

**“UNIVERSIDAD DE MATANZAS”
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



Obtención de un modelo para la simulación del tratamiento térmico de crudo en el tanque 8 perteneciente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP - Centro).

Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico.

Autor: Daniel Alejandro Matamoro Pérez.

Tutor: Ing. Dariel Medina Rodríguez.

Matanzas, Cuba, 2021

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Daniel Alejandro Matamoro Pérez, declaro ser el único autor de la presente investigación, realizada en la Sede Universitaria de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico, y autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada Institución como material de consulta. Para que así conste, firma:

Nombre y Apellidos

Firma

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Calificación

Ciudad, fecha

“El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de Ciencia”

Fidel Castro Ruz.

AGRADECIMIENTOS

- ✓ A mi familia por el apoyo que han brindado a lo largo de mi formación profesional.
- ✓ A mi novia y amiga Cristell, por compartir nuestra vida, por tener la capacidad de soportarme y estar siempre presente para mí.
- ✓ A mis profesores, de los cuales soy fruto y constituyen guía y ejemplo.
- ✓ A mis compañeros de grupo, con los que compartí esta importante etapa de la vida.
- ✓ Y especialmente a mi tutor, Dariel Medina Rodríguez, por el esfuerzo y el trabajo realizado en condiciones excepcionales.

Resumen

El presente trabajo de investigación se realiza en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP–Centro), ubicada en la provincia de Matanzas, con el objetivo de obtener un modelo para la descripción del tratamiento térmico en el tanque 8, que opera con régimen dinámico. Para determinar el perfil de temperatura en el crudo, se realiza un balance microscópico de energía calorífica, donde solo se considera el mecanismo de conducción en el interior del tanque, así como las pérdidas de calor a través de las paredes y la tapa del mismo. Además, se muestra la metodología para la solución del modelo mediante el *software* Matlab. Los resultados obtenidos en la investigación proporcionan una herramienta a la empresa para describir los efectos en la operación del tanque 8 al modificar la altura de los mazos de serpentines.

Abstract

The research work is carried out at the Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP - Centro), located in Matanzas province, with the aim of obtaining a model for the description of the heat treatment in tank 8, which operates with dynamic regime. To determine the temperature profile in the crude oil, a microscopic heat energy balance is carried out, where only the conduction mechanism inside the tank is considered, as well as the heat losses through the walls and lid. In addition, the methodology for the solution of the model through Matlab software is shown. The results obtained in the investigation provide a tool for the company to describe the effects on the operation of tank 8 by modifying the height of the coil bundles.

Nomenclatura

A menos que se especifique en el trabajo, la nomenclatura utilizada se indica a continuación:

V : Velocidad de sedimentación (m/s).

g : Aceleración debido a la gravedad (m/s^2).

d : Diámetro de la partícula (m).

ρ_d : Densidad de las partículas dispersas (kg/m^3).

ρ_f : Densidad del fluido (kg/m^3).

μ_f : Viscosidad absoluta del fluido ($Pa \cdot s$).

q_x'' : Densidad de flujo de calor (W/m^2).

k : Conductividad térmica k y se expresa en $W/m \cdot K$.

x : Sentido en el que se transmite el calor.

dT : Diferencial de temperatura entre dos puntos.

C_p : Capacidad calorífica a presión constante ($J/kg \cdot ^\circ C$).

D : Diámetro del tanque (m).

H : Altura del tanque (m).

R : Radio del tanque (m).

Pr : Número de Prandtl (adimensional).

Re : Número de Reynolds (adimensional).

T : Temperatura ($^\circ C$).

T_v : Temperatura del vapor ($^\circ C$).

T_∞ : Temperatura de aproximación del aire ($^\circ C$).

T_s : Temperatura de la superficie ($^\circ C$).

T_w : Temperatura media de la superficie exterior de la pared del tanque ($^{\circ}\text{C}$).

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tanque ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$).

h_{or} : Coeficiente combinado de transferencia de calor por convección y radiación en el exterior del tanque referido a la pared ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$).

h_0 : Coeficiente de transferencia de calor en el exterior del tanque ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$).

h_r : Coeficiente ficticio de transferencia de calor por radiación ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$).

h_T : Coeficiente de transferencia de calor en el exterior del tanque sobre la tapa ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$).

k : Conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$).

q : Generación de energía calorífica de distintas fuentes (W/m^3).

t : tiempo de calentamiento (s).

v : velocidad del aire (m/s).

ϵ : Emisividad de la pared del tanque.

σ : Constante de Stefan – Boltzman ($5.67004\cdot 10^{-8}\text{W}/\text{m}^2\cdot \text{K}^4$).

ρ : Densidad (kg/m^3).

μ : Viscosidad ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

r, θ, z : Coordenadas cilíndricas (m, rad, m).

Subíndices:

a: referido al aire.

s: referido al serpentín.

v: referido al vapor.

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico.	3
1.1. Caracterización del petróleo crudo.....	3
1.1.1. Tratamiento de petróleo crudo.....	3
1.2. Mecanismos de transporte de cantidad de movimiento y calor.....	6
1.2.1. Transporte de cantidad de movimiento. Ley de Stokes.....	6
1.2.2. Transporte de calor. Conducción, convección y radiación.	7
1.2.3. Estimación de las propiedades del crudo.	9
1.3. Métodos numéricos como herramienta en la solución de modelos.....	11
1.3.1. Método de elementos finitos.....	11
1.3.2. Matlab como <i>software</i> de simulación. PDE-Toolbox.	12
1.4. Conclusiones parciales.	12
Capítulo 2: Materiales y métodos.....	14
2.1 Descripción del proceso tecnológico.....	14
2.1.1 Descripción del caso base.....	16
2.2 Formulación del modelo matemático.	16
2.2.1 Identificación del modelo físico.....	16
2.2.2 Balance de energía calorífica.	17
2.2.3 Condiciones iniciales y de frontera.	18
2.2.4 Estimación de las propiedades físicas del crudo.	22
2.3 Simulación mediante el <i>software</i> Matlab.....	22
2.4 Validación del modelo.	24
Conclusiones.....	25
Recomendaciones.....	26
Bibliografía.	27
Anexos	33

Introducción.

El empleo del petróleo en Cuba, como en el mundo, es de importancia para el crecimiento de los sectores productivos y la economía. Se utiliza para la generación eléctrica en las termoeléctricas nacionales, en la fabricación de cemento y en centrales azucareros.

La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro), perteneciente al grupo CUPET, se fundó en el año 1976. Esta empresa se encuentra ubicada en la Finca “La Cachurra”, poblado de Guásimas, municipio de Cárdenas. Alcanza niveles de producción anual por encima de un millón de toneladas de crudo y 438 millones de metros cúbicos de gas natural acompañante.

El petróleo, luego de su extracción, debe ser sometido a un tratamiento para eliminar una serie de impurezas hasta alcanzar los parámetros establecidos para su comercialización. Dentro de estas impurezas destacan el agua y las sales, las cuales provocan serios problemas de corrosión, deposiciones indeseables y otros efectos que inciden negativamente en la eficiencia de las instalaciones. El agua en el petróleo crudo hace que el proceso de refinación sea costoso e incluso pueden causar un proceso de refinado inestable. Sales, como el sodio, los cloruros de magnesio y calcio en el petróleo crudo pueden corroer los equipos, obstruir las tuberías y envenenar los catalizadores.

Debido a la alta corrosión que produce el agua decantada sobre los mazos de serpentines, el tiempo de operación de los tanques de tratamiento se reduce, lo que incrementa los costos por concepto de mantenimiento. Por tal motivo, se ha propuesto aumentar la altura de los serpentines y de esta forma disminuir el contacto con el agua y aumentar el tiempo de operación. Sin embargo, no se conoce el efecto que esta alternativa produce sobre el tiempo de calentamiento y el consumo de vapor, los cuales podrían aumentar de forma tal, que no resulte factible aplicar dicha propuesta desde el punto de vista técnico y económico. Por tanto, resulta necesario realizar un estudio preliminar, sobre el efecto que produce la variación de la altura de los mazos de serpentines sobre la operación de los

tanques, específicamente en el tanque 8. Si se utiliza un modelo de simulación adecuado, será posible determinar la influencia de la variación de la altura de los mazos de serpentines sobre la operación del tanque 8.

Por lo antes expuesto se plantea el **problema científico** de investigación:

¿Qué modelo de simulación será adecuado para describir el tratamiento térmico del crudo en el tanque 8 perteneciente a la EPEP - Centro?

Como posible solución a este problema se plantea la siguiente **hipótesis** de trabajo: Si se realiza un balance de energía con nivel de descripción microscópico se podrá obtener un modelo de simulación adecuado para la representación del tratamiento térmico del crudo en el tanque 8 perteneciente a la EPEP - Centro.

Objetivo general:

Formular un modelo para la simulación del tratamiento térmico de crudo en el tanque 8 perteneciente a la EPEP - Centro.

Objetivos específicos:

1. Describir el proceso de producción en la empresa y la operación en el tanque 8.
2. Establecer el modelo físico del tanque 8.
3. Realizar la formulación del modelo a partir de un balance microscópico de energía en el interior del tanque.
4. Describir la metodología para validar el modelo de simulación.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico.

En este capítulo se estudia la bibliografía relacionada con el tema objeto de estudio del presente trabajo, tratándose como temas fundamentales: la caracterización del petróleo crudo, los mecanismos de transporte de cantidad de movimiento y calor, la estimación de las propiedades del crudo, la aplicación de métodos numéricos en la solución de modelos y los *software* de simulación utilizados en la solución de problemas ingenieriles. Al final del capítulo se emiten conclusiones del estudio bibliográfico que permiten continuar la investigación.

1.1. Caracterización del petróleo crudo.

El petróleo es un líquido oleoso bituminoso de origen natural compuesto por una mezcla variable de hidrocarburos, aunque también suelen contener unos pocos compuestos de azufre y de oxígeno. También recibe los nombres de petróleo crudo, crudo petrolífero o simplemente "crudo". El petróleo es un hidrocarburo de origen fósil, fruto de depósitos en grandes cantidades de restos de plantas y microorganismos en fondos anóxicos del pasado geológico; que sujetos a distintos procesos físicos y químicos fueron posteriormente enterrados bajo pesadas capas de sedimentos. (McCaffrey *et al.*, 2017; Osuji *et al.*, 2005).

La industria petrolera clasifica el petróleo crudo según su lugar de origen y también con base a su densidad o gravedad API. Los refinadores también lo clasifican como crudo dulce o ácido, en relación al contenido de azufre que presente, ya que se necesitarán más operaciones de refinamiento a mayor contenido de azufre para cumplir las especificaciones de los productos refinados. (Ancheyta *et al.*, 2007).

1.1.1. Tratamiento de petróleo crudo.

La producción de petróleo crudo natural suele ir acompañada de la formación de emulsiones estables. El agua emulsionada debe ser eliminada del petróleo crudo antes del transporte y refinación. La presencia de agua en el petróleo provoca problemas operativos como la corrosión de las tuberías. El uso de los productos químicos como demulsificantes junto con el tratamiento térmico es uno de los

mejores métodos para facilitar la deshidratación del crudo (Alvarado *et al.*, 2019; Delgado-Linares *et al.*, 2016; Farrokhi *et al.*, 2017).

El porcentaje de agua y sedimentos (BSW) es un parámetro de suma importancia para determinar la calidad y el valor económico del petróleo crudo en el mercado internacional, por tanto, es necesario realizar un tratamiento de deshidratación y eliminación de impurezas antes de su comercialización. La adición de productos químicos demulsificantes es una de las diferentes opciones que existen como parte del tratamiento aplicado al petróleo crudo para resolver el problema de las emulsiones (Loayza, 2016).

La presencia de agua en el crudo es un inconveniente dada su inutilidad y valor. Además el agua es portadora de impurezas que generan incrustaciones y pérdidas de calor. Su presencia también incumple con las especificaciones requeridas para su transporte y venta (Lizana y Vásquez, 2016).

El mercado internacional exige que el agua en los crudos se debe eliminar a un nivel de menos de 0.5 % BSW. Por lo tanto, diferentes métodos, incluidos los tratamientos físicos y químicos, se han utilizado para separar el agua del petróleo a través de la demulsificación, proceso de romper emulsiones para separar el agua del petróleo (Fan, *et al.*, 2009).

En Cuba los parámetros de calidad de venta del petróleo crudo están definidos por la presencia de 2 % BSW, además de una viscosidad cinemática de $1,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s, la cual se alcanza con la adición de disolventes reductores de viscosidad (Rizo, 2018).

Un tratamiento efectivo de la emulsión agua-petróleo es esencial por razones económicas, ya que el objetivo es producir y entregar el volumen máximo de crudo, minimizando la cantidad de petróleo que se pierde con el vertido de agua y, por lo tanto, reducir los costos operativos (Rezende *et al.*, 2017).

✓ Métodos generales de separación.

Loayza (2016) resume de forma detallada y precisa los diferentes métodos de tratamiento y separación a los que se somete el crudo desde su extracción hasta su comercialización:

- Estabilización, que consiste en la eliminación de los gases disueltos en el crudo originan grandes presiones de vapor que aumentan el riesgo de explosión en el transporte.
- Eliminación de sólidos, etapa en la cual deben ser removidas las arenas bituminosas que se arrastran con el crudo debido a la presión de extracción.
- Desalación, proceso en el que se eliminan las sales inorgánicas asociadas al material orgánico.
- Deshidratación, proceso mediante el cual se separa el agua asociada con el crudo. El agua libre se separa fácilmente del crudo por acción de la gravedad. La otra parte del agua queda combinada con el crudo en forma de emulsión.
- Desemulsión, etapa que consiste en separar el agua contenida en el crudo en forma de emulsión.

Esta última es la etapa objeto de estudio, la cual se efectúa mediante un tratamiento termoquímico en la EPEP-Centro.

El método de tratamiento termoquímico, se basa en la adición de sustancias químicas desemulsionantes, que tienen la propiedad de debilitar la acción de las sustancias emulsificadoras naturales de las emulsiones agua-petróleo, favoreciendo la separación de las fases (EPEP-Centro, 2013).

La temperatura tiene un efecto muy fuerte en la estabilidad de la emulsión. Con un incremento de la temperatura aumenta la difusión de las gotas, disminuye la viscosidad de la fase externa o continua y la película interfacial, además se modifica la tensión superficial (Azcuy, 2005).

1.2. Mecanismos de transporte de cantidad de movimiento y calor.

Los fenómenos de transporte tienen lugar en aquellos procesos, conocidos también como procesos de transferencia, en los que se establece el movimiento de una propiedad en una o varias direcciones bajo la acción de una fuerza impulsora, a este movimiento de la propiedad se le denomina flujo (Kim y King, 2009).

Los fenómenos de transporte son consecuencia directa de la existencia de una situación de no equilibrio en el sistema. Se trata de una causa termodinámica relacionada con lo alejado que se encuentra el sistema del estado de equilibrio, lo que se conoce como fuerza impulsora del transporte. La tendencia natural del sistema a evolucionar hacia el estado de equilibrio será la consecuencia de que se produzca un transporte de materia, un transporte de energía o un transporte de cantidad de movimiento. La velocidad a la que se produzca este transporte ya no tendrá naturaleza termodinámica y dependerá de la naturaleza del medio y de las condiciones de flujo (Incropera, 2006).

El transporte de cualquier propiedad puede producirse por dos mecanismos distintos: molecular y turbulento (Kern, 1999).

El transporte molecular es lento, ordenado y permite un estudio teórico sencillo, por el contrario el transporte turbulento es rápido, desordenado y su estudio teórico presenta grandes dificultades, por lo que los problemas de transporte turbulento se resuelven en la actualidad desde el punto de vista macroscópico a partir de propiedades globales del sistema (White, 2001).

1.2.1. Transporte de cantidad de movimiento. Ley de Stokes.

El flujo de cantidad de movimiento en régimen de flujo laminar constituye el mecanismo típico de transporte de cantidad de movimiento y se describe matemáticamente por la Ley de Newton de la Viscosidad (White, 2001).

- Ley de Stokes

La sedimentación gravitatoria de partículas sólidas o líquidas presentes en una emulsión, está regida por la Ley de Stokes, que permite calcular la velocidad de sedimentación (Sellman y Mandewalkar, 2016):

$$V = \frac{gd^2(\rho_d - \rho_f)}{18\mu_f} \quad 1.1$$

La Ley de Stokes es válida solamente para definir la velocidad con que sedimenta una sola gota o partícula, moviéndose lentamente por efecto de la gravedad, sin interactuar con otras gotas. Los números de Reynolds en estos casos son menores que uno. Por lo tanto, ésta ley suministra solamente una idea semicuantitativa de la velocidad de sedimentación, pero permite determinar las variables involucradas y hallar las condiciones extremas (Morín, 2008).

1.2.2. Transporte de calor. Conducción, convección y radiación.

La transferencia de energía en forma de calor es muy común en muchos procesos químicos y está condicionada a una fuerza impulsora, la que se define como una diferencia de temperatura, por la cual el calor fluye de la región de alta temperatura a la de temperatura más baja (Geankoplis, 1998).

En general, el calor se transfiere por tres mecanismos distintos (Kern, 1999; Incropera, 2006):

- Por conducción, o transferencia de la energía desde una materia a una materia adyacente por contacto directo, sin mezcla o flujo de cualquier material.
- Por convección o transferencia de la energía por el mezclado íntimo de grupos de material.
- Por radiación, tal como las ondas de la luz, infrarrojas, ultravioleta y radio, que emanan desde un cuerpo caliente y se absorben por uno frío.

Según las características del sistema de flujo, la convección puede ser de dos formas:

- Convección forzada: Ocurre cuando el movimiento de fluido se debe a la acción de fuerzas externas tales como la gravedad o a una diferencia de presiones.
- Convección libre o natural: Tiene lugar cuando el fluido se mueve como consecuencia de los cambios de densidad que experimenta en las proximidades de las regiones calientes y frías del sistema.

Según Incropera, (2006) se puede determinar la influencia de cada tipo de convección en un sistema mediante la relación entre las fuerzas de empuje y las fuerzas inerciales. Esta relación de fuerzas se determina mediante la relación entre los números adimensionales Gr_L (número de Grashof) y Re_L (número de Reynolds). Los efectos combinados de la convección libre y forzada se deben considerar cuando $(Gr_L/Re_L^2) \approx 1$. En caso de satisfacer la desigualdad $Gr_L/Re_L^2 \ll 1$, los efectos de convección libre se pueden ignorar. En caso contrario, si $Gr_L/Re_L^2 \gg 1$, los efectos de convección forzada se pueden ignorar.

✓ Mecanismo de Conducción.

En el caso del fenómeno de conducción de calor, la ecuación o modelo que se utiliza para poder cuantificar la cantidad de energía que se trasfiere por unidad de tiempo se conoce como ley de Fourier (Lienhard, 2006).

Para una pared plana esta ecuación queda expresada como (Kern, 1999):

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad 1.2$$

- ✓ Mecanismos de convección.

La transferencia de calor por convección, sin importar la naturaleza, se puede describir según la ley de enfriamiento de Newton (Lienhard, 2006):

$$q_x'' = h (T_s - T_\infty) \quad 1.3$$

- ✓ Mecanismo de radiación.

Según Kern (1999), cuando la fuente de calor es pequeña en comparación con el medio que la rodea, es costumbre plantear la ecuación de calor de la forma:

$$\frac{Q}{A} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad 1.4$$

El mismo autor refiere que muchas veces es conveniente representar el efecto neto de la radiación en la misma forma empleada en la convección; es decir:

$$q_x'' = h_r (T_s^4 - T_\infty^4) \quad 1.5$$

1.2.3. Estimación de las propiedades del crudo.

Metodologías para la determinación de las propiedades del crudo:

- Análisis en laboratorio.

Este se basa en el conocimiento detallado de la composición del fluido. Estas propiedades se determinan experimentalmente, son caros y representan una pérdida de tiempo ya que no siempre están disponibles (El-hoshoudy, 2019 y Ramírez *et al.*, 2017).

- Correlaciones matemáticas.

Los valores de las propiedades físicas del petróleo, se calculan a partir de las ecuaciones definidas por modelos matemáticos empíricos, aplicables a las mezclas de petróleo crudo sometidos a tratamiento termofísico. Al ser el crudo una mezcla

de gran cantidad de hidrocarburos resulta complejo el cálculo mediante esta vía (Rizo, 2018).

- Estimación mediante *software*.

Se tienen, entre las aplicaciones con uso reciente, el uso de simuladores profesionales de propósito general para la industria química, entre ellos: Design, ChemCAD, HYSYM, ASPEN PLUS, PROSIM PLUS, SUPERPRO DESIGNER, PROII y en particular HYSYS y su equivalente, comúnmente empleado en la industria petrolera, Petro-SIM. (Basulto, 2017).

El *software* Petro-SIM utiliza como base a HYSYS, mantiene toda su interfaz e incorpora herramientas específicas para la industria petrolera.

Según Fontana *et al.* (2019) las características de Petro-SIM son:

- Aborda cada fase de la instalación y el ciclo de vida de los activos.
- Integra operaciones, procesos, tuberías y sistemas de servicios públicos en un solo entorno, incluidos modelos de clasificación y dimensionamiento altamente detallados.
- Diseñado para trabajar en tiempo real y monitorear el estado y la rentabilidad de la unidad.
- Contiene la infraestructura para coleccionar y administrar datos. Permite conexiones históricas para la validación, reconciliación y minería de datos.

Los componentes que no están disponibles en la biblioteca de este simulador se pueden definir en el *software* de simulación como componentes hipotéticos basados en las propiedades de los químicos. Para definir dichos componentes en la biblioteca de Petro-SIM, son importantes diferentes propiedades de los productos químicos como el peso molecular y el punto de ebullición. El *software* entonces estimará las otras propiedades, basadas en modelos de contribución grupal de UNIFAC (Samimi *et al.*, 2020). A mayor cantidad de propiedades disponibles la precisión de la predicción de las otras propiedades será mucho más exacta y confiable (Ng *et al.*, 2017).

1.3. Métodos numéricos como herramienta en la solución de modelos.

Los métodos numéricos son de gran importancia porque constituyen hoy en día en una herramienta fundamental para la solución de muchos problemas de las ciencias cuya solución exacta no es alcanzable y, es por tanto, necesario obtener una solución aproximada. Por otro lado, el desarrollo computacional actual, a través de *software* como Matlab, permite resolver rápidamente mediante la implementación de algoritmos numéricos recientes problemas que antes tenían una solución numérica poco factible, debido al tiempo que se requerirá para ello (Mañas y Pinta, 2018).

1.3.1. Método de elementos finitos.

El método de elementos finitos (*FEM*, por sus siglas en inglés) es una técnica numérica para hallar soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y a ecuaciones integrales. El método se basa en eliminar completamente la ecuación diferencial o bien en transformar la ecuación en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, que son resueltos mediante técnicas estándares como los métodos de Runge-Kutta (Kwon y Bang, 2018).

En la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales el principal reto es crear una ecuación que se aproxime la ecuación estudiada pero que sea numéricamente estable. El *FEM* es una buena opción para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales sobre dominios complejos, cuando los dominios cambian o cuando la precisión deseada no es igual en todo el dominio. El *FEM* ha sido aplicado exitosamente a diversos problemas de transferencia de calor (Kim y King, 2009).

Heinrich (2017) presenta una guía explicativa de los fundamentos básicos del método de elementos finitos de una manera clara, utilizando ejemplos completos, donde el primer caso es el concepto de transferencia de calor unidimensional.

1.3.2. Matlab como *software* de simulación. *PDE-Toolbox*.

Según The MathWorks (1996), en su guía de usuario, la caja de herramientas de ecuaciones diferenciales parciales (*PDE-Toolbox*) proporciona un entorno potente y flexible para el estudio y la solución de ecuaciones diferenciales parciales en dos dimensiones, espaciales y temporales. Las ecuaciones están discretizadas por el método de elementos finitos (*FEM*). La *PDE-Toolbox* está diseñada tanto para principiantes como para usuarios avanzados. El uso de *PDE-Toolbox* no requiere ningún conocimiento de las matemáticas detrás del *PDE*, los esquemas numéricos o Matlab. Los *PDE* implementados en la caja de herramientas se utilizan como modelo matemático para una amplia variedad de fenómenos en todas las ramas de la ingeniería y la ciencia. Los objetivos de *PDE-Toolbox* son proporcionarle herramientas para:

- Definir un problema de *PDE*, es decir, definir regiones 2-D, condiciones de contorno y coeficientes de *PDE*.
- Resolver numéricamente el problema *PDE*, es decir, generar mallas no estructuradas, discretizar las ecuaciones y producir una aproximación a la solución.
- Visualizar los resultados.

Con la ayuda de la caja de herramientas *PDE*, no se requiere programación y la interfaz gráfica de usuario (*GUI*) se ingresa directamente para resolver problemas de ingeniería reales. El análisis del ejemplo de conducción de calor de una fuente de calor puntual muestra que la caja de herramientas *PDE* es rápida y sencilla para resolver problemas generales (Li y Zhang, 2005).

1.4. Conclusiones parciales.

- La presencia de agua en el crudo, en forma de emulsión, es un parámetro negativo y dañino en las operaciones de producción y transporte de petróleo crudo.

- El tratamiento termoquímico es el principal método de deshidratación mediante la ruptura de la emulsión.
- El *software* Petro-SIM es el más recomendado para la estimación de propiedades del crudo y en el trabajo vinculado a la industria petrolera.
- El *software* Matlab contiene una caja de herramientas para la solución de ecuaciones diferenciales parciales (*PDE-Toolbox*), que tiene una interfaz gráfica y permite visualizar los resultados, por lo que es recomendado para la resolución y simulación del modelo.

Capítulo 2: Materiales y métodos.

En este capítulo se describe el proceso tecnológico, así como el caso base objeto de estudio. Además, se muestra de forma detallada la metodología para la obtención del modelo matemático y se explican las herramientas informáticas utilizadas.

2.1 Descripción del proceso tecnológico.

La Planta de Procesamiento de Crudo (PPC) tiene por objetivo la aplicación de un tratamiento termoquímico a los crudos provenientes de los pozos en producción, de forma tal que se eliminen las impurezas que acompañan al mismo hasta que alcancen los índices de calidad requeridos antes de su comercialización. La disposición de la planta se muestra en el anexo 1.

Antes de la entrada del petróleo a la planta, se le adiciona nafta como sustancia reductora de viscosidad, lo que garantiza una mejor transportación del crudo y favorece el tratamiento posterior del mismo.

El crudo se recibe desde los centros colectores o pozos aislados en producción, a través de oleoductos y de carros cisternas respectivamente. Para ello la planta cuenta con dos piscinas de recepción con una capacidad de 120 m³ comunicadas entre sí.

El crudo se calienta hasta 85 °C, con el fin de garantizar una mejor separación del gas en la segunda etapa de separación (SES) y posteriormente en el tanque 6, así como la continuidad del tratamiento termoquímico sobre la emulsión agua-petróleo.

La mezcla de gas y líquido entra a los separadores por un extremo donde parte del fluido de la mezcla es separada por la acción de la gravedad, puesto que las balas se encuentran a una altura de 17 m. El gas separado es vendido a ENERGAS que lo utiliza, después de hacer los tratamientos pertinentes, para la generación de energía eléctrica.

Luego el crudo pasa por gravedad hacia el tanque 6, con el objetivo de separar la mayor parte de gas que no se separa en la SES. Dicho tanque, consta con un

sistema de calentamiento y de una columna desgasificadora central en su interior por la cual entra el crudo.

Este gas pasa hacia un separador horizontal de arrastre (SHA) que posee el tanque 6 y se une a la corriente de gas que se separa en las balas, donde el flujo total es succionado con el compresor de baja instalado en la Planta de ENERGAS.

El crudo tratado es bombeado hacia los tanques de tratamiento estático en dependencia de las necesidades y la disponibilidad en el proceso. El objetivo de esta etapa es la culminación del tratamiento para lograr 2 % BSW antes de trasegarlo hacia la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO). Los tanques de tratamiento estáticos presentan las capacidades siguientes: 5 000 m³ (Tanques 15 y 16), 10 000 m³ (Tanque 7 y 8) y 20 000 m³ (Tanque 14). Para comenzar el calentamiento es necesario que el nivel de petróleo sobrepase el nivel de los serpentines, entonces se suministra vapor saturado a 0.7 MPa de presión, a través de los serpentines para calentar el crudo hasta alcanzar temperaturas entre 75 y 90 °C. El agua libre, conjuntamente con el agua producto de la ruptura de la emulsión agua – petróleo, sufre un proceso de decantación durante el llenado de los tanques, que se completa durante el tiempo de reposo del crudo. El agua depositada en el fondo de los tanques es enviada por gravedad hacia el sistema de residuales de la instalación.

El crudo en calidad que se encuentra en los tanques de tratamiento, es bombeado hacia los tanques de almacenamiento de la ECO, cuya capacidad es de 5 000 m³ (Tanques 101, 102, 103 y 104). Este es bombeado hacia el colector de succión de las Bombas Magistrales, y a través de unos intercambiadores de calor de tubos y coraza se puede corregir la viscosidad del crudo hasta el valor normado para la venta. Las bombas magistrales a su vez impulsan el petróleo a través de oleoducto hasta la Estación de Rebombeo del Oleoducto Varadero – Matanzas (EROVM) o hasta la UEB División Territorial de Comercialización de Combustible Matanzas (DTCCM), en caso de que por algún motivo sea necesario sacar de servicio la EROVM.

2.1.1 Descripción del caso base.

El tanque 8 (TK 8), ver anexo 2, posee una capacidad de 10 000 m³, con un volumen operacional de 9 800 m³. El petróleo entra al tanque por la columna desgasificadora central, que permite la eliminación de los vapores remanentes en el crudo. Cuando el crudo sobrepasa el nivel de los serpentines comienza el calentamiento mediante el suministro de vapor saturado a 0.7 MPa de presión. El condensado se inyecta en el interior del tanque. Una vez que se alcanza una temperatura entre 70 y 90 °C, el crudo se deja en reposo hasta que alcance 2 % de BSW requerido. Durante el llenado del tanque el agua sufre un proceso de decantación que se completa durante el reposo del mismo.

Este proceso ocurre mediante la acción de sustancias demulsificantes, las cuales tienen como propósito disminuir las tensiones superficiales existentes entre el agua y el petróleo, lo que permite a las pequeñas gotas de agua formar flóculos, que precipitan al fondo del tanque por diferencia de densidades.

2.2 Formulación del modelo matemático.

A continuación, se plantean las consideraciones para la formulación del modelo, así como las ecuaciones que componen el mismo.

2.2.1 Identificación del modelo físico.

El calentamiento del crudo comienza durante el llenado del tanque y continúa cuando el tanque se encuentra en el nivel de operación hasta que alcanza la temperatura requerida. El modelo físico está determinado por las restricciones siguientes:

- ✓ El volumen de control está determinado por el volumen ocupado por el crudo en el interior del tanque.
- ✓ Solo se considera el mecanismo de transferencia de calor por conducción.
- ✓ No se considera el calentamiento mediante la inyección de condensado al interior del tanque.

- ✓ Se desprecia la resistencia a la transferencia de calor de las paredes del tanque y de los serpentines.
- ✓ Se desprecia la separación del agua y sedimentos.

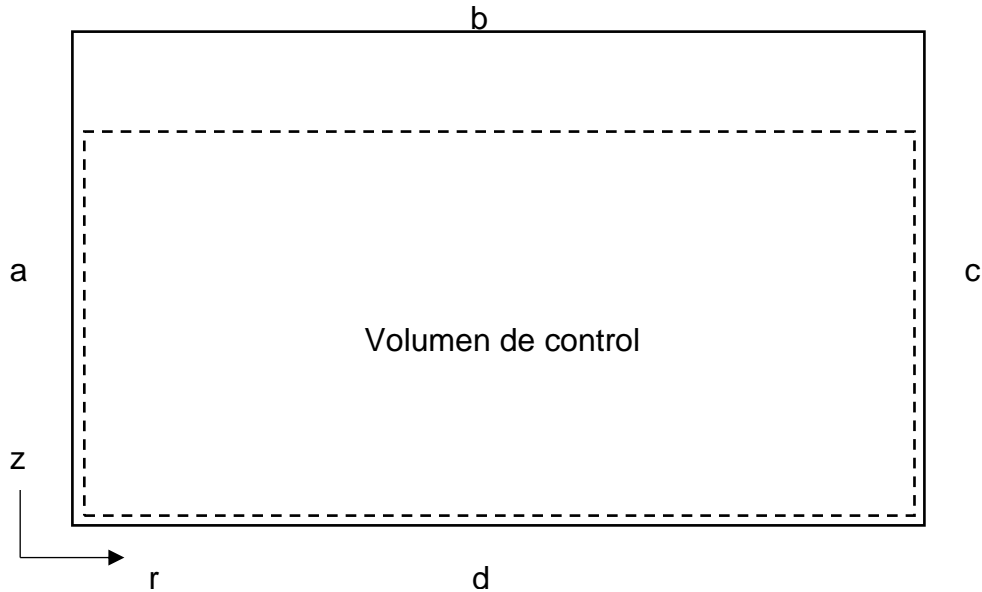


Figura 0.1: Representación del volumen de control (líneas discontinuas) en el TK 8 (a: pared de la columna central, b: tapa del tanque, c: pared del tanque y d: fondo del tanque).

2.2.2 Balance de energía calorífica.

A continuación, se realiza un balance microscópico de calor para el crudo en el tanque totalmente lleno. De acuerdo con Bird (1992), la ecuación de energía calorífica para un volumen de control, para coordenadas cilíndricas es la siguiente:

$$\rho C_p \left(\frac{dT}{dt} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad 0.1$$

Las componentes de velocidad v_r , v_θ y v_z se desprecian pues el fluido es altamente viscoso y no se considera la convección.

$$v_r \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = v_z \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

Debido a la simetría del sistema, en la dirección θ no se transfiere calor por conducción.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = 0$$

Además, no existe una fuente interna de generación de calor, por tanto:

$$q = 0$$

De acuerdo con las condiciones del sistema, la ecuación 0.1 se simplifica, y se obtiene la expresión siguiente:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad 0.2$$

2.2.3 Condiciones iniciales y de frontera.

La temperatura es una función del tiempo y la posición, $T(t, r, z)$. La ecuación 2.2 es una ecuación diferencial de segundo orden en las coordenadas espaciales r y z , y de primer orden en el tiempo t , por lo que requiere cuatro condiciones de frontera y una condición inicial.

Si se desprecia la resistencia a la transferencia de calor por conducción en el serpentín, entonces, durante el calentamiento, la temperatura en la superficie exterior de este es igual a la temperatura del vapor.

$$T_{(t,r,S)} = T_v \quad 0.3$$

Debido a la simetría del sistema se considera que el centro del tanque se encuentra aislado, por tanto:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad 0.4$$

Si se desprecia la resistencia a la transferencia de calor por conducción en la pared del tanque, entonces la temperatura en la superficie exterior de este viene dada por la expresión:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h_{0r} (T_{(t,R,z)} - T_{\infty}) \quad 0.5$$

El coeficiente combinado de transferencia de calor por convección – radiación se determina mediante la ecuación siguiente:

$$h_{0r} = h_0 + h_r \quad 0.6$$

De acuerdo con Garcell *et al.* (2011) el coeficiente de transferencia de calor por convección para un cilindro de sección circular, cuyo eje es perpendicular a una corriente de fluido, se determina mediante la ecuación siguiente:

$$h_0 = \frac{k_a}{D} C' \cdot Re_a^{m''} \cdot Pr_a^{1/3} \quad 0.7$$

Esta ecuación se cumple para $Pr > 0.6$, y los valores de las constantes C' y m'' dependen del número de Reynolds como se indica en la Tabla 0.1. Además, se considera que la pared del tanque se encuentra a una temperatura promedio de la temperatura inicial y final.

Tabla 0.1: Valores de los parámetros C' y m'' de la ecuación 0.7

Re	C'	m''
1 – 4	0,989	0,330
4 – 40	0,911	0,385
40 – 4 000	0,683	0,466
4 000 – 40 000	0,193	0,618
40 000 – $2,5 \cdot 10^5$	0,0266	0,805

Fuente: Garcell *et al.*, 2011.

Los números adimensionales se determinan mediante las ecuaciones siguientes:

$$Re_a = \left(\frac{v\rho D}{\mu} \right)_a \quad 0.8$$

$$Pr_a = \left(\frac{\mu C_p}{k} \right)_a \quad 0.9$$

En las ecuaciones 0.7; 0.8, 0.9, las propiedades físicas del aire se evalúan a la temperatura media entre la pared del tanque y la temperatura de aproximación del aire.

Para determinar el coeficiente ficticio de transferencia de calor por radiación se utiliza la ecuación siguiente:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_w + T_\infty)(T_w^2 + T_\infty^2) \quad 0.10$$

El coeficiente utilizado en la ecuación 0.10 se considera constante y la temperatura $T(t, R, z)$ se aproxima a la temperatura de la pared T_w durante el calentamiento.

Por otro lado, se considera que el fondo del tanque se encuentra aislado, lo cual puede ser descrito por la expresión 0.11.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad 0.11$$

La temperatura en la superficie del crudo viene dada por la expresión siguiente:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H} = \left(\frac{1}{\frac{e}{k_g} + \frac{1}{h_T}} \right) (T_{(t,r,H)} - T_\infty) \quad 0.12$$

En la ecuación 0.12 se desprecia la resistencia a la transferencia de calor por conducción en la tapa del tanque, pero se tienen en cuenta la resistencia de los gases que se encuentran entre la superficie del crudo y la tapa del tanque. Se

considera una capa estática de gases, por lo que solo se tiene en cuenta la conducción para la misma.

De acuerdo con Garcell *et al.* (2011) el coeficiente de transferencia de calor para flujo tangencial de un medio fluido infinito sobre una lámina plana, puede ser calculado por las ecuaciones siguientes:

Para régimen laminar:

$$h_T = \frac{k_a}{D} (6,86)(Re)_a^{0.5} (Pr)_a^{1/3} (\mu_a/\mu_w)^{0.25} \quad 0.13$$

Para régimen turbulento.

$$h_T = \frac{k_a}{D} (0,037)(Re)_a^{0.8} (Pr)_a^{0.43} (\mu_a/\mu_w)^{0.25} \quad 0.14$$

La ecuación 0.13 es válida para $Re_a < 3 \cdot 10^5$ y $Pr_a > 0,6$, mientras que la ecuación 0.14 se utiliza para $Re_a > 3 \cdot 10^5$ y $Pr_a > 0,6$. En las ecuaciones 0.13 y 0.14, así como las utilizadas para calcular los números adimensionales, las propiedades físicas del aire se evalúan a la temperatura de aproximación de este, excepto μ_w que se determina a la temperatura de la superficie exterior de la tapa del tanque (se considera la temperatura constante e igual al promedio de la temperatura inicial y final).

Dado que el calentamiento comienza una vez que el nivel del crudo sobrepasa los serpentines, al concluir el llenado existirán dos zonas con temperaturas diferentes. Dichas zonas están definidas en el volumen de control, y se encuentran separadas por el serpentín. La condición inicial está dada por la temperatura inicial en cada zona. En la zona inferior la temperatura se considera uniforme e igual a la temperatura de entrada del crudo T_0 . Mientras que en la zona superior se considera una temperatura uniforme T_1 . La misma se determina mediante un balance macroscópico de calor en las proximidades del serpentín, donde se desprecian las pérdidas de energía.

$$(w \cdot Cp \cdot (T_1 - T_0))_{crudo} = (w \cdot \lambda)_{vapor} \quad 0.15$$

2.2.4 Estimación de las propiedades físicas del crudo.

Para estimar las propiedades físicas del crudo se utiliza el módulo de simulación obtenido por Hernández (2020), mediante el *software* de simulación *Hysys*.

2.3 Simulación mediante el *software* Matlab.

Para llevar a cabo la solución de la ecuación diferencial parcial obtenida se utiliza la herramienta *pdetool* del *software* Matlab, para lo cual se siguen los pasos siguientes.

1. Abrir el *software* Matlab.
2. Escribir el comando “*pdetool*” para activar la utilidad de ecuaciones diferenciales parciales y presionar *Enter*.

En este entorno se define la geometría, se genera la malla, se especifican las condiciones de contorno y se asignan los parámetros de la ecuación diferencial.

Metodología para el diseño gráfico.

El dibujo del tanque se realiza por partes: la parte superior al serpentín y la parte inferior al serpentín, este recurso es debido a la imposibilidad de utilizar distintas temperaturas como condiciones iniciales para cada sección en el volumen de control. La representación del modelo se realiza como sigue:

1. En el menú “*Draw*” se selecciona “*Draw Mode*”:
2. En el menú “*Draw*” seleccionar “*Rectangle/square*”.

El rectángulo, correspondiente al corte del tanque, se dibuja a partir de las dimensiones. Sobre el rectángulo obtenido se da doble clic y sale una pestaña para rellenar con las dimensiones.

3. Repetir el paso anterior para dibujar el otro rectángulo.
4. En “*Set formula*” aparece la ecuación $R_1 + R_2$.

Metodología para definir las condiciones de frontera.

1. En el menú “*Options*” seleccionar “*Application/ Heat transfer*”.
2. En el menú “*Boundary*”, seleccionar la opción “*Boundary Mode*”.
3. En el menú “*Boundary*”, seleccionar la opción “*Specify Boundary Conditions*”.
4. Seleccionar el lado del rectángulo que se va a especificar.
5. Seleccionar en la ventana “*Boundary Conditions*”, el tipo de condición Dirichlet y especificar el valor de la temperatura, o seleccionar la opción el tipo de condición Neumann y especificar el valor del coeficiente de transferencia de calor y el valor de la multiplicación del coeficiente de transferencia de calor y la temperatura exterior.
6. Repetir los pasos 4 y 5 para el resto de los lados del rectángulo.

Metodología para definir la ecuación diferencial.

1. En el menú “*PDE*”, seleccionar la opción “*PDE Mode*”.
2. En el menú “*PDE*”, seleccionar la opción “*PDE Specification*”. En esta ventana se selecciona el tipo de ecuación (en este caso es parabólica).
3. Además, se especifican los datos de densidad, capacidad calórica y conductividad térmica. No se consideran las pérdidas de calor originadas entre las capas de petróleo.

Metodología para solucionar la ecuación diferencial.

Para resolver la ecuación diferencial parcial obtenida, mediante un método numérico, se debe establecer una red o malla de puntos en la región de interés ocupada por las variables independientes. Después se sustituyen las derivadas parciales por sus aproximaciones en diferencias finitas y se plantea la condición inicial. Para llevar a cabo el mallado y la solución de la ecuación mediante el *software* se siguen los pasos siguientes:

1. En el menú “*Mesh*”, seleccionar la opción “*Mesh mode*”.
2. Luego en el menú “*Mesh*”, seleccionar la opción “*Initialize mesh*” y para refinar la malla seleccionar la opción “*Refine mesh*”.

3. Posteriormente, en el menú “*Solve*”, seleccionar la opción “*Parameters...*”, donde se define la condición inicial, el paso y el valor de la variable independiente (tiempo de calentamiento) para el cual se desea hallar la solución.
4. En el menú “*Solve*”, seleccionar la opción “*Solve PDE*”, donde se resuelve la ecuación diferencial parcial. El *software* muestra los resultados de forma gráfica.

2.4 Validación del modelo.

La validación del modelo de simulación se realiza a partir del ajuste al caso base que permite definir la confiabilidad del modelo para predecir y estudiar el comportamiento del perfil de temperaturas y con el objetivo de conocer la respuesta del modelo ante cambios de los parámetros que lo conforman se realiza un análisis de sensibilidad.

Para hacer el ajuste al caso base, se hace una simulación con las condiciones actuales de operación y se compararan los resultados obtenidos con los datos reales del tanque 8. Para ello se toma la temperatura a tres niveles, en distintos horarios, durante el calentamiento.

Posteriormente se comparan los valores obtenidos por el modelo con los datos recopilados en la planta y se estima el error relativo según la ecuación 0.16, el cual debe ser inferior al 10%.

$$e(x) = 100 \left| \frac{x - x^*}{x^*} \right| \quad 0.16$$

Conclusiones.

1. Se obtiene un modelo de posible aplicación para la descripción de tratamiento térmico del tanque 8 a partir de un balance microscópico de calor.
2. En la formulación del modelo solo se considera el mecanismo de transferencia de calor por conducción en el interior del tanque.
3. El modelo obtenido es una ecuación diferencial parcial de tipo parabólica, con condiciones de frontera de Dirichlet en el serpentín y condiciones de frontera de Neuman en las paredes del tanque.
4. Para la validación del modelo se determina el error relativo entre el valor real de temperatura y el valor simulado.

Recomendaciones.

- Continuar la investigación con la toma de datos en la empresa que permitan validar el modelo y la obtención de resultados.

Bibliografía.

- Alvarado, J. G., Delgado-Linares, J. G., Forgiarini, A. M., y Salager, J.-L. (2019). Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 8. *Demulsifier Performance at Optimum Formulation Is Significantly Improved by a Small Aromatic Content of the Oil Energy Fuels*, 33, 1928-1936.
- Ancheyta, J., y Speight, J. G. (2007). *Hydroprocessing of heavy oils and residua*: CRC press.
- Aylott, M. y Van der Merwe, B. (2008). *Petro-SIM simulator and cape-open: experiences and successes*. In The 2008 Annual Meeting.
- Azcuy, Yuczisley (2005). *Metodología para el cálculo de la eficiencia en el separador de grupo y Triter de la Planta procesadora de crudo nativo*. Tesis presentada en opción al título de Ing. Químico. Canasí. Habana.
- Basulto, E. (2017). *Caracterización simulada de una columna desflemadora de la destilería de Cárdenas*. (Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico), Universidad de Matanzas, Cuba.
- Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Lightfoot, E.N., (1992). *Fenómenos de transporte*. Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- Delgado-Linares, J. G., Alvarado, J. G., Véjar, F., Bullón, J., Forgiarini, A. M., y Salager, J.-L. (2016). *Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 7. Demulsifier Performance at Optimum Formulation for Various Extended Surfactant Structures Energy Fuels*, 30(9), 7065–7073.
- El-hoshoudy, A. J. P., y Coal. (2019). *PVT Properties of black crude oil-a review*. 61(6).
- EPEP-CENTRO (2013). *Manual de Documentos de la Planta de Procesamiento de Crudo (Reglamentos Tecnológicos)*. Matanzas.

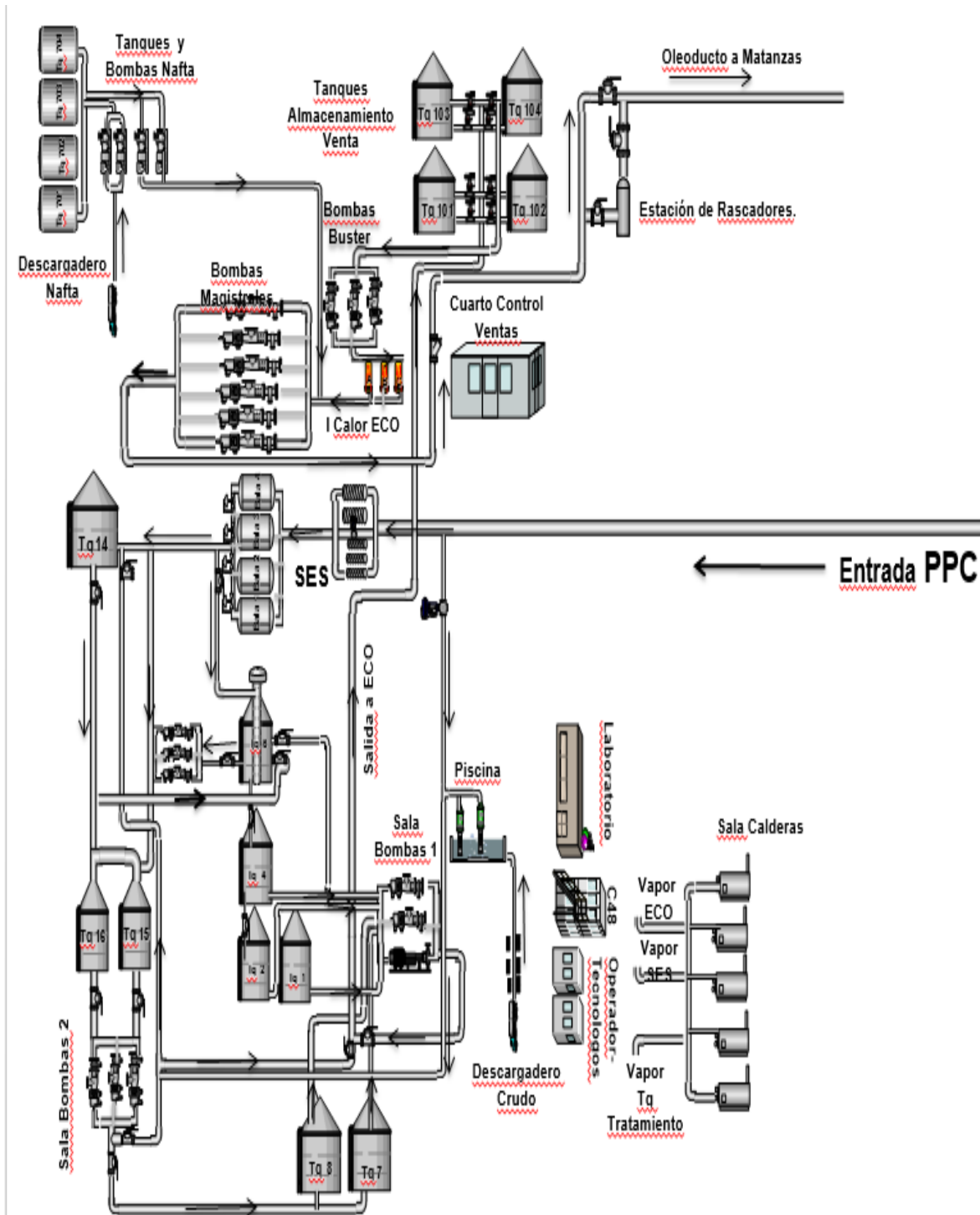
- Fan, Y., Simon, S., y Sjoblom, J. (2009). *Chemical Destabilization of Crude Oil Emulsions: Effect of Nonionic Surfactants as Emulsion Inhibitors. Energy Fuels*, 23, 4575–4583.
- Farrokhi, F., Nasr, M. R. J., Rahimpour, M. R., Arjmand, M., y Vaziri, S. A. (2017). *Application of a novel magnetic nano-particle as demulsifier for dewatering in crude oil emulsion. Separation Science and Technology*, 48, 2014-2047.
- Fontana, M., Fernandes, L. M., y Souza, T. A. (2019). *Design and evaluation of a system to obtain polymer grade propylene by means of vapor recompression distillation. Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 13(4).
- Garcell, L.P.; Díaz, A.G. y Surís, G.C., (2011). *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela.
- Geankopolis, C.J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3ra Ed., Tlhuaca (México): Compañía Editorial Continental, ISBN 968-261316-7.
- Heinrich, J. C. (2017). *The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications with Matlab®, Maple, and Comsol*.
- Incropera, Frank P. y DeWitt, David P. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Editorial Prentice Hall 6th Ed.
- Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor* (C. S.A Ed.). México.
- Kim, K.J.; King, W.P. (2009). *Thermal conduction between a heated microcantilever and a surrounding air environment. Applied Thermal Engineering*. vol. 29, pp. 1631-1641.
- Kwon, Y. W., y Bang, H. (2018). *The finite element method using Matlab*: CRC press.
- Li, P., y Zhang, W. J. I. F. (2005). *Application of Matlab in Solving temperature field*. 27(03), 32-35.
- Lienhard, John H. (2006). *A Heat Transfer Text Books*. Houston: Editorial Phlogiston Press.

- Lizana, G. R., y Vásquez, P. R. (2016). *Evaluación y selección de productos químicos demulsificantes para la deshidratación de petróleo crudo en un lote petrolero del noreste peruano a nivel de laboratorio*. (Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico), Universidad nacional Pedro Ruiz Gallo, Perú.
- Loayza, P. A. (2016). *Tratamiento químico del petróleo crudo que se transporta a través del Oleoducto*. (Tesis presentada en opción al título de ingeniero químico), Universidad Nacional Mayor De San Marcos, Lima, Perú.
- Mañas Mañas, J. F., y Pinta, M. A. (2018). *Métodos Numéricos para el Análisis Matemático con Matlab*. In: Machala: Universidad Técnica de Machala.
- McCaffrey, M. A., Al-Khamiss, A., Jensen, M. D., Baskin, D. K., Laughrey, C. D., y Rodgers, W. M. (2017). *Diagnosing Production Problems in Highly Deviated Wells Using Oil and Gas Geochemical Fingerprinting*. Paper presented at the Offshore Technology Conference.
- Morín, R.D. (2008). *Evaluación del Sistema de Tratamiento de Petróleo Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro*. Tesis presentada en opción al título de Especialista en Perforación de Pozos de Petróleo y Producción de Petróleo. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", Matanzas, Cuba.
- Ng, D. K. S., Chong, C. H., y Chemmangattuvalappil, N. (2017). *Registration of new components*. In N. G. Chemmangattuvalappil, C. H. Chon y D. N. K. Sum (Eds.), *Chemical engineering process simulation*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science.
- Osuji, L., y Antia, B. (2005). *Geochemical implication of some chemical fossils as indicators of petroleum source rocks*.
- Ramirez, A. M., Valle, G. A., Romero, F., y Jaimes, M. (2017). *Prediction of PVT Properties in Crude Oil Using Machine Learning Techniques* *MLT Society of Petroleum Engineers* (Vol. SPE-185536-MS).

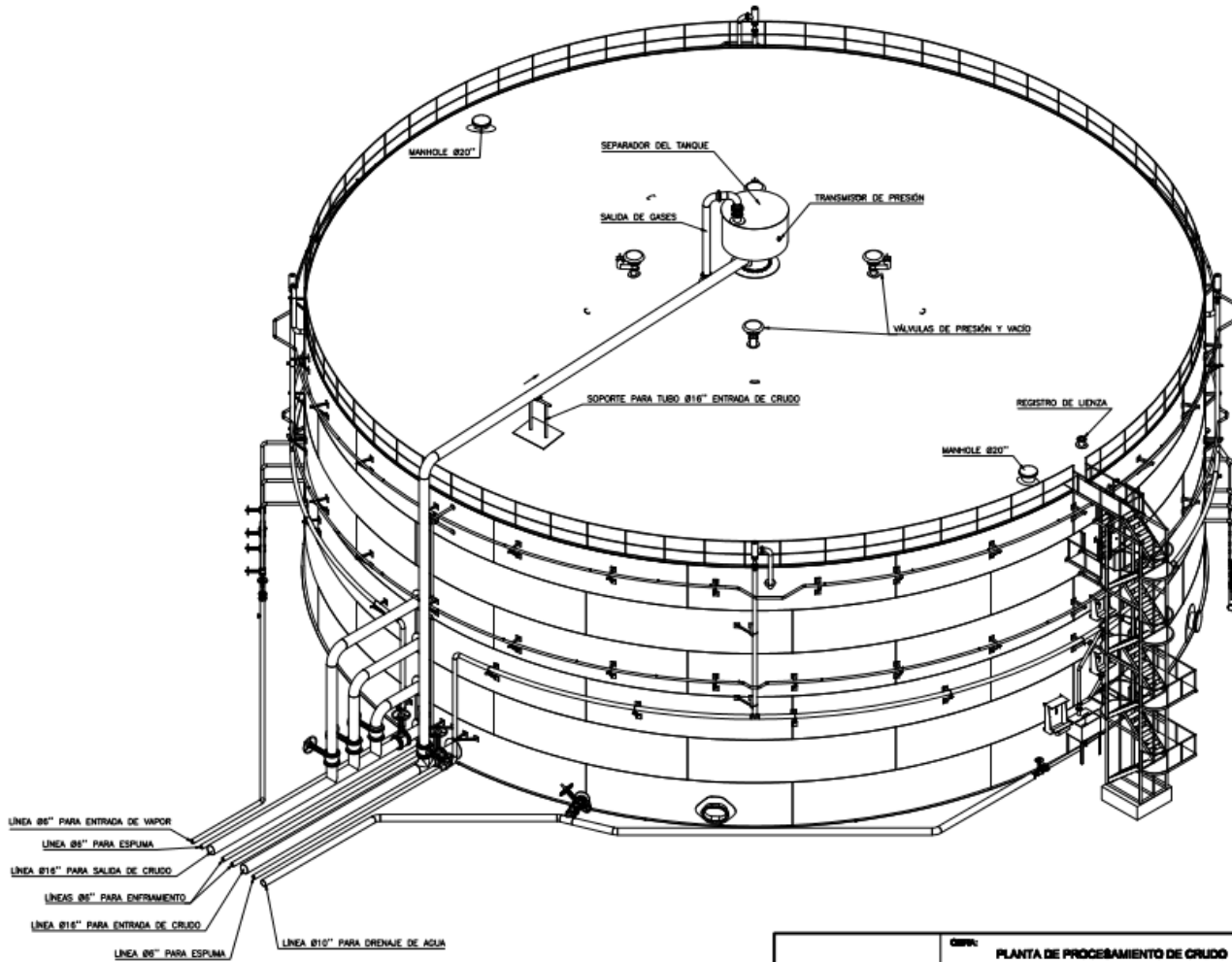
- Rezende, F. C., Rabelo, R. B., Filho, P. J. C., S.A, O., y Comercio, I. e. (2017). *The use of Desing of Experiments for Development of Flocculating Agents for Treatment of Crude Oil Emulsions*.
- Rizo, L. B. (2018). *Evaluación energética en la planta de procesamiento de crudo de la EPEP Centro*. (Tesis presentada en opción al título de máster en ciencias), Centro politécnico del petróleo, Varadero, Matanzas.
- Samimi, A., Zarinabadi, S., Shahbazi Kootenaei, A. H., Azimi, A., y Mirzaei, M. (2020). *Kinetic Overview of Catalytic Reforming Units (Fixed and Continuous Reforming)*. *Chemical Methodologies*, 4(3), 245-257.
- Sellman, E., y Mandewalkar, P. (2016). *Highly Efficient Dehydration of Crude Oil from Mature Fields in the Middle East Society of Petroleum Engineers* (Vol. SPE-181724-MS).
- The MathWorks, Inc. (1996). *Partial Differential Equation Toolbox User's Guide*. Massachusetts, USA.
- White, F.M. (2001). *Fluid mechanic*. 4th Ed. New York (USA): Editorial McGraw-Hill Professional.

Anexos

Anexo N° 1: Diagrama de la Planta de procesamiento de crudo (PPC).



Anexo N° 2: Tanque 8.



OBRA: PLANTA DE PROCESAMIENTO DE CRUDO

Proyectado por:
J. IBAN AGUILA

OBJETO: REPARACION CAPITAL TANQUE #8

Revisado por:
DANIEL A. IGLESIBAS