

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Estudio de prefactibilidad técnico-económica del acoplamiento de tecnologías electroquímicas al tren de tratamiento de aguas de producción provenientes del recobro químico

Orlando Stick Melgarejo Martinez

Cristian Giovanny Rueda Sarmiento

Trabajo Presentado Como Requisito Para Optar El Título De Ingeniero Químico

Director

Maria Ines Jaramillo Gutierrez
Doctora en ingeniería química

Codirector

Julio Andres Pedraza Avella
Doctor en ingeniería química

Universidad industrial de santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de ingeniería química

Bucaramanga

2021

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 8 |
| 1. Objetivos..... | 11 |
| 1.1 Objetivo general | 11 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 11 |
| 2. Marco teórico..... | 12 |
| 2.1 Producción de hidrocarburos..... | 12 |
| 2.2 Recobro mejorado..... | 13 |
| 2.3 Tratamiento convencional | 13 |
| 2.4 Tecnologías electroquímicas para tratamiento de aguas provenientes de recobro químico | 15 |
| 2.5 Reúso del agua de producción tratada | 16 |
| 3. Metodología..... | 17 |
| 3.1 Etapa 1. Identificar las características fisicoquímicas del agua de producción | 17 |
| 3.2 Etapa 2. Identificar las tecnologías convencionales empleadas para el tratamiento de aguas de producción | 17 |
| 3.3 Etapa 3. Evaluar la factibilidad técnico-económica de acoplar al tren de tratamiento... | 19 |
| 4. Resultados..... | 20 |
| 4.1 Sistemas de tratamiento planteados | 20 |
| 5. Conclusiones..... | 31 |
| 6. Recomendaciones | 32 |
| Referencias | 33 |
| ANEXOS | 37 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mecanismos de producción de hidrocarburos..... | 12 |
| Figura 2. Sistema de tratamiento convencional 1..... | 21 |
| Figura 3. Sistema de tratamiento acoplado 1..... | 21 |
| Figura 4. Sistema de tratamiento convencional 2..... | 22 |
| Figura 5. Sistema de tratamiento acoplado 2..... | 22 |
| Figura 6. Sistema de tratamiento convencional 3..... | 24 |
| Figura 7. Sistema de tratamiento acoplado 3..... | 24 |
| Figura 8. Sistema de tratamiento convencional 4..... | 25 |
| Figura 9. Sistema de tratamiento acoplado 4..... | 25 |
| Figura 10. Sistema de tratamiento convencional 5..... | 27 |
| Figura 11. Sistema de tratamiento acoplado 5..... | 27 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Etapas y equipos de un tren de tratamiento convencional de aguas de producción. | 14 |
| Tabla 2. Equipos electroquímicos para tratamiento de aguas provenientes de recobro químico..... | 16 |
| Tabla 3. Características fisicoquímicas necesarias para disposición final. | 16 |
| Tabla 4. Caracterización fisicoquímica campo petrolífero..... | 20 |
| Tabla 5. Concentraciones salida trenes de tratamiento convencional 1 y acoplado 1..... | 21 |
| Tabla 6. Concentraciones sistemas de tratamiento 1 y 2..... | 23 |
| Tabla 7. Concentraciones sistemas de tratamiento 1, 2 y 3..... | 24 |
| Tabla 8. Concentraciones sistemas de tratamiento 1, 2, 3 y 4..... | 26 |
| Tabla 9. Concentraciones sistemas de tratamiento 1, 2, 3, 4 y 5..... | 28 |
| Tabla 10. CAPEX Y OPEX de los diferentes sistemas de tratamiento..... | 29 |
| Tabla 11. Métodos de disposición y costos totales de los diferentes trenes de tratamiento..... | 29 |

Lista de Anexos

| | |
|---|----|
| Anexo 1. Caracterización fisicoquímica del campo petrolífero. | 37 |
| Anexo 2. Interfaz general herramienta computacional | 38 |
| Anexo 3. Datos generales CAPEX-OPEX | 44 |

Resumen

Título: Estudio de prefactibilidad técnico-económica del acoplamiento de tecnologías electroquímicas al tren de tratamiento de aguas de producción provenientes del recobro químico*

Autor: Orlando Stick Melgarejo Martinez, Cristian Giovanni Rueda Sarmiento**

Palabras clave: Aguas de producción, simulación de procesos, factibilidad económica, recobro químico.

Descripción: Los sistemas de tratamiento convencionales de aguas de producción están compuestos por unidades de separación por gravedad, unidades de flotación y sistemas de membranas. Sin embargo, la implementación de métodos de recobro químico dificultan el tratamiento mediante estas tecnologías debido a la carga contaminante que poseen las aguas provenientes de estos procesos de producción. Por lo anterior, el uso de tecnologías electroquímicas sobresale como una alternativa. La utilización de estas técnicas con el fin de remover contaminantes en aguas provenientes del recobro químico resulta promisorio por su versatilidad, automatización y compatibilidad con el ambiente. Se plantearon diferentes sistemas de tratamiento convencionales y se acoplaron estas tecnologías electroquímicas, para así realizar un análisis técnico-económico de su factibilidad de implementación. El acoplamiento de las tecnologías emergentes en electroquímica al tren de tratamiento de aguas de producción convencional es factible para aquellos sistemas que no tengan una alta complejidad en su esquema de proceso, es decir, que no tengan un gran número de unidades de tratamiento. Con base en el análisis CAPEX-OPEX y las concentraciones finales de los diferentes trenes de tratamiento planteados mediante la herramienta computacional, se estableció que el método de disposición adecuado para el agua de producción es la reinyección.

*Trabajo de Investigación para obtener el título de Ingeniero Químico

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Maria Ines Jaramillo Gutierrez, Dr. Co-director: Julio Andres Pedraza Avella, Dr

Abstract

Title: Technical-economic pre-feasibility study of the coupling of electrochemical technologies to the production water treatment train from chemical recovery

Author: Orlando Stick Melgarejo Martinez, Cristian Giovanni Rueda Sarmiento**

Keywords: Production waters, process simulation, economic feasibility, chemical recovery.

Description: Conventional production water treatment systems are made up of gravity separation units, flotation units and membrane systems. However, the implementation of chemical recovery methods make treatment using these technologies difficult due to the pollutant load of the waters from these production processes, reducing their efficiency is approximately 50%. Therefore, the use of electrochemical technologies has been implemented and these stand out as an alternative. The use of these techniques in order to remove pollutants in water from chemical recovery is promising due to its versatility, automation and compatibility with the environment. In this work, different conventional treatment systems were proposed and these electrochemical technologies were coupled, in order to carry out a technical-economic analysis of their feasibility of implementation. The coupling of emerging technologies in electrochemistry to the conventional production water treatment train is feasible for those systems that do not have a high complexity in their process scheme, that is, that do not have a large number of treatment units. Based on the CAPEX - OPEX analysis and the final concentrations of the different treatment trains proposed by the computational tool designed by the authors, it was established that the appropriate disposal method for the production water is reinjection, since the values are guaranteed limits of pollutants that comply with Colombian standards.

* Research work to obtain the title of Chemical Engineer

** Faculty of Physico-chemical Engineering. Chemical Engineering School. Advisor: Maria Ines Jaramillo Gutierrez, PhD. Co-advisor: Julio Andres Pedraza Avella, PhD.

Introducción

La exploración y explotación del petróleo ha sido el motor de la economía colombiana a lo largo de muchos años, siendo el petróleo el primer producto de exportación aportando un gran número de regalías a las diferentes regiones del país [1]. Sin embargo, la producción de petróleo conlleva a la generación de un alto volumen de residuo líquido. A 2020, se estima que la producción de agua en los campos colombianos podría llegar a 16 barriles de agua por cada barril de petróleo[2]. El agua producida debe ser tratado para una disposición posterior, ya sea riego, vertimiento o reinyección.

Las tecnologías convencionales para el tratamiento de agua de producción se centran en la eliminación de compuestos orgánicos dispersos, lo cual se logra eficientemente con métodos físicos, químicos, biológicos o una combinación de estos. Sin embargo, los sistemas de tratamiento convencionales instalados en superficie han disminuido su eficiencia en más de 50% luego de la implementación de métodos de recobro mejorado, particularmente métodos de recobro químico. Adicionalmente, plantea la necesidad de implementar métodos alternativos para el tratamiento de estos efluentes líquidos, que sean eficientes y capaces mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes.

La implementación de métodos de recobro químico (CEOR, Chemical Enhanced Oil Recovery), surgen como alternativa para incrementar la recuperación de crudo en las reservas maduras y en yacimientos de crudo pesado. Esta tecnología permite recuperar entre 10-20% del petróleo original en sitio, lo cual resulta en un recobro adicional significativo [3–5]. Luego de que en el año 2018, La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) afirmó que Colombia contaba con un abastecimiento de crudo para aproximadamente 6.2 años [6], y con el fin de mantener la estabilidad macroeconómica del país se ha generado un gran interés en la implementación de métodos CEOR.

Los métodos de recuperación implementados en CEOR incluyen la inyección de surfactantes, polímeros y álcalis o una mezcla de los tres lo que se conoce como inyección de mezcla álcalis-surfactante-polímero (ASP)[7]. La razón de implementar el proceso ASP es que con esta tecnología se consiguen mayores factores de recobro mediante la

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

combinación de lo mejor de los tres métodos químicos [8]. El proceso de inyección de surfactante consiste en desplazar el petróleo atrapado en los poros del reservorio para que este se haga móvil y pueda ser desplazado por el fluido inyectado. El surfactante se adsorbe disminuyendo la tensión interfacial entre dos fluidos, que en este caso son el petróleo y el agua. Por otro lado, la inyección de polímeros busca aprovechar la viscosidad de estas soluciones acuosas con el objetivo de controlar la movilidad de los fluidos inyectados. Su función principal es aumentar la viscosidad de la fase acuosa y así incrementar el desplazamiento del petróleo remanente. Finalmente, la inyección de álcali consiste en inyectar una solución para lograr un pH entre 8 y 10; a medida que los álcalis reaccionan con los ácidos del petróleo, se producen sales de sodio que son surfactantes en la interfase petróleo-agua, que reducen la tensión interfacial y movilizan el petróleo residual de la formación.

Además de ser generada en grandes cantidades, el agua de producción tiene una composición compleja con grandes cantidades de sales disueltas (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^-), sólidos en suspensión (grasas, aceites y minerales del yacimiento), metales pesados (Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Ag y Zn), compuestos orgánicos disueltos, como ácidos carboxílicos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) y fenoles alquilados, y compuestos de bajo peso molecular, como benceno, tolueno, etilbenceno, y xileno (BTEX) [9–12]. Ahora, con la implementación de CEOR se adicionan aditivos químicos como polímeros sintéticos o naturales (poliacrilamida, gomas xánticas), surfactantes de tipo aniónicos y no iónicos (alcanosulfonatos secundarios-SAS, sulfonatos de alquilbenceno lineales LAS, alfa-olefina sulfonatos AAO, alcohol etoxilado, polialcoholes, poliglicol) y álcalis (NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, LiOH , NH_4OH , Na_2SiO_3 , Na_2CO_3 , Na_3PO_4 , y NaBO_2).

De acuerdo a la legislación colombiana en materia ambiental [13] (Resolución 0631 de 2015 reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984) el agua de producción proveniente de procesos de recobro químico no puede ser descargada directamente en cuerpos acuíferos naturales y por esta razón debe ser tratada mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, la implementación de un método de recobro químico dificulta el proceso de separación debido a que: (1) El contenido

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

de polímeros aumenta la viscosidad del fluido y permanece en la fase acuosa retardando los procesos de separación, esto puede causar fallas en tratadores térmicos, y reducir la eficiencia en sistemas primarios, hidrociclones y unidades de flotación, entre otras complicaciones [5,14,15]; (2) Los surfactantes añadidos, generan emulsiones de alta estabilidad [16] y (3) Los álcalis adicionados, reaccionan generando surfactantes in situ, que incrementan la densidad de carga superficial en la superficie de las gotas y promueven también la formación de emulsiones estables [17].

Una alternativa de solución a esta problemática es el uso de tecnologías de tratamiento electroquímicas. La utilización de estas técnicas para remover contaminantes en aguas de producción resulta promisoria dadas las atractivas características que posee: (1) versatilidad, ya que es posible realizar oxidaciones o reducciones, tanto directas como indirectas, de soluciones concentradas o diluidas del contaminante; (2) automatización, puesto que las variables eléctricas usadas (corriente y potencial) son fácilmente manejables para el control y la adquisición de datos; (3) compatibilidad con el ambiente, debido a que el principal reactivo utilizado es el electrón y, generalmente, no es necesaria la inclusión de otras especies[17]. Por esta razón el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) ha desarrollado diferentes equipos a escala laboratorio para el tratamiento de aguas provenientes de estos procesos de recobro mejorado.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se evalúa la factibilidad técnico-económica de acoplar tecnologías electroquímicas (electrocuagulación y fotoelectrocatalisis) a trenes de tratamiento convencional, a fin de verificar la viabilidad del agua tratada en aplicaciones posteriores de vertimiento, riego y reinyección. Para lograr este fin, se desarrolló una herramienta computacional que permitió evaluar técnicamente la configuración adecuada de un tren de tratamiento para aguas de producción acoplando procesos electroquímicos, basado en las características fisicoquímicas y destino final del agua tratada.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnico-económica de diferentes configuraciones de trenes de tratamiento para aguas de producción acoplando procesos electroquímico mediante una herramienta computacional, basada en las características fisicoquímicas y destino final del agua tratada.

1.2 Objetivos específicos

Identificar las características fisicoquímicas del agua de producción proveniente de recobro químico que son relevantes durante su tratamiento, así como las concentraciones permisibles según su destino final (vertimiento, riego o reinyección).

Caracterizar las tecnologías convencionales empleadas para el tratamiento de aguas de producción provenientes de recobro químico a fin de acoplarlas a las tecnologías electroquímicas emergentes, teniendo en cuenta las características fisicoquímicas del agua y limitaciones de cada tecnología.

Evaluar la factibilidad técnico-económica de acoplar al tren de tratamiento convencional los avances en electroquímica emergentes para el tratamiento de aguas de producción, estableciendo diferentes configuraciones de acuerdo con las características finales del agua.

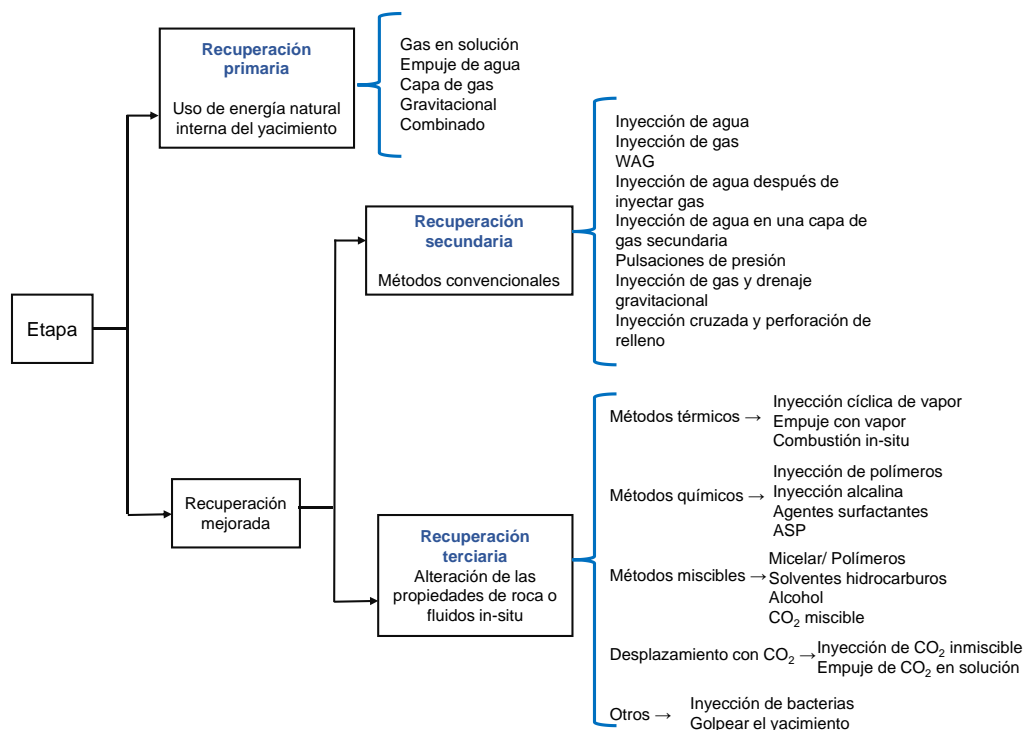
2. Marco teórico

2.1 Producción de hidrocarburos

La producción de hidrocarburos hace referencia al proceso mediante el cual se realiza la extracción de petróleo y gas desde la capa de roca hasta la superficie. La producción es llevada a cabo mediante dos mecanismos principales, el primer método hace uso de válvulas y la energía natural del yacimiento[18]. Cuando el recobro primario ya no es económicamente viable porque la presión del yacimiento disminuye causando la no fluidez de crudo [19], se implementa un nuevo tipo de proceso, recobro secundario, en el cual se inyecta un fluido externo para elevar la presión del yacimiento[20], el uso sucesivo de recobro primario y recobro secundario aumenta la producción de crudo entre un 30% y 60% del petróleo original existente en el lugar [21]. En la Figura 1 se detalla la clasificación de los tres mecanismos de producción.

Figura 1.

Mecanismos de producción de hidrocarburos



Adaptado de: Tobon, W. Aspectos Fundamentales de Recobro Secundario y Terciario. https://www.academia.edu/25115087/Aspectos_Fundamentales_de_Recobro_Secundario_y_Terciario_Autor

2.2 Recobro mejorado

Se define el recobro mejorado como la recuperación de petróleo después de una recuperación primaria y secundaria [22]. Dentro del recobro mejorado se encuentran tres tipos de procesos, el recobro térmico, recobro miscible y recobro químico. Cada uno de estos tipos de recobro se caracteriza por la naturaleza del fluido usado al momento de la inyección, siendo para el térmico vapor, para el miscible suelen usarse gases como hidrocarburos gaseosos, dióxido de carbono o nitrógeno y por último en el recobro químico se usan compuestos como surfactantes, polímeros, álcalis o una mezcla de estos.

Entre los diferentes tipos de recobro mejorado, el recobro químico ha sido uno de los más prometedores, mostrando grandes eficiencias y un costo capital razonable [23]. El propósito principal de inyectar estos compuestos es actuar sobre factores que puedan aportar una mayor recuperación, de esta forma, la inyección de polímeros se realiza a una concentración entre 1000 y 2000 ppm [24], esto favorece la viscosidad del fluido entrante desarrollándose esto en un incremento de la movilidad del crudo, a su vez el inyectar surfactantes en concentraciones bajas (~0,05-0,2%) [25] y álcalis en un rango de 2 a 5% de concentración [26] alteran la tensión interfacial entre el crudo y el fluido entrante, así como la mojabilidad de la roca [23,27].

2.3 Tratamiento convencional

El tren de tratamiento usado para aguas de producción provenientes de recobro primario y secundario está dividido en diferentes etapas, las cuales tendrán un enfoque de remoción, estas son pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario, la Tabla 1 presenta un resumen de estas tecnologías incluyendo sus características principales y las eficiencias de remoción [12,28–31].

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Tabla 1.

Etapas y equipos de un tren de tratamiento convencional de aguas de producción.

| Etapa tratamiento | Nombre del equipo | Características | Eficiencias de remoción |
|--|-------------------------------------|---|---|
| PRETRATAMIENTO El que se refiere a la eliminación de aquellos componentes que puedan provocar problemas operacionales y de mantenimiento en el proceso de tratamiento o en los sistemas auxiliares | Separador API | - Simplicidad del diseño. - Bajo mantenimiento. - Requieren altas extensiones de terreno - Resistencia al taponamiento con sólidos. | - Grasas y aceites: 90% - SST: 80% |
| | Desnatador (SKIMMER) | - Bajo costo de operación y mantenimiento. - Diseño basado en la separación por gravedad - Tiempos de residencia entre 10-30 min. | - Grasas y aceites: 80% - SST: 80% |
| TRATAMIENTO PRIMARIO En este nivel de tratamiento, una porción de sólidos y materia orgánica suspendida es removido del agua residual utilizando la fuerza de gravedad como principio | Separador CPI | - Alta eficiencia de separación, los efluentes tienen una mejor calidad. - Bajos costos de instalación y mantenimiento. - Bajos tiempos de retención hidráulica. - Bajos requerimientos de espacio. | - Grasas y aceites: 95% - SST: 80% |
| | Unidad de microflotación | - Bajo consumo energético (< 1 hp / 1.000 BPD). - Bajo costo de mantenimiento. - Menor requerimiento de espacio. - Bajo consumo de aditivos. - Apto para ambientes corrosivos. - Alta durabilidad. | - Grasas y aceites: 99% - SST: 90% |
| | Unidad de flotación de gas inducido | - Operan por inducción y dispersión de burbujas en el afluente. - Tamaños de burbuja generados mayores a 100 micras. | - Grasas y aceites: 95% - SST: 80% |
| | Unidad de filtración | - Ahorros monetarios al eliminar el uso de solventes o tensoactivos para tratar los medios. - Facilidad de eliminar el aceite y los sólidos del medio. - Capacidad de reutilizar los medios filtrantes. | - Grasas y aceites: 99% - SST: 95% |
| TRATAMIENTO SECUNDARIO Elimina la materia orgánica biodegradable | Laguna facultativa | - Maneja cargas orgánicas entre 55 y 200 kg DBO/día por hectárea de terreno - Tiempo de retención entre 5 y 30 días. | - DQO: 75% - DBO: 80% |
| TRATAMIENTO Terciario Este tipo de tratamiento se refiere a todo tratamiento hecho después del tratamiento secundario con el fin de eliminar compuestos tales como sólidos suspendidos, nutrientes y la materia orgánica remanente no biodegradable. | Membrana de nanofiltración | - Diseñada para eliminar iones polivalentes en operaciones de ablandamiento. - Empleada para eliminar o separar la materia orgánica. - Operan a presiones entre 0,5 y 1,5 MPa. | - Grasas y aceites: 95% - SST: 100% - DQO: 85% - DBO: 100% |
| | Membrana de ultrafiltración | - Eliminación de color, olor, virus y materia orgánica coloidal. - Es más eficiente para la eliminación de hidrocarburos, sólidos suspendidos y componentes disueltos. - Operan a baja presión (1-30 psi). | - Grasas y aceites: 95% - SST: 80% - DQO: 75% - DBO: 80% |
| | Membrana de ósmosis inversa | - Eliminación de contaminantes presentes tan pequeños como de 0,1 nm. - Requiere pretratamiento. | - Grasas y aceites: 95% - SST: 100% - DQO: 75% - DBO: 80% |

SST: Sólidos suspendidos totales, DQO: Demanda química de oxígeno, DBO: Demanda biológica de oxígeno.

2.4 Tecnologías electroquímicas para tratamiento de aguas provenientes de recobro químico

Los procesos fotoelectrocatalíticos acoplan procesos fotocatalíticos y electroquímicos. Durante este proceso se generan radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) altamente oxidantes, los cuales producen cambios en la estructura química de los contaminantes hasta transformarlos en productos inocuos para el ambiente [32–36]. La fotoelectrocatalisis a pesar de haber sido empleada en el tratamiento de aguas de producción sin inyección de polímeros o surfactantes, ha podido evidenciar sus ventajas, logrando mediante la unión de fotocatalisis heterogénea y la oxidación electroquímica una mayor eficacia en la remoción de DQO [37]. Por su parte, la electrocoagulación ha reportado grandes desempeños en el tratamiento de diversas aguas residuales, razón que la convierte en una técnica prometedora para el tratamiento de aguas provenientes del recobro químico [16]. La electrocoagulación es una técnica que comprende la generación in situ de coagulantes a partir de la oxidación electrolítica de un ánodo de sacrificio. Estos agentes promueven la desestabilización de las partículas suspendidas mediante la reducción de las cargas superficiales, causando la coalescencia y subsecuente separación de las fases, mediante asentamiento o flotación [38,39].

En base a esto el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) realizó investigaciones en fotoelectroquímica, diseñando e implementando un reactor fotoelectroquímico tubular para la oxidación de surfactantes provenientes de aguas de producción resultantes del recobro químico, y diseñando un proceso de electrocoagulación en continuo para el tratamiento de aguas de producción provenientes del recobro químico. A continuación, se resumen las principales características de estos equipos en la Tabla 2.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Tabla 2.

Equipos electroquímicos para tratamiento de aguas provenientes de recobro químico

| Técnica | Características | Eficiencias de remoción |
|--------------------|---|--|
| Electrocoagulación | <ul style="list-style-type: none"> - Menor costo respecto a procesos de coagulación convencional. - Elimina necesidades de almacenamiento y uso de productos químicos (coagulantes in-situ). - El paso de corriente favorece el movimiento de partículas pequeñas facilitando su colisión y coagulación. | <ul style="list-style-type: none"> - Grasas y aceites: 96% - Sólidos suspendidos: 95% - DQO: 95% - Surfactantes: 75% - Polímeros: 87% |
| Fotoelectroquímica | <ul style="list-style-type: none"> - Generación de producto de valor agregado (Hidrógeno). - Posibilidad de usar radiación solar para reducir el consumo de energía. - Solo se requiere una unidad de proceso debido a que no es necesario recuperar el catalizador. | <ul style="list-style-type: none"> - Fenoles: 80% - DQO: 50% - Surfactantes: 89% - Polímeros: 75% |

2.5 Reúso del agua de producción tratada

La legislación colombiana establece los parámetros y valores límites máximos permisibles para dar uso al agua resultante de procesos de producción en sistemas de riego agrícola o vertimientos puntuales en cuerpos de aguas superficiales, mediante la Resolución N° 1207 de Junio de 2014 y la Resolución N° 0631 de Marzo 17 de 2015 respectivamente. Por su parte, la industria de hidrocarburos en Colombia ha definido requerimientos de calidad necesarios para la inyección del agua de producción en la formación. Todos estos parámetros pueden ser observados en la Tabla 3.

Tabla 3.

Características fisicoquímicas necesarias para disposición final.

| Parámetro | Vertimiento | Riego | Reinyección | Unidad |
|-----------------------------|-------------|-------|-------------|--------|
| Grasas y aceites | 15 | - | 5 | mg/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | 50 | - | 5 | mg/L |
| Cloruros | 1200 | 300 | - | mg/L |
| Sodio | - | - | - | me/L |
| Calcio | - | - | - | me/L |
| Magnesio | - | - | - | me/L |
| Bicarbonato | - | - | - | me/L |
| Conductividad | - | 1500 | - | uS/cm |
| Surfactantes | 0.5* | - | - | mg/L |
| Polímeros | 500** | - | - | mg/L |

* La legislación colombiana provee valores máximos para sustancias activas al azul de metileno sólo para vertimiento de aguas domésticas, ARD de actividades industriales, comerciales y de servicios y solo exige el análisis y reporte para la industria de hidrocarburos. Sin embargo se han realizado estudios internacionales que muestran un alto nivel de toxicidad para la fauna marina a partir de 1,23 mg/L[40].

** La legislación colombiana no provee valores máximos para polímeros, sin embargo se han realizado estudios internacionales que muestran un alto nivel de toxicidad para la fauna marina a partir de 500 mg/L[40].

3. Metodología

Para alcanzar el objetivo planteado en el presente estudio, la estrategia experimental consistió de tres etapas; (a) Identificar las características fisicoquímicas del agua de producción, (b) Identificar las tecnologías convencionales empleadas para el tratamiento de aguas de producción y (c) Evaluar la factibilidad técnico-económica de acoplar al tren de tratamiento.

3.1 Etapa 1 Identificar las características fisicoquímicas del agua de producción

Búsqueda bibliográfica de las características de aguas de producción. Se realizó una búsqueda bibliográfica en base de datos teniendo como foco principal las características generales de las aguas de producción y cuáles de estas poseen una regulación por parte del gobierno del país. Adicionalmente se analizó la caracterización de aguas de producción de un campo petroletto con piloto ASP. El análisis fisicoquímico del agua de producción real se muestra en el Anexo 1. A partir de esta información se tomó como concentración máxima los valores históricos reportados.

Parámetros de referencia a la entrada del sistema de tratamiento. En base a la revisión de las características fisicoquímicas del agua se encontraron cierto número de parámetros como lo son concentración de grasas y aceites, sólidos suspendidos, cloruros, bicarbonatos, sodio, magnesio, valor de conductividad.

3.2 Etapa 2 Identificar las tecnologías convencionales empleadas para el tratamiento de aguas de producción

Búsqueda bibliográfica del tratamiento convencional de aguas de producción. Se realizó una revisión de las tecnologías más empleadas en la industria de los hidrocarburos para realizar un tratamiento a las aguas residuales provenientes de sus respectivos procesos de producción. Se rescataron las diferentes etapas del proceso de tratamiento y en cada una de estas se planteó un número de equipos, permitiendo de esta forma una flexibilidad al momento de escoger el tren final a utilizar, dando paso a la posibilidad de obtener una mayor eficiencia de remoción de los contaminantes deseados.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Desarrollo del tren de tratamiento convencional. La realización del programa mediante el cual se darán los diferentes trenes de tratamiento se dio por medio del Se empleó el software Matlab V. 2020b para desarrollar el programa mediante el cual se darán los diferentes trenes de tratamiento, dando uso a uno de sus complementos llamado App Designer, el cual ofrece varias opciones al momento de construir la interfaz de la herramienta a programar y una facilidad durante el proceso de escritura de código. El uso de este software requiere de un mínimo de 4 GB de memoria RAM, 5-8 GB de espacio libre en el disco duro y un procesador Intel o AMD x86-64. Para comenzar la construcción de la herramienta se planteó la interfaz de bienvenida, permitiendo al usuario navegar a través de sus pestañas haciendo uso de botones. Se construyeron diferentes pestañas para informar al usuario sobre el proceso de producción de hidrocarburos, sus diferentes etapas de tratamiento y los equipos más empleados en la industria.

Se planteó una interfaz para el ingreso de las características fisicoquímicas del agua a tratar, con sus respectivas unidades. Después de esto se llevó a cabo la inclusión de los diversos equipos que forman parte del tren de tratamiento, desarrollando su programación mediante el uso de condicionales “if” basados en las características provenientes del agua y los requerimientos máximo y mínimos de operación de los equipos. A su vez, para dar el ingreso del agua de producción a ciertas etapas del tratamiento se debe cumplir con unos valores máximo permisibles, por esta razón se requiere de la implementación de uno o más equipos pertenecientes a ciertas etapas del proceso, esto se llevó a cabo a través de condicionales “while”. Es importantes resaltar que el seguimiento de la remoción de contaminantes a lo largo del programa fue desarrollado con las diferentes eficiencias de los equipos propuestas en la búsqueda bibliográfica. El código completo se puede encontrar en el Anexo 2.

Búsqueda bibliográfica de equipos de tratamiento electroquímico para aguas de producción. A partir de los avances tecnológicos realizados por el Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente en el sector de la electroquímica y fotoelectrocatalisis, se resaltaron dos equipos a implementar en el tren de tratamiento para aguas de producción provenientes del recobro químico, un reactor fotoelectroquímico tubular y una celda de electrocoagulación. Por último, se dio una búsqueda bibliográfica de

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

porcentajes de remoción y eficiencias de procesos basados en los principios utilizados para el desarrollo de estos equipos.

Implementación de nuevas tecnologías al tren de tratamiento convencional. Para realizar la inclusión de los dos equipos basados en electroquímica, se siguió el mismo procedimiento usado en el desarrollo del tren de tratamiento convencional, es decir, al momento de selección de los equipos se implementaron condicionales “if” basados en los valores máximo permisibles para cada equipo y en la cantidad de contaminantes provenientes del recobro químico (surfactantes y polímeros).

Con el fin de mostrar un esquema global del tren seleccionado a través del programa y por medio de condicionales “if” funcionales según las decisiones tomadas por el usuario con la herramienta, se programó un esquema visual del tren de tratamiento con los equipos seleccionados y sus respectivos nombres. Para finalizar se llevó a cabo un reporte mediante tablas de cada una de las etapas existentes en el proceso con los respectivos valores de salida para los parámetros planteados en la selección de caracterización del agua de producción.

3.3 Etapa 3 Evaluar la factibilidad técnico-económica de acoplar al tren de tratamiento.

Se realizaron diferentes configuraciones a partir de las características fisicoquímicas finales y se planteó un análisis de estimación de costo capital (CAPEX) y operacional (OPEX). En el análisis CAPEX se tuvo en cuenta el costo de equipos principales del sistema de tratamiento, costeo de materias primas, insumos en el sistema de tratamiento, costo de equipos menores (Bombas, tuberías, compresores, etc), debido a que desestimar el CAPEX acarrearía efectos desfavorables para las proyecciones financieras, ya que provee información base para el desarrollo del proyecto. En los gastos operacionales OPEX se tuvo en cuenta costos asociados a los recursos que implican un correcto funcionamiento del sistema de tratamiento (energía eléctrica, consumo de agua). El análisis CAPEX-OPEX, representó una herramienta adicional de desición al permitir comparar entre las diferentes configuraciones y sus respectivas eficiencias. Brindando una perspectiva amplia y objetiva del proyecto para su futura implementación.

4. Resultados

Con base en los criterios de selección del agua de producción, se optó por escoger el agua proveniente de un campo petrolífero colombiano. De esta forma, mediante una búsqueda de caracterizaciones realizadas a las aguas de producción utilizadas en este campo se pudieron obtener los parámetros relevantes durante su tratamiento.

Tabla 4.

Caracterización fisicoquímica de un campo petrolero colombiano con piloto ASO.

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------------------------|--------------|---------------|
| Grasas y Aceites | 342 | mg/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | 320 | mg/L |
| Cloruros | 6407 | mg/L |
| Sodio | 128,95 | me/L |
| Bicarbonato | 20 | me/L |
| Calcio | 41,40 | me/L |
| Magnesio | 10,78 | me/L |
| Conductividad | 15720 | uS/cm |
| Surfactantes | 402 | mg/L |
| Polímeros | 488 | mg/L |

La herramienta informática programada está equipada de un sistema de decisiones el cual permite la selección de sistemas de tratamiento. Comenzando con el ingreso de las características fisicoquímicas del agua de producción, junto con los requerimientos necesarios para cada etapa de tratamiento, el programa guía al usuario a través de las diferentes etapas del proceso. La interfaz general de la herramienta se encuentra en el Anexo 3.

A partir del uso de la herramienta computacional se establecieron cinco sistemas de tratamiento convencional para el agua de producción seleccionada y se reprodujeron estos resultados añadiendo las unidades de tratamiento electroquímico establecidas.

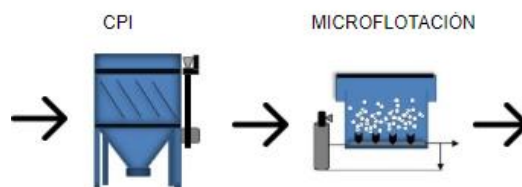
4.1 Sistemas de tratamiento planteados

El primer sistema de tratamiento representa un tratamiento convencional el cual está conformado por una sola etapa de proceso, el tratamiento primario, con equipos como un separador CPI y una unidad de microflotación.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Figura 2.

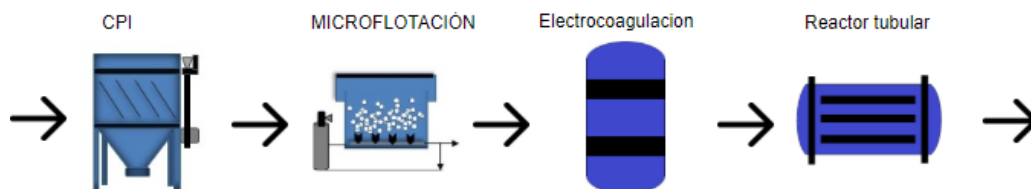
Sistema de tratamiento convencional 1.



Con el fin de evaluar el impacto de las características fisicoquímicas del agua, se añade un tratamiento electroquímico, compuesto por una unidad de electrocoagulación y un reactor fotoelectroquímico tubular.

Figura 3.

Sistema de tratamiento acoplado 1.



En la Tabla 5 se presentan las concentraciones resultantes para cada uno de los trenes antes mencionados.

Tabla 5.

Concentraciones salida trenes de tratamiento convencional 1 y acoplado 1.

| Parámetros | Salida tren convencional 1 | Salida tren acoplado 1 | Vertimiento | Riego | Reinyección | Unidad |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|-------------|-------|-------------|--------|
| Grasas y aceites | 13,68 | 0,55 | 15 | - | 5 | mg/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | 28 | 1,26 | 50 | - | 5 | mg/L |
| Cloruros | 6407 | 6407 | 1200 | 300 | - | mg/L |
| Sodio | 128,96 | 128,96 | - | - | - | me/L |
| Calcio | 41,40 | 41,40 | - | - | - | me/L |
| Magnesio | 10,78 | 10,78 | - | - | - | me/L |
| Bicarbonato | 20 | 20 | - | - | - | me/L |
| Conductividad | 15720 | 15720 | - | 1500 | - | uS/cm |
| Surfactantes | 402 | 11,06 | 0,5 | - | - | mg/L |
| Polímeros | 488 | 16,39 | 500 | - | - | mg/L |

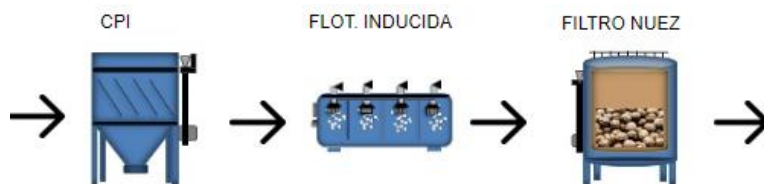
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

En la Tabla 5 se evidencia un alto contenido de cloruros, surfactantes y polímeros en el tren de tratamiento convencional 1, incumpliendo la normatividad de disposición final planteada para vertimiento, riego u reinyección. Mientras que acoplando las tecnologías electroquímicas se nota una disminución del 96%, 97%, 96%, 95% en el contenido de surfactantes, polímeros, sólidos suspendidos, grasas y aceites respectivamente. Por lo tanto, al comparar las composiciones de salida del tren acoplado y la normatividad es posible implementar las tecnologías emergentes y satisfacer los parámetros de reinyección.

En la Figura 4. Se presenta el segundo sistema planteado compuesto por tres equipos de proceso centrados en el tratamiento convencional, siendo estos, un separador CPI, unidad de flotación de gas inducido y un filtro de cáscara de nuez.

Figura 4.

Sistema de tratamiento convencional 2.



Como se puede observar en la Figura 4. este sistema convencional de tratamiento aumentó su cantidad de unidades respecto al anterior, esto debido al cambio de la unidad de microflotación por una unidad de flotación de gas inducido. En la Figura 5 se presenta el tren de tratamiento convencional 2 acoplado con las tecnologías electroquímicas.

Figura 5.

Sistema de tratamiento acoplado 2.



En la Tabla 6 se presentan las concentraciones de salida de los trenes previamente planteados.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Tabla 6.

Concentraciones sistemas de tratamiento 1 y 2.

| Parámetros | Salida tren convencional 1 | Salida tren acoplado 1 | Salida tren convencional 2 | Salida tren acoplado 2 | Vertimiento | Riego | Reinyección | Unidad |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|-------------|-------|-------------|--------|
| Grasas y aceites | 13,68 | 0,55 | 3,420 | 0,1368 | 15 | - | 5 | mg/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | 28 | 1,26 | 4 | 0,180 | 50 | - | 5 | mg/L |
| Cloruros | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 1200 | 300 | - | mg/L |
| Sodio | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | - | - | - | me/L |
| Calcio | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | - | - | - | me/L |
| Magnesio | 10,78 | 10,78 | 10,78 | 10,78 | - | - | - | me/L |
| Bicarbonato | 20 | 20 | 20 | 20 | - | - | - | me/L |
| Conductividad | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | - | 1500 | - | uS/cm |
| Surfactantes | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 0,5 | - | - | mg/L |
| Polímeros | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 500 | - | - | mg/L |

De la Tabla 6 se puede observar que el tren convencional 2 representó un aumento en la remoción de 3% en grasas y aceites y de 7% en sólidos suspendidos respecto al tren convencional 1. Así mismo, entre el tren convencional 2 y el tren acoplado 1 presentan una diferencia de concentración del 84%, 69%, 96%, 97% para grasas y aceites, sólidos suspendidos, surfactantes y polímeros, respectivamente a favor del tren acoplado 1. A pesar de esto, el tren convencional 2 cumple con los requerimientos para la reinyección del agua tratada.

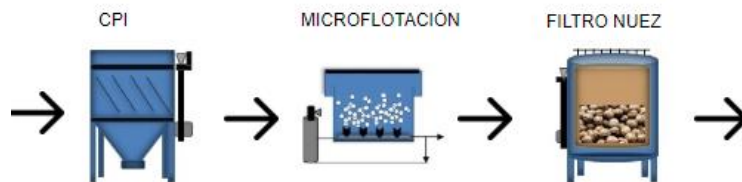
El ingreso de las tecnologías electroquímicas al tren convencional 2 representa un aumento de la remoción de grasas y aceites y sólidos suspendidos respecto a los trenes planteados anteriormente. Sin embargo, la concentración de surfactantes (11,06 mg/L) y polímeros (16,39 mg/L) mantienen su valor al compararlo con el tren acoplado 1. Se puede observar en la Tabla 6 que el tren convencional 2 cumple con los requerimientos para la reinyección del agua tratada, y el acople de las tecnologías electroquímicas no permite lograr una disposición diferente bajo esta configuración.

En la Figura 6 se observa el tercer sistema de tratamiento, cuyas unidades de proceso son un separador CPI, una unidad de microflotación y un filtro de cáscara de nuez.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Figura 6.

Sistema de tratamiento convencional 3.



Al acoplar las tecnologías emergentes, es posible representar el sistema como se observa en la Figura 7.

Figura 7.

Sistema de tratamiento acoplado 3.



A continuación se presenta la Tabla 7, en la cual se plantean las concentraciones de salida de los trenes de tratamiento.

Tabla 7.

Concentraciones sistemas de tratamiento 1, 2 y 3.

| Parámetros | Salida tren convencional 1 | Salida tren acoplado 1 | Salida tren convencional 2 | Salida tren acoplado 2 | Salida tren convencional 3 | Salida tren acoplado 3 | Vertimiento | Riego | Reinyección | Unidad |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|-------------|-------|-------------|--------|
| Grasas y aceites | 13,68 | 0,55 | 3,42 | 0,14 | 2,19 | 0,09 | 15 | - | 5 | mg/L |
| Sólidos Suspendedos Totales | 28 | 1,26 | 4 | 0,18 | 5,60 | 0,25 | 50 | - | 5 | mg/L |
| Cloruros | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 1200 | 300 | - | mg/L |
| Sodio | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | - | - | - | me/L |
| Calcio | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | - | - | - | me/L |
| Magnesio | 10,78 | 10,78 | 10,78 | 10,78 | 10,780 | 10,780 | - | - | - | me/L |
| Bicarbonato | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | - | - | - | me/L |
| Conductividad | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | - | 1500 | - | uS/cm |
| Surfactantes | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 0,5 | - | - | mg/L |
| Polímeros | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 500 | - | - | mg/L |

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

En la Tabla 7 es posible apreciar que el tren convencional 3 permite un incremento del 0,35% en la eficiencia de remoción de grasas y aceites respecto a los demás trenes convencionales (1 y 2), sin embargo, no cumple con los parámetros establecidos por la legislación colombiana para la reinyección del agua tratada, por lo que requiere adicionar el tratamiento electroquímico, permitiendo así el cumplimiento de la normatividad para reinyección.

El cuarto sistema de tratamiento está segmentado en dos etapas, un tratamiento primario y tratamiento terciario; conformado por un separado CPI, una unidad de microflotación, un filtro de cáscara de nuez y dos unidades de membranas tales como ultrafiltración y ósmosis inversa, como se puede observar en la Figura 8.

Figura 8.

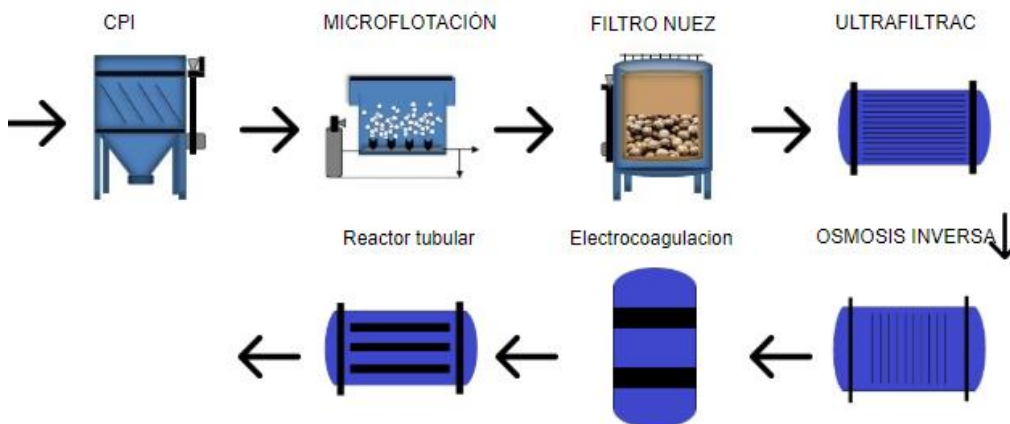
Sistema de tratamiento convencional 4.



La Figura 9 muestra el esquema del cuarto sistema de tratamiento al añadir las tecnologías electroquímicas.

Figura 9.

Sistema de tratamiento acoplado 4.



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Con base en el planteamiento de estos sistemas, se obtuvieron las concentraciones presentadas en la Tabla 8.

Tabla 8.

Concentraciones sistemas de tratamiento 1, 2, 3 y 4.

| Parámetros | | Salida tren convencional 1 | Salida tren acoplado 1 | Salida tren convencional 2 | Salida tren acoplado 2 | Salida tren convencional 3 | Salida tren acoplado 3 | Salida tren convencional 4 | Salida tren acoplado 4 | Vertimiento | Riego | Reinyección | Unidad |
|-----------------------------|---|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|-------------|-------|-------------|--------|
| Grasas aceites | y | 13,68 | 0,55 | 3,42 | 0,14 | 2,19 | 0,09 | 2,19 | 0 | 15 | - | 5 | mg/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | | 28 | 1,26 | 4 | 0,18 | 5,60 | 0,25 | 5,60 | 0 | 50 | - | 5 | mg/L |
| Cloruros | | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 64,070 | 64,070 | 1200 | 300 | - | mg/L |
| Sodio | | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 1,289 | 1,289 | - | - | - | me/L |
| Calcio | | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 0,41 | 0,41 | - | - | - | me/L |
| Magnesio | | 10,78 | 10,78 | 10,78 | 10,78 | 10,780 | 10,780 | 0,11 | 0,11 | - | - | - | me/L |
| Bicarbonato | | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 0,20 | 0,20 | - | - | - | me/L |
| Conductividad | | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 1572 | 1572 | - | 1500 | - | uS/cm |
| Surfactantes | | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 0,5 | - | - | mg/L |
| Polímeros | | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 500 | - | - | mg/L |

En la tabla 8 se puede observar que al añadir las unidades de membranas al tren convencional 4 se aporta un factor de remoción del 99% de los iones propios del agua de producción y del 90% para conductividad. Sin embargo, la concentración final de surfactantes, sólidos suspendidos y conductividad no permite el cumplimiento de la normatividad para vertimiento, reinyección o riego. Por otro lado, el acoplar las tecnologías de tratamiento electroquímico posibilita la reinyección del agua de producción tratada con el tren acoplado 4.

El quinto sistema de tratamiento es similar al sistema anterior, su única diferencia se encuentra en el equipo de flotación, el cual en este caso es una unidad de flotación de gas inducida como se observa en la Figura 10.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Figura 10.

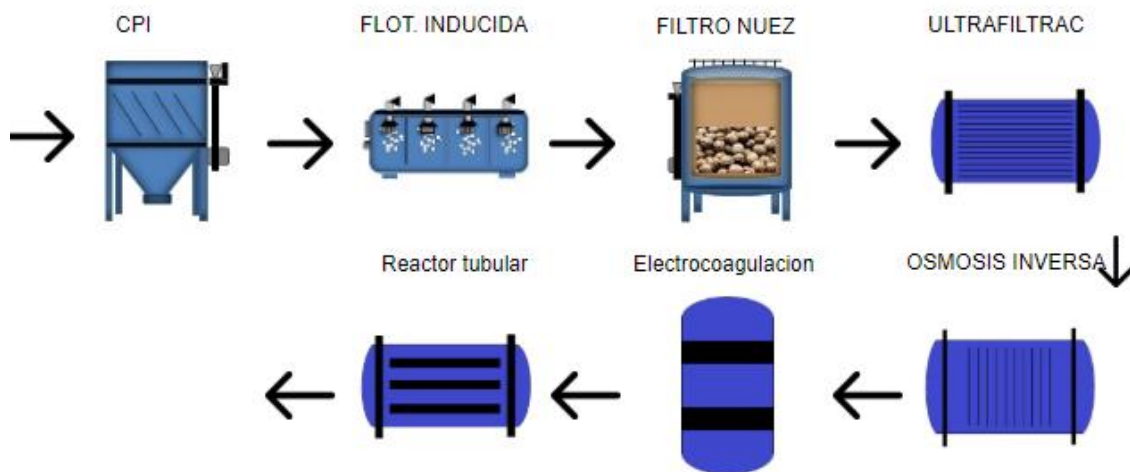
Sistema de tratamiento convencional 5.



Al agregar las unidades de tratamiento electroquímico (unidad electrocoagulación, reactor fotoelectroquímico tubular), el esquema del tren resulta como se observa en la Figura 11.

Figura 11.

Sistema de tratamiento acoplado 5.



La Tabla 9 presenta los valores finales de los parámetros fisicoquímicos establecidos a partir de los cambios realizados a los sistemas de tratamiento.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Tabla 9.

Concentraciones sistemas de tratamiento 1, 2, 3, 4 y 5.

| Parámetros | Salida tren convencional 1 | Salida tren acoplado 1 | Salida tren convencional 2 | Salida tren acoplado 2 | Salida tren convencional 3 | Salida tren acoplado 3 | Salida tren convencional 4 | Salida tren acoplado 4 | Salida tren convencional 5 | Salida tren acoplado 5 | Vertimiento | Riego | Reinyección | Unidad |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|-------------|-------|-------------|--------|
| Grasas y aceites | 13,68 | 0,55 | 3,42 | 0,14 | 2,19 | 0,09 | 2,19 | 0 | 3,420 | 0 | 15 | - | 5 | mg/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | 28 | 1,26 | 4 | 0,18 | 5,60 | 0,25 | 5,60 | 0 | 4 | 0 | 50 | - | 5 | mg/L |
| Cloruros | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 6407 | 64,07 | 64,07 | 64,07 | 64,07 | 1200 | 300 | - | mg/L |
| Sodio | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 128,96 | 1,289 | 1,289 | 1,29 | 1,29 | - | - | - | me/L |
| Calcio | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 41,40 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | - | - | - | me/L |
| Magnesio | 10,78 | 10,78 | 10,78 | 10,78 | 10,780 | 10,780 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | - | - | - | me/L |
| Bicarbonato | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | - | - | - | me/L |
| Conductividad | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 15720 | 1572 | 1572 | 1572 | 1572 | - | 1500 | - | uS/cm |
| Surfactantes | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 402 | 11,06 | 0,5 | - | - | mg/L |
| Polímeros | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 488 | 16,39 | 500 | - | - | mg/L |

En la Tabla 9 se observa que al realizar el cambio en la unidad de flotación en el tren convencional 5 se aumenta la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos un 0,5% respecto al tren convencional 4 logrando así que el agua resultante de este tratamiento sirva como agua de inyección en el proceso de producción. Por su parte, el acoplar las tecnologías electroquímicas al tren convencional 5 ofrece un aumento del 1,25% en la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos y del 1% en la eficiencia de remoción de grasas y aceites, sin embargo, las características finales del agua solo permiten el cumplimiento de la normatividad para la reinyección del agua proveniente de este tren de tratamiento acoplado.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Tabla 10.

CAPEX Y OPEX de los diferentes sistemas de tratamiento.

| Tren | Costo de inversión [COP] | Costos de operación | | | | Costo total [COP] | Costo total [USD] |
|----------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| | | Energía consumida anual [kW] | Costo energía anual [COP] | Agua potable consumida anual [m3] | Costo agua anual [COP] | | |
| Convencional 1 | \$5.615.868.000 | 6369023,7 | \$2.201.962.564 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 14.956.296.843 | \$3.935.868 |
| Acoplado 1 | \$5.623.506.000 | 8328947,501 | \$2.879.567.020 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 15.641.539.299 | \$4.116.195 |
| Convencional 2 | \$6.743.404.000 | 11023310,25 | \$3.811.089.053 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 17.692.959.332 | \$4.656.042 |
| Acoplado 2 | \$6.758.680.000 | 12983234,05 | \$4.488.693.509 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 18.385.839.788 | \$4.838.379 |
| Convencional 3 | \$7.895.336.000 | 7348873,5 | \$2.540.726.035 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 17.574.528.314 | \$4.624.876 |
| Acoplado 3 | \$5.631.144.000 | 9308797,301 | \$3.218.330.491 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 15.987.940.770 | \$4.207.353 |
| Convencional 4 | \$11.551.968.954 | 9451278,425 | \$3.267.590.490 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 21.958.025.723 | \$5.778.428 |
| Acoplado 4 | \$11.567.244.954 | 11411202,23 | \$3.945.194.946 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 22.650.906.179 | \$5.960.765 |
| Convencional 5 | \$10.400.036.954 | 10431128,22 | \$3.606.353.961 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 21.144.857.194 | \$5.564.436 |
| Acoplado 5 | \$10.415.312.954 | 12391052,03 | \$4.283.958.417 | 1697674,419 | \$7.138.466.279 | \$ 21.837.737.650 | \$5.746.773 |

De la Tabla 10 es posible observar el costo económico de los diferentes trenes de tratamiento construidos por medio de la herramienta informática, teniendo en cuenta los costos de inversión establecidos por la compra de los equipos necesarios para cada tren y sus respectivos costos de operación. La Tabla 11 presenta la opción de disposición para cada tren de tratamiento y sus respectivos costos totales.

Tabla 11.

Métodos de disposición y costos totales de los diferentes trenes de tratamiento.

| Tren | MÉTODO DE DISPOSICIÓN | | | Costo total [USD] |
|---------------------|-----------------------|-------|-------------|-------------------|
| | Vertimiento | Riego | Reinyección | |
| Tren convencional 1 | X | X | X | \$3.935.868 |
| Tren acoplado 1 | X | X | ✓ | \$4.116.195 |
| Tren convencional 2 | X | X | ✓ | \$4.656.042 |
| Tren acoplado 2 | X | X | ✓ | \$4.838.379 |
| Tren convencional 3 | X | X | X | \$4.624.876 |
| Tren acoplado 3 | X | X | ✓ | \$4.207.353 |
| Tren convencional 4 | X | X | X | \$5.778.428 |
| Tren acoplado 4 | X | X | ✓ | \$5.960.765 |
| Tren convencional 5 | X | X | ✓ | \$5.564.436 |
| Tren acoplado 5 | X | X | ✓ | \$5.746.773 |

Como se observa en la Tabla 11, siete de los diez trenes establecidos mediante la herramienta computacional proveen el tratamiento necesario para que el agua ingresada

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

pueda ser reinyectada en el proceso de producción de acuerdo a lo establecido por la normatividad colombiana, siendo dos de estos trenes tratamientos convencionales, el tren convencional 2, tren convencional 5. A su vez, el tren de tratamiento convencional 2 es menos costoso de implementar que el tratamiento convencional 5.

Así mismo, cinco de estos los 10 sistemas de tratamiento son sistemas de tratamiento acoplados a las tecnologías electroquímicas emergentes (Tren acoplado 1, tren acoplado 2, tren acoplado 3, tren acoplado 4, tren acoplado 5), las cuales a pesar de brindar una remoción del contenido de grasas y aceites no reducen parámetros como conductividad y salinidad, los cuales son esenciales para aplicaciones en riego y vertimiento. Adicionalmente se observa que el tren acoplado 1 permite cumplir con la normatividad para reinyección y presenta el menor valor para los costos totales, confirmando que bajo esta configuración es técnica y económicamente viable acoplar las unidades electroquímicas a los sistemas de tratamiento convencionales.

5. Conclusiones

Con la metodología planteada en este trabajo se logró evaluar la factibilidad de acoplar tecnologías electroquímicas al trenes convencionales de tratamiento de aguas de producción mediante el desarrollo de una herramienta computacional basada en los equipos industrialmente usados para el tratamiento de aguas provenientes de recobro primario, secundario, químico y los equipos desarrollados a nivel laboratorio por el Grupo de Investigación en Minerología, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA). De esta forma, se estableció que el método de disposición adecuado para el agua de producción es la reinyección, y su sistema de tratamiento más viable es el tren acoplado 1.

Gracias a una investigación documental de caracterizaciones fisicoquímicas de aguas de producción y una comparación con la normatividad de disposición, fue posible realizar la elección de los parámetros relevantes y que requieren intervención para evitar un impacto negativo al medio ambiente.

A partir de la búsqueda bibliográfica realizada durante el desarrollo de este trabajo de investigación se obtuvo la caracterización de los equipos comúnmente usados en planta para el tratamiento de aguas de producción. De acuerdo con lo anterior y a la comparación realizada con la normatividad colombiana, se determinó que algunos sistemas de tratamiento convencionales (tren convencional 2, tren convencional 5) permiten el reuso del agua tratada como reinyección.

El acoplamiento de las tecnologías emergentes en electroquímica al tren de tratamiento de aguas de producción convencional es factible para aquellos sistemas que no tengan una alta complejidad en su esquema de proceso, es decir, que no tengan un gran número de unidades de tratamiento. Logrando así que a partir de estos pequeños sistemas se pueda dar un reuso al agua de producción sin incurrir en altos gastos económicos, con eficiencias de remoción globales de contaminantes mayores al 90%.

6. Recomendaciones

Con el fin de presentar mejoras en la implementación de estas nuevas tecnologías a nivel industrial se presentan las siguientes recomendaciones:

A partir de la configuración más viable establecida en este trabajo, realizar un estudio mediante un software de simulación de procesos, en el cual se logre analizar la viabilidad de incluir a una mayor escala estas nuevas tecnologías en los diferentes sistemas de tratamiento de aguas de producción.

Incluir en la herramienta computacional la opción de realizar un análisis de costos para los diferentes sistemas establecidos a lo largo de la interfaz de la misma, facilitando de esta forma una mayor cantidad de información al usuario.

Aportar a la herramienta computacional una mayor base de datos acerca de parámetros fisicoquímicos de aguas de producción y sus respectivos equipos de tratamiento. Permitiendo de esta forma una mayor eficiencia en futuros análisis de implementación de tecnologías.

Cuantificar los costos del impacto ambiental causado por el vertimiento de aguas de producción sin ningún tratamiento previo.

Referencias

1. ANH. Colombia petrolera [Internet]. Available from: [https://www.anh.gov.co/Banco de informacion petrolera/Colombia Petrolera/Paginas/default.aspx](https://www.anh.gov.co/Banco_de_informacion_petrolera/Colombia_Petrolera/Paginas/default.aspx)
2. Ecopetrol S.A. El petróleo y su mundo. 2014;
3. Berdugo CAE, Orellano KJT. Técnicas de recobro y recobro mejorado en yacimientos con crudos livianos, pesados y extrapesados. 2015;
4. Portafolio. Economía colombiana seguirá dependiendo del petróleo. 2019; Available from: <https://www.portafolio.co/economia-colombiana-seguira-dependiendo-del-petroleo-530495>
5. Aguilar J, Mansur C. The influence of polymer flooding on produced oily water: a review. *Pet Gas*. 2016;10(1):49–61.
6. ANH. Avanza la reactivación del sector de hidrocarburos: Suben reservas de petróleo en Colombia a 6,2 años. Continúa desafío en reservas de gas. Avanza la reactivación del sector de hidrocarburos: Suben reservas de petróleo en Colombia a 6,2 años. Continúa desafío en reservas de gas. 2018.
7. Olajire AA. Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: Prospects and challenges. *Energy* [Internet]. 2014 Dec;77:963–82. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544214010603>
8. Al-Mjeni R, Arora S, Edwards J, Felber BJ, Gurpinar O. ¿Llegó el momento para la tecnología EOR? *Ilf Rev Invier*. 2011;22(4).
9. AlAnezi K, Al-Samhan M, Belkharchouche M, Abuhaimed W, Alali S, Alenizi K, et al. Comparative Analysis of Produced Water Collected from Different Oil Gathering Centers in Kuwait. *J Environ Prot (Irvine, Calif)* [Internet]. 2018;09(06):736–50. Available from: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/jep.2018.96046>
10. T. R, Heydari A, Henni A. State of the Art Treatment of Produced Water. In: *Water Treatment* [Internet]. InTech; 2013. Available from: <http://www.intechopen.com/books/water-treatment/state-of-the-art-treatment-of-produced-water>
11. Gil MJ, Soto AM, Usma JI, Gutierrez OD. Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Prod + Limpia*. 2012;7(2):52–73.
12. Igunnu ET, Chen GZ. Produced water treatment technologies. *Int J Low-Carbon Technol* [Internet]. 2014 Sep;9(3):157–77. Available from: <https://academic.oup.com/ijlct/article-lookup/doi/10.1093/ijlct/cts049>
13. Minambiente. Vertimientos y reuso de aguas residuales [Internet]. Available from: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso->

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales

14. Chen H, Tang H, Gong X, Wang J, Liu Y, Duan M, et al. Effect of partially hydrolyzed polyacrylamide on emulsification stability of wastewater produced from polymer flooding. *J Pet Sci Eng* [Internet]. 2015 Sep;133:431–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920410515300462>
15. Deng S, Bai R, Chen JP, Jiang Z, Yu G, Zhou F, et al. Produced water from polymer flooding process in crude oil extraction: characterization and treatment by a novel crossflow oil–water separator. *Sep Purif Technol* [Internet]. 2002 Dec;29(3):207–16. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586602000825>
16. Arango A. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Rev LASALLISTA Investig.* 2005;2.
17. Sarria V, Parra S, Rincon A, Pulgarin C, Torres RA. NUEVOS SISTEMAS ELECTROQUÍMICOS Y FOTOQUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DE BEBIDA. *Rev Colomb Química.* 2005;34(2).
18. ANH. Cadena productiva de los hidrocarburos [Internet]. 2008. Available from: <https://www.anh.gov.co/Ninos/Cartillas/cadenaProductivaHidrocarburos.pdf>
19. Schlumberger. Recuperación primaria [Internet]. 2021. Available from: https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/p/primary_recovery
20. Schlumberger. Recuperación secundaria [Internet]. 2021. Available from: https://glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/secondary_recovery
21. Cuéllar Franca RM, Azapagic A. Life Cycle Environmental Impacts of Carbon Capture, Storage, and Utilization. In: *Encyclopedia of Sustainable Technologies* [Internet]. Elsevier; 2017. p. 447–59. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012409548910123X>
22. Sun X, Zhang Y, Chen G, Gai Z. Application of Nanoparticles in Enhanced Oil Recovery: A Critical Review of Recent Progress. *Energies* [Internet]. 2017 Mar 11;10(3):345. Available from: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/3/345>
23. Gbadamosi AO, Junin R, Manan MA, Agi A, Yusuff AS. An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects. *Int Nano Lett* [Internet]. 2019 Sep 29;9(3):171–202. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s40089-019-0272-8>
24. Thomas A. Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) - a Practical Overview [Internet]. Romero-Zeron L, editor. InTech; 2016. Available from: <http://www.intechopen.com/books/chemical-enhanced-oil-recovery-ceor-a-practical-overview>
25. Massarweh O, Abushaikha AS. The use of surfactants in enhanced oil recovery: A review of recent advances. *Energy Reports* [Internet]. 2020 Nov;6:3150–78. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484720314347>

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

26. G.Speight J. Introduction to Enhanced Recovery Methods for Heavy Oil and Tar Sands (Second Edition). 2016. 253–322 p.
27. Druetta P, Raffa P, Picchioni F. Chemical enhanced oil recovery and the role of chemical product design. *Appl Energy* [Internet]. 2019 Oct;252:113480. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261919311547>
28. NapaSan. Primary, Secondary, & Tertiary Treatment [Internet]. Available from: <https://www.napas.com/179/Primary-Secondary-Tertiary-Treatment>
29. Kumar A. Wastewater Treatment Processes [Internet]. 2016. Available from: https://web.iitd.ac.in/~arunku/files/CVL100_Y16/LecSep1220.pdf
30. Niño C. Evaluación y comparación de las buenas prácticas y nuevas tecnologías en el manejo de aguas residuales en la planta de tratamiento de La Calera - Colombia y Juan Diaz - Panamá. 2018.
31. Carvajal J. Fotocatálisis heterogénea para el abatimiento de tensoactivos aniónicos en aguas residuales. *Prod + Limpia*. 2011;6(2).
32. Antoniadou M, Bouras P, Strataki N, Lianos P. Hydrogen and electricity generation by photoelectrochemical decomposition of ethanol over nanocrystalline titania. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 2008 Oct;33(19):5045–51. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319908008069>
33. Antoniadou M, Lianos P. Near Ultraviolet and Visible light photoelectrochemical degradation of organic substances producing electricity and hydrogen. *J Photochem Photobiol A Chem* [Internet]. 2009 Apr;204(1):69–74. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1010603009000811>
34. Antoniadou M, Lianos P. Production of electricity by photoelectrochemical oxidation of ethanol in a PhotoFuelCell. *Appl Catal B Environ* [Internet]. 2010 Aug;99(1–2):307–13. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926337310002870>
35. Jaramillo-Gutiérrez MI, Rivero EP, Cruz-Díaz MR, Niño-Gómez ME, Pedraza-Avella JA. Photoelectrocatalytic hydrogen production from oilfield-produced wastewater in a filter-press reactor using TiO₂-based photoanodes. *Catal Today* [Internet]. 2016 May;266:17–26. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920586115007658>
36. Cao C-Y, Zhao Y-H, Zhou Y-J. A study on oxidative degradation of polyacrylamide in wastewater with UV/FENTON/C₄H₄O₆ 2-. *Int J Green Energy* [Internet]. 2016 Jan 2;13(1):80–4. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15435075.2014.910778>
37. Huang H, Xu Y, Feng Q, Leung DY. Low temperature catalytic oxidation of volatile organic compounds: a review. *Catal Sci Technol* [Internet]. 2015;5(5):2649–69. Available from: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C4CY01733A>
38. Hakizimana JN, Gourich B, Chafi M, Stiriba Y, Vial C, Drogui P, et al.

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

- Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination* [Internet]. 2017 Feb;404:1–21. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916416315971>
39. Garcia-Segura S, Eiband MMSG, de Melo JV, Martínez-Huitle CA. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *J Electroanal Chem* [Internet]. 2017 Sep;801:267–99. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1572665717305337>
40. Najamudin KE, Halim NH, Salleh IK, Chai Ching Hsia I, Yusof MY, Sedaralit MF. Chemical EOR Produced Water Management at Malay Basin Field. In: *All Days* [Internet]. OTC; 2014. Available from: <https://onepetro.org/OTCASIA/proceedings/14OTCA/All-14OTCA/Kuala Lumpur, Malaysia/173080>

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización fisicoquímica del campo petrolífero.

| Fecha | Pozo | Corte de agua % | pH/T°C | Cond (ms/cm) | Alcalinidad (HCO ₃ ⁻) | Cloruros ppm | Fe ppm | Ca ⁺² ppm | Conc. Surf. (ppm) | Conc. Polímero (ppm) |
|------------|--------|--|------------|--------------|--|--------------|--------|----------------------|-------------------|----------------------|
| 23/11/2017 | SF-4 | 99,2 | 7.15 @27.9 | 14,14 | 1830 | 6007 | NR | 460.6 | 1.9 | 102 |
| 23/11/2017 | SF-24 | 88,3 | 7.62 @27.2 | 14,33 | 2745 | 5606 | NR | 228.4 | 3.5 | 75.5 |
| 23/11/2017 | SF-40 | 96,8 | 7.01 @27.1 | 14,41 | 1525 | 6407 | NR | 400 | ND | ND |
| 23/11/2017 | SF-93 | FUERA DE SERVICIO POR RECOMENDACIÓN DE YAC MIENTOS | | | | | | | | |
| 23/11/2017 | SF-139 | FUERA DE SERVICIO | | | | | | | | |
| 23/11/2017 | SF-171 | WORKOVER | | | | | | | | |
| 23/11/2002 | SF-185 | 96,8 | 8.99 @26.3 | 11,32 | 1500 | 5121 | NR | 56 | 48 | 402 |
| 23/11/2017 | SF-188 | 98.0 | 9.54 @26.1 | 9,15 | 2500 | 4920 | NR | ND | 402 | 488 |

NR: No realizado, ND: No detectado

| Fecha | Pozo | Corte de agua % | pH/T* | Cond (ms/cm) | Alcalinidad HCO ₃ ⁻ | Cloruros | Fe | Ca ⁺² | Conc. Surf. (ppm) | Conc. Polímero (ppm) |
|------------|--------|-------------------|------------|--------------|---|----------|----|------------------|-------------------|----------------------|
| 24/11/2017 | SF-14 | FUERA DE SERVICIO | | | | | | | | |
| 24/11/2017 | SF-94 | 97.5 | 7.78 @26 | 14.61 | 2319 | 4970 | NR | 293 | 2.83 | 97.5 |
| 24/11/2017 | SF-123 | FUERA DE SERVICIO | | | | | | | | |
| 24/11/2017 | SF-147 | 97 | 7.42 @25.9 | 14.88 | 1278 | 5112 | NR | 543 | ND | ND |

NR: No realizado, ND: No detectado

| Fecha | Pozo | Corte de agua % | pH/TC* | Cond (ms/cm) | Alcalinidad (HCO ₃ ⁻) | Cl- | Fe | Ca ⁺² | Conc. Surf. (ppm) | Conc. Polim. (ppm) |
|------------|--------|-------------------|------------|--------------|--|------|----|------------------|-------------------|--------------------|
| 24/11/2017 | SF-90 | 98.5 | 7.56 @25.9 | 14.15 | 1576 | 4586 | NR | 431 | ND | ND |
| 24/11/2017 | SF-91 | FUERA DE SERVICIO | | | | | | | | |
| 24/11/2017 | SF-124 | SOLO GAS | | | | | | | | |
| 24/11/2017 | SF-130 | 89.5 | 7.11 @25.9 | 15.72 | 1398 | 5396 | NR | 522 | 3.5 | 9.6 |
| 24/11/2017 | SF-167 | FUERA DE SERVICIO | | | | | | | | |
| 24/11/2017 | SF-186 | 91.4 | 7.17 @25.8 | 14.32 | 1526 | 4970 | NR | 320 | ND | ND |

NR: No realizado, ND: No detectado

| Fecha | Punto de muestreo | pH/T* | Cond (ms/cm) | Cloruros | T [NTU] | G&A | CO ₂ | O ₂ | Fe | Ca ⁺² | Conc. Surf. (ppm) | Conc. Polim. (ppm) |
|------------|-------------------|-------------|--------------|----------|---------|-----|-----------------|----------------|----|------------------|-------------------|--------------------|
| 23/11/2017 | GB2 | 6.91 @ 30.4 | 13.71 | 5578 | 520 | 342 | 160 | ND | ND | 142 | 3.5 | 157 |
| 23/11/2017 | Skim Tank 3000 | 6.97 @ 27.2 | 13.57 | 5506 | 598 | 302 | 155 | ND | 4 | 139 | 3.4 | 153 |
| 23/11/2017 | GB1 | 6.73 @ 27.3 | 15.01 | 5017 | 85 | 74 | 172 | ND | ND | 428.3 | 1.5 | 40.1 |
| 23/11/2017 | Skim Tank 5000 | 6.75 @ 27.5 | 15.66 | 4877 | 75 | 70 | 150 | ND | ND | 430.5 | 1.2 | 30.3 |

ND: No detectado

| Pozo | [Na+] mg/L | [Ca++] mg/L | [Mg++] mg/L | [Ba++] mg/L | [Cl-] mg/L | [SO4-] mg/L | [CO3-] mg/L | [HCO3-] mg/L | [Na+] me/L | [Ca++] me/L | [Mg++] me/L | [Ba++] me/L | [Cl-] me/L | [SO4-] me/L | [CO3-] me/L | [HCO3-] me/L |
|-------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| WFRANCISCO | 2799 | 452 | 66.71 | 42.9 | 4873 | 4 | 0 | 1159 | 12169565 | 22.6 | 5.490535 | 0.624727 | 137.46121 | 0.0833333 | 0 | 19 |
| WFRANCISCO | 2682 | 828 | 131 | 78.98 | 5268 | 4 | 0 | 1189 | 116,6087 | 41.4 | 10.781893 | 1.1501383 | 148.60367 | 0.0833333 | 0 | 19,491803 |
| WFRANCISCO1 | 2875 | 385 | 62.09 | 41.24 | 5419 | 4 | 0 | 1128.5 | 125 | 19.25 | 5.1102881 | 0.6005534 | 152.86319 | 0.0833333 | 0 | 18.5 |
| WFRANCISCO1 | 2689 | 470 | 67.55 | 43.49 | 4693 | 4 | 0 | 1220 | 116,31904 | 23.5 | 5.5596708 | 0.6333188 | 132.38364 | 0.0833333 | 0 | 20 |
| WFRANCISCO | 2943 | 463 | 65.27 | 41.52 | 5278 | 4 | 0 | 1183.5 | 123,6087 | 23.15 | 5.3720165 | 0.6046308 | 148.82394 | 0.0833333 | 0 | 19.5 |
| WFRANCISCO1 | 2966 | 540 | 67.83 | 42.75 | 5270 | 4 | 0 | 1159 | 128,95952 | 27 | 5.5962551 | 0.6225426 | 148.66008 | 0.0833333 | 0 | 19 |
| WFRANCISCO1 | 2813 | 459 | 67.06 | 42.11 | 4648 | 4 | 0 | 1183.5 | 122,30435 | 22.35 | 5.5193416 | 0.6132227 | 131.11425 | 0.0833333 | 0 | 19.5 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Pozo | [Na+] mg/L | [Ca++] mg/L | [Mg++] mg/L | [Ba++] mg/L | [Cl-] mg/L | [SO4-] mg/L | [CO3-] mg/L | [HCO3-] mg/L | [Na+] me/L | [Ca++] me/L | [Mg++] me/L | [Ba++] me/L | [Cl-] me/L | [SO4-] me/L | [CO3-] me/L | [HCO3-] me/L |
|------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| WFRANCISCO | 2682 | 828 | 131 | 78.98 | 5268 | 4 | 0 | 1189 | 116,6087 | 41.4 | 10.781893 | 1.1501383 | 148.60367 | 0.0833333 | 0 | 19,491803 |
| WFRANCISCO | 0 | 0 | 0 | 0 | 4430 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 124.96474 | 0 | 0 | 0 |
| WFRANCISCO | 0 | 0 | 0 | 0 | 4450 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 125,52891 | 0 | 0 | 0 |

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Anexo 2. Interfaz general herramienta computacional

UI Figure

INICIO INTRODUCCIÓN EQUIPOS TRATAMIENTO TRAT PRIM TRAT SEC TRAT TER

AGUAS DE PRODUCCIÓN

Las aguas de producción son las aguas que retornan hacia la superficie a través de un pozo de petróleo o gas. Se componen del agua de la formación más un porcentaje del agua inyectada en la formación como parte del proceso de estimulación por fractura o durante las operaciones de recobro mejorado.

Las aguas de producción son generalmente consideradas como un residuo, pero la industria petrolera está comenzando a considerarla como una corriente valorizable que puede generar ganancias potenciales.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

Las aguas de producción son una mezcla de varios productos en diferentes proporciones que hace que sus propiedades físicas y químicas varíen considerablemente dependiendo de la localización geográfica del campo, la formación geológica con la cual el agua ha estado en contacto desde hace miles de años y el tipo de hidrocarburo que se está produciendo.

Los principales componentes del agua de producción son los siguientes:

- Grasas y aceites (libres, dispersos, emulsionados).
- Sólidos suspendidos.
- Sólidos disueltos.
- Compuestos orgánicos disueltos. Benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos y los fenoles.
- Aditivos químicos usados durante las actividades de



UI Figure

INTRODUCCIÓN EQUIPOS TRATAMIENTO TRAT PRIM TRAT SEC TRAT TERC REGI

PRETRATAMIENTO

Los pretratamientos se aplican cuando el contenido de grasas y aceites, así como de sólidos suspendidos es considerable. En este caso siempre es deseable instalar un equipo de separación por gravedad, para reducir la carga de contaminantes de tamaño de gotas superiores a 150 micras. Posteriormente se aplican unidades para remover tamaños de gota inferiores a la mencionada. Los equipos comúnmente usados para la fase de pretratamiento son:

SKIMMER (TANQUE DESNATADOR) SEPARADOR API

SEPARADOR API

Los API son dispositivos de cámaras múltiples diseñados para remover altas cargas de aceites y sólidos en suspensión de una corriente. Suelen tener tres compartimentos, el primero es el de carga de fluido, el segundo el de separación de aceites y el tercero el de salida del efluente. Los separadores API generalmente se dimensionan para separar partícula de 150 μm de tamaño y tamaños mas grandes.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN SEPARADOR API

- Simplicidad de diseño.
- Bajo mantenimiento.
- Resistencia al taponamiento con sólidos.
- Requieren altas extensiones de terreno para su implementación eficiente.



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

UI Figure

INTRODUCCIÓN EQUIPOS TRATAMIENTO TRAT PRIM TRAT SEC TRAT TERC REGU

TRATAMIENTO PRIMARIO

Los equipos comunmente utilizados durante la etapa de tratamiento primario de cualquier agua de producción son:

SEPARADOR CPI
 UNIDADES DE MICROFLOTACIÓN
 UNIDADES DE FLOTACIÓN GAS DISUELTO
 UNIDADES DE FILTRACIÓN

UNIDADES DE MICROFLOTACIÓN

Las unidades de flotación han mostrado ser muy efectivas para remover emulsiones O/W así como sólidos suspendidos. El proceso implica inyección de burbujas a la fase del agua las cuales se adhieren a las gotas de aceite. El gas mas utilizado para aguas de producción es el metano.

CARACTERÍSTICAS DE MICROFLOTACIÓN

- Bajo consumo energético (< 1 hp / 1.000 BPD).
- Eficiencia hasta del 99%.
- Generación de microburbujas de 10 a 30 micras.
- Sistema de autolimpieza.
- No necesita sistemas de compresión de gas.
- Usa gas a baja presión.
- Mínimo consumo de gas.
- Bajo consumo de aditivos.



UI Figure

INTRODUCCIÓN EQUIPOS TRATAMIENTO TRAT PRIM TRAT SEC TRAT TERC REGU

TRATAMIENTO SECUNDARIO

El objetivo de emplear métodos de tratamientos secundarios (tratamientos biológicos anaerobios y aerobios) en las aguas de producción, es reducir el nivel de contaminación de los efluentes (DBO, DQO, fenoles, etc) a los límites permisibles para la descarga de agua en cuerpos de aguas superficiales. Cabe destacar, que esta opción debería ser la última opción considerada, sólo si no hay otra opción disponible.

LODOS ACTIVADOS
 BIORREACTOR DE MEMBRANA
 LAGUNA FACULTATIVA

LAGUNA FACULTATIVA

Las lagunas facultativas son la variación más importante en la depuración de aguas residuales en este tipo de tratamiento. Una laguna facultativa típicamente maneja cargas orgánicas entre 55 y 200 Kg DBO/día por hectárea de terreno, con un tiempo de retención entre 5 y 30 días. La profundidad de la laguna es de 1.2 a 2.5 metros.

En este tipo de lagunas facultativas se tienen varias capas o zonas en las cuales se tienen condiciones aerobias, facultativas y anaerobias.

Las condiciones aerobias que existen en la parte superior de una laguna facultativa se deben a la acción conjunta del viento y de la actividad fotosintética que se presenta en el cuerpo de agua. Los nutrientes que se hallan presentes en las aguas residuales, principalmente nitrógeno y fósforo, favorecen la eutroficación del acuífero. Las algas formadas en la superficie al efectuar el proceso de fotosíntesis y producir más biomasa, requieren de bióxido de carbono del aire o del medio circundante para la síntesis de carbohidratos y proteínas, al mismo tiempo liberan



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

UI Figure

INTRODUCCIÓN EQUIPOS TRATAMIENTO TRAT PRIM TRAT SEC TRAT TERC REGU

TRATAMIENTO TERCIARIO

La finalidad de los tratamientos terciarios es eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como por ejemplo, los nutrientes, fósforo, nitrógeno, cloro y sodio.

MEMBRANA ULTRAFILTRACIÓN
 MEMBRANA NANOFILTRACIÓN
 MEMBRANA ÓSMOSIS INVERSA

MEMBRANA ÓSMOSIS INVERSA

La nanofiltración (NF), también llamada ósmosis inversa a baja presión o desdurecimiento por membranas, relaciona la OI y la UF en términos de selectividad de la membrana, la cual está diseñada para eliminar iones polivalentes (calcio y magnesio) en operaciones de ablandamiento

Más recientemente, la NF ha sido empleada para eliminar o separar la materia orgánica. En esta técnica los iones monovalentes son rechazados débilmente por la membrana. Esto explica por que la NF permite una contrapresión osmótica mucho menor. En consecuencia la presión de trabajo en la NF es normalmente de 0,5 MPa a 1,5 MPa.



UI Figure

EQUIPOS TRATAMIENTO TRAT PRIM TRAT SEC TRAT TERC REGULACIONES PLAN

REGULACIONES

VERTIMIENTO - INYECCIÓN - RIEGO

VERTIMIENTO
 INYECCIÓN
 RIEGO

| | Valor máximo |
|-----------------|--------------|
| GyA [mg/L] | 15 |
| SST [mg/L] | 50 |
| DQO [mg/L] | 180 |
| DBO [mg/L] | 60 |
| Fenoles [mg/L] | 0.2000 |
| Cloruros [mg/L] | 1200 |

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

UI Figure

TRAT SEC | TRAT TERC | REGULACIONES | PLANTEARTREN | **PRETRATAMIENTO** | TRAT

Universidad Industrial de Santander

PRETRATAMIENTO

Es necesario aplicar un pretratamiento, cuando se presenta un contenido considerable de grasas y aceites libres, así como sólidos suspendidos.

SKIMMER

SEPARADOR API

La función principal del SKIMMER es eliminar grandes cantidades de aceite libre antes de posteriores tratamientos.

- Capacidad de remover arenas y sólidos.
- Alcanzan eficiencias del 90%.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Tiempo de residencia entre 10-30 min.
- Bajo costo de operación.
- No tienen partes móviles.



Siguiente

UI Figure

PLANTEARTREN | PRETRATAMIENTO | **TRATAMIENTO PRIMARIO** | TRATAMIENTO SECUNDARIO

Universidad Industrial de Santander

TRATAMIENTO PRIMARIO

La finalidad del tratamiento primario es reducir lo máximo posible las concentraciones de grasas y aceites y sólidos suspendidos presentes en el agua de producción.

SEPARADOR CPI

El separador CPI es una opción efectiva para la separación de aceite libre y disperso y sólidos suspendidos en bajas concentraciones del agua de producción.

- Alcanzan eficiencias del 90%.
- Remueve gotas de aceite libre entre 30-60 micras o tamaños mas grandes.
- Bajo costo de instalación y mantenimiento.



Siguiente

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

UI Figure

PLANTEARTREN PRETRATAMIENTO TRATAMIENTO PRIMARIO TRATAMIENTO SECUNDARIO

SELECCIÓN DEL USO DEL AGUA A TRATAR

A partir de las etapas simuladas, se han obtenido las siguientes concentraciones.

Grasas y aceites [mg/L] 375 Sólidos suspendidos [mg/L] 250

Seleccione el uso que le dará al agua posterior al proceso de tratamiento, tenga en cuenta que dependiendo de esto se pueden necesitar más o menos equipos

Vertimiento Reinyección Riego

GyA = 15 mg/L
SST = 50 mg/L

GyA < 5 mg/L
SST < 5 mg/L

Cultivos
Fenoles = 1,2 mg/L

UI Figure

TRATAMIENTO PRIMARIO TRATAMIENTO SECUNDARIO TRATAMIENTO TERCIARIO TRATAM

TRATAMIENTO TERCIARIO

La finalidad de los tratamientos terciarios es eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como por ejemplo, los nutrientes, fósforo, nitrógeno, cloro y sodio.

La ultrafiltración es un sistema de filtración tangencial por membranas, dichos sistemas se componen de una bomba, que impulsa el líquido a tratar a cierta presión, creando un flujo paralelo a la membrana filtrante.

- Eliminación de color, olor, virus y materia orgánica coloidal.
- Eficiente para la eliminación de hidrocarburos, sólidos suspendidos y componentes disueltos del agua de producción.
- Operan a baja presión (1- 30 psi).

MEMBRANA ULTRAFILTRACIÓN



Siguiente

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

UI Figure

TRATAMIENTO SECUNDARIO TRATAMIENTO TERCIARIO **TRATAMIENTO ELECTROQUIMICO**

Universidad Industrial de Santander

TRATAMIENTO ELECTROQUIMICO

La finalidad del tratamiento electroquímico es reducir lo máximo posible el contenido de químicos utilizados durante el proceso de inyección de recobro químico, siendo estos específicamente surfactantes y polímeros

- Generación de producto de valor agregado como el Hidrógeno.
- Posibilidad de usar radiación solar para reducir el consumo de energía.
- Solo se requiere una unidad de proceso debido a que no es necesario recuperar el catalizador.



REACTOR FOTOELECTROCATALITICO TUBULAR

Siguiente

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA

Anexo 3. Datos generales CAPEX-OPEX

| EQUIPOS | PRECIO [USD] | PRECIO [COP] |
|--|-------------------------------|---------------------|
| Separador API | \$ 287.829 | \$ 1.093.749.000 |
| Tanque Desnatador (SKIMMER) | \$ 2.528.597 | \$ 9.608.669.444 |
| Separador CPI | \$ 499.860 | \$ 1.899.468.000 |
| Unidad de flotación de gas inducido (IGF) | \$ 674.860 | \$ 2.564.468.000 |
| Unidad de microflotación | \$ 978.000 | \$ 3.716.400.000 |
| Filtro de cascara de nuez | \$ 599.860 | \$ 2.279.468.000 |
| Unidad de ultrafiltración | \$ 177.103 | \$ 672.990.222 |
| Unidad de ósmosis inversa | \$ 785.169 | \$ 2.983.642.732 |
| Unidad de electrocoagulación | \$ 2.010 | \$ 7.638.000 |
| Reactor fotoelectroquímico tubular | \$ 2.010 | \$ 7.638.000 |
| SERVICIO | PRECIO | |
| Energía | 345,73 [COP/kWh] | |
| Agua potable | 4204,85 [COP/m ³] | |
| EQUIPOS | CONSUMO ENERGÍA [kW] | |
| Unidad electrocoagulación | 0,034125 | |
| Bomba de lodos | 410,135 | |
| Bomba membranas | 160 | |
| Bomba agua tratada | 149,14 | |