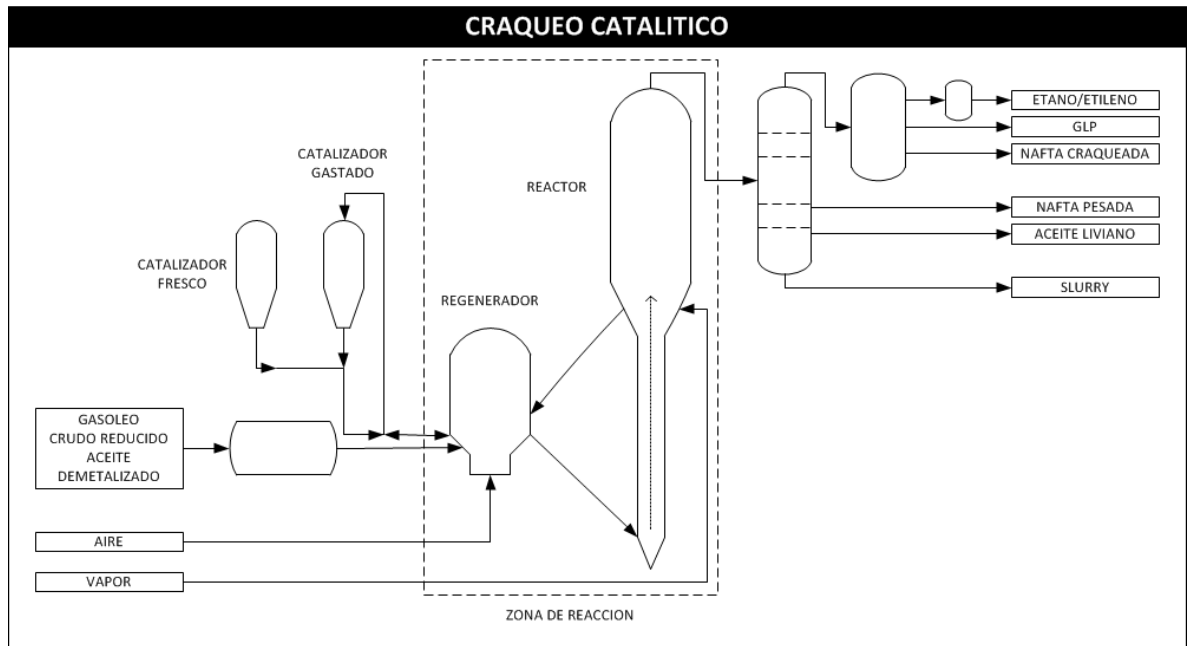
Por último, el residuo o fracción más pesada resultante se conoce como fondo de vacío.

Como se mencionó, el “desalado” del crudo es una de las principales fuentes de generación de un agua aceitosa, la cual se caracteriza por el alto aporte de sólidos y sales a muy alta temperatura. De igual forma, en los sistemas de separación de agua y aceite, donde no existan buenos controles de proceso, pueden presentarse vertimientos con altos contenidos de hidrocarburo.

5.1.1.2. Cracking catalítico. Este proceso tiene como su materia prima los gasóleos, el crudo reducido y el aceite demetalizado, los cuales contienen hidrocarburos de alto peso molecular, que se rompen en moléculas más pequeñas por acción del catalizador y la temperatura. Esto se lleva a cabo en la sección de reacción.

Luego, se realiza la separación de los diferentes productos en la sección de fraccionamiento, de tal manera que se obtienen los gases, la gasolina, el aceite liviano de ciclo, el alquitrán aromático y el “*slurry*”. En la Figura 6 se presenta un esquema del proceso de craqueo catalítico.

Figura 6. Esquema del craqueo catalítico



5.1.1.3. Almacenamiento de hidrocarburos. Este proceso es transversal a todos los procesos de refinación y consiste en el almacenamiento de las materias primas, los productos intermedios y el producto final. Para el control de la calidad de las corrientes., los sistemas de almacenamiento deben tener establecidos las características de las sustancias en lo referente a las propiedades físicas y/o químicas.

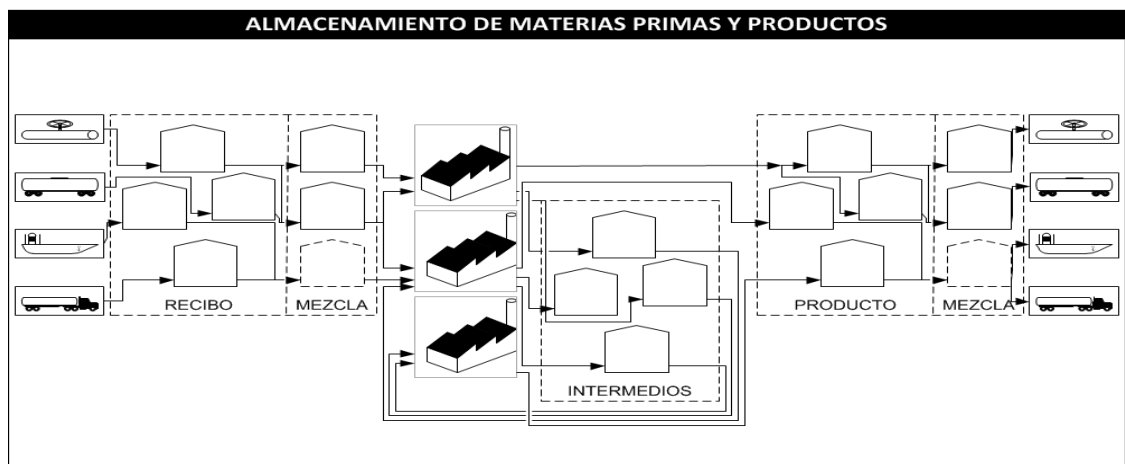
Grosso modo, los diferentes estados de los hidrocarburos a través de su procesamiento requieren de almacenamiento, en consecuencia hay sistema dedicados al almacenamiento de crudos que serán la materia prima para las unidades de destilación primaria; algunas corrientes de refinación serán productos terminados para la venta, mientras otras corrientes serán productos intermedios, los cuales serán cargados por otros sistemas, por ejemplo, las unidades cracking.

En principio, los crudos pueden provenir directamente de los campos de producción nacional o de compras a proveedores internacionales, en ambos casos, los crudos pueden llegar por diferentes medios de transporte como los oleductos, los carro-tanques y los transportes fluviales o marítimos.

Los productos intermedios son aquellas corrientes que dentro de una instalación se transfieren entre los diferentes procesos de refinación. Los almacenamientos reciben estos productos de las plantas generadoras, luego establecen el cumplimiento de controles de calidad y posteriormente son entregados a las plantas receptoras.

Por último, los productos finales son aquellos que salen de la refinería para venta final a consumidores mayoristas y/o minoristas; sus especificaciones son legalmente reguladas, dado que deben cumplir con condiciones de seguridad y calidad según las aplicaciones en las que serán usadas. Para tal fin son preparadas en línea o cochadas, posteriormente almacenadas, y finalmente se valida la especificación de calidad. La entrega de estos productos se realiza por diferentes medios, de igual manera que los medio de llegada mencionados. El almacenamiento se representaría así:

Figura 7. Esquema del almacenamiento en instalaciones de refinación



Las materias primas y los productos finales pueden tener un paso intermedio que corresponde a la preparación o “*blending*”, en el cual se asegura a partir de la mezcla de corrientes las características físicoquímicas requeridas por procesos y/o calidad.

5.1.1.4. Sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales. Estos sistemas corresponden al conjunto de procesos cuyo objetivo es lograr la adecuación de las corrientes líquidas residuales industriales de los procesos de refinación para ser servidas a los cuerpos de agua; en algunos casos incluye el tratamiento de los vertimientos sanitarios. Al final los vertimientos serán efluentes tratados con bajos niveles de contaminantes y deberán estar en concordancia con la normatividad legal aplicable.

Dentro de las aguas residuales industriales de los procesos de refinación se pueden establecer los siguientes grupos:

- **Aguas aceitosas:** son aguas que provienen de drenajes de tanques y equipos, se caracterizan por sus valores de pH cáusticos y altos contenido de hidrocarburos y/o sólidos.
- **Aguas agrias (o ácidas):** aguas con alto contenido de ácido sulfhídrico (H_2S) y amoniaco; también pueden contener mercaptanos, provenientes de los proceso de lavado de gases de la unidad de craqueo catalítico.
- **Aguas de rechazo de sistemas de tratamiento de aguas:** corresponden a las aguas generadas por las diferentes operaciones rutinarias del tratamiento de aguas potables o industriales. Su característica depende de los tratamientos de aguas; dentro de las principales desviaciones están los altos contenido de sales, materia orgánica y turbiedad.

Dependiendo del alineamientos de las corrientes de aguas residuales, éstas pueden llegar a los proceso de tratamiento de aguas de manera mezclada o

segregada. De esta última manera se pueden generar opciones de re-uso o tratamientos especiales que optimizan los esfuerzos de tratamiento.

A continuación se describe el tratamiento de aguas.

En primera instancia se encuentra la separación primaria o pre-tratamiento. Esta separación se lleva a cabo en separadores agua-aceite, los cuales básicamente utilizan las diferencias de densidades que pueden tener las partículas de aceite, el agua y el material sólido. Estos separadores pueden tener diferentes configuraciones las cuales redundan en eficiencias de espacio, equipos asociados, etc. Específicamente, dentro de los dos principales separadores se tiene:

- **Separador API:** equipos diseñados bajo los lineamiento de American Petroleum Institute.
- **Interceptor de placas corrugadas** (CPI por sus siglas en inglés: *Corrugated Plate Interceptor*).

En ambos casos, los separadores generan tres corrientes de materiales: agua, aceite recuperado y lodos aceitosos.

Éstos los lodos aceitosos, según la filosofía de operación del equipo, pueden producirse a periodos cortos (horas o días), éste el caso de los CPI; o pueden generarse incluso cuando se hace el mantenimiento de equipo para el caso de los Separadores API.

El tratamiento de los lodos aceitosos con alto contenido de líquidos, agua y aceite, consiste principalmente de una deshidratación por centrifugación con ayuda de químicos. Dicha centrifugación puede generar separaciones de dos fases (líquidos y sólidos) y/o tres fases (agua, aceite y sólidos).

Por otra parte, el agua retorna al tratamiento de separación primaria, mientras que el aceite recuperado del proceso de centrifugación y el aceite recuperado de los sistema de separación primaria van al tratamiento de “*slop*”.

El tratamiento de “*slop*” tiene como objetivo obtener aceites con bajos contenidos de agua y sólidos, los cuales podrán ser reutilizados en diferentes procesos de refinación o incluso ser tratado como un producto de especificación para la venta. De este proceso se generan también tres corrientes aguas, aceite y sólidos; los cuales se alinean respectivamente a tratamiento de separación primaria, tanques de almacenamiento y tratamiento de deshidratación de lodos aceitosos.

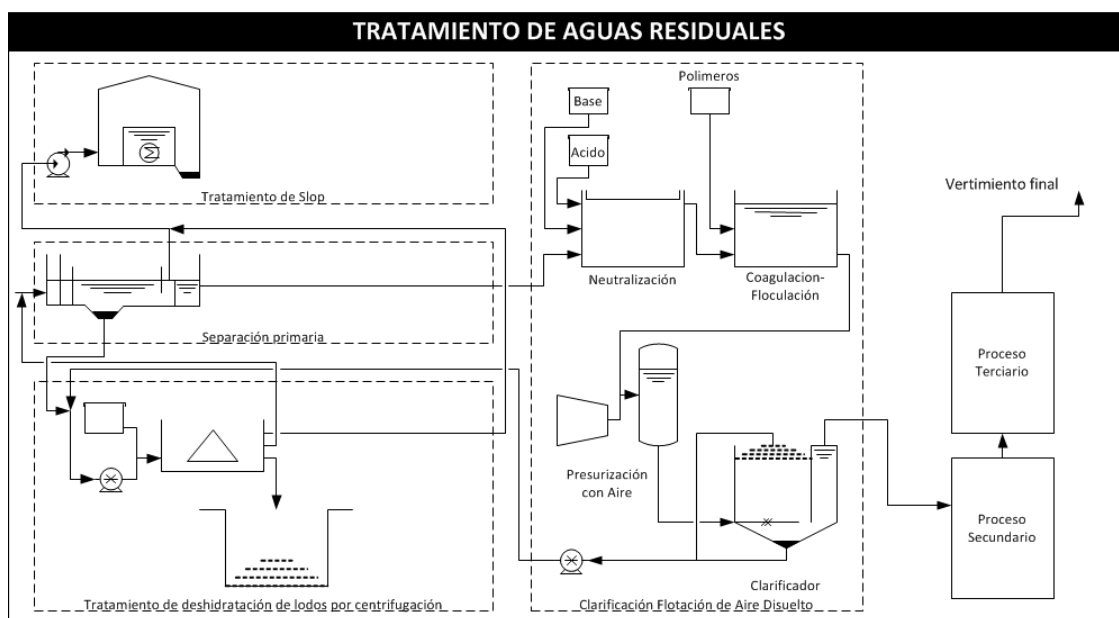
El agua efluente de la separación primaria continua con el proceso de clarificación por flotación con aire disuelto. Este proceso tiene como propósito inducir la formación de sólidos mediante la adición de químicos coagulantes y floculantes a un pH controlado. El agua con flóculos se mezcla con una corriente de agua clarificada rica en micro-burbujas. El flujo ascensional de las burbujas arrastra los flóculos y estos son removidos continuamente y tratados como lodo aceitoso.

Es necesario enfatizar, que según los contaminantes remanentes disueltos en el agua clarificada se emplean procesos secundarios, incluso terciarios de tratamiento. Un ejemplo de tratamientos secundarios son los tratamientos biológicos orientados a la reducción de las concentraciones de compuestos aromáticos como benceno o fenoles, o sencillamente reducir los compuestos que causen demanda oxígeno. Los tratamientos terciarios son aquellos que atienden a la reducción de los sólidos y ciertos contaminantes mediante equipos de filtración.

En conclusión, los efluentes residuales industriales dentro de una instalación de refinación tienen orígenes y características diversas, dado que provienen de diferentes procesos, y como tal el tratamiento es individualizado según dichos contaminantes o requerimientos de calidad del vertimiento. A continuación se

presenta un esquema donde se resumen los tratamientos de aguas residuales en procesos de refinación.

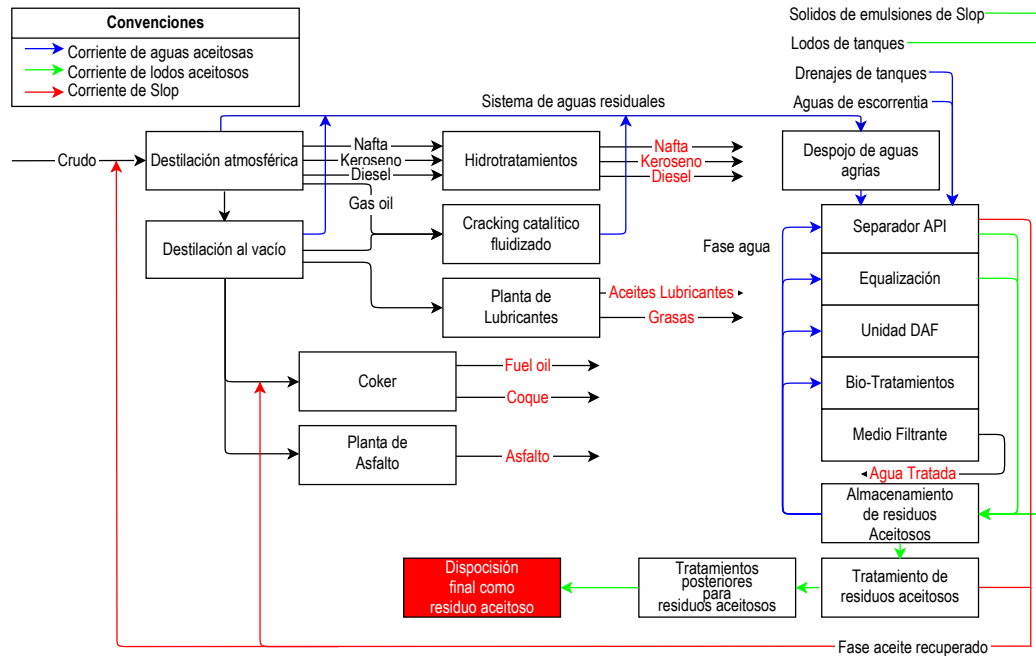
Figura 8. Esquema del tratamiento de aguas residuales en refinación



5.1.2. Integración de los procesos de refinación. Ya establecidos los principales procesos que intervienen en un esquema de refinación de complejidad media, estos se integran para que las entradas de un proceso puedan ser las salidas de otros, como se muestra a continuación.

El flujo de hidrocarburos inicia por el proceso destilación de crudos, posteriormente, en los procesos intermedios de cracking catalítico, hidrotratamientos y coker se busca la maximización de la obtención de productos blancos y medios. Durante todo el proceso se generan residuos sólidos y líquidos los cuales también son integrados a proceso de tratamiento para asegurar la minimización del impacto ambiental de las operaciones.

Figura 9. Diagrama de procesos de una refinería de complejidad media



5.2. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE LODOS ACEITOSOS EN REFINACION

De manera general se presentan los procesos de tratamientos para los lodos aceitosos generados en los procesos de refinación. De ellos se extracta una descripción de su funcionamiento, los valores de entrada permisible de los lodos al proceso para ser tratados y el potencial de remoción de los procesos en término de las cantidades de agua, aceites-hidrocarburos y sólidos.

En la fase de aplicación de los diferentes tratamientos es obligatorio establecer una caracterización del lodo a tratar, de decir de donde proviene el petróleo presente en los lodos, cuáles son sus propiedades, las cantidades (o concentraciones) de agua, aceites-hidrocarburos y sólidos suspendidos presentes, al igual que las cantidades de contaminantes, en especial de los contaminantes que están regulados legalmente; para esto es muy útil conocer los procesos de transformación que originaron el residuo y por cuales procesos ha pasado.

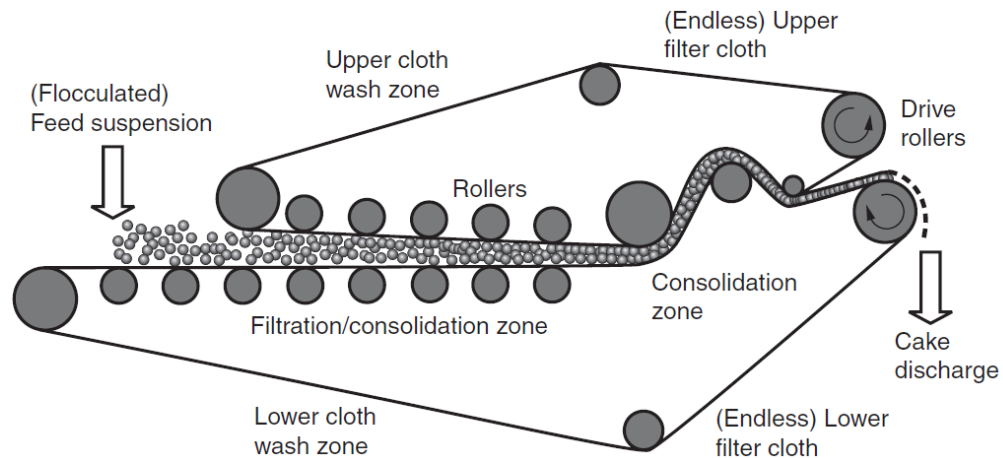
Luego, para realizar una selección apropiada de tecnología y equipos es clave conocer cómo funciona cada tipo de equipo separador, incluyendo sus limitaciones operacionales (Schultz, 2006); y dentro de esas limitaciones, especialmente, se debe establecer el grado de remoción de los contaminantes regulados legalmente, pues esto diferencia las tecnologías y sus beneficios.

5.2.1. Tratamientos mecánicos. Incluye los tratamientos en los cuales la separación se realiza por medios físicos naturales o inducidos, como por ejemplo aprovechando las diferencias de presión de los medios, las diferencias de densidad de los componentes, las diferencias de velocidades de las partículas, entre otras. A continuación se presentan las principales tecnologías incluidas en este grupo.

5.2.1.1. Filtros de correas o bandas: Son procesos continuos, donde los filtros de bandas son usados para remover el agua de los líquidos residuales y producir un material libre de líquido conocido como torta.

De manera general, el proceso de filtración con correas incluye tres operaciones básicas: el acondicionamiento químico del lodo a tratar, el drenaje por gravedad hasta una consistencia de no fluidez y la compactación de los lodos previamente drenados. Según siguiente esquema.

Figura 10. Esquema general de un filtro de vacío de correas con correas auxiliares de presión



Fuente: (Sutherland K. , 2008, pág. 190)

Según Rowe (1987), más del 60% de la fase líquida puede ser removida en la llamada zona de gravedad.

Inicialmente la materia cruda es mezclada con un polímero para provocar la floculación de sólidos e incrementar la separación de la fase líquida. Posteriormente, el material ingresado es aplicado a una membrana de retención de sólidos o filtro de tela, donde se da la separación de las fases líquida y sólida. El material drenado se mueve a través del filtro y fluye hasta las bandejas de recolección del filtrado; los sólidos son retenidos en el filtro de la tela. Finalmente, la torta que se produjo es eliminada. Un lavado de alta presión es aplicado en este punto para limpiar y destapar los poros tapados de la banda (Rowe, 1987) (Sutherland K. , 2008).

Variables objetivo y valores típicos de desempeño

A continuación se presenta un resumen de la información de desempeño para este proceso.

Tabla 1. Resumen del desempeño del proceso de filtro de correas a presión de vacío

| Parámetro | Entrada Permisible (%) ^a | Productos Líquidos (%) ^a | | Torta Filtrada (%) ^a | Adición Polímero (g/kg) | Costos ^c |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|---------------------------------|-------------------------|--|
| | | Agua | Aceite | | | |
| Aceite | 4,6 | NA | 80-90 | 0,5 - 21 | 0,018 – 0,09 | Varia de (80\$ a 200\$)US /ton Sólidos secos + Polímero (12 \$ a 80\$)USD /ton |
| Agua | >20 | 100 | 8-15 | 5 - 46 | 0,018 – 0,09 | |
| Sólidos | >0,5 ^c | NA | 0,1 | > 20 ^c | 0,018 – 0,1 | |

Fuente: a) (Rowe, 1987), b) (Adams, Jr., 1982), c) (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2000), d) (Sutherland K. , 2008), e) (Onay & Gonenc, 1998)

Los principales proveedores

Los principales proveedores de la tecnología para este proceso son:

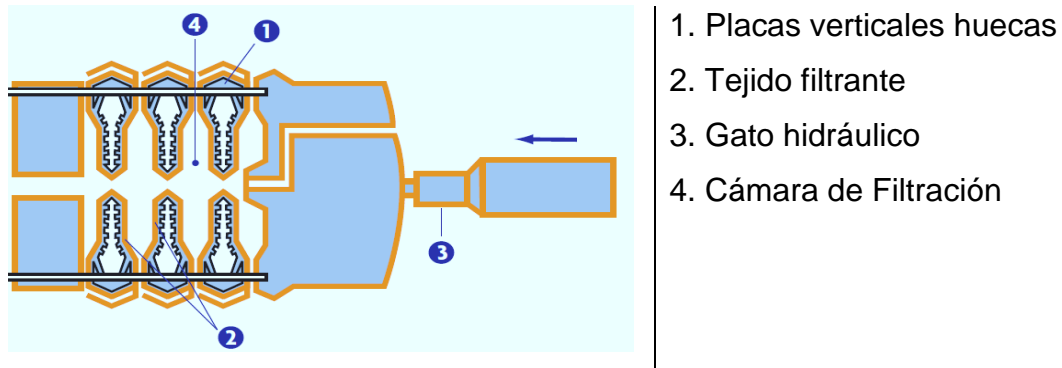
- Komline Sanderson (<http://www.komline.com>)
- SIEMENS (<http://www.water.siemens.com>)
- BDP (<http://www.bdpindustries.com>)

5.2.1.2. Filtros de placas: Los filtros de placas, también llamados filtros de marco y prensa, tienen como principio de funcionamiento la filtración.

Un filtro de placas se compone de una serie de bastidores verticales agujerados con tejidos filtrantes estirados en ambos lados, los cuales están colgados unos al lado de los otros y se presan juntos hidráulicamente, formando una cámara entre las placas. Cada ciclo puede ser separado en tres etapas:

Etapas de llenado: es el inicio del ciclo; el lodo previamente acondicionado es inyectado en las cámaras de filtración por una bomba de alta presión. El lodo llena cada cámara y el agua empieza a filtrarse.

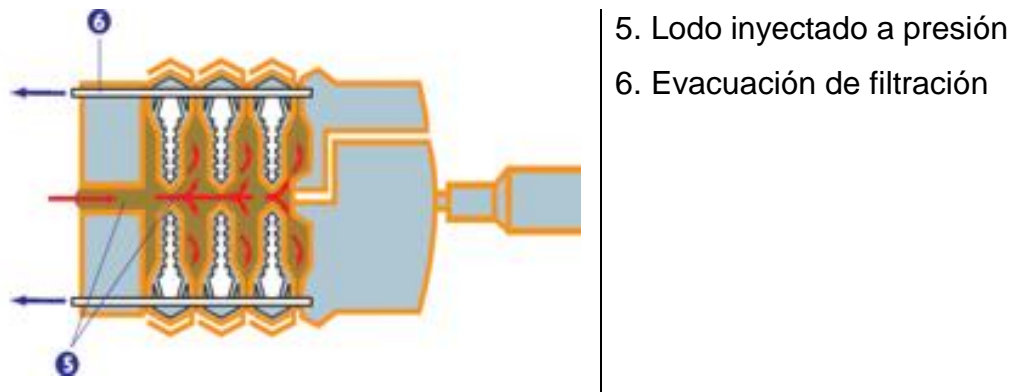
Figura 11. Esquema general de la etapa de llenado en un filtro de platos



Fuente: (SNF FLOERGER, 2003)

Etapa de filtración: Una vez todas las cámaras han sido llenadas, el lodo sigue siendo bombeado dentro las cámaras hasta alcanzar una presión de 15 bar. El filtrado fluye en canales emplazados en cada bastidor y es evacuado a través de una tubería principal. El flujo de lodo inyectado se reduce cuando aumenta la presión. Dos bombas de tornillo son usadas, por una parte una de las bombas es de alta presión y bajo caudal al inicio del ciclo, y la otra bomba es de baja presión alto caudal al final del mismo.

Figura 12. Esquema general de la etapa de filtración en un filtro de platos

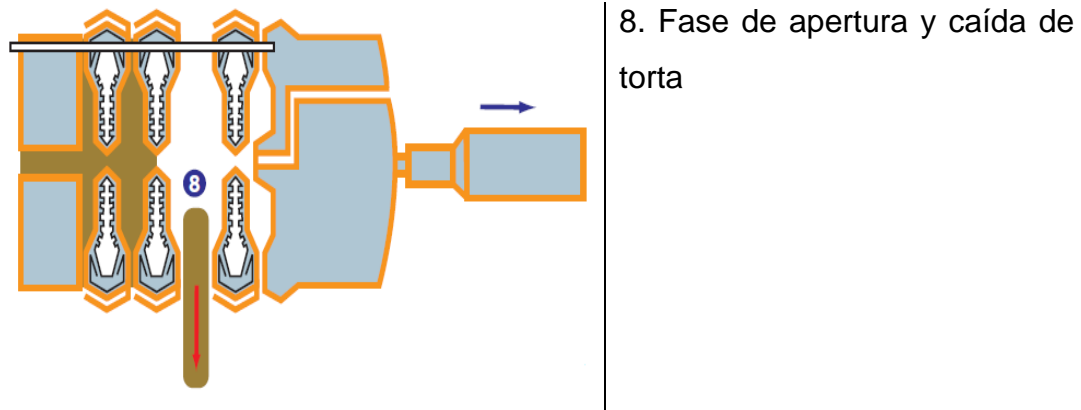


Fuente: (SNF FLOERGER, 2003)

Etapa de apertura: dentro de los parámetros que pueden ser utilizados para indicar el final del ciclo, se encuentran una cierta presión máxima de operación, un determinado tiempo de filtrado o cierto volumen filtrado. Una vez la prensa se ha detenido, la cámara es purgada de los lodos contenidos, la presión sobre los

bastidores se libera, luego, las cámaras se abren secuencialmente y finalmente la torta cae abajo sobre una banda transportadora.

Figura 13. Esquema general de la etapa de apertura en un filtro de platos



Fuente: (SNF FLOERGER, 2003)

Variables objetivo y valores típicos de desempeño

Es posible medir la efectividad de estos tratamientos con respecto a la reducción en los componentes aromáticos, fenoles y metales presentes en los lodos tratados por el filtro, midiendo los niveles presentes en la alimentación y en las tortas de filtradas. Los filtros de prensa presentan un rendimiento promedio de componentes orgánicos entre 82 y 99% en reducción de peso, además los metales pueden reducirse en más del 50%. En cuanto al transporte lixiviados se reducen en más del 90%, menos para el plomo que fue de 79% (Adams, Jr., 1982), (Rowe, 1987).

Tabla 2. Resumen del desempeño del proceso de filtro de platos

| Parámetro | Entrada permisible, % ^d | Productos líquidos, % ^d | | Torta Filtrada (%) ^d | Costos ^e |
|-----------|------------------------------------|------------------------------------|--------|---------------------------------|---------------------|
| | | Agua | Aceite | | |
| Aceite | 1,5 – 23 | 0,1 | 73 -88 | 9 - 27 | \$1 USD / Galón |
| Agua | 39 | 100 | 12 | 4,3 - 31 | |
| Sólidos | 12 - 38 TSS | 0,1 | 0,45 | 44 - 55% | |

Fuente: a) (Stickland, de Kretser, Scales, Usher, Hillis, & Tillotson, 2006), b) (Guyer, 2011), c) (Tarleton & Wakeman, 2007), d) (Rowe, 1987), e) (SERFILCO, 2002)

Principales proveedores

Los principales proveedores de la tecnología para este proceso son:

- Aqua Care Systems' filter presses
- Diemme Filtration
- Shandong Jing Jin environmental protection equipment limited company
- Grupo SNF Floerger

5.2.1.3. Filtro de tambor rotatorio de vacío: Un filtro de tambor de vacío consiste en un contenedor de tambor forrado en paño, suspendido en un eje axial sobre una canaleta de alimentación que va en la suspensión con aproximadamente un 50 a 80 % de la pared del tambor inmersa en la suspensión (Sutherland K. , 2008). El canal generalmente incluye un agitador que mantiene la suspensión a una concentración constante. La oscilación es un agitador tipo columpio, que consta de brazos laterales soldados y rastrillos de arado angulados; está diseñado para prevenir la erosión de la torta en la superficie del tambor, pero al tiempo para maximizar su formación y salida de producción.

El tambor es habitualmente dividido en tres zonas conocidas como la zona de construcción de la torta, la zona del filtrado y la zona de remoción.

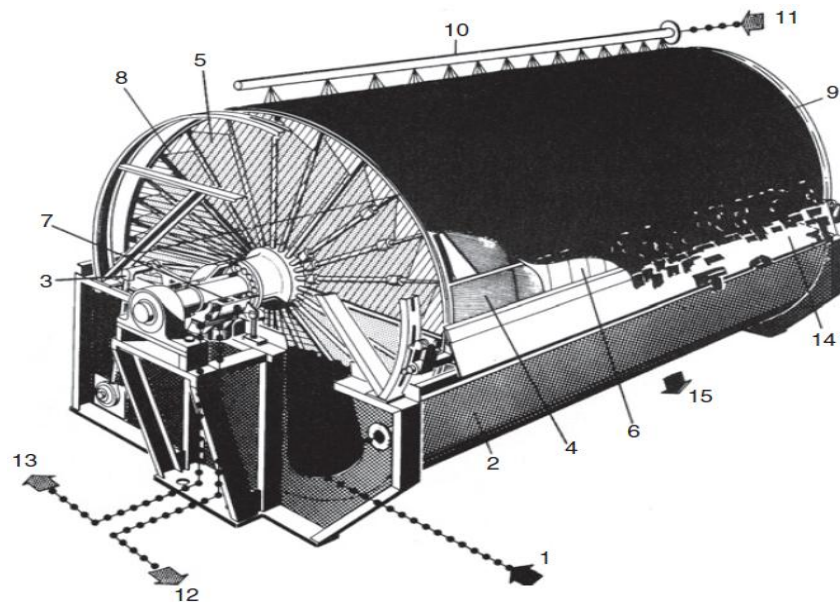
Las dos primeras zonas se hacen bajo vacío, por lo que el agua es succionada a través de la tela filtrante y las partículas sólidas forman una torta. En la tercera zona se libera el vacío y chorros de aire comprimido se usan para remover la torta también se usa para limpiar la tela filtrante.

El tambor gira de 10 a 60 revoluciones por hora y el vacío está entre 400 a 160 torr, el cual se consigue con una bomba de sello líquido que está conectada a las celdas del tambor vía cabezal de control y tubería de filtrado. Ésta succiona el líquido a través de la tela y los sólidos contenidos en la suspensión son

depositados en una capa uniforme sobre la tela en la parte del tambor que está sumergido en el lecho de la suspensión. A continuación se presenta uno de estos filtros.

El cabezal de control divide el filtro del tambor en las diferentes secciones para el filtrado, el lavado, la succión y la descarga de la torta, tal que en el curso de una revolución cada zona del tambor pasa a través de estas zonas en forma sucesiva. El filtrado se escapa a través del separador y es descargado ya sea por bombeo o por la utilización de la presión atmosférica. La capa de sólido filtrado emerge de la suspensión cuando el tambor gira, y después de emerger se lava; es drenada por succión y descargada de la tela. El líquido de lavado se riega sobre la torta ya sea por dispositivos de lavado, como presas o boquillas de aspersión o de una banda de lavado que está encima de la torta (Tarleton & Wakeman, 2007), (Rowe, 1987).

Figura 14. Esquema general de un filtro rotatorio de vacío



- | | | |
|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1) suspensión | 6) tela filtrante | 11) fluido lavado |
| 2) canal de filtración | 7) cabezal de control | 12) filtrado madre |
| 3) péndulo agitador | 8) tubería filtrados | 13) lavado de filtrado |
| 4) celdas filtración | 9) torta filtrada | 14) dispositivo descarga |

5) tambor;

10) dispositivo lavado

15) sólidos

Fuente: (Sutherland K. , 2008)

Variables objetivo y valores típicos de desempeño

Tabla 3. Resumen del desempeño del proceso de filtro rotario de vacío

| | Entrada de Lodos ^a | Torta Filtrada ^d | Rendimiento ^{a c} | Vacío en Tanque ^c | Costos ^e |
|---------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Agua | 34 % | 60- 70 % | (2 – 4.5) gph/ft ² | 4 cfm/ ft ² | 18 Kw / Dia |
| Aceite | 57 % | | | | |
| Sólidos | >4 % - 15% ^b | >30% | | | |

Fuente: a) (Tarleton & Wakeman, 2007), b) (Rowe, 1987), c) (Sutherland K. , 2008), d) (Weber, 2003), e) (Ahmad Ali, 2012)

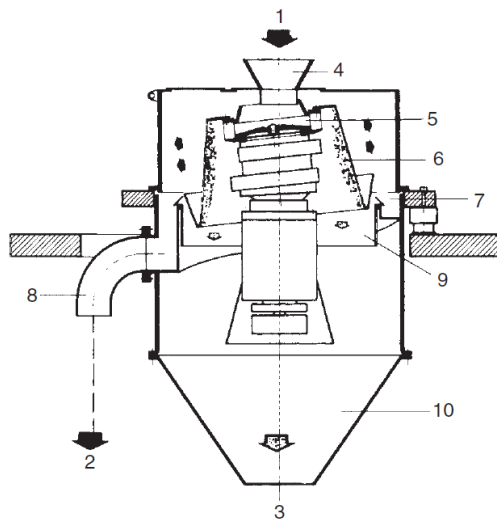
Principales proveedores

- AJM Filtration (<http://www.polyfilters.com>)
- Komline – Sanderson (<http://www.komline.com>)
- TECCNIPLANT (<http://www.tecniplant.it>)

5.2.1.4. Filtro centrífugo: Estos filtros usan las fuerzas centrífugas para producir filtración de tortas en cochadas o continua, sobre superficies semi permeables de forma cilíndrica o cónica. Las operaciones de lavado se pueden ajustar por más centrifugados en procura de mejorar la eficiencia de la filtración de la torta. Varias máquinas son capaces de operar en ambas orientaciones, horizontalmente o verticalmente, mientras que otras tienen un único sentido de deslizamiento y unas características específicas de transporte de la torta (Tarleton & Wakeman, 2007). Existen varios tipos de centrifugadoras a continuación se presentan la operación de los más relevantes:

Canasta: Se usa normalmente para separar sólidos de fases líquidas; estas máquinas centrífugas son esencialmente operadas por cochadas y comprenden una canasta montada vertical u horizontal con un extremo cerrado y otro parcialmente abierto. La canasta, la cual es perforada y cubierta por una combinación de lámina metálica y paño filtrante; es puesta a girar para obtener caudales de sólidos hasta de 15 (t/h). La fuerza centrífuga inducida permite al concentrado pasar a través del paño mientras las partículas se acumulan en forma de una torta filtrada.

Figura 15. Esquema general de un filtro centrífugo de canasta vertical



1. alimentación
2. filtrado
3. sólidos
4. embudo
5. acelerador
6. canasta forrada
7. canal filtrado
8. conexión filtrado
9. plataforma de goma
10. hogar de sólidos

Fuente: (Sutherland K. , 2008)

Las variantes del filtro de canasta pueden ser de eje vertical u horizontal; estos últimos pueden alcanzar un mayor caudal de tratamiento.

Cono: Los filtros centrífugos de cono comprenden una lámina de metal perforada a través de la cual los sólidos húmedos se deslizan después de la filtración de una alimentación de relativa alta concentración. Durante su paso los sólidos en forma de torta, pueden ser lavados por un spray y drenados antes de descargarlos en el extremo más ancho del cono. Las cuatro variantes del filtro centrífugo de cono

difieren principalmente en la manera en la cual los sólidos son trasladados a través de la lámina:

Descarga deslizamiento/ángulo de cono amplio; en estas máquinas de ejes verticales u horizontales, la torta es impulsada a moverse por cono con un ángulo de medio vértice que excede el ángulo de fricción entre la torta y la lámina. El ángulo del cono es crítico para el correcto funcionamiento y está en el intervalo entre 25 y 35 grados, aunque la lubricación proporcionada por el líquido en la torta puede ayudar en el proceso de traslación. Mientras un buen filtrado es logrado cuando se tiene una fuerza centrífuga de 2900 G, el rápido tránsito de sólidos a través del centrífugo significa que hay un tiempo límite disponible para lavar la superficie del cono. La descarga por deslizamiento es la mejor opción para el procesamiento de sólidos granulares y de rápida filtración.

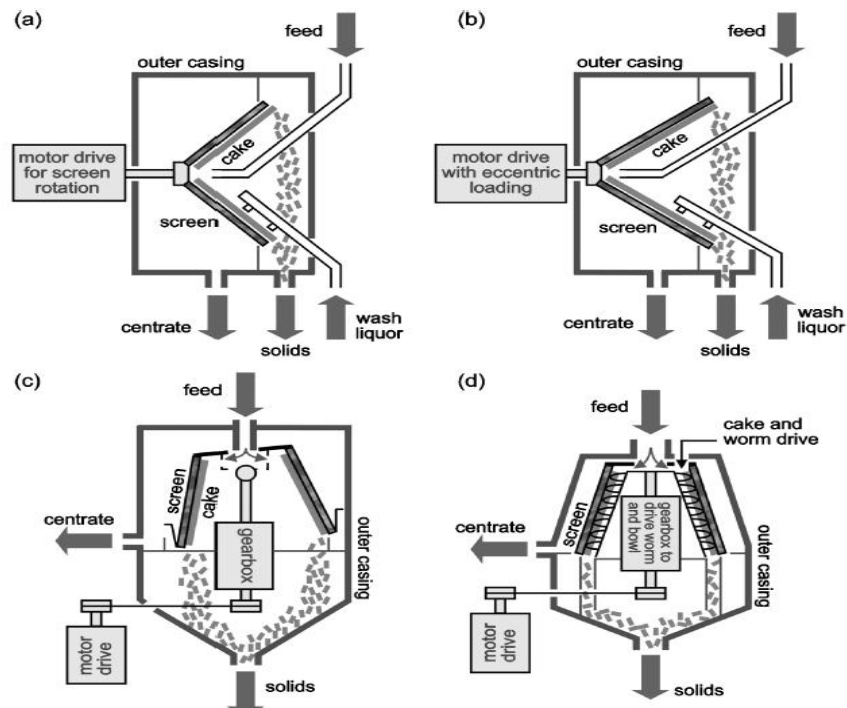
Vibratorio/oscilatorio; estos centrífugos trabajan con un principio similar al de descarga por deslizamiento, sin embargo, la adición de una unidad vibratoria excéntrica facilita el uso de un cono con un ángulo menor que el ángulo de fricción entre la torta y la lámina. Ángulos de cono de 13 a 18 grados son comunes y vibraciones de 1700 rpm inducen una fluidización parcial de la torta la cual mejora su traslado a través de la lámina para obtener muy altos caudales hasta 350 t/h. Como la fuerza centrífuga que se genera es baja (típicamente bajo 120 G) el deshidratado y la claridad del concentrado pueden ser pobres y esto puede reflejarse en la baja calidad de productos sólidos y líquidos.

Rebote: Un movimiento giratorio del tazón laminado alrededor de un eje vertical causa la inclinación de las paredes del cono para alterar el ángulo de fricción entre la torta y la lámina. El tamboreo del cono induce movimientos intermitentes en la torta y caudales de hasta 120 t/h. A pesar de fuerzas centrífugas relativamente modestas, el filtrado puede ser muy bueno. Sin embargo, el tamborileo centrífugo

es usualmente usado solo cuando no se requiere lavado y están presentes en la alimentación sólidos más gruesos y de rápida filtración.

Laminas Gusanos: También conocido como descarga en banda o centrifuga de lámina rodante. La lámina de gusano causa que los sólidos se muevan a lo largo del cono por medio de una banda interna, la cual rota en un diferencial de velocidad. La banda gira en una velocidad diferente a la lámina del cono y las fuerzas centrífugas debajo de los 2600 G facilitan razonablemente los caudales. La presencia de una banda transportadora a veces puede conllevar la rotura de ambos cristales y problemas de abrasión, así como a un lavado relativamente pobre. Allí hay un equilibrio entre caudal y humedad de la torta final, esto es dictado por la velocidad de la banda transportadora, los tiempos de residencia típicos de la torta en la lámina están entre los 4 y 15 segundos (Sparks, 2012) (Tarleton & Wakeman, 2007).

Figura 16. Esquema general de un filtro de cono



Fuente: (Tarleton & Wakeman, 2007)

Variables objetivo y valores típicos de desempeño

Los filtros centrífugos son usados principalmente para la separación de los sólidos de una fase líquida, las paredes de la canasta centrífuga son porosas y los líquidos a través de las tortas depositadas son removidos. Las partículas sólidas son finas, las tortas producidas son más secas (Towler & Sinnott, 2013).

Tabla 4. Resumen del desempeño de los procesos de filtración centrífuga

| Tipo de Filtro | Concentración Sólidos (%) ^b | Fuerza Centrífuga (g) ^a | Max Caudal Sólidos (ton/h) ^a | Costos ^c |
|------------------------|--|------------------------------------|---|--------------------------|
| Canasta pelador | 4-30 | 800 -2200 | 15 | US\$34 to 40 per dry ton |
| Canasta Péndulo | 4-30 | 200 - 1200 | 12 | |
| Cono Deslizamiento | 10 – 40 | 2900 | <150 | |
| Vibratorio Oscilatorio | 10 – 40 | 30-150 | 350 | |
| Cono Rebote | 10 – 40 | 50 - 300 | 120 | |
| Lámina Gusano | 10 – 40 | 500 - 2600 | <150 | |

Fuente: a) (Tarleton & Wakeman, 2007), b) (Towler & Sinnott, 2013), c) (Chen, Yue, & Mujumdar, Sludge dewatering and drying, 2002)

Efectividad del Proceso: La capacidad de la filtración centrífuga depende mucho de la concentración de sólidos en los lodos, por ejemplo con una concentración de sólidos en los lodos del 10%, 9 kg de líquido serán filtrados por cada 1 kg de sólidos separados, mientras que con una concentración de 50 % la cantidad de filtrado será menor de 1 kg (Towler & Sinnott, 2013).

Principales proveedores

- Centrisys Centrifuge Systems (<http://centrisys.us/>) (LePree, 2012)
- ANDRITZ GROUP (<http://www.andritz.com/>) (LePree, 2012)
- Heinkel Drying and Separation Group (<http://www.heinkelusa.com/>) (LePree, 2012)

- GEA Westfalia Separator Group (<http://www.westfalia-separator.com>) (LePree, 2012)

5.2.1.5. Separación por centrifugación: El principio de una centrífuga o decantador centrifugó es usar la fuerza para acelerar la separación de sólidos y líquidos. De manera general, puede asumirse que una centrifugadora es un decantador cónico cilíndrico que gira horizontalmente sobre su eje con un desborde de agua clarificada; el lodo filtrado es removido por un tornillo de Arquímedes. La rotación aplica una fuerza centrífuga sobre las partículas sólidas que se mueven mucho más rápido. En la práctica, el lodo floculado es inyectado dentro de la taza centrífuga a través de un tubo de inyección. La taza tiene una alta velocidad de rotación (3500 rpm) y las partículas son aplastadas contra los lados de la taza en la zona de clarificación. Las partículas son entonces empujadas por el tornillo de Arquímedes hacia el extremo del cono de la taza en la zona de centrifugado de lodos. El líquido clarificado es evacuado en el otro extremo de la tasa por sobre flujo o desbordamiento, (SNF FLOERGER, 2003).

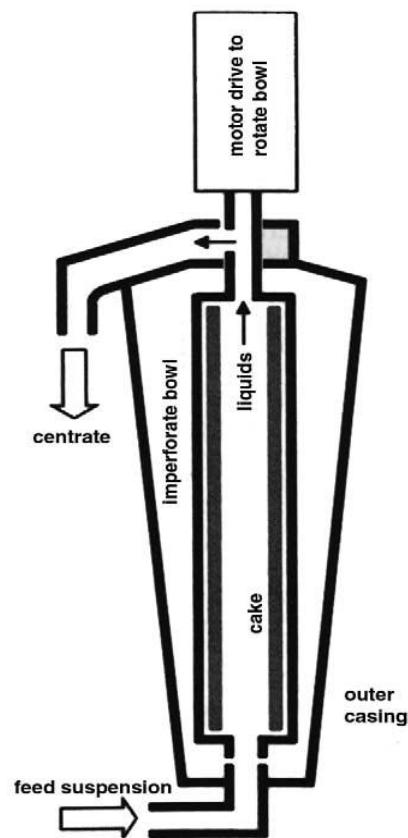
Hay cuatro principales tipos de centrifugación (Towler & Sinnott, 2013):

Tazón tubular: de alta velocidad y eje vertical, usados para separación de líquidos no miscibles, tales como agua y aceite en la separación de sólidos finos el tazón es accionado a una velocidad de 15000 rpm y la fuerza centrífuga generada excede los 130000 N. En la Figura 17 se presenta esquema general de esta centrífuga.

Tazón de disco: Las centrífugas de este tipo separan el flujo líquido en capas muy finas, lo que aumenta considerablemente la eficiencia; se utilizan para separar líquidos y sólidos finos, y para clasificación de sólidos. En la Figura 18 se presenta un esquema de esta centrífuga.

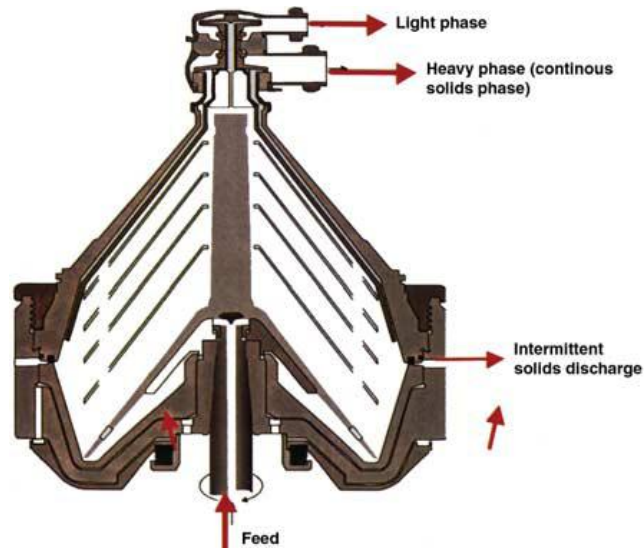
Descarga de rodillo: En este tipo de máquina, los sólidos depositados en la pared del recipiente se eliminan mediante un desplazamiento de un transportador de tornillo helicoidal, que gira a una velocidad ligeramente diferente del tazón. El rodillo de descarga puede ser diseñado para que los sólidos puedan ser lavados y los sólidos relativamente secos puedan ser descargados. En la Figura 19 se presenta un esquema de esta centrifuga.

Figura 17. Esquema general de una centrifugadora de tazón tubular



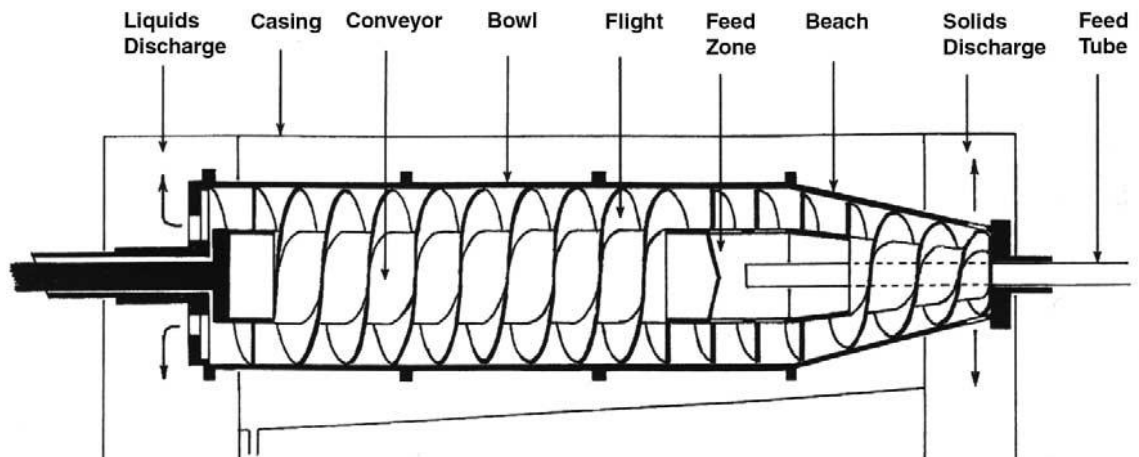
Fuente: (Sutherland K. , 2005)

Figura 18. Esquema general de una centrifugadora de tazón de discos



Fuente: (Sutherland K. , 2005)

Figura 19. Esquema general de un sistema de centrifugación con descarga de rodillo



Fuente: (Sutherland K. , 2005)

Tazón sólido por cochadas: Es más sencillo; parecido al tazón tubular pero con un tamaño de tazón más pequeño en relación al diámetro 0,75 (Towler & Sinnott, 2013).

Variables Objetivo y Valores Típicos

Los centrífugos son usados principalmente para separación de líquidos no miscibles (agua, aceite) sin embargo han sido rápida y ampliamente adaptados para la separación de sólidos. El tubular es raramente usado para concentración de sólidos sobre el 1% por volumen. Para concentraciones entre 1 y 15% en volumen de sólidos cualquiera de los otros tres puede ser usado. (Towler & Sinnott, 2013)

Tabla 5. Resumen del desempeño de los proceso de centrifugación

| Tipo centrífugo | Entrada permisible ^a | Eficiencia ^c | Reducción de Metales | Productos Sólidos Agua y Aceite ^c | Costos ^d |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------|---|--|---------------------|
| Tubular | <1% S, 70 – 30% L | 90 % | >60%, Na, Ca, Fe, Zn, Al > 7% V y Ni | Agua 97% (1% Sólidos y 2% Aceite) Aceite 87 % (8% Sólidos y 5% Agua) Sólidos 89.5% (7% Aceite y 3.5% Agua) | \$(82 - 114) €/ton |
| Disco | 1-15% S 55 – 30% L | 45 % | | | |
| Rodillo | 1-15% S 55 – 30% L | 60 % | | | |
| Cochadas | 1-15% S 55 – 30% L | 45 % | | | |

Fuente: a) (Towler & Sinnott, 2013), b) (Abbasa, Maqsood, & Alib, 2010), c) (Flottweg Separation Industry, 2009), d) (Jonassen, Michel Crine, & Stenström, 2008)

Principales Proveedores

- Alfa Laval (<http://www.alfalaval.com/>) (Abbasa, Maqsood, & Alib, 2010)
- Western State Machines CO (<http://www.westernstates.com/>)
- Celeros INC (<http://celerosinc.com>) (Solid-liquid separation showcase: From self-cleaning filters to automatic-discharge centrifuges, 2006)
- WestFalia (<http://www.westfalia-separator.com/home.html>)

5.2.2. Extracción con solvente. La extracción con solventes es una técnica de tratamiento que consiste en usar un líquido capaz de disolver otra sustancia para separar o retirar contaminantes orgánicos peligrosos de lodos residuales, sedimentos o tierra. La extracción con solventes no destruye los contaminantes,

sino que los concentra para que sea más fácil reciclarlos o destruirlos con otra técnica.

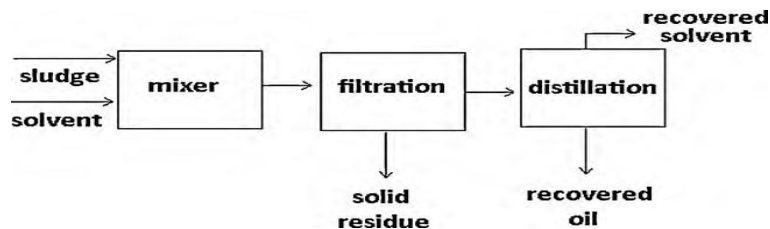
Las ventajas del proceso son, que hay un alto nivel de aceite recuperado, el cual se puede integrar en las operaciones de refinería; y por otra parte, hay una sustancial reducción de constituyentes peligrosos en los productos sólidos.

El proceso puede emplear un solvente no polar, polar, altamente polar. Alrededor de los 4 a 10 °C de temperatura el aceite y el agua se disuelve en el solvente para formar un líquido monofásico de cual los sólidos son fácilmente separados. Cuando esta única fase líquida es calentada de 50 a 60°C la separación de fase de los dos líquidos ocurre, una de aceite, y solvente y otra con agua y algo de solvente diluido. Los pasos básicos en el proceso son (Rowe, 1987):

- a) Extracción de aceite y agua de sólidos aproximadamente a 10 °C.
- b) Secado de los sólidos para reciclar el solvente residual.
- c) Calentamiento del líquido efluente monofásico a cerca de 60 °C para lograr la separación en dos fases líquidas.
- d) Destilación del agua decantada para remover el solvente a fin de reciclarlo.
- e) Destilación de la mezcla solvente/aceite decantada para recuperar los solventes para reciclo.

A continuación se presenta un diagrama de bloques del proceso.

Figura 20. Diagrama del proceso de Extracción con Solvente



Fuente: (Zubaidy & Abouelnasr, 2010)

Variables Objetivo y Valores Típicos

La extracción con solvente se usa específicamente para extraer y lograr recuperar la mayor cantidad de aceite posible de lodos aceitosos, de preferencia pre-tratados en procesos mecánicos, además de remover los metales pesados presentes en los lodos.

Tabla 6. Resumen del Desempeño de la Extracción con Solvente

| Parámetro | Entrada permisible en peso | Productos en peso ^b | Condiciones óptimas de operación ^c | Costos ^d |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------------|
| Aceite | >20% ^(a) | 64.23% | 17,20 M P a 35 C | De (117 a 194) US\$ / Ton |
| Agua | >3.2 % - 18.91% ^(b) | 28.13% | | |
| Sólidos | 7.85% ^(b) | 7.64% | | |

Fuente: a) (Rowe, 1987), b) (Taiwo & Otolurin, 2009), c) (Ávila-Chávez, Rincón, Reza, & Trejo, 2007), d) (Trowbridge & Holcombe, 2012)

Principales Proveedores

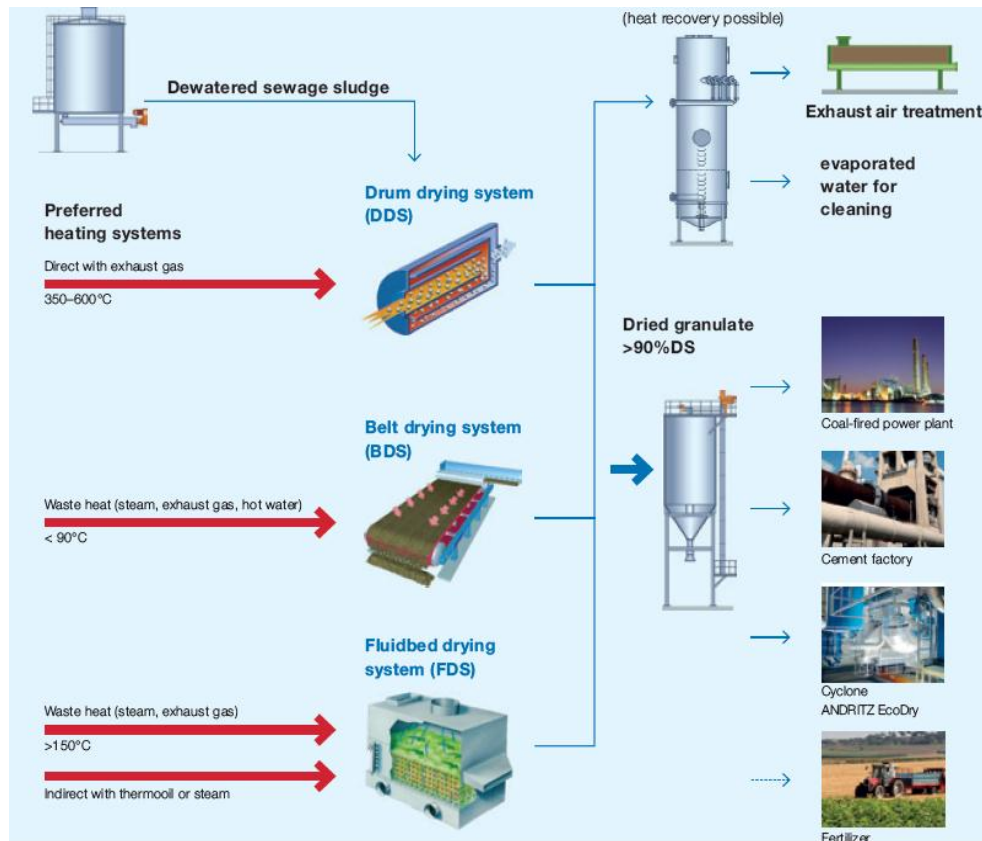
- Kumar Metal Industries (<http://www.kumarmetal.com>)
- Zhengzhou DingSheng manufacturing Co (<http://zhengzhou-ingsheng.en.ywsp.com>)

5.2.3. Tratamientos térmicos. Los tratamientos térmicos para residuos de refinerías de petróleo están encaminados principalmente a remover agua y orgánicos volátiles de las mezclas de agua, aceite y sólidos, valiéndose del calentamiento de los mismos y provocando su evaporación. Existen variedad de equipos para tratamiento de lodos mediante procesos térmicos pero principalmente se componen de los conocidos como secadores.

5.2.3.1. Proceso térmico: Algunos de los equipos secadores más utilizados son descritos a continuación (Couper, Penney, Fair, & Walas, 2012), en la Figura 21 se presenta la generalidad de los procesos térmicos.

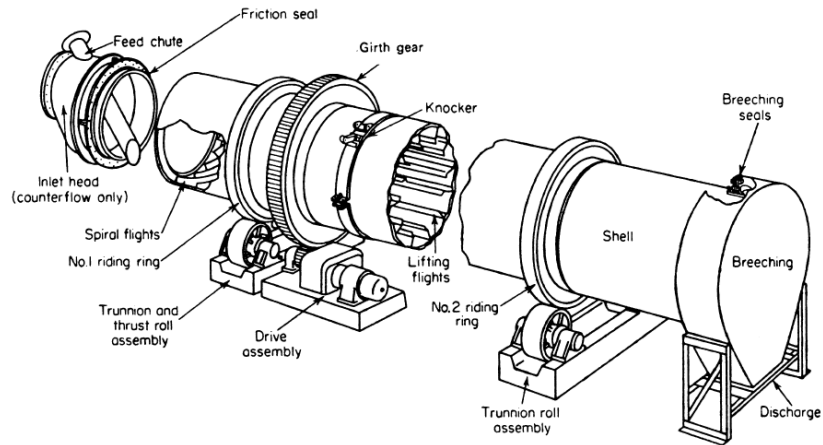
Secadores de Cilindro rotatorio: Son típicamente usados para libre flujo granular de materiales que requieren menos de una hora de secado. Materiales que tienden a aglomerarse por la humedad pueden ser acondicionados mezclándolos con productos secos reciclados. Este equipo se compone de una carcasa cilíndrica en el que el material húmedo se carga en un extremo y el material seco sale del otro; el secado es mejorado por contacto con gases calientes en flujo paralelo o contracorriente, o con transferencia de calor mediante tubos calientes o doble carcasa (Couper, Penney, Fair, & Walas, 2012).

Figura 21. Esquema general del proceso de tratamiento térmico



Fuente: (Andritz, 2012)

Figura 22. Esquema general de un secador rotatorio



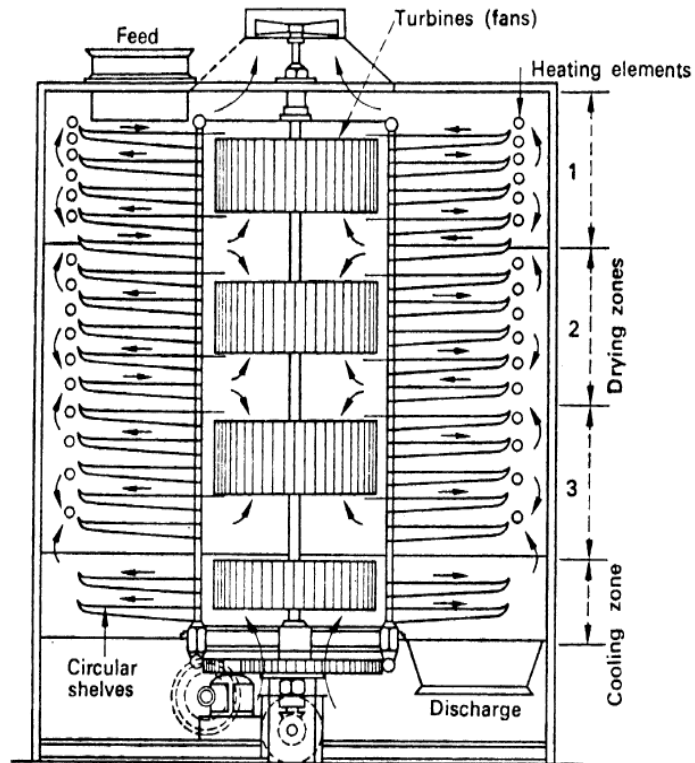
Fuente: (Couper, Penney, Fair, & Walas, 2012)

Como se ve en el esquema un secador de bandas de la Figura 24, este se compone de una zona húmeda donde el aire fluye hacia arriba, mientras que en el secador y en las zonas de enfriamiento es hacia abajo con el fin de minimizar las emisiones de material particulado. (Couper, Penney, Fair, & Walas, 2012)

Secador de Tornillo: El proceso consiste en un tornillo sin fin que está dentro de un canal revestido. El flujo de transferencia de calor circula a través de las aletas del tornillo, el eje del tornillo y el canal revestido. El tornillo además de proveer la transferencia de calor mueve el lodo a través del procesador y proporciona un buen contacto entre el lodo y la superficie de la transferencia de calor.

La unidad puede incluir barras que trituren para mejorar el mezclado y minimizar la suciedad del tornillo y la superficie. El resto del sistema consta de un condensador de agua refrigerante y de un tanque condensador / decantador.

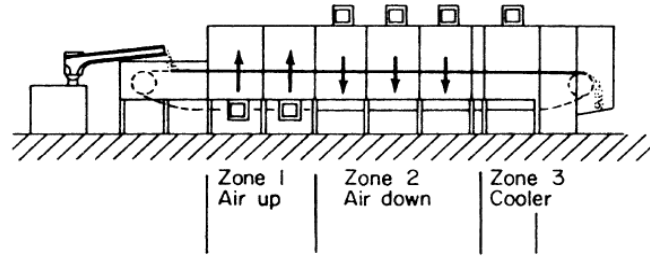
Figura 23. Esquema general de un secador de tornillo



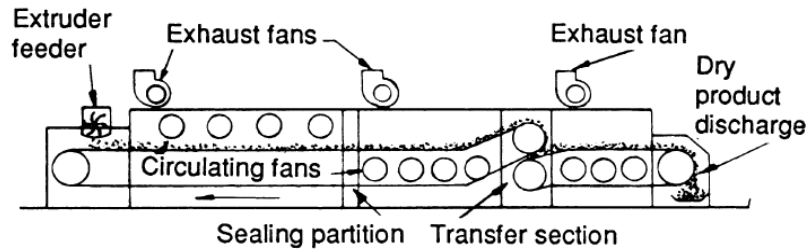
Fuente: (Couper, Penney, Fair, & Walas, 2012)

Secador de Bandas: Pueden ser de dos tipos, con bandas sólidas y flujo de aire a través de la parte superior del lecho, llamado secado por convección; o con bandas perforadas a través de las cuales circula el aire. Estos son aplicados principalmente a pastas y polvos finos. Las bandas están hechas una manta de cota de malla o con manta de metal con perforaciones de 2 mm. El vapor de agua es el medio de transferencia más común y usado, sin embargo también se puede usar gases de combustión.

Figura 24. Esquema general de un secador de bandas



(d)



Fuente: (Couper, Penney, Fair, & Walas, 2012)

Variables Objetivo y Valores Típicos

Los procesos térmicos de tratamientos de lodos son principalmente usados después de una filtración mecánica de los lodos, para remover agua y compuestos orgánicos volátiles (Rowe, 1987).

Tabla 7. Resumen del desempeño de los procesos de tratamiento térmico

| Secador | Entrada Permissible ^a | Eficiencia Térmica ^a | Reducción Compuestos Volátiles Orgánicos ^b | Productos ^b | Costos ^e |
|-----------|----------------------------------|---------------------------------|---|------------------------|-------------------------------|
| Tornillo | 6% -35% | 73% ^c | >98% ^c | 60 a 85 % sólidos | Varía entre (100 y 300)\$/ton |
| Bandas | >30% | 66% | >96% | | |
| Rotatorio | > 50 % sólidos ^d | 65% | 97% | 95% ^b | |

Fuente: a) (Couper, Penney, Fair, & Walas, 2012), b) (Andritz, 2012), c) (Rowe, 1987), c) (Waje, Thorat, & Mujumdar, 2006), d) (Chen, Yue, & Mujumdar, Sludge dewatering and drying, 2002), e) (Abrishamian, 1991)

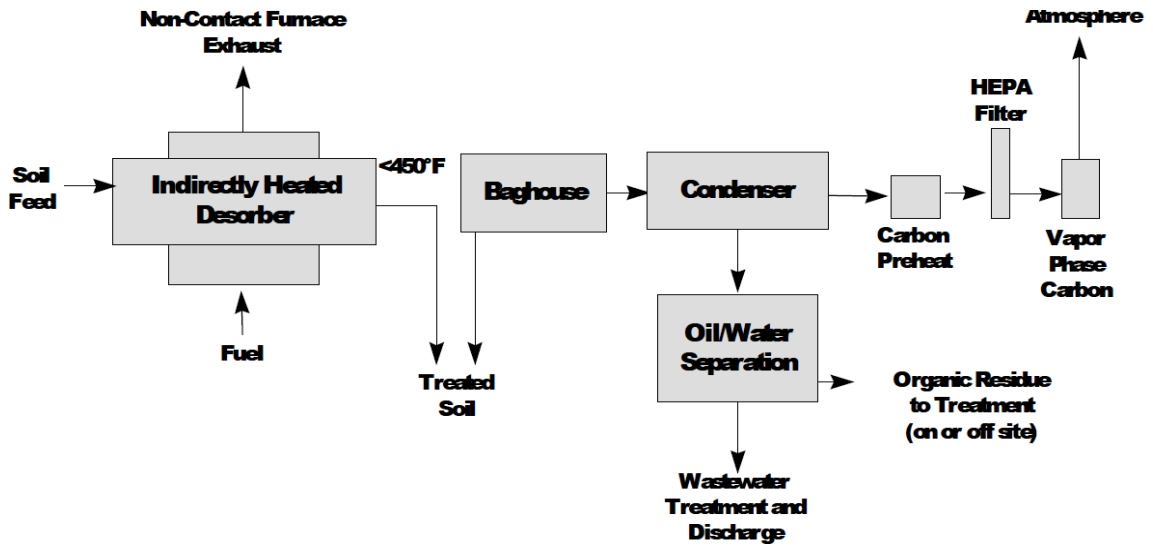
Principales Proveedores

- ANDRITZ (<http://www.andritz.com/>).
- Vander Broek (<http://www.vadebspain.com>)
- SIEMENS Water Technologies (<http://www.water.siemens.com/en/products/>)

5.2.3.2. Desorción térmica: La desorción térmica elimina las sustancias químicas dañinas del suelo y otros materiales, como lodo y sedimentos, utilizando calor para transformar dichas sustancias químicas en gases. Esos gases se recolectan empleando un equipo especial. El polvo y las sustancias químicas dañinas se separan de los gases y se eliminan con seguridad y el sedimento limpio se regresa al sitio. En la desorción térmica no hay destrucción de sustancias químicas, como si ocurre en la incineración. En la siguiente figura se presenta un esquema general de este proceso.

La desorción térmica emplea un equipo denominado desorbedor para limpiar los lodos contaminados. Ese equipo funciona como un horno grande. Cuando los lodos se calientan lo suficiente, las sustancias químicas dañinas se evaporan. Durante cada paso del proceso, los trabajadores emplean equipamiento especial para controlar el polvo del suelo y recolectar los gases dañinos que se liberan al aire. Los gases contaminados se separan del aire limpio utilizando un equipo de recolección de gases. Los gases se convierten nuevamente en líquidos y/o materiales sólidos. Esos líquidos o sólidos contaminados se eliminan de manera segura EPA (2001) (1997)

Figura 25. Esquema general del proceso de desorción térmica



Fuente: (Naval facilities engineering service center, 2008)

Variables Objetivo y Valores Típicos

Los procesos de desorción térmica se usan comúnmente para separar los compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles de residuos sólidos, los que se calientan hasta que se desprenden en forma de gases sin llegar a destruirlos (United States Environmental Protection Agency (EPA), 1997).

Tabla 8. Resumen del desempeño del proceso de desorción térmico

| Contenido Humedad ^a | Contenido Aceite ^c | Eficiencia ^b | Temperatura ^d | Productos Sólidos ^c | Costos ^b |
|---|--|--|--|---|---|
| Típicamente lodos de 15% Entre 20 y 25 % es permisible pero inviable económicamente. | Por Cuestiones de seguridad el contenido de aceite debe ser no mayor a 25% | Puede alcanzar una efectividad del 99%, De los metales solo el mercurio puede tratarse con este tratamiento. | Entre 100 y 300 C Dependiend o de los compuestos. | 5% agua, 27% Minerales y 60% Materia Orgánica. | Pueden variar de (50 a 300) US\$/Ton de estos entre unos 35 US\$ son de costos operativos directos. |

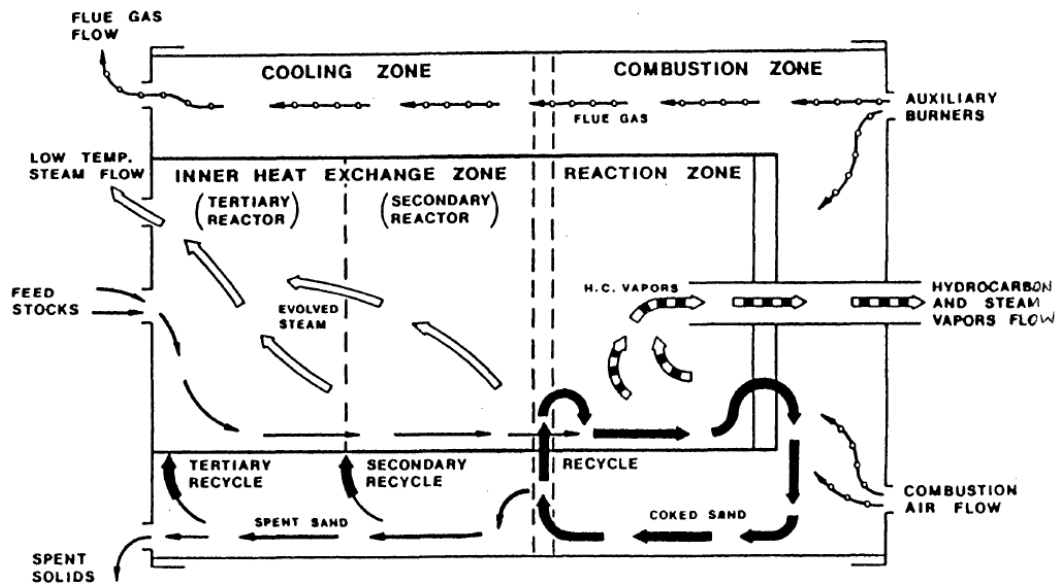
Fuente: a) (United States Environmental Protection Agency (EPA), 1997), b) (Khan, Husain, & Hejazi, 2004),c) (Naval facilities engineering service center, 2008), d) (Troxler, Cudahy, Zink, Yezzi, & Rosenthal, 1993)

Principales Proveedores

- ECOIMSA (<http://www.tradebe.com>)
- MARKES (<http://www.markes.com>)
- Midwestoil (<http://www.midwestoil.com>)

5.2.3.3. Pirólisis: El proceso de pirólisis es una mezcla de tratamiento térmico (para evaporar agua y compuestos orgánicos volátiles), seguido por rompimiento térmico de los aceites más pesados, junto con la formación de coque y finalmente la combustión de este último, que proporciona calor al proceso y maximiza la reducción de material orgánico peligroso. Como se indica con los análisis de TCLP y concentración de constituyentes de los productos sólidos, casi todos los materiales orgánicos se reducen a las cantidades mínimas detectables. Se ilustra el proceso de pirólisis en la siguiente figura.

Figura 26. Esquema general del proceso de Pirólisis



Fuente: (Rowe, 1987)

La pirólisis se puede hacer con un recipiente rotatorio conocido como procesador rotatorio el cual admite alimentación sólida o líquida y opera de la siguiente forma:

La alimentación entra por el centro en la sección interior del procesador y es precalentada por intercambio de calor con la combustión de sólidos en la corona circular del tambor. La mayoría de los contenidos de agua y orgánicos ligeros son evaporados en esta zona de intercambio.

En la siguiente zona de reacción la temperatura de alimentación es elevada por transferencia indirecta de calor y el contacto directo con la combustión de los sólidos reciclados, los aceites ligeros se vaporizan y los más pesados son térmicamente quebrados, formándose coque con sólidos inertes. Los hidrocarburos vaporizados, el agua restante en forma de vapor y los gases formados durante el rompimiento, fluyen de la zona de reacción a la de condensación y el gas limpia el sistema externo del procesador. El coquizado inerte fluye en el anillo exterior del procesador donde el coque es quemado para proveer de calor al proceso y maximizar la remoción y destrucción de residuos. Parte de los sólidos son reciclados dentro de la zona de reacción para ser fuente de calor directa. El resto de los sólidos continúa a través de la zona de enfriamiento transfiriendo calor a la alimentación fresca. (Rowe, 1987).

Variables Objetivo y Valores Típicos

El objeto de la pirólisis es separar en las fases agua y aceite de un sólido, mediante la evaporación y posterior condensación, y de esta forma poder recuperar compuestos hidrocarbonados mediante la diferencia de densidad entre el agua y el aceite. (Silva, y otros, 2012)

Tabla 9. Resumen del desempeño del proceso de Pirólisis

| Entradas Permisibles | Temperaturas Típicas | Productos recuperados | Eficiencia proceso |
|--|---|---|--|
| 20 – 25% Agua 30 – 35 % Aceite 40 – 60 % Sólidos | Entre 106 - 540 °C , teniendo en cuenta que 60 - 70% de los aceites tienen punto ebullición a 295 C ⁽⁴⁰⁾ | 7,1% Aceite 68,7% Coque 11,7% Gas 11,7% Agua | >85% de Eficiencia en Disposición de Residuos > 98% En reducción de material orgánico. |

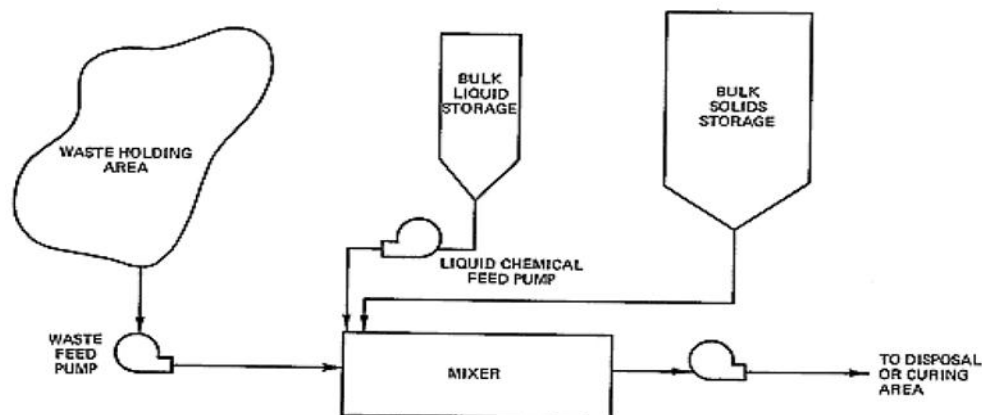
Fuente: (Rowe, 1987), (Silva, y otros, 2012) , (Schmidt & Kaminsky, 2001), (Shie, Lin, Chang, Shih, Lee, & Wu, 2004)

Principales Proveedores

- NAKIN (<http://www.nkoilpurifier.com>)
- Advance plasma power (<http://www.advancedplasmawater.com>)
- Newgens (<http://www.newgens.ch>)
- PYTEC (<http://www.pytecsite.de>)

5.2.4. Fijación (encapsulamiento). La estabilización solidificación (S/S) es una técnica ampliamente usada y bien establecida para la inmovilización de componentes inorgánicos peligrosos. A continuación se presenta una generalización de este proceso.

Figura 27. Diagrama de estabilización solidificación



Fuente: (Cullinane, Jones, Malone, Spooner, & Bliss, 1986)

El uso de la fijación a base de cemento arcilla o sílice puede restringir la movilización de especies inorgánicas, sin embargo se sabe que la fijación de desechos con carga orgánica a menudo produce materiales con pobres características de resistencia.

Este proceso no está encaminado a remover el material peligroso, no recupera el aceite que pueda ser reciclado y no disminuye el volumen del residuo a eliminar. Por el contrario la fijación cambia las características físicas y a veces químicas de los residuos para reducir su lixiviación, el volumen y el peso del material que requiere ser eliminado incrementa de 10 a 100%.

El primer paso en la estabilización, es la adición de un químico patentado para dispersar y micro encapsular los hidrocarburos en el lodo. Los compuestos orgánicos son rodeados y atrapados por el agente químico. El segundo paso involucra la adición de material cementoso para fijar y solidificar completamente los residuos. Las cenizas funcionan mejor con residuos de refinerías de petróleo. La masa endurecida resultante puede alcanzar alta resistencia a la compresión de 1000 a 5000 psi y puede tener permeabilidades de 10^{-2} a 10^{-9} cm /s. este proceso puede aplicarse en un rango de temperatura de -30 a 93 °C.

Variables Objetivo y Valores Típicos

La estabilización/solidificación convierte los contaminantes riesgosos en una forma menos soluble, menos tóxica y los inmoviliza, para luego encapsularlos en un sólido monolítico de alta estructura. Produce mejores resultados en los compuestos inorgánicos.

Tabla 10. Resumen del desempeño del proceso estabilización/solidificación

| Entrada Permisible ^{a,d} | Lixiviación de Volátiles Orgánicos ^c | Lixiviación de FENOLES ^c | Lixiviación de Metales ^c | Requerimientos de la base para la Solidificación (Kg / L de lodo) ^c | Costos ^b |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|---|--|-------------------------------|
| Aceite de 5 a 15%, Recomendado 5% | En porcentaje reducción >99%, mejores resultados usando base de cemento. | Reducción de lixiviación en > 98%, | Reducción de entre 12 – 45%, no funciona muy bien con compuestos inorgánicos. | Cemento Portland 0,96 | Aproximadamente USD \$110/Ton |
| Sólidos Totales de 60% a 70% | | | | Ceniza volátil 0,96 | |
| Humedad de 30 a 40% | | | | Cal comercial 0,84 | |

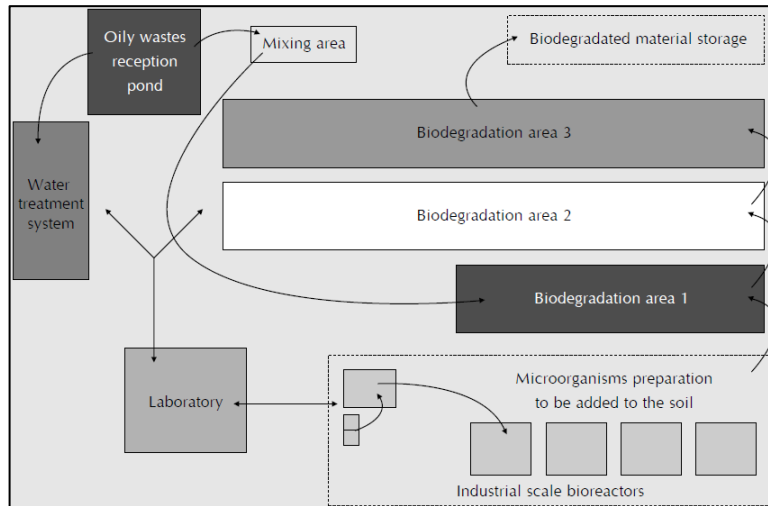
Fuente: **a)** (Rowe, 1987), **b)** (Khan, Husain, & Hejazi, 2004), **c)** (Karamalidis & Voudrias, Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: Leaching behavior of alkanes and PAHs, 2007), **d)** (Karamalidis & Voudrias, 2004)

Principales Proveedores

- CHEMFIX Technologies <http://www.chemfix.co.uk/>
- Cleaning Service Group <http://www.csg.co.uk/>
- NCM Group <http://www.ncmgroup.com>

5.2.5. Tratamientos biológicos. Los tratamientos biológicos de lodos aceitosos son aquellos en los que se usa la biodegradación de materia orgánica para eliminar contaminantes mediante el uso de microorganismos en unas condiciones de temperatura y presión determinadas. La vista general de una instalación para procesamiento biológico de residuos aceitosos en una refinería se presenta a continuación.

Figura 28. Disposición en planta de una instalación para Biotratamiento en Refinería



Fuente: (Echeverría, Monsalve, & Vidas, 2002)

Principalmente se usan dos tipos de tratamiento biológicos:

Anaerobio (ausencia de oxígeno): Es la destrucción por vía biológica de contaminantes usando bacterias que funcionan en estas condiciones. Este proceso produce gas metano el cual puede ser usado como fuente energética, por lo cual puede hacer de la digestión anaerobia un proceso económicamente más atractivo que el aerobio. Cuanto mayor es la planta de tratamiento, mayor es el incentivo económico para el uso de digestión anaerobia. Sin embargo, la digestión anaerobia es considerablemente más difícil de manejar que la digestión aeróbica. Por lo tanto, la decisión de usar la digestión anaeróbica debe evaluar cuidadosamente la capacidad operativa de la instalación. (Guyer, 2011).

Aerobio: Es considerado como uno de los métodos más efectivos de tratamiento, el cual está orientado a reducir las altas cantidades de contaminantes presentes en los lodos a niveles aceptables, en un tiempo razonable y a bajo costo. El proceso aerobio más usado son las Biopilas donde los lodos son sometidos a

calor y centrifugación, para separarlas en sus fases: acuosa y aceitosa, y la fase sólida la cual va al biotratamiento.

Variables Objetivo y Valores Típicos

El tratamiento biológico se lleva a cabo mayoritariamente después de haber sometidos a los lodos crudos a varios tratamientos de separación, mecánica y térmica y se enfoca principalmente en reducir los contaminantes de los residuos sólidos.

Tabla 11. Valores Típicos Biotratamiento de Lodos

| Entradas Permisibles ^a | Temperaturas Típicas ^b | Reducción de TPH % ^c | Productos ^d | Costos ^a |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| Agua (30-50 %) | 25 – 30 C | Entre 50 – 75% | Sólidos (43 – 70%) Aceite (50 %) | El costo del tratamiento es cercano a US\$15/ Metro ³ |
| Sólidos (30 - 40%) | | | | |
| Aceite (15 - 40%) | | | | |

Fuente: a) (Echeverria, Monsalve, & Vidaes, 2002), b) (Mountourisa, y otros, 2011), c) (Kriipsalu, Marques, Nammari, & Hogland, 2007), d) (Guyer, 2011)

Principales Proveedores

- Intergeo <http://www.intergeo.com>
- TRADEBE <http://www.tradeberrefineryservices.com>
- BEFESA <http://www.befesa-gri.com>

5.2.6. Tecnologías experimentales

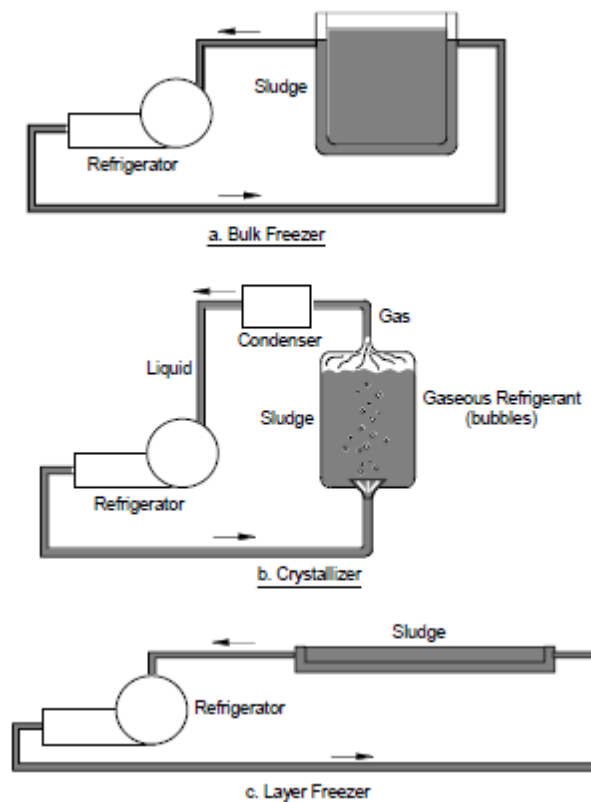
5.2.6.1. Congelamiento y descongelamiento: El congelamiento/descongelamiento es un método de desemulsificación para lodos aceitosos que se usa principalmente en regiones frías aprovechando las bajas temperaturas; ha sido registrado como un efectivo y viable método, aplicado para romper las emulsiones agua/aceite con gotas menos compactas que son

producidas a partir del aceite. La expansión en volumen del agua al convertirse en hielo y la tensión interfacial de agua-aceite, son factores determinantes para la desemulsificación.

Según la ingeniería los métodos de C/D (congelamiento/descongelamiento) pueden ser dos: Directos e Indirectos; el sistema de congelación directa aporta un medio de refrigeración en contacto directo con el área máxima de la superficie de la muestra, las barreras de la transferencia de calor se reducen al máximo, tanto gases como líquidos refrigerantes pueden ser usados para este método.

El segundo método utiliza una superficie de transferencia de calor entre el lodo y el refrigerante, la muestra se separa del refrigerante por medio de alguna barrera.

Figura 29. Sistemas de congelamiento



Fuente (Franceschini, 2010)

A continuación se muestran varias tecnologías de uso para congelamiento directo así como para congelamiento Indirecto:

a) Congelador en volumen: es un mecanismo de congelamiento indirecto en el que el lodo es bombeado a un tanque, un refrigerante es puesto a circular dentro las paredes del tanque, enfriando su superficie y congelando el lodo. El descongelamiento es realizado en el mismo tanque el agua descongelada y el lodo acondicionado son separados, cuando el tanque es vaciado un nuevo ciclo puede comenzar. El principal riesgo de estos procesos es la falla de las paredes de los tanques debido a los esfuerzos cíclicos de expansión del hielo.

b) Cristalizador: usa una técnica de contacto directo en el acondicionamiento del lodo; un refrigerante gaseoso como el butano es inyectado dentro de los lodos agitados que contiene el tanque. La suspensión de cristales de hielo y sólidos se separa.

c) Congelamiento de capa: Es un tipo de congelamiento indirecto, al igual que el congelador en volumen, pero en este se usa una placa refrigerada en lugar de tanque evitando así el quiebre de la pared. El congelador en capa es más eficiente pero es necesaria una gran superficie.

Variables Objetivo y Valores Típicos

El método de congelamiento/descongelamiento está orientado principalmente a separar aceite de las emulsiones que las contienen.

Tabla 12 Valores típicos Congelamiento Descongelamiento

| Entradas Permisibles ^a | Temperaturas Típicas ^c | Recuperación de aceite ^a | Remoción de Agua ^c | DQO en Agua separada ^c | Costos Aproximados ^d |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Agua 38–70 % | Congelamiento -40 C Descongelamiento 20 C | 65,7% | 90% | 10000 a 15000 mg/L | US D \$11,10 / Ton |
| Aceite ^b 22–60% | | | | | |
| Sólidos ^a 7–15% | | | | | |

Fuente: a) (Zhang, Li, Thring, Hu, & Song, 2012), b) (Franceschini, 2010), c) (Chen & He, 2003), d) (Martel, Affleck, & Yushak, 1996)

Principales Proveedores

- FriGeo <http://www.frigeo.se>

5.3. CONTEXTO DE LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA GESTION AMBIENTAL DE RESIDUOS

La generación de materiales de desecho, aunque indeseable, es una realidad de la cual se deben tener claras las consecuencias y métodos de resolución. Los Sistemas de Gestión Ambiental (por sus siglas en inglés EMS), en general, se sustentan en las etapas del ciclo mejoramiento continuo: planear, hacer, verificar y revisar (Cheremisinoff, 2006). Mediante instrumentos como políticas, planes, procedimientos, indicadores y revisiones sucesivas del desempeño, entre otros, las organizaciones implementan el EMS dentro de sus actividades.

Es así como, el desarrollo de la gestión de recursos en general en las compañías está guiado por algún esquema de toma de decisión.

No obstante, en algunas organizaciones las decisiones en asuntos ambientales se realizan de manera diferente a las que se acometen para el resto de las decisiones

(Cheremisinoff, 2006), como consecuencia los resultados de los procesos de definición de la gestión de recursos ambientales arrojan un cumplimiento del ahorro de costos, pero no son confiables a largo plazo para la reducción de impacto ambiental.

Cheremisinoff (2006) menciona cuatro (4) categorías de costos en las cuales deben ser reconocidos los costos de los proyectos, estas se presentan en la Tabla 13.

En detalle, los análisis de los costos generalmente se centran en las categorías 1 y 2, y por ende llevan a soluciones de control de contaminación basado en tecnologías; sin embargo al integrar las categorías 3 y 4, se tienen en cuenta el riesgo y las alternativas tienen a ser de prevención de la contaminación. Ahora bien, utilizando metodologías como el análisis de costo del ciclo de vida se pueden integrar las diferentes categorías de costos a lo largo de la vida del proyecto, incorporando el valor del dinero en el tiempo y por ende generar decisiones más integrales.

5.4. MÉTODO DELPHI PARA CONSULTA A EXPERTOS

“El método Delphi es básicamente un proceso de grupo muy estructurado a través del cual expertos evalúan cuestiones sobre las que el conocimiento es incierto e imperfecto por naturaleza.” (Bogner, Littig, & Menz, 2009). Lo “incierto” e “imperfecto” del conocimiento hace referencia a la complejidad del problema (Linstone & Turoff, 1975). De manera simplificada, el método comprende en unificar la opinión de un conjunto de expertos en la especialidad a tratar, los cuales deben ser previamente seleccionados basados en su conocimiento y/o experticia.

Tabla 13. Categorización de diferentes costos de un proyecto de inversión

| Categoría | Componente del costo |
|--|--|
| 1. Gastos habituales o normales. | Mano de obra directa Las materias primas y energía Bienes de equipo Preparación del terreno Conexiones "Tie-ins" Capacitación de los empleados Permisos |
| 2. Costos ocultos o indirectos. | Monitoreo Honorarios de permisos Transformación ambiental Evaluaciones de impacto ambiental Evaluaciones de salud y seguridad Los acuerdos de servicio Legal Instrumentación de control Mantenimiento y reemplazo Presentación de informes y mantenimiento de registros |
| 3. Costos futuros por responsabilidad. | Acciones correctivas Lesiones personales Riesgos para la salud y el daño al público Más estrictos requisitos de cumplimiento Inflación |
| 4. Costos menos tangibles. | Respuesta de clientes y pérdida de confianza de los inversores Relaciones con los empleados Establecer y ampliar las líneas de crédito Los valores de propiedad Las primas de seguros Frecuentes inspecciones ambientales y sanciones Influencia en la negociación con los reguladores ambientales |

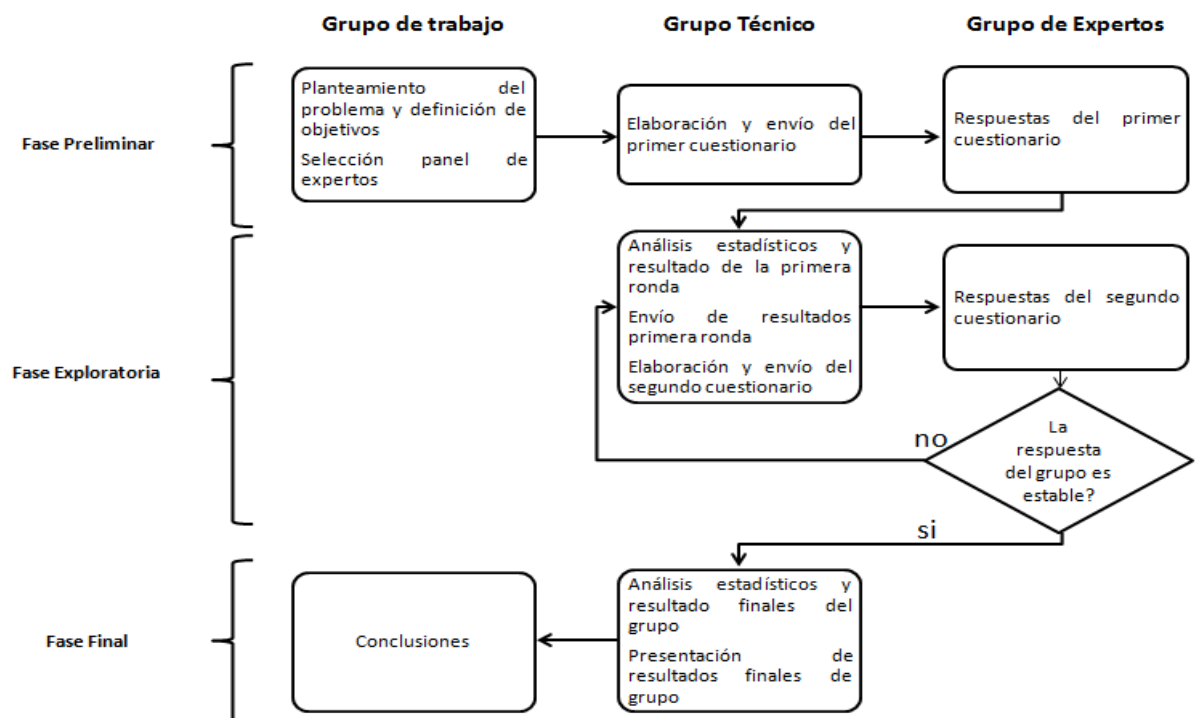
Fuente: (Cheremisinoff, 2006)

El cuestionario realizado por el equipo técnico es enviado a los expertos para su respuesta. En la evaluación de las respuestas el equipo técnico debe analizar y evaluar las convergencias y divergencias entre los participantes. En la siguiente ronda de cuestionario se deben hacer preguntas que disminuyan las divergencias

de las respuestas. Cada ronda y cuestionario debe responderse de manera anónima entre los expertos, donde solo el grupo técnico conoce las opiniones. Los tipos de preguntas pueden ser: abierta, ordenamientos, selecciones de puntuación, etc. Se debe elaborar un informe, el cual debe tener un análisis estadístico de las respuestas posterior a cada ronda. El informe se debe enviar a todos los expertos, así mismo se envía el cuestionario de la siguiente ronda. El objetivo de esta fase es que cada experto revise sus planteamientos frente a los otros participantes, teniendo en cuenta la nueva información.

La cantidad de circulaciones de cuestionarios depende del grado de convergencia de las respuestas, si las respuestas son estables se puede considerar el final del ejercicio, de manera normal se requieren dos (2) rondas. En la siguiente figura se muestra un diagrama del método Delphi.

Figura 30. Diagrama de método Delphi



Fuente: modificado por el autor con base en (Cruz Ramirez, 2009), (Blanco Mira, Lopez Padrón, & Mengual Andrés, 2010) y (Duque, Marmolejo, & Rueda de Torres, 2004)

6. DISEÑO Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ESPECÍFICA PARA LA CONSULTA A EXPERTOS EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS

6.1. GRUPO DE EXPERTOS

El grupo de expertos para el desarrollo de la metodología Delphi se resume en el siguiente cuadro:

Tabla 14. Datos de los Expertos que participaron en esta investigación

| Nombre del Experto | Compañía en la que labora actualmente | País, estado donde desarrolla actualmente sus actividades profesionales | Tiempo de experiencia específica aproximado en años |
|----------------------------------|--|---|---|
| Alejandra Sofía Ramirez Tavelli | Trihydro Corporation | Estados Unidos (Cheyenne, Wyoming) | 19 |
| Nubia Esperanza Ramirez Pabon | Ecopetrol S.A - ICP | Colombia | 23 |
| Martha Yolanda Herrera Zapata | Ecopetrol S.A - ICP | Colombia | 15 |
| Victor Julio Echeverria Restrepo | Ecopetrol S.A - ICP | Colombia | 23 |
| Mauricio Cardeñosa Mendoza | Ecopetrol S.A - ICP | Colombia | 23 |
| Ramón Cardona | Environmental Resources Management (ERM) Puerto Rico Inc | Puerto Rico | 19 |

Fuente: Expertos

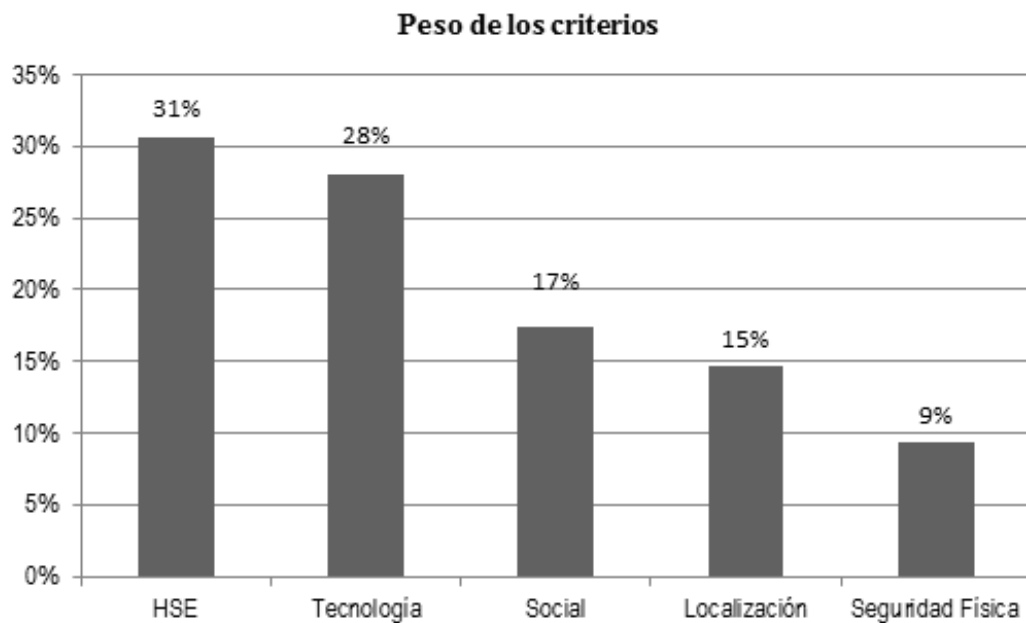
6.2. DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS

Haciendo uso de la metodología Delphi, se llegó al consenso de los expertos consultados respecto a la importancia de los criterios para ser tenidos en una

evaluación de los esquemas de contratación de servicios ambientales. Los resultados se graficaron en la Figura 31 fueron.

En consecuencia para el desarrollo de la estructura del modelo Jerárquico los criterios tenidos en cuenta fueron en primer lugar el HSE referido a través del Impacto Ambiental. En segundo lugar como riesgo se verificó la importancia de la Disponibilidad de la Tecnología en el Mercado Nacional.

Figura 31. Importancia de los criterios para la selección de alternativas según los expertos



Fuente: consulta a expertos

6.3. PRESELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Basado en Rowe (1987) e incorporando los procesos de tratamiento investigados se plantearon preliminarmente diecinueve (19) secuencias de los procesos que resuelven el problema de tratamiento de los lodos aceitosos de la Refinería de

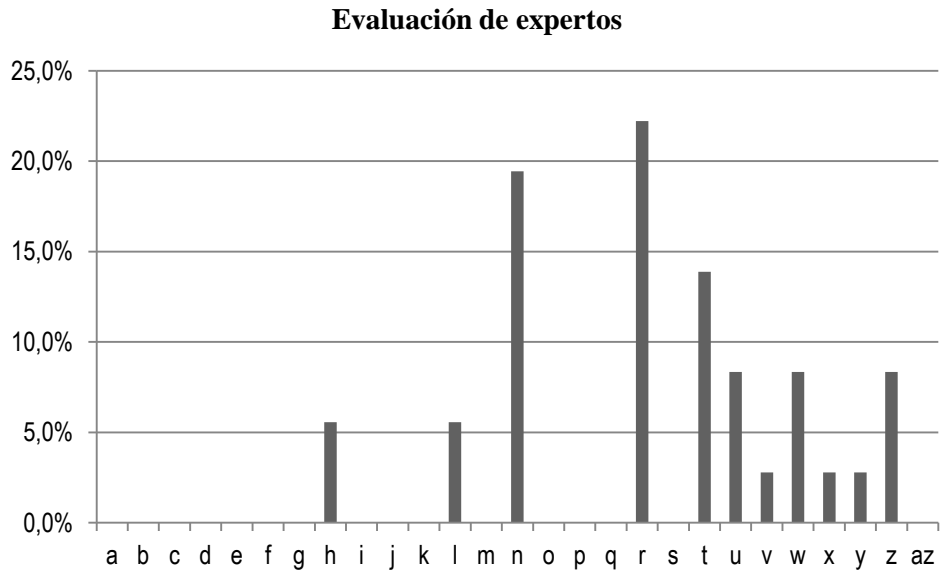
Barrancabermeja. En el desarrollo de las consultas a expertos las secuencias aumentaron a veinticinco (25). Como resultados de la circulación de la encuestas se presenta la lista final de los procesos seleccionados como alternativas viables por los expertos y los porcentajes de las rondas C1 y C2.

Tabla 15. Procesos y secuencias de proceso para el tratamiento de lodos aceitosos

| Procesos de tratamiento | | Código | Secuencia de Alternativas | | | | C1 | C2 |
|--------------------------|----------------------------------|--------|---------------------------|----|---|---|-------|-------|
| Tratamiento mecánicos | Filtros de correas o bandas | 1A | | | | | 0,0% | 0,0% |
| | Filtros de placas | 1B | | | | | 6,7% | 0,0% |
| | Filtro tambor rotatorio de vacío | 1C | | | | | 0,0% | 0,0% |
| | Filtro centrífugo | 1D | | | | | 0,0% | 0,0% |
| | Separación por centrifugación | 1E | | | | | 6,7% | 0,0% |
| Tratamientos térmicos | Proceso térmico de secado | 2A | | | | | 3,3% | 0,0% |
| | Desorción térmica | 2B | | | | | 2,2% | 0,0% |
| | Pirólisis | 2C | | | | | 6,7% | 5,6% |
| | Incineración | 2D | | | | | 2,2% | 0,0% |
| Extracción con solventes | | 3 | | | | | 1,1% | 0,0% |
| Fijación | | 4 | | | | | 2,2% | 0,0% |
| Tratamientos biológicos | | 5 | | | | | 3,3% | 5,6% |
| Relleno de seguridad | | 6 | | | | | 0,0% | 0,0% |
| Coprocesamiento | | 7 | | | | | 13,3% | 19,4% |
| | | | 1 | 2B | 6 | | 4,4% | 0,0% |
| | | | 1 | 2B | 4 | 6 | 4,4% | 0,0% |
| | | | 1 | 2C | 6 | | 4,4% | 0,0% |
| | | | 1 | 2C | 4 | 6 | 0,0% | 0,0% |
| | | | 1 | 2D | 6 | | 8,9% | 22,2% |
| | | | 1 | 2D | 4 | 6 | 0,0% | 0,0% |
| | | | 1 | 2B | 5 | | 5,6% | 13,9% |
| | | | 1 | 3 | 2 | 7 | 5,6% | 8,3% |
| | | | 1 | 3 | 2 | 6 | 4,4% | 2,8% |
| | | | 1 | 2B | 7 | | 4,4% | 8,3% |
| | | | 1 | 3 | 6 | | 3,3% | 2,8% |
| | | | 1 | 4 | 5 | | 1,1% | 2,8% |
| | | | 5 | 6 | | | 4,4% | 8,3% |
| | | | 2C | 5 | 6 | | 5,6% | 0,0% |

Fuente: Rowe (1987), expertos y autor

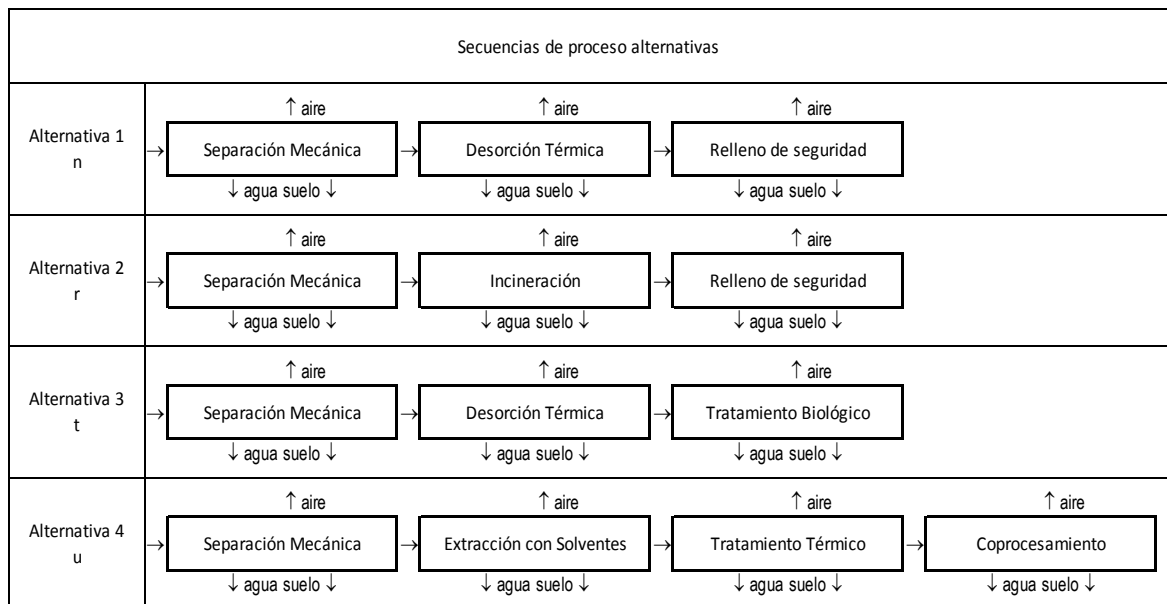
Figura 32. Proceso de pre-selección por parte de los expertos



Fuente: expertos

En conclusión las secuencias procesos de tratamiento de lodos aceitosos pre-seleccionados por los expertos son:

Figura 33. Secuencias de proceso seleccionadas por los expertos



7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La implementación de la técnica de consulta a expertos redujo el grupo inicial de veintisiete (27) secuencias de proceso posibles técnicamente viables para realizar el tratamiento a siete (6) secuencias.

Lo anterior representa una reducción del 78%.

8. CONCLUSIONES

En el mercado están disponibles múltiples opciones de tratamiento de los lodos aceitosos, sin embargo al realizar la consulta a expertos varias alternativas fueron desechadas.

De lo anterior se deriva que el desarrollo y ejecución de una metodología para involucrar los criterios de expertos en la ejecución de un proceso de toma de decisión aporta gran cantidad de elementos valiosos, especialmente en la identificación de riesgos derivados de la experiencia y conocimiento de los expertos.

Por consiguiente, al usar la metodología de preselección de alternativas disminuye la incertidumbre por el uso de paquetes tecnológicos, los cuales, potencialmente, no lleguen a lograr los resultados esperados por el usuario del proceso.

En conjunción con lo anterior, es importante que el experto tenga el conocimiento y esté en la disposición de aportar a la resolución del problema; por otra parte el equipo técnico de las consultas a expertos debe asegurar el consenso sobre las respuestas de los expertos, de lo contrario, si el experto no ve un reflejo de sus opiniones pierde el interés de participar juiciosamente.

Los juicios de los expertos llevaron a la selección de alternativas muy competitivas entre sí, lo que denota el grado de conocimiento respecto al problema.

9. RECOMENDACIONES

Esta metodología utilizada en fases tempranas previene la escogencia de alternativas que tengan asociados grandes barreras para la implementación en fases finales o baja efectividad cuando la alternativa ya esté implementada.

Para mejorar la toma de decisión se pueden incorporar otros criterios que los expertos puedan valorar a partir de sus conocimientos tácitos.

Por otra parte, como un paso posterior se debe identificar y evaluar otros criterios que sean de carácter explícito, como el impacto ambiental, los riesgos de mercado y los costos.

Para posteriores trabajos, se sugiere realizar la caracterización de otros criterios se puede hacer tan compleja como se desee, sin embargo las dimensiones escogidas deben permitir diferenciar las alternativas, ya sea de manera cuantitativa o cualitativa. Por tanto, se resalta la gran importancia de utilización de una metodología que permite lograr valorar en una misma función tanto los atributos cualitativos de los riesgos, como los atributos monetarios, como el costo.

Para este caso de estudio fueron excluidas las aplicaciones innovadoras, dando prioridad a las tecnologías maduras; sin embargo es importante identificar si los expertos estarían dispuestos a considerar el riesgo de la madurez de la tecnología como un criterio de riesgo en la toma de decisión.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbasa, S., Maqsood, Z. T., & Alib, M. F. (2010). The Demetallization of Residual Fuel Oil and Petroleum Residue. *Petroleum Science and Technology*, 28(17), 1770-1777.
- Abrishamian, R. (1991). THERMAL TREATMENT OF OILY SOILS AND SLUDGES. *Incinerable Hazardous Waste Minimization* (págs. 163-171). Berkeley, CA: RETEC.
- Adams, Jr., C. E. (1982). The economic of handling refinery. *Environment International*, 293-303, 293-303,.
- Ahmad Ali, S. (2012). Design and evaluate a drum screen filter driven by undershot waterwheel for. *Aquacultural Engineering*.
- American Petroleum Institute (API). (2010). *Reclaimed Petroleum Hydrocarbons: Residual Hydrocarbon Waste from Petroleum Refineries*. Washington: American Petroleum Institute (API).
- Andritz. (2012). *Drying technologies for sewage sludge*. Graz: Andritz.
- Ávila-Chávez, M. A., Rincón, R. E., Reza, J., & Trejo, A. (2007). Extraction of Hydrocarbons from Crude Oil. *Separation Science and Technology*, 42:10, 2327-2345.
- Blanco Mira, J. E., Lopez Padrón, A., & Mengual Andrés, S. (2010). Validación mediante método Delphi de un cuestionario para conocer las experiencias e

interés hacia actividades acuáticas con especial atención al Windsurf. *Ágora para la Educación Física y el Deporte*, 75-96.

- Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (2009). *Interviewing Experts*. Hampshire, Inglaterra: Palgrave Macmillan.
- Castillo Hernández, M. (2006). *Toma de decisiones en las empresas: entre el arte y la técnica*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Chen, G., & He, G. (2003). Separation of water and oil from water-in-oil emulsion by freeze/thaw method. *Separation and Purification Technology*, 83-89.
- Chen, G., Yue, P. L., & Mujumdar, A. S. (2002). Sludge dewatering and drying. *Drying Technology: An International Journal*, 20(4-5), 883-916.
- Cheremisinoff, N. P. (2006). *Environmental Management Systems Handbook for refineries. Pollution prevention through ISO 14001*. Houston, Texas, USA: Gulf Publishing Company,.
- Couper, J. R., Penney, W. R., Fair, J. R., & Walas, S. M. (2012). *Chemical Process Equipment. Selection and Design*. Elsevier.
- Cruz Ramirez, M. (2009). *El método Delphi en las investigaciones educacionales*. La Habana, Cuba: Academia.
- Cullinane, M. J., Jones, L. W., Malone, P. G., Spooner, P. A., & Bliss, T. M. (1986). *Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste*. Cincinnati: United State Environmental Protection Agency.

- Duque, C., Marmolejo, E. F., & Rueda de Torres, M. T. (2004). Análisis de prospectiva de la Generación Distribuida (GD) en el sector eléctrico colombiano. *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes*, 19, 81-89.
- Echeverria, V., Monsalve, G., & Vidades, H. (2002). CONTINUOUS TREATMENT OF OILY SLUDGE AT COLOMBIAN REFINERIES. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 61-70.
- ECOPETROL S.A. (2011). Documento Soporte de Decisión (ECP-DPY-F-001). Bogotá: ECOPETROL S.A.
- Flottweg Separation Industry. (2009). DECANTERS y TRICANTERS® FLOTTWEG. Recuperado el 28 de 01 de 2013, de FLOTTWEG: <http://www.flottweg.de>
- Franceschini, O. (2010). Dewatering of sludge by freezing. Luleå University of Technology, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, 1-147.
- Guyer, J. P. (2011). *An Introduction to Sludge Handling, Treatment and Disposal*. New York: CEDengineering.com.
- Jonassen, O., Michel Crine, A. L., & Stenström, S. (2008). Drying and dewatering of sludge. *Energy Efficient Drying and Dewatering Technologies* (pág. Summary). International Energy Agency IEA.
- Karamalidis, A. K., & Voudrias, E. A. (2004). Application of Stabilization/Solidification Technology on Oil Refinery Sludge Contaminated by Heavy Metals. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 39(4), 961-971.

- Karamalidis, A. K., & Voudrias, E. A. (2007). Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: Leaching behavior of alkanes and PAHs. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1-2), 122–135.
- Khan, F. I., Husain, T., & Hejazi, R. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, 71(2), 95–122.
- Kriipsalu, M., Marques, M., Nammari, D., & Hogland, W. (2007). Bio-treatment of oily sludge: The contribution of amendment material to the content of target contaminants, and the biodegradation dynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 616–622.
- LePree, J. (2012). Say Good-Bye to Old-School Centrifuges "LePree J" 2012. *Chemical Engineering*, 119(1), 19-22.
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The Delphi Method. Techniques and applications*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Martel, C. J., Affleck, R. T., & Yushak, M. L. (1996). A Device for Mechanical Freeze–Thaw Conditioning of Alum Sludge. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory CRREL*, 1-13.
- Mountourisa, A., Leventos, D., Papadimos, D., Antotsios, C., Papadopoulos, S., Vatsaris, C., y otros. (2011). Biotreatment of oil refinery sludge. *Desalination and Water Treatment*, 194-201.
- Naval facilities engineering service center. (4 de 2008). TR-2090-ENV. Recuperado el 19 de 1 de 2013, de Application guide for desorption systems: <http://www.clu->

in.org/download/contaminantfocus/dnapi/Treatment_Technologies/NFESC-TR-2090-ENV.pdf

- Onay, T. T., & Gonenç, I. E. (1998). An application of sludge conditioning and dewatering technique. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 33(3), 461-476.
- Pusey Mitchell, A. D. (2013). *Diseño de una estrategia de decisión para la gestión de los activos de automatización y control en la Gerencia Refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A.* Bogotá: Universidad de los Andes.
- Rowe, G. (1987). *Evaluation of Treatment Technologies for Listed Petroleum Refinery Waste.* American Petroleum Institute (API).
- Schmidt, H., & Kaminsky, W. (2001). Pyrolysis of oil sludge in a fluidised bed reactor. *Chemosphere*, 45(3), Pages 285–290.
- Schultz, T. E. (2006). Improve oily wastewater treatment Innovative methods meet challenges to pretreat and dispose of process wastewater properly. *Hydrocarbon Processing*, 85(11), 103-112.
- SERFILCO. (2002). www.serfilco.com. Recuperado el 28 de Enero de 2013, de <http://www.serfilco.com/pdfs/bulletins/CAT-01.pdf>
- Shie, J.-L., Lin, J.-P., Chang, C.-Y., Shih, S.-M., Lee, D.-J., & Wu, C.-H. (2004). Pyrolysis of oil sludge with additives of catalytic solid wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 695–707.
- Silva, R. V., Romeiro, G. A., Veloso, M. C., Figueiredo, M. K.-K., Pinto, P. A., Ferreira, A. F., y otros. (2012). Fractions composition study of the pyrolysis oil

obtained from sewage sludge treatment plant. *Bioresource Technology*, 103(1), 459–465.

- SNF FLOERGER. (2003). SNF Group. Recuperado el 10 de 02 de 2013, de http://www.snf-group.com/IMG/pdf/Water_Treatment_3_E.pdf
- Solid-liquid separation showcase: From self-cleaning filters to automatic-discharge centrifuges. (2006). *CHEMICAL ENGINEERING*, 113(9), 31-36.
- Sparks, T. (2012). *Solid-Liquid Filtration - A Users' Guide to Minimizing Costs and Environmental Impact; Maximizing Quality and Productivity*. Elsevier Ltd.
- Stickland, A. D., de Kretser, R. G., Scales, P. J., Usher, S. P., Hillis, P., & Tillotson, M. R. (2006). Numerical modelling of fixed-cavity plate-and-frame filtration: Formulation, validation and optimisation. *Chemical Engineering Science*, 61, 3818 – 3829.
- Sutherland, K. (2005). Centrifuge focus: solids removal the options. *Filtration Separation*, 42(6), 16-20.
- Sutherland, K. (2008). *Filters and Filtration Handbook*. Elsevier.
- Taiwo, E. A., & Otolurin, J. A. (2009). Oil Recovery from Petroleum Sludge by Solvent. *Petroleum Science and Technology*, 27:8, 836-844.
- Tarleton, E. S., & Wakeman, R. J. (2007). *Solid/Liquid Separation. Equipment Selection and Process Design*. Elsevier.
- Tordo, S., Tracy, B. S., & Arfaa, N. (2011). *National Oil Companies and Value Creation*. Washington DC: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.

- Towler, G., & Sinnott, R. (2013). Chemical Engineering Design. Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design (Second Edition). El.
- Trowbridge, T., & Holcombe, T. (2012). Refinery Sludge Treatment/Hazardous Waste. Journal of the Air & Waste Management Association, 782-788.
- Troxler, W. L., Cudahy, J. J., Zink, R. P., Yezzi, J. J., & Rosenthal, S. I. (1993). Treatment of nonhazardous petroleum-contaminated soils by thermal desorption technologies. Journal of the Air & Waste Management Association, 43(11), 1512-1525.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2000). Biosolids Technology Fact Sheet. Belt Filter Press. United States Environmental Protection Agency (EPA), Office of Water. Washington, D.C: United States Environmental Protection Agency (EPA).
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (Diciembre de 2001). EPA 542-F-01-003S. Recuperado el 19 de 2 de 2013, de Guía del Ciudadano para la Desorción Térmica: <http://www.epa.gov/superfund/action/spanish/pdfs/td-sp12-6-1.pdf>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (Enero de 1997). EPA 540-F-95-031. Recuperado el 19 de 2 de 2013, de Engineering Forum Issue Paper: Thermal Desorption Implementation Issues: <http://www.cluin.org/download/remed/tdissue.pdf>
- Waje, S. S., Thorat, B. N., & Mujumdar, A. S. (2006). An Experimental Study of the Thermal Performance of a Screw Conveyor Dryer. Drying Technology: An International Journal, 24(3), 293-301.

- Weber, J. W. (2003). Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos. Barcelona: Editorial Reverté, S. A.
- Zhang, J., Li, J., Thring, R., Hu, X., & Song, X. (2012). Oil recovery from refinery oily sludge via ultrasound and freeze/thaw. *Journal of Hazardous Materials*, 195– 203.
- Zubaidy, E. A., & Abouelnasr, D. M. (2010). Fuel recovery from waste oily sludge using solvent. *Process Safety and Environmental Protection*, 318–326.