

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO USADO PARA PRODUCTOS
PESADOS EN CENTRO DE ALMACENAMIENTO Y COMERCIALIZACIÓN SPPB.

INGRID PAULINA PÉREZ SOTOMAYOR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2020

ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO USADO PARA PRODUCTOS
PESADOS EN CENTRO DE ALMACENAMIENTO Y COMERCIALIZACIÓN SPPB.

INGRID PAULINA PÉREZ SOTOMAYOR

Trabajo de grado para obtener el título de Master en Ingeniería de Petróleo y Gas
con énfasis en Gerencia y Economía.

Director

M.Sc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Docente

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2020

CONTENIDO

pag.

INTRODUCCIÓN	15
1. CALENTAMIENTO DE PRODUCTOS PESADOS EN SPPB.	30
1.1. SISTEMA DE CALENTAMIENTO EN SPPB.	30
1.1.1 Tanques de almacenamiento.	31
1.1.2 Equipos del sistema de calentamiento.	32
1.1.2.1 Filtro de hidrocarburos FIL 110:.....	32
1.1.2.2 Bombas de recirculación de hidrocarburos P120A, B y C.....	33
1.1.2.3 Intercambiador de calor E 110.....	33
1.1.2.4 Calentador de aceite (Heater) B-610.....	34
1.1.2.5 Bombas de recirculación de aceite P 610 A y P610 B.....	35
1.1.2.6 Filtro de Aceite FIL 610	36
1.1.2.7 Tanque de expansión de Aceite TS-610.....	36
1.2. ANALISIS AL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE SPPB.	37
1.2.1. Posibles escenarios presentados durante el proceso de calentamiento	42
1.2.1.1. Calentamiento de tanque con volumen constante.....	42
1.2.1.2. Calentamiento de tanque con ingreso de producto al sistema de control.	42
1.2.1.3. Calentamiento de producto en tanque sin aislamiento térmico.....	43
1.2.1.4. Calentamiento de producto en tanque sin aislamiento y sin ingreso de producto.	43

1.3. RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO AL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE SPPB.

44

2. COSTOS DE COMBUSTIBLE PARA CALENTAMIENTO DE ACEITE

TÉRMICO.56

3. CONCLUSIONES.58

4. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....60

BIBLIOGRAFIA62

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Reservas de hidrocarburos.....	16
Tabla 2. Reservas Probadas de Petróleo.....	17
Tabla 3. Características del Filtro FIL 110.....	32
Tabla 4. Características las bombas de hidrocarburo P120 A/B/C.....	33
Tabla 5. Características del Intercambiador de calor E 110.	33
Tabla 6. Características del calentador de aceite (Heater) B-610.	34
Tabla 7. Características bombas de aceite P 610 A/B.....	35
Tabla 8. Características filtro Fil - 610.	36
Tabla 9. Características tanque de expansión TS-610.	37
Tabla 10. Viscosidades de crudos pesados Rubiales (r) y Combustóleo.....	44
Tabla 11. Resultados de análisis calentamiento del combustóleo en tanques.	52

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 2. Campo de petróleo con mayores Reservas Probadas (MBIs).	18
Figura 3. Pronostico de producción petróleo (3P conjunto de probadas, probables y posibles) y recursos contingentes.	19
Figura 4. Proyectos piloto de Recobro Mejorado activos en 2018.	21
Figura 5. Centro de distribución SPPB – Tanques Terminal de Líquidos.....	24
Figura 6. Centro de distribución SPPB – Muelle Principal.....	24
Figura 7. Diagrama de proceso del sistema de calentamiento de producto pesado en SPPB.	37
Figura 8. Volumen de producto constante en el sistema de control.	42
Figura 9. Volumen de producto variable en el sistema de control.	43
Figura 10. Volumen de producto constante en sistema de control, sin aislamiento térmico en tanque.	43
Figura 11. Volumen de producto variable en sistema de control, sin aislamiento térmico en tanque.	44

Figura 12. Viscosidades de Crudos Pesados Rubiales (r) y Combustóleo.....	45
Figura 13. Curva de viscosidades del Combustóleo.....	46
Figura 14. Seguimiento periodo 1 del tanque TA53001.....	48
Figura 15. Seguimiento periodo 1 del tanque TA53002.....	48
Figura 16. Seguimiento periodo 1 del tanque TA53005.....	49
Figura 17. Seguimiento periodo 2 del tanque TA53001.....	49
Figura 18. Seguimiento periodo 2 de tanque TA53002.....	50
Figura 19. Seguimiento periodo 2 de tanque TA53005.....	50
Figura 20. Seguimiento al calentamiento tanque TA53005 con nivel alto y bajo.	53
Figura 21. Seguimiento al calentamiento tanque TA53002 con nivel alto y bajo.	54
Figura 22. Seguimiento al calentamiento de producto en tanque TA5300-2 y -5.....	55
Figura 23. Costos del combustible empleado en el sistema de calentamiento de producto pesado.	56

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca UIS)

Anexo A. Therminol_55_Technical_Bulletin.

Anexo B. Viscosidad Crudos Pesados SPPB.

Anexo C. Combustóleo

GLOSARIO

ANH agencia Nacional de Hidrocarburos.

CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA es la cantidad de energía, en forma de calor, que gana o pierde un sistema por unidad de masa, para que se produzca en él un cambio de temperatura de un grado, sin que haya cambio de estado.

CONDUCCIÓN es la transferencia de calor a través de un material fijo. La dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico

¹.

CONVECCIÓN es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla².

FRONTERA DEL SISTEMA es la superficie que separa el sistema de sus alrededores³.

FUEL OIL el combustóleo, también conocido como fuel oil No. 6, es un combustible elaborado a partir de productos residuales que se obtienen de los procesos de refinación del petróleo. Se utiliza típicamente en procesos de combustión para calentamiento⁴.

¹ KERN, D. Q. Procesos de Transferencia de Calor. México: Compañía editorial continental, S.A., 1999. p. 14

² *Ibíd.*, p. 15.

³ *Ibíd.*, p 24.

⁴ ECOPETROL S.A. Especificación Técnica del Catálogo de Productos de Ecopetrol S.A. Combustóleo (Fuel Oil No. 6) [En línea]. 2018 [Consultado 09 de noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/documentos/cliente/Especificaciones-Tecnicas-Combustoleo-Fuel-Oil-No6.pdf>

LA TERMINAL hace referencia a la terminal de líquidos de Sociedad Portuaria Puerto Bahia.

PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR se ha descrito a la transferencia de calor como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y recibidores, tratados usualmente de manera independiente⁵.

PRODUCTO es todo hidrocarburo líquido

SISTEMA es la parte del universo que se ha separado para su examen y análisis, el cual interactúa con el resto del universo mediante un intercambio de energía o de masa⁶.

VOLUMEN DE CONTROL o sistema abierto ocurre cuando la cantidad de masa dentro de sistema puede o no ser contante, permitiendo que el inventario de la masa dentro de sistema sea diferente en cada momento⁷.

⁵ HOWELL, J. y BUCKINUS, R. Principios de Termodinámica para Ingeniería. México D.F.: McGRAW-HILL INTERAMERICANA DE MEXICO, 1990. p. 16

⁶ *Ibíd.*, p. 24.

⁷ *Ibíd.*, p 25.

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO USADO PARA PRODUCTOS PESADOS EN CENTRO DE ALMACENAMIENTO Y COMERCIALIZACIÓN SPPB.*

AUTOR: INGRID PAULINA PÉREZ SOTOMAYOR **

PALABRAS CLAVE: CALENTAMIENTO, HIDROCARBURO PESADO, VISCOSIDAD, ALMACENAMIENTO, CAPACIDAD CALORIFICA.

DESCRIPCIÓN:

En el mercado de los hidrocarburos se encuentran variados tipos de sustancias líquidas con características particulares, así como son particulares las maneras que permiten su manejo, los procesos en los que se emplean hidrocarburos pesados manifiestan como principal restricción las implicaciones generadas por la alta viscosidad. En la industria nacional de hidrocarburos se evidencia la necesidad de implementar en terminales de almacenamiento mecanismos que permitan el procesamiento de productos hidrocarburos con altas viscosidades. En la terminal de la Sociedad Portuaria Puerto Bahía se implementa un sistema de calentamiento que permite disminuir la viscosidad a los hidrocarburos pesados para posteriormente usar el sistema de bombeo para la exportación del producto, ya que dicho sistema se encuentra restringido a una viscosidad máxima definida.

Debido a la necesidad que se tiene en la terminal para disminuir la viscosidad de los productos pesados, se suscitan costos que pueden presentar significativamente una disminución de los mismos implementando mejoras u optimizaciones en el sistema de calentamiento y a la vez disminuir impactos ambientales, dichas mejoras son los resultados arrojados luego de realizar un análisis energético. Para tal fin se asumió el sistema como un volumen de control global permitiendo de esta forma determinar la capacidad calorífica específica del hidrocarburo pesado almacenado en los tanques asignados en la terminal en el momento del análisis, este se realizó a partir de la energía suministrada al sistema por gas natural empleado como combustible y el aprovechamiento del mismo el cual es evidenciado en el cambio de temperatura que presentó el producto almacenado en el tanque que se encontraba sometido al proceso de calentamiento.

* Bachelor thesis

** Facultad de Ingeniería Físico Químicas. Escuela: Ingeniería de Petróleos. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE WARMING SYSTEM USED FOR HEAVY PRODUCTS IN THE STORAGE AND COMMERCIALIZATION CENTER SPPB. *

AUTHOR: INGRID PAULINA PÉREZ SOTOMAYOR**

KEYWORDS: HEATING, HEAVY HYDROCARBON, VISCOSITY, STORAGE, HEAT CAPACITY.

DESCRIPTION:

In the hydrocarbon market, there are different types of liquid substances presenting certain characteristics as well as particular handling processes. In the case of heavy hydrocarbons, the high viscosity of this substance is considered to be a significant restricting aspect. In the national hydrocarbon industry, it is evident the need to improve mechanisms that could allow the processing of hydrocarbon products with high viscosities in storage terminals. In the terminal of the Bahia Port Society (SPPB), a heating system is used to reduce the viscosity of heavy hydrocarbons and, subsequently, a pumping system to export the product. However, this pumping system only works with a specific viscosity range.

Due to the need to reduce viscosity in heavy hydrocarbons at SPPB terminal, the optimization of the heating system not only could represent a significantly shortfall in costs, but it could also reduce its effects on the environment. In this study, an energetic analysis has been considered to the possible system optimization. For this purpose, the system was assumed as a global control volume, allowing to determine the specific heat capacity of the heavy product stored in the tanks assigned in the terminal for the analysis. This analysis was based on the energy supplied from the natural gas used as fuel for the heating system. This process allowed a change in the heavy oil crude stored in the tank.

* Bachelor thesis

** Facultad de Ingeniería Físico Químicas. Escuela: Ingeniería de Petróleos. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

INTRODUCCIÓN

Siendo Colombia en la actualidad un país en donde los combustibles fósiles son el principal recurso en la canasta energética, 77%⁸; para su distribución, importación y exportación se hace necesario contar con instalaciones adecuadas que permita tener la flexibilidad necesaria para una posible variación en el mercado. Dada las posibles variaciones que se puedan presentar en las especificaciones de los hidrocarburos, estas resultan ser un factor importante para su manejo durante su comercialización.

Como dice Zaidullin, M., *et. al*, las reservas de hidrocarburos en el mundo se están agotando, y que en la lista para la explotación hay formas alternativas de recursos de hidrocarburos, como los aceites pesados de alta viscosidad, que son sistemas complejos de dispersión de petróleo. La determinación de las características de la composición, estructura y propiedades de los sistemas dispersos y el estudio de su estabilidad de fase ayudarán al desarrollo de tecnologías para su transporte, procesamiento y almacenamiento.⁹

Goncalves, Rerín y Goncalves Mothé, en sus estudios dice que el petróleo crudo representaba el 50% del consumo de energía primaria en el mundo a principios de

⁸ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA, UPME. Plan Energético Nacional 2020- 2050 [En línea]. Bogotá D.C., diciembre de 2019, p. 10. [Consultado: 20 de enero de 2020]. Disponible en:

https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf

⁹ ZAIDULLIN, M, *et. al*. Influence of the structure of heavy oil disperse system on its rheological properties under steam-heat treatment conditions. New York: Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2017. Vol. 53, No. 4, pp. 470-479.

esta década. Dicen que por cada depósito existente de petróleo o gas convencional, hay tres veces la cantidad de crudo pesado en el planeta. También investigan el comportamiento térmico de tres crudos pesados de las cuencas brasileñas y encuentran que el petróleo con el API° más bajo exhibió el valor más alto para la capacidad de calor específica.¹⁰ Por lo anterior, resulta que entre más pesado sea una determinada cantidad de hidrocarburo mayor será la cantidad de calor a suministrar para la elevación de su temperatura.

Los informes entregados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH y la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia UPME, muestran el panorama que el mercado de los hidrocarburos en el país tiene en el mediano y largo plazo. En la tabla 1 se resume las reservas que Colombia presente al corte del 31 de Dic de 2019, la cual está enfocada en las reservas y proyectos de exploración y producción como sigue:

Tabla 1. Reservas de hidrocarburos.

Categoría	Petróleo @ 31 Dic 2018
Reservas probadas	1958
Reservas probables	698
Reservas posibles	586

Fuente: Informe de gestión ANH 2019¹¹. Mbls: Millones de barriles

¹⁰ GONCALVES MOTHÉ, Michelle; PERIN, Mauricio and GONCALVES MOTHÉ, Cheila. Comparative thermal study of heavy crude oils by DSC. Rio de Janeiro: Federal University of Rio de Janeiro. Petroleum Science and Technology, 2016, 34:4, pp. 314-320

¹¹ COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Informe de Gestión y Rendición de Cuentas 2019 [En línea]. p. 101. [Consultado: 19 de enero 2020]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/Atencion-al-ciudadano/Documents/INFORME%20GESTI%C3%93N%20Y%20RENDICI%C3%93N%20DE%20CUENTAS%202019-V3.pdf>

De igual forma los informes nos muestran una comparación de las reservas con el año inmediatamente anterior al año de gestión, en la siguiente tabla 2 tenemos el balance de las reservas probadas presentadas al 31 de diciembre del 2018 comparadas con las presentadas al corte del 2017, apreciando un aumento en las reservas del país de la siguiente forma:

Tabla 2. Reservas Probadas de Petróleo.

	2017 (Mbls)	2018 (Mbls)
Reservas año anterior	1665	1782
Consumo de Reservas	312	316
Nuevas Incorporaciones	48	39
Reevaluaciones	381	453
Incorporación anual	429	492
Reservas Probadas a 31 de Dic	1782	1958

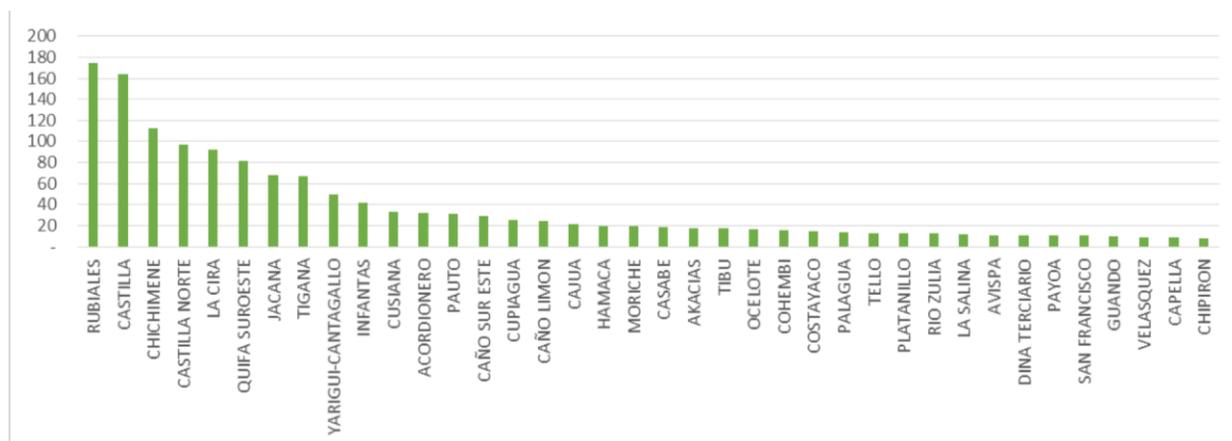
Fuente: Informe de gestión ANH 2019¹². Mbls: Millones de barriles

La relación (R/P) muestra el abastecimiento de crudo en el país, de esta manera se observa que se tendría asegurado el abastecimiento para un periodo aproximado de 6 años de acuerdo al resultado de esta relación y a la tasa de producción del

¹² COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Informe de Gestión y Rendición de Cuentas 2019 [En línea]. p. 102. [Consultado: 19 de enero 2020]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/Atencion-al-ciudadano/Documents/INFORME%20GESTI%C3%93N%20Y%20RENDICI%C3%93N%20DE%20CUENTAS%202019-V3.pdf>

2018. Teniendo mayores reservas de crudos en los campos Rubiales y Castilla acorde a informe presentado por la ANH en figura 1 cuyos campos se han mantenido tanto para el balance de 2018 y 2019 en Colombia.

Figura 1. Campo de petróleo con mayores Reservas Probadas (MBIs).



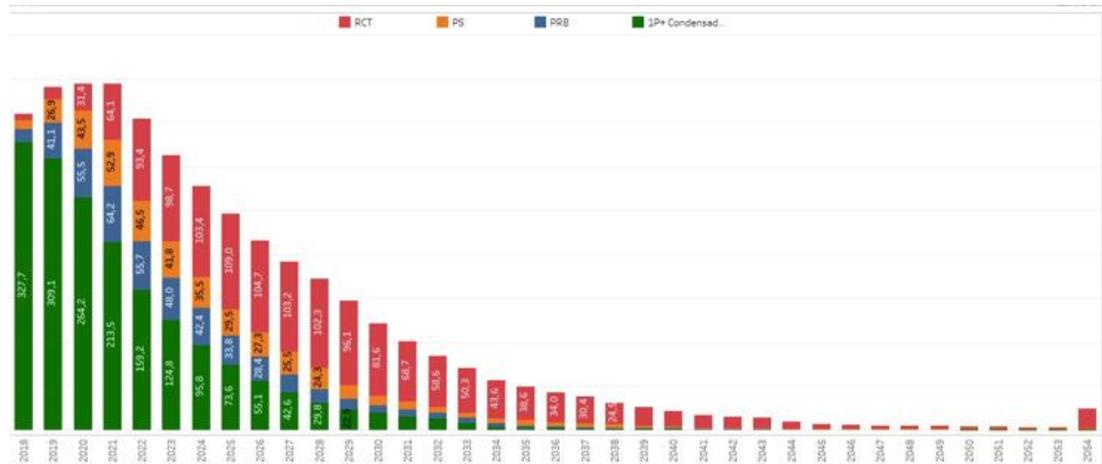
Fuente: Informe de gestión ANH 2018.¹³

Hay pronósticos económicos de que para el año 2025, el petróleo pesado será la principal fuente de energía fósil en el mundo y al menos el 80% de la demanda mundial de energía será provista principalmente por petróleo y gas natural¹⁴. En Colombia los informes sobre el pronóstico de producción muestran una declinación de las reservas probadas que se acentúa a través de los años (barras verdes), tal como se presenta en la figura 2 la ANH en Colombia.

¹³ COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Informe de Gestión 2018 [En línea]. p. 77. [Consulta: 02 de septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/la-anh/Informes%20de%20Gestin/Informe%20de%20gesti%20n%20ANH%202018.pdf>

¹⁴ GONCALVES MOTHÉ, Michelle; PERIN, Mauricio y GONCALVES MOTHÉ, Cheila, Comparative thermal study of heavy crude oils by DSC, Federal University of Rio de Janeiro: Petroleum Science and Technology, 2016, 34:4, pp. 314-320

Figura 2. Pronostico de producción petróleo (3P conjunto de probadas, probables y posibles) y recursos contingentes.



Fuente: Informe de gestión ANH 2018.¹⁵

En la figura 2 la ANH muestra el pronóstico de producción obteniéndose la mayor contribución en los años 2020, 2021 y 2022; extiendose hasta el año 2054, y a partir de 2025 se obtienen niveles menores a 300.0000 bopd, disminuyendose entre 200.000 hasta llegar a 100.000 bopd en 2031. Según la ANH, la adición de reservas probables y posibles cubriría un alto porcentaje del valor de las reservas probadas actuales. Sugiere sobre la necesidad de desarrollar proyectos que favorezcan la migración de recursos contingentes en el corto plazo. Además de continuar fortaleciendo los proyectos y la retoma de programas de exploración y ejecución de contratos para desarrollar recursos no convencionales.¹⁶ Por la misma línea encontramos que Wang, *et al.* en sus estudios asegura que con el rápido agotamiento de los recursos petroleros convencionales, el petróleo pesado ha

¹⁵ COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Informe de Gestión 2018 [En línea]. p. 77. [Consulta: 02 de septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/la-anh/Informes%20de%20Gestin/Informe%20de%20gesti%20n%20ANH%202018.pdf>

¹⁶ *Ibíd.*, p. 78.

aumentado cada vez más la preocupación de algunos países, como Venezuela y Canadá, también se puede inferir de estos estudios que la inyección de vapor predomina entre todas las tecnologías existentes para la recuperación de petróleo pesado.¹⁷

En Colombia actualmente existen estudios gubernamentales enfocados en la viabilidad de la implementación del recobro mejorado con el fin de aumentar reservas. La ANH en sus informes dice que el objetivo fundamental de los proyectos de recobro mejorado es aumentar el factor de recobro último que se lograría con los métodos tradicionales de producción, extrayendo un porcentaje adicional de petróleo del yacimiento, llamado Petróleo Original En Sitio – POES; esto aplicando tecnologías, procesos o mecanismos de recuperación secundaria, terciaria o mejorada de petróleo¹⁸. En Colombia durante la vigencia 2018 se registraron 39 proyectos piloto de recobro mejorado -EOR de los cuales al finalizar el año, 29 se encontraban activos y 2 suspendidos, 7 terminados y 1 desistido. De los 29 proyectos activos, los campos Teca Cocorná, Chichimene y Castilla pasan a etapa de expansión por sus prometedores resultados. Lo cual logramos apreciar en los avances, en cuanto a reservas se refiere, entre los informes presentados por la ANH en 2018 y 2019. En la figura 3 se muestra la ubicación de los proyectos pilotos de recobro mejorado de 2018 activos en Colombia¹⁹.

¹⁷ WANDA, Z, *et al.*, Comparative performance of electric heater vs. RF heating for heavy oil recovery. Beijing: University of Petroleum, 2019, V. 160, p. 1-9

¹⁸ COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Informe de Gestión 2018 p. 80. [En línea]. [Consulta: 02 de septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/la-anh/Informes%20de%20Gestin/Informe%20de%20gesti%20n%20ANH%202018.pdf>

¹⁹ *Ibíd.*, p. 81.

aún en la actualidad se concentra la mayor producción de crudos con cuya gravedad API es inferior a los 17°²¹.

En Colombia los crudos pesados representan una porción relativamente alta de la canasta total de crudos y la modernización de la refinería de Cartagena, entre otras razones se realizó para el procesamiento de mayores volúmenes de crudos pesados²². Es por ello que se hace necesaria en las facilidades para el manejo de hidrocarburos de Colombia la implementación de mecanismos que permitan el procesamiento de crudos pesados. Ejemplo de lo dicho lo sustenta la UPME con el sistema de transporte de crudos en Colombia el cual supuso que la gravedad API resultante de las distintas mezclas de crudos no debe ser inferior a 18 °API lo que se traduce en una viscosidad promedio del orden de 600 cSt. Para los crudos pesados con gravedad por debajo de este valor, se agrega diluyente con °API de 65 en la proporción adecuada para alcanzar la fluidez necesaria que su movilización. El modelo calcula entonces los volúmenes de diluyentes para que la mezcla con crudo obtenga la viscosidad deseada y así poder transportar las mezclas sin incrementar costos de la operación y sin mayores afectaciones a sistema de transporte de petróleo.²³

²¹ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA, UPME. Escenarios Oferta y Demanda de Hidrocarburos Colombia 2012. p. 10. [En línea]. [Consultado: 01 de diciembre de 2019] Disponible en:
http://www.upme.gov.co/Docs/Publicaciones/2012/Escenarios_Oferta_Demanda_Hidrocarburos.pdf

²² *Ibíd.*, p. 21.

²³ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA, UPME. Plan Indicativo de Abastecimiento de Combustibles Líquidos, 2018. p. 192. [En línea]. [Consultado: 19 de enero de 2020]. Disponible en:
https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan_Abastecimiento_Combustibles_Liquidios_Final2019.pdf

Sociedad Portuaria Puerto Bahía es un puerto multipropósito con una terminal de líquidos diseñada para realizar almacenamiento, recibos y despachos de hidrocarburos mediante carros-tanque, barcaza y buque-tanque, construida con un enfoque en un mercado de crudos de alrededor a los 18 °API y superiores. Sin embargo, en su diseño se contemplaron los crudos que se encuentren por debajo de esta viscosidad, son crudos pesados y extra pesados que se caracterizan por tener viscosidades elevadas, para ello la terminal cuenta con un sistema de calentamiento que permite la transferencia de calor para la disminución de la viscosidad del hidrocarburo pesado del orden de los 900 cSt., y de esta forma alcanzar las condiciones que permita el flujo través del sistema de bombeo implementado en la terminal para su exportación.

Surge de esta forma la necesidad de adaptación y rediseño que permita contar con la versatilidad necesaria para el manejo de productos crudos pesados y extra pesados en las terminales de Colombia acorde al mercado de los hidrocarburos. Es por ello que la terminal de líquidos de la SPPB en consecuencia busca la implementación de nuevos mecanismos y estrategias que viabilicen el negocio de almacenamiento de hidrocarburos para su comercialización y permanecer a conformidad con las necesidades que presenta el mercado. En la figura 4 se ilustra la terminal de líquidos de SPPB, área de almacenamiento de los hidrocarburos y en la figura 5 el muelle principal de buque-tanques para la importación o exportación de los mismos.

Figura 4. Centro de distribución SPPB – Tanques Terminal de Líquidos.



Fuente: SPPB: www.puertobahia.com.co²⁴

Figura 5. Centro de distribución SPPB – Muelle Principal.



Fuente: SPPB: www.puertobahia.com.co²⁵

En el presente trabajo se busca identificar factores que impacten el sistema operativo usado para la transferencia de calor en SPPB, proponiendo mejoras y estrategias que permitan la administración de estos factores, las mejoras estarían

²⁴SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHÍA. 2019. [sitio web]. [Consultado: 15 septiembre 2019].
Disponble en <https://www.puertobahia.com.co>

²⁵ Ibíd.

enfocadas en el aprovechamiento del proceso de calentamiento del producto almacenado en los tanques y con ello la disminución de costos operacionales e impactos ambientales.

La metodología empleada para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo está basada en un análisis investigativo de campo en la terminal de líquidos de SPPB, para ello se realiza seguimiento y mediciones al producto pesado que actualmente se está manejando en la terminal y que comercialmente está identificado como Combustóleo o Fuel Oil (ver anexo C). Basando la investigación en este producto pesado en particular, se obtendrán resultados y conclusiones haciendo la observación desde este punto, de que cada producto pesado tiene características particulares propias debido a la naturaleza misma del compuesto o sustancias que lo conforman. Por lo anterior los resultados obtenidos describen el sistema de operación realizado con el Combustóleo en particular. Más allá de lo dicho, el combustóleo es un producto con características descritas en el anexo C, pero este mismo puede presentar rangos dentro de sus especificaciones por el hecho de ser un producto resultado de un proceso realizado con crudos lo cual hace que el Combustóleo sea una sustancia no pura.

Durante el seguimiento se toman mediciones sobre el Combustóleo, se realizan muestreos para su análisis en laboratorio y se mide la cantidad de combustible suministrado al proceso de calentamiento; con los datos obtenidos se calcula la cantidad de energía que es suministrada al sistema y de igual forma se calcula como el combustóleo reacciona a este calor suministrado. Análisis similares encontramos en la bibliografía así como lo hace *Delgado, Camargo y Espitia Cubillos*, quienes emplean métodos estadísticos descriptivos, de muestreo, así como de correlación y métodos matemáticos como mínimos cuadrados, aplicaciones lineales y exponenciales, entre otros, para generar el análisis conjunto de la información

logrando un mayor grado de confianza en los análisis.²⁶ El análisis de los datos obtenidos en el presente trabajo, fundamentado en principios termodinámicos, en donde la capacidad calorífica específica del Combustóleo (caracterizado por ser un producto pesado) y el poder calorífico del gas natural fueron identificados como los principales factores que impactan el proceso. La información obtenida en campo es recopilada bajo los diferentes escenarios que se pueden presentar durante la ejecución de las operaciones con productos pesados en la terminal de líquidos de SPPB a la fecha, los cuales son descritos en el desarrollo del presente trabajo.

En la bibliografía encontramos metodología de investigación para el análisis sobre el manejo de crudos pesados como es el caso de Gozá, Rodríguez y Morón, ellos realizan la evaluación del sistema energético de una planta de tratamiento de crudos pesados mediante la aplicación de una estrategia general de análisis de procesos que permitió caracterizar las condiciones de la planta, y plantear un grupo de medidas y recomendaciones que conllevaron a un mejor uso de la energía y a una disminución del impacto ambiental.²⁷ De igual forma en el presente trabajo se busca estudiar el proceso en la terminal de líquidos de SPPB, donde tiene lugar el calentamiento del Combustóleo con una perspectiva global, y de esta forma proponer estrategias que conlleven al mejoramiento del proceso.

Para el análisis del sistema de transferencia de calor para productos pesados en la terminal de líquidos de SPPB se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

²⁶ DELGADO, A., CAMARGO, S. y ESPITIA, A. Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, Scientia et Technica Año XXIV. 2019, Vol. 24, No. 02, pp. 190 - 199.

²⁷ GOZÁ, Osvaldo; RODRIGUEZ, Yadier; MORÓN, Carlos. Alternativas de mejoras energéticas en la planta de tratamiento de crudos de puerto escondido. La Habana: Revista de Ingeniería Energética, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría. 2017, vol. XXXVIII., n. 2, pp. 115-123

- Debido a que el análisis se realiza sobre el proceso conformado por todos los equipos implementados en el mismo (descritos en el desarrollo del trabajo en pag. 29), la suma de las pérdidas de calor presentadas durante el funcionamiento de cada uno de estos equipos se considera como la pérdida total del proceso. Dichas pérdidas se relacionan con la eficiencia de cada uno de los equipos. Por ejemplo, se tiene el intercambiador de calor el cual es considerado un equipo clave ya que en éste ocurre la transferencia de energía entre el aceite térmico empleado y el Combustóleo, esta transferencia de calor es afectada por el ensuciamiento del equipo lo cual se produce por la deposición de materiales no deseados en la superficie metálica, a medida que avanza el ensuciamiento, se observa caída de presión y resistencia a la transferencia de calor y, por lo tanto, la eficiencia térmica general del equipo disminuye.²⁸
- Se realizan seguimientos a los tanques de almacenamiento que están siendo sometidos a calentamiento durante dos periodos de tiempos, entre dos y tres meses aproximadamente. Durante los seguimientos se toman registros diarios volumétricos del combustible suministrado al sistema, volumen del Combustóleo contenido en el tanque que se encuentra sometido a calentamiento, seguidamente se hacen análisis de laboratorio de la calidad, densidad²⁹ °API @ 60 del producto, viscosidad y registro de la temperatura³⁰ que presentó el tanque. Con los datos obtenidos durante los seguimientos, se procede a realizar cálculos que permiten estimar la capacidad calorífica específica del combustóleo en el proceso. Se asume

²⁸ MUÑOZ PINTO, D. A., *et al.* Formation of fouling deposits on a carbon steel surface from Colombian heavy crude oil under preheating conditions. 2016, Journal of Physics: Conference Series 687.

²⁹ ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1298-12b (2017), Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. West Conshohocken: PA. Disponible en: www.astm.org

³⁰ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2012), API. Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 7—Temperature Determination. 2012. Washington, D.C.

que las pérdidas presentadas en los equipos que conforman el sistema están representadas en el resultado obtenido ya que este es analizado de una forma global.

- Se realiza el análisis de los datos, tomando aquellos que se obtienen durante operaciones relativamente estables, ya que el proceso de calentamiento ocurre bajo diferentes escenarios los cuales se describen en el presente trabajo.
- Los datos son promediados para obtener la capacidad calorífica específica del combustóleo/sistema. Con la implementación del resultado se puede estimar el periodo de tiempo a considerar para alcanzar la temperatura en el Combustóleo según el requerimiento y la viscosidad deseada en este.

Finalmente, con los resultados se estimaría la cantidad de combustible en el sistema para lograr generar los cambios en la temperatura del producto almacenado. La cantidad de gas natural requerido involucra costos y es por ello que mediante la administración de este recurso se presenta la posibilidad de viabilizar la implementación de estrategias que permitan disminuir dichos costos mediante el aprovechamiento del calor suministrado, de igual forma se lograría disminuir el impacto que el sistema de calentamiento de SPPB genera sobre el medio ambiente. Varios autores referencian lo dicho en sus investigaciones así como lo hace *Giuliano Albo, P.A.*,³¹ y también *Gozá, Rodríguez y Morón*, estos últimos dicen que trabajar con más eficiencia energética no sólo disminuye el consumo de combustible a utilizar, sino también disminuye los efectos negativos sobre el medio ambiente, al

³¹ GIULIANO ALBO, P.A., *et al.* Density, viscosity and specific heat capacity of diesel blends with rapeseed and soybean oil methyl ester. Netherlands: Biomass and Bioenergy. 2017. 96, p.87-9

disminuir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera producto de la combustión, y la contaminación de las aguas.³²

³² GOZÁ, Osvaldo; RODRIGUEZ, Yadier; MORÓN, Carlos. Alternativas de mejoras energéticas en la planta de tratamiento de crudos de puerto escondido. La Habana: Revista de Ingeniería Energética, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría. 2017, vol. XXXVIII., n. 2, pp. 115-123

1. CALENTAMIENTO DE PRODUCTOS PESADOS EN SPPB.

1.1. SISTEMA DE CALENTAMIENTO EN SPPB.

En la terminal de líquidos de SPPB, el sistema de bombeo para transportar los productos desde los tanques de almacenamientos hacia el muelle principal de buque-tanques se encuentra diseñado bajo especificaciones de productos con viscosidades máximas de 900 cSt.³³ Para el transporte de productos pesados, caracterizados por tener alta viscosidad a temperatura ambiente, la terminal cuenta con una facilidad que consiste en un sistema de calentamiento ubicado por fuera de los tanques de almacenamiento, aquí ocurre la transferencia de calor del producto mediante el intercambio en contracorriente con el fluido térmico³⁴, para así aumentar la temperatura del producto de tal manera que permita alcanzar la viscosidad dentro de la especificación que posibilite su transporte desde el tanque de almacenamiento hacia el muelle de buque tanques, para tal fin se emplea el sistema de bombeo para exportación.

Es muy frecuente el método de aumentar la temperatura de productos pesados enfocados en la disminución de la viscosidad, *Davletbaeva, Kovalevaa y Babadaglib*, en su investigación realizaron estudios sobre un mecanismo para el calentamiento de crudos pesados mediante calentamiento electromagnético de radiofrecuencia con el fin de aumentar de temperatura para de esta forma disminuir

³³ SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHIA. SPPB. PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD- 001 Sistema de calentamiento de crudo tanques – 1_2, Descripción del proceso. 05 Diciembre de 2014, Cartagena.

³⁴ SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHIA. SPPB. PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-FI-001 Sistema de calentamiento de crudo tanques – 1_2, Filosofía de operación de control. Diciembre de 2014, Cartagena.

viscosidad.³⁵ Existen múltiples mecanismos que buscan disminuir la viscosidad de hidrocarburos pesados para su transporte, el alcance del presente trabajo permite analizar el mecanismo que actualmente es empleado en SPPB.

El fluido térmico usado para la transferencia de calor es el Therminol 55³⁶ (Anexo A), es un aceite de alta conductividad que permite trabajar en su fase líquida alcanzando las condiciones operativas adecuadas sin generar presión significativa y sin vaporizarse durante su calentamiento en el equipo calentador del sistema.

Los productos pesados que se han manejados en la terminal de líquidos de SPPB hasta la actualidad han llegado a alcanzar los 5.000 cSt a temperatura ambiente. Hoy en día se maneja el combustóleo y el crudo rubiales. (Anexo C)

1.1.1 Tanques de almacenamiento. Los tanques asociados al sistema de calentamiento almacenan hidrocarburos pesados recibidos actualmente de dos fuentes: carro tanques y/o barcazas para luego ser despachados a buque-tanques. Los tanques asociados al sistema de calentamiento *heating* de la terminal de líquidos de SPPB son el TA5300-1, TA5300-2 y TA5300-5 habilitados para el almacenamiento de hidrocarburos pesados. Luego que el tanque seleccionado recibe el combustóleo y alcanza el nivel mínimo para proceder con el calentamiento, se hace recircular el producto hacia el sistema de calentamiento hasta el momento en el cual se logra alcanzar la temperatura deseada.

³⁵ DAVLETBAEVA, A; KOVALEVAA, Liana and BABADAGL, Tayfun. Combining solvent injection, electromagnetic heating, and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery. Edmonton: Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2016 Vol. 30, No. 2, pp. 207-224

³⁶ SPPB. PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD- 001 Sistema de calentamiento de crudo tanques – 1_2, Descripción del proceso. 05 Diciembre de 2014, Cartagena.

Los tanques de almacenamiento se encuentran conectados a la succión de los siguientes sistemas de bombeo en la terminal:

- ✓ Bombas de transferencia de productos a muelle P101 A, P101 B, P101 C.
- ✓ Bomba de *stripping* y multiuso P102
- ✓ Bombas de transferencia P103 A, P103 B

1.1.2 Equipos del sistema de calentamiento. El sistema de calentamiento de productos pesados se diseñó para manejar el fluido contenido en solo uno de los tanques de almacenamiento a la vez. Se caracteriza por ser un circuito cerrado en el que se busca minimizar las pérdidas del fluido y de calor, disminuyendo la reposición periódica del aceite de calentamiento. El sistema de calentamiento de productos pesados de la terminal de líquidos de SPPB se encuentra constituido por los siguientes equipos:

1.1.2.1 Filtro de hidrocarburos FIL 110 Es un filtro tipo canasta, común para las bombas de recirculación de crudo, el objetivo de este filtro es evitar el paso de elementos que puedan llegar a obstruir o afectar la operación de las bombas empleadas para la recirculación del producto a través del sistema de calentamiento tiene las características descritas en la tabla 3.

Tabla 3. Características del Filtro FIL 110.

ITEM	DATO
Tipo	Canasta
Capacidad	980 gpm
ΔP colmatado	3 psi
Fluido	(300 - 3.000 cSt, 12.7 °API)
Conexiones	20"

Fuente: Descripción del proceso, PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD-001

1.1.2.2 Bombas de recirculación de hidrocarburos P120A, B y C Son bombas de desplazamiento positivo que por sus características mecánicas se consideran ideales para el manejo de fluidos de alta viscosidad. En el sistema se emplean dos (2) bombas en operación y una (1) en *stand by* garantizando un equipo de *back-up*, tiene las características descritas en la tabla 4:

Tabla 4. Características las bombas de hidrocarburo P120 A/B/C.

ITEM	DATO
Tipo	Desplazamiento positivo - paletas
Marca	Blackmer
Modelo	MLX4B
Capacidad	490 gpm
Presión diferencial	145 psi
Fluido	(300 - 3.000 cSt)
Potencia	60 HP
Conexiones	4" succión y descarga

Fuente: Descripción del proceso, PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD-001

1.1.2.3 Intercambiador de calor E 110 El intercambiador de calor es de tipo carcasa y tubos, diseñado específicamente para calentar fluidos viscosos. El intercambiador trabaja en contracorriente con el producto hidrocarburo en la carcasa y el aceite térmico en los tubos, tiene las características descritas en la tabla 5

Tabla 5. Características del Intercambiador de calor E 110.

ITEM	DATO
Tipo	Carcasa y Tubos
Marca	<i>American Heating Company</i>
Modelo	AHST - 1500
Capacidad Carcasa	980 gpm
Capacidad Tubos	450 gpm
Fluido carcasa	Producto (300 - 3.000 cSt, 12,7 °API)
Fluido tubos	Therminol 55 (1,05 cSt, 44,6 lb/ft ³)
Temperatura entrada	89°F
Temperatura salida	450°F
ΔP Carcasa	20 psi
ΔP Tubos	15 psi

Fuente:

Descripción del proceso, PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD-001

1.1.2.4 Calentador de aceite (Heater) B-610 El calentador del aceite del sistema es de tipo serpentín, su fuente de calor es generada por combustión de gas natural. El aceite circula dentro de un serpentín helicoidal colocado dentro del cuerpo del calentador. El poder calorífico del combustible gas natural es una propiedad importante que caracteriza su contenido energético.³⁷ tiene las características descritas en la tabla 6

Tabla 6. Características del calentador de aceite (Heater) B-610.

³⁷ DELGADO, A.; CAMARGO, S. y ESPITIA, A. Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. Pereira: Scientia et Technica Año XXIV, Universidad Tecnológica de Pereira. 2019, Vol. 24, No. 02, pp. 190 - 199.

ITEM	DATO
Tipo	Serpentín
Marca	<i>American Heating Company</i>
Modelo	AHE - 100
Capacidad	450 gpm.
Capacidad transferencia de calor	10.000.000 BTU/ h
Fluido	Therminol 55 (1.05 cSt, 44,6 lb/ ft ³)
Temperatura entrada / salida aceite	350°F / 450°F
ΔP equipo	60 psi.
Eficiencia	88%
Potencia <i>Blower</i>	15 HP
Quemador	IC Burner – Gas Natural

Fuente: Descripción del proceso, PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD-001

1.1.2.5 Bombas de recirculación de aceite P 610 A y P610 B. Las bombas centrífugas son utilizadas para forzar la circulación del aceite térmico a través del sistema. Para la circulación del aceite térmico se emplea un (1) equipo operando y un (1) equipo en *stand by*, con lo cual se garantizara un equipo de *back-up*, tiene las características descritas en la tabla 7

Tabla 7. Características bombas de aceite P 610 A/B.

ITEM	DATO
Tipo	Centrifugas
Marca	<i>Dean Pump</i>
Modelo	RA 3143

Tabla 7. (Continuación)

ITEM	DATO
------	------

Capacidad	450 gpm.	Fuente: Descripción del proceso, PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD-001
Presión diferencial	120 psi.	
Fluido	Therminol 55 (1,05 cSt, 44,6 lb/ft ³)	
ITEM	DATO	
Potencia	40 HP	
Conexiones	4" succión y 3" descarga	

1.1.2.6 Filtro de Aceite FIL 610. Cumple las mismas funciones del Filtro de hidrocarburos FIL 110 pero para el aceite térmico, tiene las características descritas en la tabla 8:

Tabla 8. Características filtro Fil - 610.

ITEM	DATO
Tipo	Cartuchos de fibra
Capacidad	10 gpm.
ΔP colmatado	25 psi
Fluido	Therminol 55 (1,05 cSt, 44.6 lb/ ft ³)
Conexiones	1"

Fuente: Descripción del proceso, PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD-001

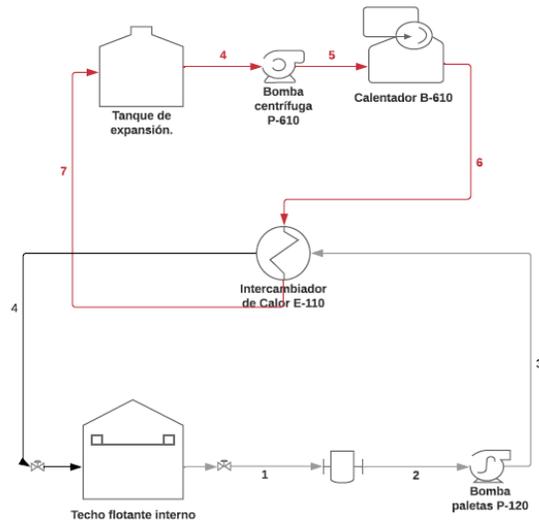
1.1.2.7 Tanque de expansión de Aceite TS-610. El tanque de expansión atmosférico absorbe la expansión del fluido térmico al calentarse, adicional tiene como finalidad desairar el aceite evitando corrosión en el sistema y al ser el aceite más frío el que entra en contacto con el ambiente se procura evitar que el mismo vuelva a capturar oxígeno, tiene las características descritas en la tabla 9:

Tabla 9. Características tanque de expansión TS-610.

ITEM	DATO
Tipo	Atmosférico – Horizontal
Capacidad	2.000 Gal.
Marca	<i>American Heating company.</i>
Diámetro	5,5 ft
Longitud	12 ft

Fuente: Descripción del proceso, PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD-001

Figura 6. Diagrama de proceso del sistema de calentamiento de producto pesado en SPPB.



Fuente: SPPB.³⁸

1.2. ANALISIS AL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE SPPB.

³⁸ SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHIA. SPPB. PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD- 001 Sistema de calentamiento de crudo tanques – 1_2, Descripción del proceso. 05 Diciembre de 2014, Cartagena.

Todo proceso natural o industrial genera entropía, y su máxima eficiencia energética tiene lugar en estados donde la generación de entropía es mínima.³⁹ Durante el proceso de calentamiento de combustóleo en la terminal de SPPB, el sistema se encuentra en constante generación de entropía hasta el punto en que se deja de suministrar calor al sistema, sin embargo este buscara alcanzar su estado de equilibrio en el cual las pérdidas del calor serian inevitables, es por ello que luego del proceso de calentamiento del producto pesado, este debe ser bombeado en el menor tiempo posible con el fin de aprovechar toda la energía suministrada.

A continuación se hace unas pequeñas descripciones de los posibles análisis energéticos que se pueden realizar sobre el sistema para el calentamiento de producto generado mediante la transferencia de calor. Básicamente en los procesos de transferencia de calor por convección, la transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura finita y el flujo de fluido con efectos viscosos son irreversibles y sus irreversibilidades pueden medirse mediante la generación de entropía.⁴⁰

Para análisis del sistema de calentamiento de SPPB se implementa un método simple y practico el cual permite hacer una estimación del calor a suministrar al sistema para alcanzar una característica en el producto como es la viscosidad. Sin embargo también se anuncian métodos para un análisis más profundo del sistema que permita realizar optimizaciones. Así pues, según la ley de enfriamiento de Newton, la tasa de transferencia de calor es proporcional al coeficiente de transferencia de calor por convección, o su versión adimensional, el número de

³⁹ BARRANGÁN, D. Producción de entropía y ley de enfriamiento de Newton. Revista Ingeniería e investigación, 2009. p. 29.

⁴⁰ CHEN, X., *et al.* Entropy and entransy in convective heat transfer optimization: A review. and perspective. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 137, pp. 119 -1220.

Nusselt, el cual puede ser usado como criterio de optimización⁴¹ Según *Chen, X., et al.*, La optimización busca obtener el mejor rendimiento dentro de las limitaciones dadas, el primer paso es establecer un criterio de evaluación razonable y unificado como la función objetivo que luego se maximiza o minimiza dentro de las restricciones dadas. Sin embargo, los procesos de transferencia de calor por convección siempre implican la conservación de la energía, por lo que la conservación de la energía no se puede utilizar como la función objetivo. Además, el resultado (el coeficiente de transferencia de calor por convección o el número de Nusselt) y el costo no se pueden comparar directamente. Por lo tanto, no existe un concepto de eficiencia para la transferencia de calor, en los problemas de transferencia de calor por convección. Como resultado, estudios han tratado de minimizar el costo o maximizar la relación de la tasa de transferencia de calor al volumen o peso como la función objetivo⁴².

Chen, X., et al., proponen diferentes métodos de optimización de procesos de transferencia de calor por convección. Sin embargo argumenta que si no hay un parámetro local en el campo de flujo que pueda usarse para medir el coeficiente de transferencia de calor por convección, el estudio solo puede optimizar la transferencia de calor por convección mediante un procedimiento de "prueba y error".⁴³

El análisis energético es una técnica planteada con base a la segunda ley de la termodinámica para identificar los lugares y las magnitudes de las irreversibilidades; Según *Patiño Duque y Rosero Coral* algunas de las irreversibilidades que se encuentran después de hacer un análisis energético no pueden ser eliminadas, pero si se pueden mejorar, ya sea rediseñando el equipo o

⁴¹ CHEN, X., *et al.* Entropy and entransy in convective heat transfer optimization: A review. and perspective. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 137, pp. 119 -1220.

⁴² *Ibíd.*

⁴³ *Ibíd.*

el proceso donde se encuentren⁴⁴. Este análisis se podría realizar para establecer con más profundidad las pérdidas en cada uno de los equipos que conforman el sistema de calentamiento de SPPB, luego de su identificación se propondrían posibles mejoras o rediseños en el sistema para el proceso de calentamiento de la terminal. Todo esto se puede lograr basados en el principio que define *Patiño Duque y Rosero Coral*, los cuales son fundamentados en la exergía.

De igual forma al aplicar la ley de enfriamiento de Newton y la ley de conducción de calor de Fourier en los procesos de transferencia de calor, se puede analizar el estado estacionario del proceso, igualmente en el estado transitorio del proceso para determinar los tiempos y las velocidades iniciales de transferencia, permitiendo caracterizar el sistema y su interacción con el entorno⁴⁵. El producto pesado almacenado en los tanques de la terminal de líquidos de SPPB, luego de ser sometidos al proceso de calentamiento se encontraría en estados transitorios ya que la temperatura es elevada de forma gradual hasta obtener la viscosidad deseada, posteriormente se suspende el calentamiento, previo a la exportación del producto. Sin embargo puede ocurrir que el producto permanezca en reposo por un periodo de tiempo, dadas ciertas condiciones operativas, lo que da pie a que se inicie el enfriamiento del producto en el tanque generando no solo pérdida del valor calórico en el producto sino también costos operativos.

Por otra parte *Delgado, Camargo y Espitia Cubillos* en su estudio definen la capacidad calorífica (C_p) en función de la temperatura mediante un modelo polinomial y lo establecen como el más acertado a través de la siguiente ecuación 1:

$$CP = (A + BT - CT^2 + DT^3) * 4,187 \text{ (ecuación 1)}$$

⁴⁴ PATIÑO DUQUE, H. D., y ROSERO CORAL, B. D., Análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Tunja: Revista ingeniería, Investigación y Desarrollo, 2017, v. 17, pp. 49-58.

⁴⁵ BARRANGÁN, D. Producción de entropía y ley de enfriamiento de Newton. Revista Ingeniería e investigación, 2009. p. 29.

Donde las constantes A, B, C y D las obtienen a partir de mínimos cuadrados, empleando con valores teóricos y pruebas de laboratorio.⁴⁶ Concluyen que la metodología empleada en su investigación permite evidenciar, que los datos resultantes para las propiedades fisicoquímicas a partir de la relación de las ecuaciones y algoritmos evaluados son próximos a los valores experimentales reportados en la bibliografía, permitiendo a partir de este estudio analizar los procesos de producción y sus ajustes a valores reales de referencia. *Delgado, Camargo, & Espitia* Cubillos también concluyen que las propiedades fisicoquímicas muestran una dependencia con la temperatura.

En cuanto al análisis del sistema de bombeo empujado en la terminal dentro del proceso para la transferencia de calor *Chem, X., et al.* dice que un buen diseño de transferencia de calor por convección no solo mejorará la transferencia de calor, sino que también reducirá la potencia de bombeo. En comparación con simplemente considerar la mejora de la transferencia de calor, la optimización de la transferencia de calor por convección requiere mejorar la transferencia de calor de manera eficiente sin aumentar significativamente la potencia de bombeo⁴⁷

El análisis realizado en el presente trabajo sobre el sistema de calentamiento de la terminal de líquidos de SPPB se hace tomando un volumen de control global que ayuda a determinar el tiempo requerido para el calentamiento del producto combustóleo, basándose en el calor diario suministrado al sistema por medio del combustible gas natural para lograr generar cambios en la temperatura del producto almacenado, tales cambios son evidenciados y medidos en el tanque de

⁴⁶ DELGADO, A.; CAMARGO, S. y ESPITIA, A. Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. Pereira: Scientia et Technica Año XXIV, Universidad Tecnológica de Pereira. 2019, Vol. 24, No. 02, pp. 190 - 199.

⁴⁷ CHEN, X., et al. Entropy and entransy in convective heat transfer optimization: A review. and perspective. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137, pp. 119 -1220.

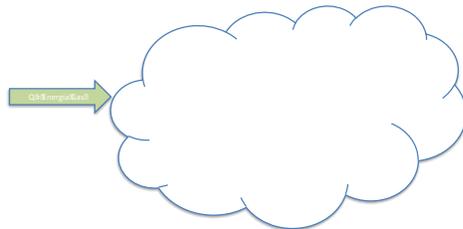
almacenamiento, que en dado momento se encuentre en supervisión por calentamiento.

1.2.1. Posibles escenarios presentados durante el proceso de calentamiento.

En la dinámica operativa ejecutada en la terminal de líquidos de SPBB, se pueden presentar diferentes casos durante el calentamiento del combustóleo, los cuales fueron evidenciados durante el seguimiento realizado con la presente investigación y son descritos con los siguientes escenarios:

1.2.2. Calentamiento de tanque con volumen constante Se presenta cambio de temperatura en un tanque a medida que ingresa calor al volumen de control del mismo (figura 7).

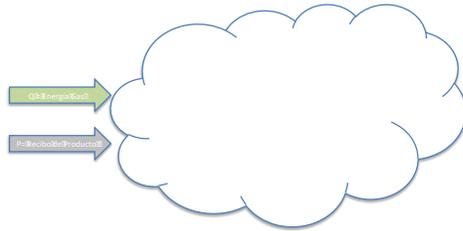
Figura 7. Volumen de producto constante en el sistema de control.



1.2.3. Calentamiento de tanque con ingreso de producto al sistema de control.

Se presenta cambio de temperatura en un tanque a medida que ingresa calor al volumen de control. Puede ser significativo el cambio de temperatura al ingresar producto hidrocarburo al tanque, principalmente proveniente de barcazas (figura 8).

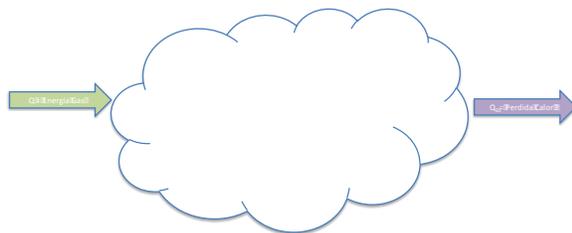
Figura 8. Volumen de producto variable en el sistema de control.



1.2.3.1. Calentamiento de producto en tanque sin aislamiento térmico.

Se presenta cambio de temperatura en el tanque a medida que ingresa calor al volumen de control. Puede ser significativa la pérdida de calor en el tanque que se encuentra sin aislamiento térmico (figura 9).

Figura 9. Volumen de producto constante en sistema de control, sin aislamiento térmico en tanque.

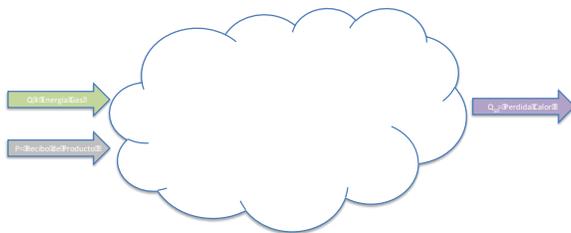


1.2.4. Calentamiento de producto en tanque sin aislamiento y sin ingreso de producto.

Se presenta cambio de la temperatura en el tanque a medida que ingresa calor al volumen de control. Puede ser significativa la afectación en la temperatura al

ingresar producto al tanque, principalmente proveniente de barcazas, de igual forma puede ser significativa la perdida de calor en el tanque por falta de aislamiento térmico (figura 10).

Figura 10. Volumen de producto variable en sistema de control, sin aislamiento térmico en tanque.



1.3. RESULTADOS DEL SEGUIMIENTO AL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE SPPB.

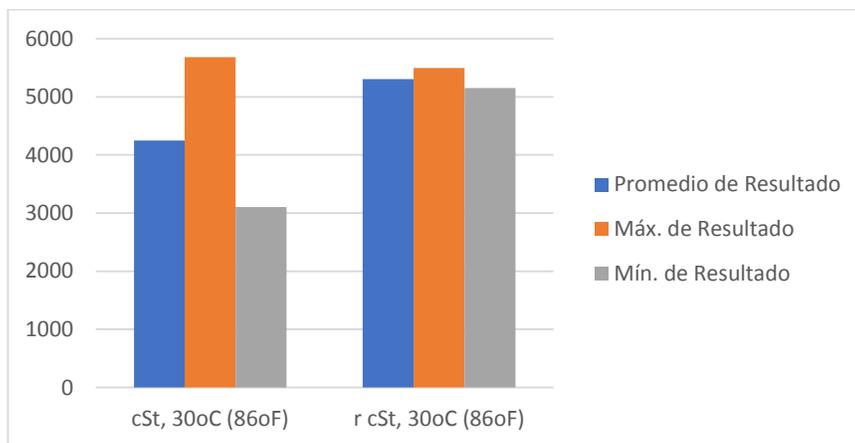
El combustóleo manejado actualmente en la terminal de líquidos de SPPB se encuentra en el rango de los 4.200 cSt a temperatura ambiente. En la tabla 10 y en el figura 12 se muestran los rangos de viscosidad que presentan los productos pesados crudos rubiales y combustóleos, estos hay sido a la fecha los productos pesados manejados en la terminal.

Tabla 10. Viscosidades de crudos pesados Rubiales (r) y Combustóleo.

Fuente: Datos tomados de análisis de productos pesados en SPPB

Etiquetas de fila	Promedio de Resultado	Máx. de Resultado	Mín. de Resultado
cSt, 30°C (86°F)	4248	5680	3105
r cSt, 30°C (86°F)	5303	5497	5152
General	4257	5680	3105

Figura 11. Viscosidades de Crudos Pesados Rubiales (r) y Combustóleo.



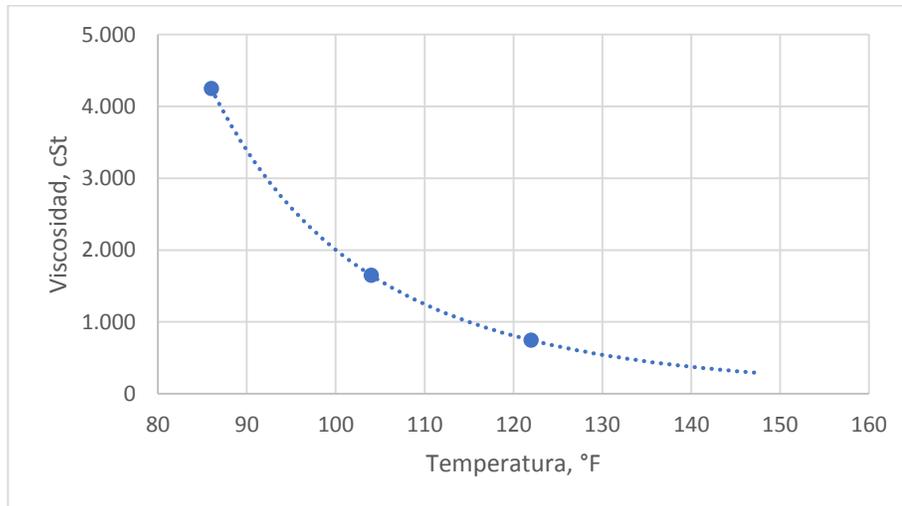
Fuente: Datos tomados de análisis en SPPB.

Con la recopilación de los resultados de análisis de viscosidad⁴⁸ del producto pesado (combustóleo) recibido en la terminal de SPPB se realiza la elaboración de una curva de viscosidad para su caracterización, figura 13, evidenciando de igual forma en que lo hicieron *Zaidullin, M. et al*, quienes en su estudio observan una

⁴⁸ASTM INTERNATIONAL. ASTM D445-19a, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). West Conshohocken: PA, 2019. Disponible en: www.astm.org

disminución regular en la viscosidad del petróleo con el aumento de la temperatura.⁴⁹

Figura 12. Curva de viscosidades del Combustóleo.



Fuente: Datos tomados de análisis laboratorio de producto pesado en SPPB

Con base a la información mostrada en la figura 13 se puede inferir que para alcanzar una viscosidad de 900 cSt, requerida por diseño para el sistema de bombeo de exportación, se demanda de una temperatura de 120°F en el combustóleo almacenado en el tanque que sea requerido para el bombeo hacia el muelle principal de buque-tanque de SPPB. En la práctica el combustóleo ha llegado a alcanzar una temperatura de 140°F en los tanques en proceso de calentamiento, lo que permite precisar que el producto llega a alcanzar viscosidades aún por debajo de lo requerido, lo que se traduce en mayores costos operativos.

⁴⁹ ZAIDULLIN, M. *et al.* Influence of the structure of heavy oil disperse system on its rheological properties under steam-heat treatment conditions. New York: Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2017, Vol. 53, No. 4. pp. 470-479

Al realizar el seguimiento al proceso de calentamiento de los productos en los tanques de almacenamiento TA53001, TA53002 y TA53005, se esperaría que los comportamientos de los tanques 53001 y 53002 sean iguales o muy similares ya que estos poseen un enchaquetamiento para el aislamiento térmico. Para el caso del comportamiento del tanque de almacenamiento TA53005 se esperaría un comportamiento diferente ya que no posee aislamiento térmico, que a diferencia de los tanques 53001 y 53002, este solo posee un recubrimiento con pintura que beneficia la conservación del calor al interior del tanque.

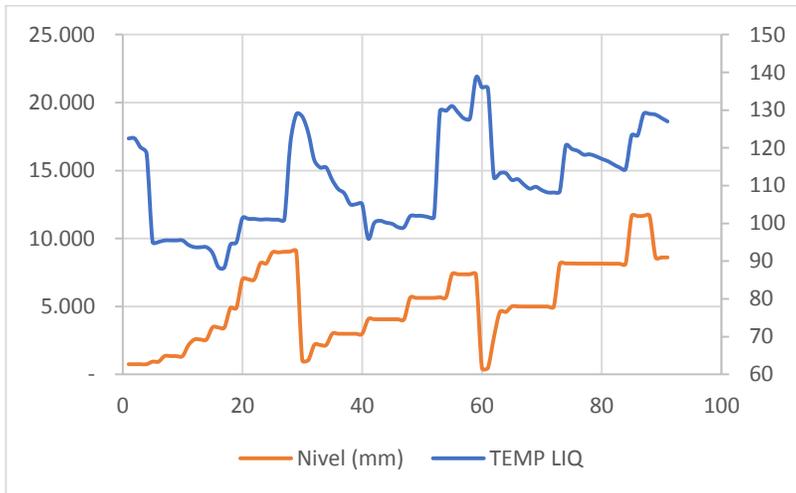
Para el proceso de calentamiento se requiere de un nivel mínimo del combustóleo en el tanque de almacenamiento, adicional a ello, que se encuentre próxima la fecha para la exportación del producto, es decir su bombeo a muelle principal de buque tanques. Por ello resulta muy importante determinar el tiempo a emplear en el calentamiento del producto para alcanzar el objetivo puntual en la temperatura, con el fin de optimizar la operación del calentamiento y los costos asociados a este proceso.

La información de campo recolectada, refleja los cambios generados en los tanques de almacenamiento al activar el sistema de calentamiento, también refleja los escenarios presentados durante el proceso ya descritos en el presente trabajo. En conjunto a esto se analiza el desempeño que presentan los tanques con chaqueta de aislamiento térmico TA53001 y TA53002, figura 13, 16 y figura 14, 17 respectivamente y el tanque sin aislamiento térmico TA53005 en figuras 15, 18. Los resultados presentados en las figuras 13 a la figura 18 corresponden a los seguimientos realizados en los periodos de tiempo correspondientes que son referenciados en cada uno de los gráficos de la siguiente forma:

El primer seguimiento al sistema para el calentamiento del combustóleo se realizó durante los meses de septiembre, octubre y noviembre 2018 a los tanques de

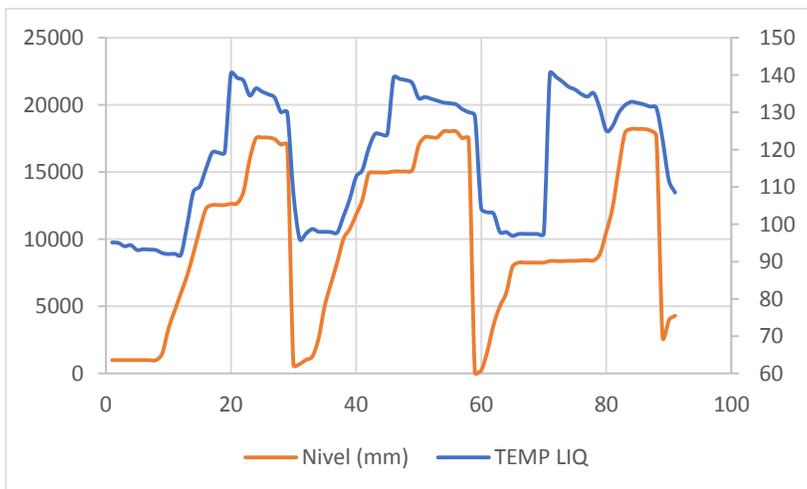
almacenamiento TA53001, TA53002 y TA53005 de la terminal de SPPB como sigue:

Figura 13. Seguimiento periodo 1 del tanque TA53001.



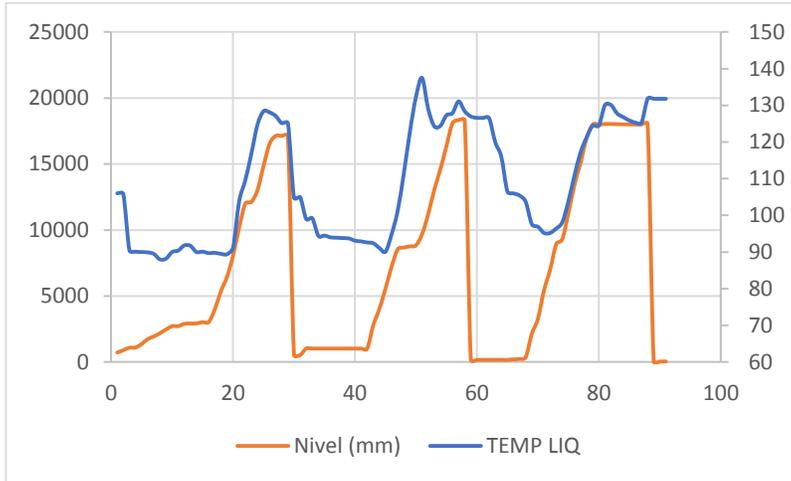
Fuente: Datos tomados de análisis de calentamiento de tanques en SPPB

Figura 14. Seguimiento periodo 1 del tanque TA53002.



Fuente: Datos tomados de análisis de calentamiento de tanques en SPPB

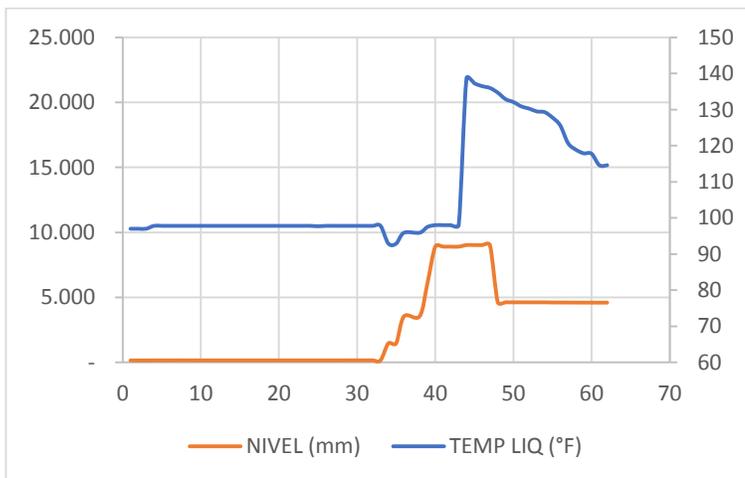
Figura 15. Seguimiento periodo 1 del tanque TA53005.



Fuente: Datos tomados de análisis de calentamiento de tanques en SPPB

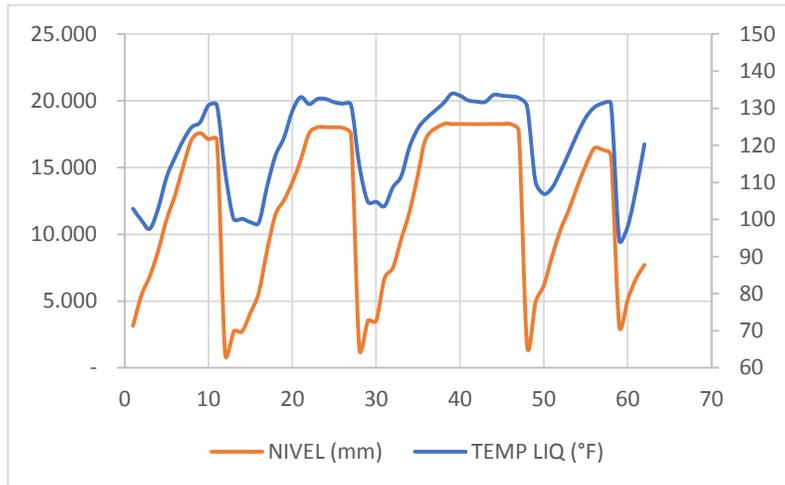
El segundo seguimiento realizado en los meses de abril y mayo del 2019 al sistema de calentamiento sobre el combustóleo almacenado en los tanques TA53001, TA53002 y TA53005 se muestran en los datos de las figuras 17, 18 y 19 así:

Figura 16. Seguimiento periodo 2 del tanque TA53001.



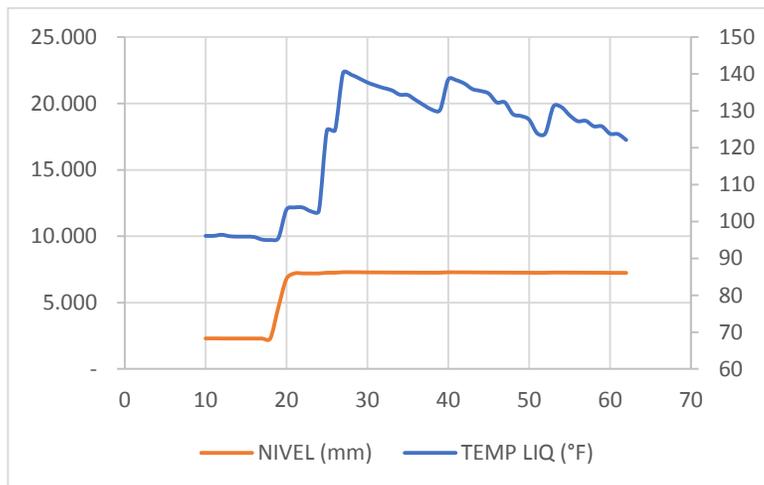
Fuente: Datos tomados de análisis de calentamiento de tanques en SPPB

Figura 17. Seguimiento periodo 2 de tanque TA53002.



Fuente: Datos tomados de análisis de calentamiento de tanques en SPPB

Figura 18. Seguimiento periodo 2 de tanque TA53005.



Fuente: Datos tomados de análisis de calentamiento de tanques en SPPB

Asumiendo todo el proceso de calentamiento (figura 7 en pag. 36) como el volumen de control y teniendo en cuenta lo dicho por *Giuliano Albo, P.A., et.al* donde sustenta que las propiedades termo-físicas de los combustibles son necesarias para el

diseño eficiente de cada paso en su producción, distribución y utilización,⁵⁰ se realiza seguimiento al calor que se suministra al sistema mediante el gas natural, del cual se asume tiene una combustión total y se toman registros de los cambios de la temperatura sobre el combustóleo almacenado en el tanque analizado. Se tomaron los datos promedios diarios en los análisis realizados en cuanto a masa de hidrocarburo contenida en el tanque, calor diario suministrado al sistema y el cambio de la temperatura del producto en el tanque.

Se buscó una estimación de la capacidad calórica específica del combustóleo/sistema, considerando y a su vez asumiendo constantes las pérdidas que se presentan en cuanto a temperatura ambiente, eficiencia del quemador (Heater) B-610 e intercambiador de calor E-110 principalmente.

En la siguiente tabla 11 se reportan los resultados de los cálculos realizados con los datos obtenidos de los seguimientos realizados sobre el sistema de calentamiento de SPPB y al combustóleo almacenado en los tanques TA53001, TA53002 y TA53005 cuando se encontraban proceso de calentamiento:

Donde:

Q: Calor suministrado al sistema mediante el gas natural, Btu/día

ΔT : Cambio de la temperatura del combustóleo almacenado en el tanque, °F.

°API: Densidad del combustóleo almacenado y sometido a calentamiento.

W: Masa almacenada de combustóleo sometida a calentamiento, lb.

Cp: Capacidad calórica específica del combustóleo caracterizado en el sistema de calentamiento de la terminal de líquidos de SPPB, (combustóleo/sistema), Btu/(lb °F)

⁵⁰ GIULIANO ALBO, P.A., et.al, Density, viscosity and specific heat capacity of diesel blends with rapeseed and soybean oil methyl ester, Biomass and Bioenergy 2017. 96, pp.87-95

Tabla 11. Resultados de análisis calentamiento del combustóleo en tanques.

PROMEDIOS DIARIOS					
TANQUE	Q, (Btu/día)	$\Delta T, ^\circ F$	$^\circ API$	W, lb	Cp, Btu/(lb $^\circ F$)
53002	239.965.310	5,15	5,94	69.029.372	0,68
53001	234.567.844	6,49	6,15	47.688.693	0,76
53005	230.514.923	5,81	6,40	55.046.028	0,72

Fuente: Resultados de seguimientos a calentamiento de combustóleo en SPPB.

Se calculó las capacidades caloríficas específicas (combustóleo/sistema) arrojando resultados con varianza en el orden de 0.001.

En el análisis realizado por *Goncalves, Perin y Goncalves, C*, donde consideran la capacidad calorífica específica mostrando que el petróleo pesado con valores de Cp más altos también tenía el API $^\circ$ más bajo.⁵¹ No resulta ser muy evidente en el presente trabajo ya que los valores reportados de Cp del combustóleo está íntimamente relacionado con el sistema analizado y las pérdidas que en este se presentan, sin embargo los resultados arrojados en los tres tanques se encuentran en rangos con una desviación estándar alrededor de 0.04 y sumado a lo dicho, el rango de variación de las especificaciones de la sustancia combustóleo no es tan marcada que permita asegurar que su caracterización posee comportamientos típicas de productos diferentes.

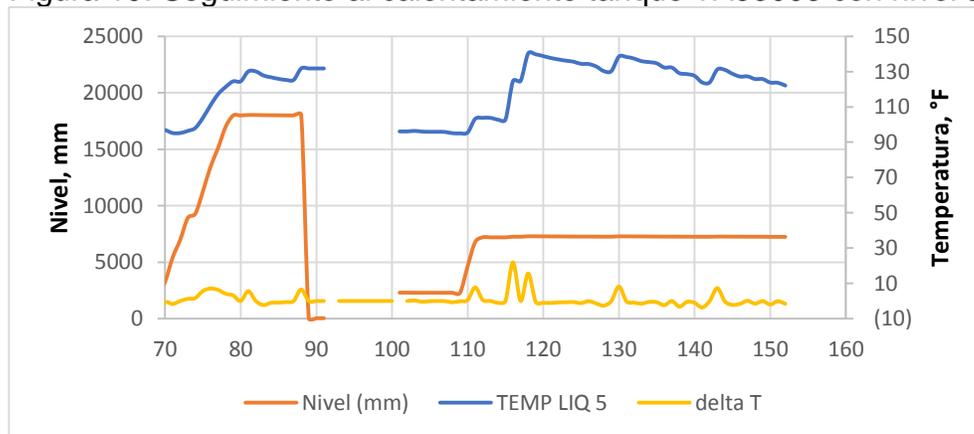
Los resultados nos permiten estimar la cantidad de calor diario que se suministraría a un tanque que contenga una determinada masa de combustóleo para alcanzar la temperatura buscada a partir de la temperatura inicial en la que se encuentre el tanque.

⁵¹ GONCALVES MOTHÉ, Michelle; PERIN, Mauricio y GONCALVES MOTHÉ, Cheila. Comparative thermal study of heavy crude oils by DSC, Federal University of Rio de Janeiro: Petroleum Science and Technology. 2016, 34:4, pp. 314-320

Sin embargo, se debe considerar los posibles escenarios que se presentan en el tanque sometido a calentamiento (descritos anteriormente en el presente trabajo) ya que la afectación al proceso puede llegar a ser significativa, cabe decir que el seguimiento realizado para el presente trabajo transcurrió con los escenarios expuestos.

El tanque TA53005 tiene la característica de encontrarse sin chaqueta para el aislamiento térmico y en efecto se encuentra más propenso a la afectación de la temperatura del combustible contenido en el tanque debido a la temperatura del ambiente, produciéndose transferencia de calor entre el sistema y el ambiente. Se evidencia que luego del proceso de calentamiento con bajo nivel de producto en este tanque, la pérdida de la temperatura ocurre más rápidamente en comparación cuando el tanque se encuentra en niveles altos, esto está relacionado con el hecho que al aumentar la masa de una sustancia, se aumenta su capacidad calorífica ya que aumenta la inercia térmica, y con ello aumenta la dificultad de la sustancia para variar su temperatura. Lo anterior se evidencia en las figura 20 en donde se muestra el seguimiento realizado al tanque TA53005 durante y después del calentamiento.

Figura 19. Seguimiento al calentamiento tanque TA53005 con nivel alto y bajo.

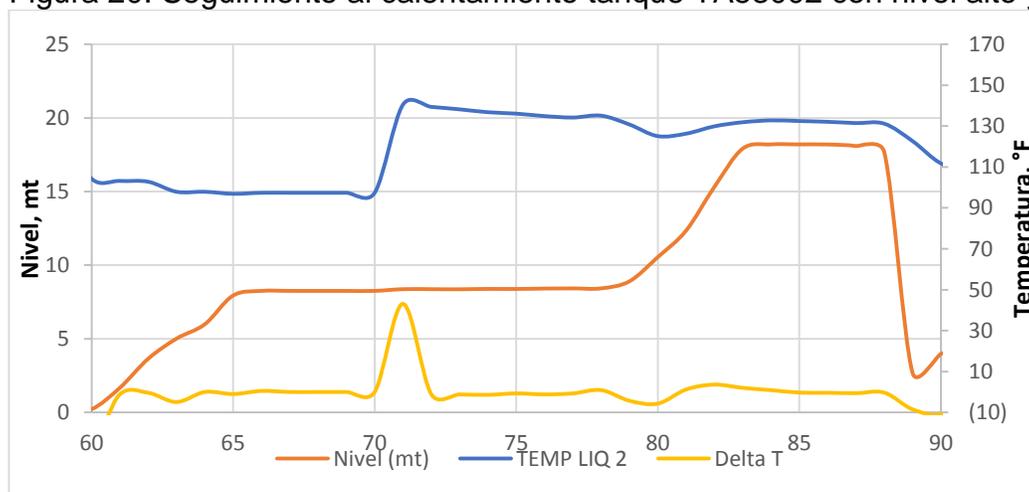


Fuente: Datos tomados de análisis en SPPB

Como es de esperar el tanque TA53005 (figura 20), presenta un comportamiento más dinámico referente a la temperatura del combustóleo contenido en este tanque y se evidencia tanto a niveles altos como a niveles bajos de combustóleo en el tanque. Posterior de someter el combustóleo contenido en el tanque TA53005 al calentamiento, se aprecia disminución de la temperatura tanto en un alto como en un bajo nivel, evidenciando en promedio una variación de la temperatura de 1 grado Fahrenheit por día.

En la figura 21 se muestra el resultado del seguimiento realizado al tanque TA53002, que a diferencia del tanque TA53005 (Figura 20), cuenta con chaqueta de aislamiento térmico lo que permite conservar el calor que ha sido suministrado al sistema. Luego del calentamiento del tanque TA53002 la temperatura se mantiene bajo un rango aceptable que asegure la viscosidad del combustóleo tanto a niveles bajos en el tanque como a niveles altos. Este tanque no muestra cambio significativo de la temperatura luego de su calentamiento, aun en el escenario en donde se presenta ingreso de producto al tanque, lo cual dado el caso y sea requerido, se puede compensar con un pequeño periodo de calentamiento.

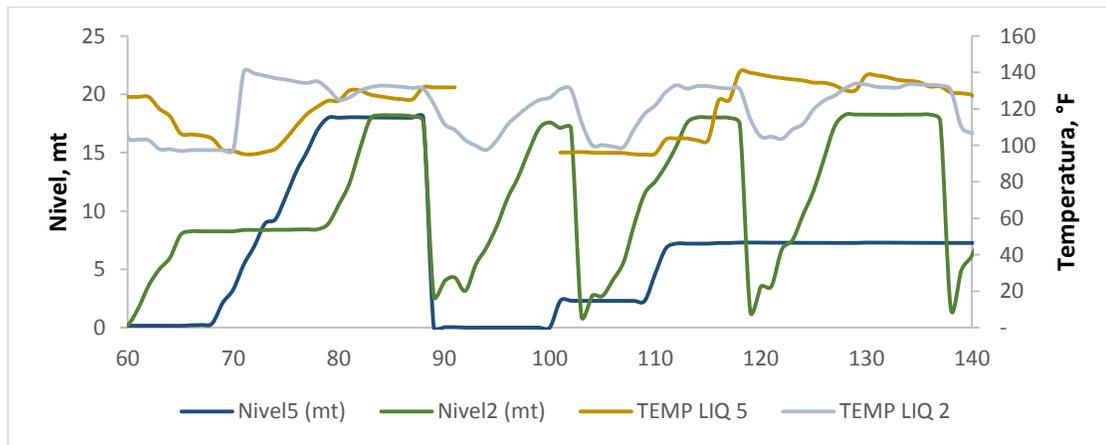
Figura 20. Seguimiento al calentamiento tanque TA53002 con nivel alto y bajo.



Fuente: Datos tomados de análisis en SPPB

En la figura 22 se superponen los comportamientos que presentan el tanque TA53002 el cual cuenta con chaqueta para aislamiento y el tanque TA53005 sin chaqueta para aislamiento térmico, resumiendo así el análisis de la temperatura en ambos tanques a niveles altos y bajos del contenido con combustóleo, evidenciando la estabilidad en la temperatura en el tanque TA53002 en comparación con la temperatura del producto en tanque TA53005 el cual presenta mayor inestabilidad.

Figura 21. Seguimiento al calentamiento de producto en tanque TA5300-2 y -5.



Fuente: Datos tomados de análisis en SPPB

2. COSTOS DE COMBUSTIBLE PARA CALENTAMIENTO DE ACEITE TÉRMICO.

Como se describió anteriormente, en el sistema de calentamiento del producto pesado en la terminal de líquidos de SPPB es empleado el gas natural como combustible para el calentamiento del fluido térmico que participa en la transferencia de calor. Los costos generados por concepto del consumo de gas natural como combustible durante el año 2019 se muestran en la siguiente figura 23 mostrando de esta forma los costos en los que se puede llegar a incurrir durante un mes operativo debido al calentamiento del combustóleo. Estos costos están relacionados con la necesidad operativa de transferir el combustóleo hacia el muelle principal para su despacho mediante buques-tanques

Figura 22. Costos del combustible empleado en el sistema de calentamiento de producto pesado.



Fuente: costos del gas natural empleado en sistema de calentamiento en SPPB

Durante el año 2019, el costo promedio que tuvo 1,0 SFC de gas natural estuvo en el rango de los COP\$ 26,55. Acorde a los resultados obtenidos en el análisis del sistema de calentamiento para la estimación de la capacidad calórica específica del combustóleo/sistema de la terminal de SPPB, se calculó un rango promedio que esta entre Cp de 0,68 y 0,76 Btu/(lb °F).

Para el calentamiento de un volumen total (nivel máximo permitido) en tanques de combustóleo en la terminal de líquidos de SPPB, se estima requerir de aproximadamente 72 millones de BTU para lograr un delta de temperatura de 1.0 °F en el combustóleo. Para lo cual el sistema en su conjunto requiere de aproximadamente 71 mil SCF de gas natural, generando un costo estimado por valor de COP\$ 1,9 millones. Este costo estimado es solo por concepto del gas natural empleado como combustible en el sistema para el calentador.

3. CONCLUSIONES.

Mediante el seguimiento realizado a los tanques de almacenamiento de la terminal de líquidos de SPPB sometidos a calentamiento, se estima la capacidad calorífica específica del combustóleo/sistema, el cual se encontró tener un rango entre los 0,68 y 0,76 Btu/(lb °F). La capacidad calorífica específica estimada es una característica propia del combustóleo en el sistema de calentamiento de SPPB ya que fue calculada asumiendo el proceso como un volumen de control global y por consiguiente el total de las pérdidas presentadas por cada uno de los equipos que conforman el proceso son inherentes a dicho volumen de control y en consecuencia se encontrarían identificadas en el resultado obtenido.

Se evidencia cambios significativos de la temperatura en el tanque TA53005 luego de la ejecución del calentamiento del combustóleo almacenado, esto ocurre debido a la falta de aislamiento térmico en dicho tanque. Lo dicho se afirma tomando como referencia los tanques TA53001 y TA5002 los cuales están equipados con chaqueta para el aislamiento térmico, en estos tanques la pérdida de calor es más lenta, es decir que se conserva el calor suministrado.

Cada delta en la temperatura, (ΔT : +/- 1°F) del combustóleo contenido en los tanques de almacenamiento de la terminal de líquidos de SPPB durante el proceso de calentamiento tiene un costo estimado alrededor de los COP\$ 1,9 millones, dicho costo solo está relacionado con el suministro del combustible gas natural al sistema.

El hecho de realizar el proceso de transferencia de calor para el calentamiento del combustóleo almacenado en los tanques mediante recirculaciones con un sistema

instalado por fuera del mismo, permite realizar homogenización del producto en el interior del tanque. Relacionado con lo dicho, se podría estimar el tiempo requerido para obtener la temperatura deseada del producto, en función del número de recirculaciones y de la cantidad de producto contenido en el tanque de almacenamiento que se desea ingresar a calentamiento.

Conjuntamente a la implementación de mejoras en el sistema de calentamiento de la terminal de líquidos de SPPB se busca la disminución de costos operativos y de igual forma minimizar el impacto ambiental que se presenta por el calentamiento de los hidrocarburos pesados mediante el uso de gas natural como combustible entre otros impactos ambientales que el sistema puede generar.

4. RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS.

En los últimos años, el calentamiento eléctrico ha sido considerado como una alternativa prometedora debido a sus ventajas de bajo costo, alta eficiencia y respeto al medio ambiente.⁵² Es por ello que resulta interesante analizar posible implementación de un sistema de calentamiento eléctrico en proyectos futuros para el manejo de productos pesados y consecuentemente disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La temperatura parece ser la variable predominante que controla y acelera el ensuciamiento.⁵³ Es por ello que se debe implementar un mantenimiento riguroso a los equipos empleados en el sistema de calentamiento de productos pesados de la terminal de líquidos de SPPB.

Ya que el tanque TA53005 se encuentra conectado al sistema de calentamiento empleado actualmente, es recomendable realizar una evaluación del acondicionamiento del mismo mediante un aislamiento total o parcial con chaqueta de aislamiento térmica. Realizando la evaluación de este proyecto se analizarían los beneficios económicos y ambientales que esto conlleva.

En la medida que se pueda obtener información sobre la temperatura del producto que ingresa al tanque que simultáneamente se encuentre en proceso de calentamiento, se podrá generar una optimización del mismo ya que permite realizar un balance energético del producto almacenado con mayor exactitud permitiendo

⁵² WANDA Z, et al.. Comparative performance of electric heater vs. RF heating for heavy oil recovery. Beijing, China: University of Petroleum, 2019, V. 160, pp. 1-9

⁵³ MUÑOZ PINTO, D. A., et al. Formation of fouling deposits on a carbon steel surface from Colombian heavy crude oil under preheating conditions., Journal of Physics: Conference Series 687, 2016.

estimar el tiempo para alcanzar la temperatura deseada del producto de una forma más certera.

Es recomendable realizar recirculación adecuada del producto en el tanque durante el proceso de calentamiento de tal forma que se alcance una homogenización satisfactoria, de esta forma se evitan zonas de baja temperatura del producto almacenado (estratificación), esto puede implicar sobreesfuerzos en el sistema de bombeo en el momento de transferir el producto hacia el muelle principal de buque-tanque. En línea con lo anterior, es recomendable realizar un análisis de los costos eléctricos asociados al sistema de recirculación del producto contenido en los tanques de almacenamiento habilitados para calentamiento.

Es importante la implementación de mejoras que busquen la optimización del sistema de calentamiento de la terminal de líquido de SPPB debido a las implicaciones operativas, económicas y principalmente ambientales que ello conlleva. Este último aspecto es de mucha importancia debido al calentamiento global que sufre nuestro planeta.

BIBLIOGRAFIA

AINTS, M., et al., (2018). Determination of the calorific value and moisture content of crushed oil shale by LIBS. Oil Shale. 2018, 35(4), pp. 339-355.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2012), API. Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 7—Temperature Determination. 2012. Washington, D.C

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1298-12b (2017), Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. West Conshohocken: PA. Disponible en: www.astm.org

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D445-19a, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). West Conshohocken: PA, 2019. Disponible en: www.astm.org

BARRANGÁN, D. Producción de entropía y ley de enfriamiento de Newton. Revista Ingeniería e investigación, 2009. p. 29.

CHEN, X., et al. Entropy and entransy in convective heat transfer optimization: A review. and perspective. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 137, pp. 119 -1220.

COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Informe de Gestión 2018 [En línea]. p. 77. [Consulta: 02 de septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/la-anh/Informes%20de%20Gestin/Informe%20de%20gestión%20ANH%202018.pdf>

COLOMBIA. AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Informe de Gestión y Rendición de Cuentas 2019 [En línea]. p. 101. [Consultado: 19 de enero 2020]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/Atencion-al-ciudadano/Documents/INFORME%20GESTI%C3%93N%20Y%20RENDICI%C3%93N%20DE%20CUENTAS%202019-V3.pdf>

DAVLETBAEVA, A; KOVALEVAA, Liana and BABADAGL, Tayfun. Combining solvent injection, electromagnetic heating, and hydraulic fracturing for multistage heavy oil recovery. Edmonton: Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2016 Vol. 30, No. 2, pp. 207-224

DELGADO, A., CAMARGO, S. y ESPITIA, A. Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, Scientia et Technica Año XXIV. 2019, Vol. 24, No. 02, pp. 190 - 199.

ECOPETROL S.A. Especificación Técnica del Catálogo de Productos de Ecopetrol S.A. Combustóleo (Fuel Oil No. 6) En línea . 2018 [Consultado 09 de noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/documentos/cliente/Especificaciones-Tecnicas-Combustoleo-Fuel-Oil-No6.pdf>

GIULIANO ALBO, P.A., et al. Density, viscosity and specific heat capacity of diesel blends with rapeseed and soybean oil methyl ester. Netherlands: Biomass and Bioenergy. 2017. 96, p.87-95

GONCALVES MOTHÉ, Michelle; PERIN, Mauricio and GONCALVES MOTHÉ, Cheila. Comparative thermal study of heavy crude oils by DSC. Rio de Janeiro:

Federal University of Rio de Janeiro. Petroleum Science and Technology, 2016, 34:4, pp. 314-320

GOZÁ, Osvaldo; RODRIGUEZ, Yadier; MORÓN, Carlos. Alternativas de mejoras energéticas en la planta de tratamiento de crudos de puerto escondido. La Habana: Revista de Ingeniería Energética, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría. 2017, vol. XXXVIII., n. 2, pp. 115-123

HOWELL, J. y BUCKINUS, R. Principios de Termodinámica para Ingeniería. México D.F.: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA DE MEXICO, 1990. p. 16

KERN, D. Q. Procesos de Transferencia de Calor. México: Compañía editorial continental, S.A., 1999. p. 14

MUÑOZ PINTO, D. A., et al. Formation of fouling deposits on a carbon steel surface from Colombian heavy crude oil under preheating conditions. 2016, Journal of Physics: Conference Series 687.

SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHIA. SPPB. PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-BD- 001 Sistema de calentamiento de crudo tanques – 1_2, Descripción del proceso. 05 Diciembre de 2014, Cartagena

SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHIA. PIN_SPPB_1_COHS_ID_PRO_MN-001 - Sistema de Calentamiento de Crudo. Diciembre de 2014, Cartagena

SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHIA. SPPB. PIN-SPPB-1-COHS-ID-PRO-FI-001 Sistema de calentamiento de crudo tanques – 1_2, Filosofía de operación de control. Diciembre de 2014, Cartagena.

SOCIEDAD PORTUARIA PUERTO BAHÍA. 2019. [sitio web]. [Consultado: 15 septiembre 2019]. Disponible en <https://www.puertobahia.com.co>

PATIÑO DUQUE, H. D., y ROSERO CORAL, B. D., Análisis exerético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Tunja: Revista ingeniería, Investigación y Desarrollo, 2017, v. 17, pp. 49-58.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA, UPME. Escenarios Oferta y Demanda de Hidrocarburos Colombia 2012. p. 10. [En línea]. [Consultado: 01 de diciembre de 2019] Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Publicaciones/2012/Escenarios_Oferta_Demanda_Hidrocarburos.pdf

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA, UPME. Plan Indicativo de Abastecimiento de Combustibles Liquidos, 2018. p. 192. [En línea]. [Consultado: 19 de enero de 2020]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Plan_Abastecimiento_Combustibles_Liquidios_Final2019.pdf

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA DE COLOMBIA, UPME. Plan Energético Nacional 2020- 2050 [En línea]. Bogotá D.C., diciembre de 2019, p. 10. [Consultado 20 de enero de 2020]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consultar.pdf

WANDA, Z, et al., Comparative performance of electric heater vs. RF heating for heavy oil recovery. Beijing: University of Petroleum, 2019, V. 160, p. 1-9

Z Aidullin, M, et. al. Influence of the structure of heavy oil disperse system on its rheological properties under steam-heat treatment conditions. New York: Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2017. Vol. 53, No. 4, pp. 470-479.