

**EVALUACIÓN TÉCNICO -ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS PARA EL
ENFRIAMIENTO DE CRUDO DE VENTA EN LA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN
BATERIA 4 CAMPO QUIFA**

**DIEGO ARMANDO SANABRIA GAMBOA
ALFONSO HERNANDEZ PEREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

**EVALUACIÓN TÉCNICO -ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS PARA EL
ENFRIAMIENTO DE CRUDO DE VENTA EN LA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN
BATERIA 4 CAMPO QUIFA**

**DIEGO ARMANDO SANABRIA GAMBOA
ALFONSO HERNANDEZ PEREZ**

**Monografía como requisito para optar el título de
Especialista en Producción de Hidrocarburos**

Director

ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ

Ingeniero de petróleos

Especialista en Producción de Hidrocarburos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza, la salud y el entendimiento necesario para culminar satisfactoriamente este proyecto.

A mi hija Isabella la cual es el motor de mi vida y es la que motiva cada día para alcanzar nuevas metas personales y profesionales.

A mis padres Elizabeth y José Anibal por los valores inculcados, su apoyo y confianza que me han brindado durante toda mi vida.

A mis hermanos Jose Luis y Andres Felipe, a mi novia Juliana por su comprensión y apoyo incondicional durante todo este tiempo.

Diego Armando Sanabria G.

DEDICATORIA

Es un orgullo y una gran felicidad para mi saber que hoy lograre uno de mis sueños más grandes, que el esfuerzo que hice cada año al fin tendrá una recompensa. En este largo trayecto he conocido gente maravillosa con la que hemos pasado buenos momentos juntos y de quienes he aprendido cosas valiosas. Agradezco a todos mis compañeros y a mis maestros a quienes ahora además considero mis amigos.

Es una satisfacción personal terminar algo que costó mucho al inicio, en este tiempo en la universidad aprendí de mis errores, conocí cual es mi verdadero potencial y descubrí que la vida es más bonita cuando se trabaja por las cosas que uno quiere junto a personas de buen corazón.

En el correr de la vida nos encontramos con diferentes tipos de familias, todas tienen sus defectos y por supuesto sus virtudes pero son la tu familia, la que nos ha tocado. Se puede elegir a los amigos, pero la familia es algo que te toca desde que naces, al mismo tiempo es el grupo de personas que más te ayudan, te quieren y se preocupan por ti; conforme van pasando los años nos vamos dando cuenta que hay personas que vienen y van, excepto, nuestros familiares que siempre se encuentran ahí, para cuando los necesites en momentos especiales e importantes que son para nosotros.

Tener un lugar a donde ir es tener un hogar. Tener a alguien a quien amar, es una familia. Teniendo ambas, es una bendición.

A mi familia, esposa e hijos nunca la dejaré atrás, nunca nadie olvidará a nadie.

ALFONSO HERNANDEZ PEREZ

CONTENIDO

OBJETIVOS.....	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVO ESPECIFICOS	14
1. MARCO TEORICO	15
1.1. GENERALIDADES DE CAMPO QUIFA.....	15
1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR	16
1.3. DIFERENCIA ENTRE LA TERMODINÁMICA Y LA TRANSFERENCIA DE CALOR	16
1.4. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA	17
1.5.MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA, $E_{ENTRADA}$ Y E_{SALIDA} ...	18
1.5.1. Transferencia de calor (Q).	18
1.5.2. Transferencia de trabajo (W).	19
1.5.3. Flujo másico (m).	19
1.6. TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	22
1.6.1. Transferencia de calor por conducción.	23
1.6.2. Transferencia de calor por convección.	24
1.6.3. Transferencia de calor por Radiación.	25
1.7. NÚMEROS ADIMENSIONALES.....	26
1.7.1. Numero de Reynolds.	26
1.7.2. Número Nusselt.	27
1.7.3. Numero de Prandtl.....	28
1.7.4. Numero de Grashof.	29
2. DESCRIPCIÓN DE PRODUCCIÓN DE CRUDO EN CAMPO QUIFA.....	30
2.1. GEOLOGIA.....	30

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	31
3. TÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL ENFRIAMIENTO DEL CRUDO DE VENTA.	35
3.1. ELIMINAR EL AISLAMIENTO DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE 40.000 Y 100.000 Bbls	35
3.2. ELIMINAR EL AISLAMIENTO DE LA LINEA DE TRANSFERENCIA A ODL.	45
3.3. INTERCONEXIÓN DE LOS SERPENTINES EN EL TANQUE FWKO.....	53
3.4. ENFRIAMIENTO CON AGUA A TRAVÉS DEL SERPENTÍN INTERNO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	65
4. EVALUACIÓN TECNICO- ECONOMICA	71
5. CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFIA.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Diferencias entre convección libre y forzada en sistemas no isotérmicos.....	25
Tabla 2.	Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....	25
Tabla 3.	Rangos típicos de los números de Prandtl.....	29
Tabla 4.	Propiedades del crudo y Datos operativos.....	38
Tabla 5.	Conductividad térmica del acero carbono.....	39
Tabla 6.	Calculo del coeficiente de transferencia de la película de aire en el tanque.....	40
Tabla 7.	Datos operativos de la tubería y propiedades del crudo.....	48
Tabla 8.	Calculo del coeficiente de transferencia la película aire.....	49
Tabla 9.	Conductividad térmica del agua.....	56
Tabla 10.	Variables del fluido.....	57
Tabla 11.	Especificaciones del tanque FWKO.....	58
Tabla 12.	Especificaciones del líquido utilizado para enfriar y las dimensiones de los serpentines.....	68
Tabla 13.	Presupuesto para retirar el aislamientos de los tanques de Almacenamiento.....	71
Tabla 14.	Presupuesto para retirar el aislamiento de la línea de transferencia de crudo al ODL.....	72
Tabla 15.	Presupuesto para interconectar los serpentines del tanque FWKO.....	73
Tabla 16.	Presupuesto para el enfriamiento con agua a través del serpentín interno del tanque de Almacenamiento.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de Campo Quifa	15
Figura 2.	Representación gráfica de la primera ley de la termodinámica	18
Figura 3.	Mecanismos de transferencia de energía.	20
Figura 4.	Modos de transferencia de calor.....	23
Figura 5.	Esquema General de producción en campo Quifa	31
Figura 6.	Facilidad de producción Bateria 4.....	32
Figura 7.	Diagrama del proceso de la facilidad Bateria 4.....	34
Figura 8.	Tanque de almacenamiento sin aislamiento térmico	36
Figura 9.	Tramo de tubería sin recubrimiento térmico	45
Figura 10.	Discretización de la tubería.....	47
Figura 11.	Interconexión de los serpentines de crudo y de agua en el FWKO	53
Figura 12.	Algoritmo de solución del sistema de ecuaciones.....	59
Figura 13.	Continuación del Algoritmo de solución del sistema de ecuaciones ...	60
Figura 14.	Enfriamiento con agua a través del serpentín interno.....	65

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS PARA EL ENFRIAMIENTO DE CRUDO DE VENTA EN LA FACILIDAD DE PRODUCCIÓN BATERIA 4 CAMPO QUIFA*.

AUTORES: DIEGO ARMANDO SANABRIA GAMBOA Y ALFONSO HERNANDEZ PEREZ**.

PALABRAS CLAVES: Balance de energía, transferencia de calor por conducción, transferencia de calor por convección.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación técnico- económica a cuatro alternativas para el enfriamiento del crudo de venta de la facilidad Batería 4 con el fin de evitar inconvenientes con el recibo en ODL por alta temperatura. Las opciones que se tuvieron en cuenta en el presente estudio fueron: Eliminar el aislamiento térmico de los tanques de almacenamiento, eliminar el aislamiento térmico de la línea de transferencia, interconectar los serpentines de crudo y de agua en el tanque FWKO, utilizar agua de enfriamiento a través del serpentín interno de los tanque de almacenamiento.

La importancia de este estudio radica en realizar los balances de energía relacionando las variables directamente involucradas en cada una de las alternativas para obtener como resultado el comportamiento del perfil de temperatura y así poder escoger la mejor opción que se ajuste a las condiciones operacionales de la facilidad .

En el presente trabajo se concluye que la alternativa de interconectar los serpentines crudo y agua del tanque FWKO es técnicamente viable y además se ajusta a las condiciones operacionales de la facilidad. De acuerdo a los resultados obtenidos esta alternativa logra cumplir con el objetivo principal y además su costo se recuperaría en menos de un año.

* Monografía.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos. Director Ing. Erik Giovany Montes Páez.

ABSTRACT

TITLE: TECHNIC- ECONOMIC EVALUATION OF ALTERNATIVES FOR SELLING OIL COOLING IN THE PRODUCTION EASE BATTERY 4 CAMPO QUIFA.*

AUTHORS: DIEGO ARMANDO SANABRIA GAMBOA Y ALFONSO HERNANDEZ PEREZ.**

KEY WORDS: Energy balance, heat transfer by driving, heat transfer by convection.

The aim of this assignment was making a technic-economic evaluation to four alternatives for selling Oil cooling of the facility Battery 4, to avoid drawbacks with ODL reception with high temperature. The options were taken into account in this study were: to remove the thermal insulation of storage tanks, to remove the thermal insulation of transfer line, to interconnect the coils of oil and water in the FWKO tank, to use cooling water through the intern coil of the storage tanks.

The importance of this study is based on making energy balances related with the variables directly involved in each one of the alternatives, to get a of result the behavior of temperature profile and of that way, choose the best option according to operating conditions of the ease.

In this assignment it is concluded, the alternative of interconnecting the oil coils and water the FWKO Tank is technically viable, and it fits to the operating conditions of the ease. According to the results, this option reaches to achieve with the main aim and its cost would be retrieved in less of one year as well.

*Monograph.

**Physicochemical Engineerings Faculty. Petroleum Engineering School. Specialization in Production of Hydrocarbons. Director Eng. Erik Giovany Montes Páez.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación técnico -económica de alternativas para el enfriamiento de crudo de venta en la facilidad de producción Batería 4 campo Quifa con el fin de evitar inconvenientes de recibo en ODL por alta temperatura.

OBJETIVO ESPECIFICOS

Describir el proceso actual de la facilidad de producción batería 4 de campo Quifa y los problemas relacionados con los volúmenes de crudo transferidos a temperaturas elevadas.

Realizar el análisis de opciones de enfriamiento del crudo de venta de la facilidad de producción de Bateria 4. Las opciones que se van a analizar son: La interconexión de los serpentines de crudo y agua del tanque FWKO, eliminar el aislamiento de los tanques de almacenamiento; eliminar el aislamiento en la línea de transferencia a ODL y Utilizar agua de enfriamiento por serpentín de vapor de los tanques de almacenamiento

Realizar los balances de energía y los cálculos requeridos a cada una de las opciones planteadas para el enfriamiento del crudo de venta de la facilidad.

Realizar la evaluación técnico -económica de alternativas para el enfriamiento de crudo de venta en la facilidad de producción bateria-4 campo Quifa.

1. MARCO TEORICO

1.1. GENERALIDADES DE CAMPO QUIFA

El campo Quifa se encuentra ubicado en la cuenca de los llanos orientales¹ en el departamento del Meta, en el municipio de Puerto Gaitán. La producción de los pozos del campo llega a la facilidad batería 4, donde se lleva a cabo el proceso de deshidratación del fluido el cual es bombeado al oleoducto de los llanos (ODL) con un %BS&W menor a 0,5 y con una gravedad API de 13,7²

El campo Quifa se encontraba produciendo 50.076 barriles por día³ de crudo pesado durante el primer trimestre del año 2013.

Figura 1. Ubicación de Campo Quifa



Fuente: [en línea]. <<http://es.scribd.com/doc/95715088/la-industria-del-petroleo-en-Colombia>>

¹Ministerio de minas y energía. Ubicación de campo quifa [en línea]. <<http://www.minminas.gov.co/documents/10180/23400/03-HIDROCARBUROS2010-2011.pdf/9d122c7e-5cfc-4368-97c0-5fbebce02f34>> [Citado 24 de octubre del 2014]

²Gravedad API del crudo quifa [en línea]. <http://www.bnamericas.com/news/petroleoygas/Pacific_Rubiales_descubre_petroleo_en_pozo_Quifa-7> [Citado 24 de octubre del 2014]

³Portafolio. Producción campo Quifa [en línea]. <<http://www.portafolio.co/negocios/produccion-petroleo-colombia-1>> [Citado 9 de Agosto del 2013]

1.2. TRANSFERENCIA DE CALOR ^{4 5}

La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura como resultado de la segunda ley de la termodinámica. Cuando un cuerpo, por ejemplo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico. La transferencia de calor completa al primer y segundo principio de la termodinámica, al proporcionar reglas experimentales adicionales que se pueden utilizar para establecer rapidez de transferencia de energía.

1.3. DIFERENCIA ENTRE LA TERMODINÁMICA Y LA TRANSFERENCIA DE CALOR ⁶

Aunque la termodinámica trata de la interacción del calor y del papel vital que ésta desempeña en la primera y segunda ley, no considera los mecanismos que realizan el intercambio de calor ni los métodos que existen para calcular la velocidad de éste intercambio. La termodinámica trata de estados en equilibrio de la materia, donde un estado de equilibrio necesariamente excluye la existencia de un gradiente de temperatura. Aunque la termodinámica sirve para determinar la cantidad de energía que se requiere en forma de calor para que un sistema pase de un estado de equilibrio a otro, no reconoce que la transferencia de calor es inherentemente un proceso de no equilibrio. Para que ocurra la transferencia de calor, debe haber un gradiente de temperatura, es decir, un desequilibrio termodinámico. La disciplina de la transferencia de calor busca llevar a cabo lo

⁴ Wikipedia. Transferencia de calor [en línea]. < http://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor >[Citado 9 de Agosto del 2013]

⁵ HOLMAN, J P. Transferencia de Calor. 10 ed. México: CECSA, 1999, p. 17.

⁶ INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: PEARSON, 1999, p. 28-29.

que la termodinámica es intrínsecamente incapaz de hacer, esto es, cuantificar la velocidad a la que ocurre la transferencia de calor en términos del grado de desequilibrio térmico.

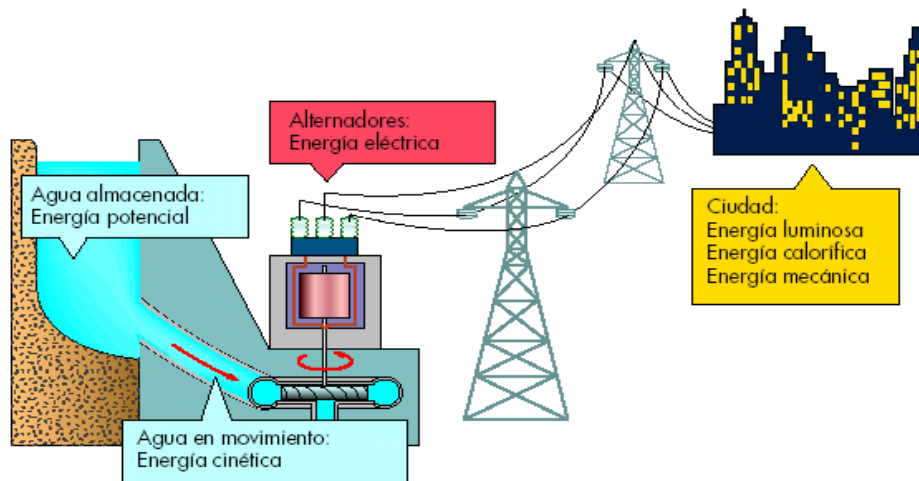
Los temas de la termodinámica y de la transferencia de calor son sumamente complementarios. Por ejemplo, como la primera trata la velocidad a la que se transfiere calor, el tema de la transferencia de calor se considera una extensión de la termodinámica. A su vez, para muchos problemas de transferencia de calor, la primera ley de la Termodinámica (ley de conservación de la energía) proporciona una herramienta útil, a menudo esencial.

1.4. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La primera ley de la termodinámica, conocida también como el principio de conservación de la energía, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso. Un ejemplo sencillo donde se encuentra representada la primera ley de la termodinámica es el siguiente: supongamos que tenemos una roca a una altura determinada la cual posee cierta energía potencial y que parte de ésta se convierte en energía cinética cuando dejamos caer la roca libremente.⁷

⁷ CENGEL, Yunes A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. 7 ed. México: McGraw-Hill. 2011, p. 70.

Figura 2. Representación gráfica de la primera ley de la termodinámica



Fuente: [en línea].

<http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema1/Imagenes/01_formasdeenergia.bmp>

1.5. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA, $E_{ENTRADA}$ Y E_{SALIDA} ⁸

La energía se puede transferir hacia o desde un sistema en tres formas: calor, trabajo y flujo másico. Las interacciones de energía se reconocen en las fronteras del sistema cuando lo cruzan, y representan la energía que gana o pierde un sistema durante un proceso. Las únicas dos formas de interacción de la energía relacionadas con una masa fija o sistema cerrado son las transferencias de calor y de trabajo.

1.5.1. Transferencia de calor (Q).

La transferencia de calor hacia un sistema (ganancia de calor) incrementa la energía de las moléculas y por lo tanto la del sistema; asimismo, la transferencia de calor desde un sistema (pérdida de calor) la disminuye, ya que la energía transferida como calor viene de la energía de las moléculas del sistema.

⁸ CENGEL, Yunes A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, Op. cit., p. 73.

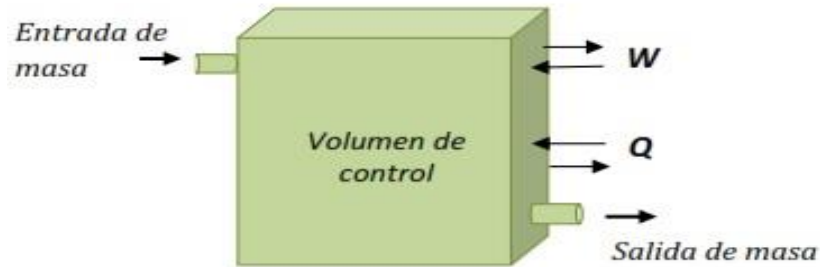
1.5.2. Transferencia de trabajo (W).

Una interacción de energía que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior es trabajo. Un émbolo ascendente, un eje rotatorio y un alambre eléctrico que cruzan la frontera del sistema se relacionan con interacciones de trabajo. La transferencia de trabajo a un sistema (es decir, el trabajo realizado sobre un sistema) incrementa la energía de éste, mientras que la transferencia de trabajo desde un sistema (es decir, el trabajo realizado por el sistema) la disminuye, puesto que la energía transferida como trabajo viene de la energía contenida en el sistema. Los motores de automóviles y las turbinas hidráulicas, de vapor o de gas, producen trabajo mientras que los compresores, las bombas y los mezcladores consumen trabajo.

1.5.3. Flujo másico (m).

El flujo másico que entra y sale del sistema funciona como un mecanismo adicional de transferencia de energía. Cuando entra masa a un sistema, la energía de éste aumenta debido a que la masa lleva consigo energía (de hecho, la masa es energía). De igual modo, cuando una cantidad de masa sale del sistema, la energía de éste disminuye porque la masa que sale saca algo de energía consigo. Por ejemplo, cuando cierta cantidad de agua caliente sale de un calentador y es reemplazada por agua fría en la misma cantidad, el contenido de energía del tanque de agua caliente (el volumen de control) disminuye como resultado de esta interacción de masa.

Figura 3. Mecanismos de transferencia de energía.



Fuente: Editado del libro de CENGEL, Yunes A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. 7 ed. México: McGraw-Hill. 2011, p. 73.

Una forma general del requerimiento de conservación de la energía se expresa entonces en una base de velocidades como⁹:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \frac{dE_{alm}}{dt} \equiv \dot{E}_{alm}$$

\dot{E}_{ent} = Velocidad al que entra la energía mecánica y térmica que entra a la superficie de control.

\dot{E}_{sale} = Velocidad al que entra la energía mecánica y térmica que sale de la superficie de control.

\dot{E}_g = Velocidad a la que ocurre la generación de energía.

\dot{E}_{alm} = La velocidad de cambio de la energía almacenada dentro del volumen de control.

⁹ INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Op. cit., p. 28-29.

En un sistema cerrado de masa fija, a través de cuyos límites la energía es transferida por las interacciones de calor y trabajo. Si en un intervalo de tiempo Δt se transfiere calor al sistema en la cantidad Q (flujo de entrada de energía), el sistema realiza trabajo en la cantidad W (flujo saliente de energía), no ocurre conversión de energía dentro del sistema ($E_g = 0$) y los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes¹⁰, la ecuación general de la conservación de energía se reduce a:

$$\Delta U = Q - W$$

ΔU = Cambio de la energía interna

Q = Cantidad de calor que se transfiere al sistema

W = Cantidad de trabajo entregado por el sistema

La otra forma del requerimiento de conservación de la energía con el que ya está familiarizado pertenece a un sistema abierto, donde el flujo de masa proporciona el transporte de energía interna, cinética y potencial hacia dentro y fuera del sistema. En tales casos, es habitual dividir el intercambio de la energía en forma de trabajo en dos contribuciones. La primera contribución, denominada trabajo de flujo, se asocia con el trabajo realizado por fuerzas de presión que mueven el fluido a través de las fronteras del sistema. Para una masa unitaria, la cantidad de trabajo es equivalente al producto de la presión por el volumen específico del fluido (pv). Respecto a todos los otros trabajos se supone que los realizó el sistema y se incluyen en el término W . De aquí, si se supone que se transferirá calor al sistema, no ocurre conversión de energía dentro de éste, y la operación se encuentra en condiciones de estado estable ($\Delta E_{alm} = 0$), la ecuación general de la conservación de energía se reduce a:

$$\dot{m} \left(u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{in} - \dot{m} \left(u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{out} + q - \dot{W} = 0$$

¹⁰ INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Op. cit., p. 31.

La suma de la energía interna y del trabajo de flujo se puede, por supuesto, reemplazar por la entalpía, $h = u + pv$.¹¹

1.6. TIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR¹²

Hay tres tipos fundamentales de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Los tres tipos de transferencia de calor se pueden producir al mismo tiempo y es aconsejable tomar en consideración la transferencia de calor por cada una de esos tipos en cada caso en particular.

Conducción

Es la transferencia de calor desde una parte de un cuerpo a otra del mismo cuerpo, o bien, desde un cuerpo a otro que este en contacto físico con él, sin desplazamiento apreciable de las partículas del cuerpo.

Convección

Es la transferencia de calor desde un punto a otro, dentro de un fluido, un gas o un líquido mediante la mezcla de una porción del fluido con otra. En la convección natural, el movimiento del fluido se debe totalmente a diferencias de densidad como resultado de diferencias de temperatura; en la convección forzada, el movimiento se produce por medios mecánicos. Cuando la velocidad forzada es relativamente baja, se debe entender que los factores de “convección libre” como la diferencias de temperatura y densidad, pueden tener una influencia importante.

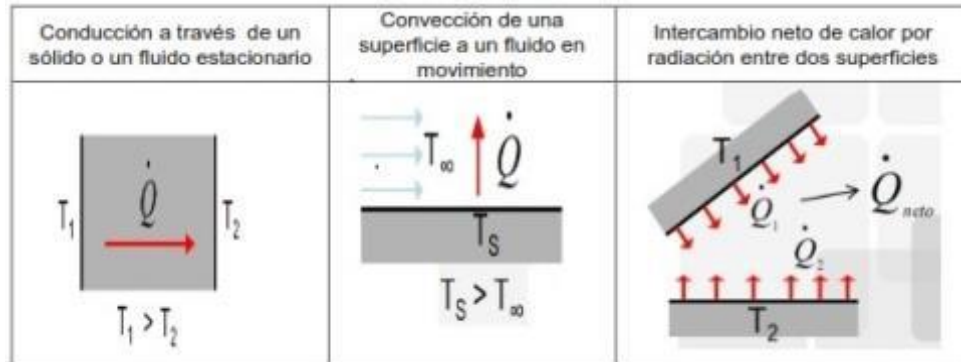
Radiación

Es la transferencia de calor desde un cuerpo a otro que no se encuentra en contacto con él, por medio del movimiento ondulatorio a través del espacio.

¹¹ INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Op. cit., p. 31-32.

¹² PERRY, Robert H.; DON, Green W. y MALONEY, James O. Manual del ingeniero químico. 6 ed. México: McGraw-Hill. p. 10-7.

Figura 4. Modos de transferencia de calor



Fuente: Editado del libro de INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: PEARSON, 1999, p. 19.

1.6.1. Transferencia de calor por conducción.¹³

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

La ley de Fourier es la ecuación diferencial fundamental para la transferencia de calor por conducción:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

Q = tasa de transferencia calor [W]

A = área en ángulo recto con la dirección en la que fluye el calor [m²]

(-dT/dx) = velocidad de cambio de temperatura con la distancia en la dirección del flujo de calor (gradiente de temperatura)

k = conductividad térmica [W/ (m·K)].

¹³ PERRY, Robert H.; DON, Green W. y MALONEY, James O. Op. cit., p. 10-7.

1.6.2. Transferencia de calor por convección.^{14 15 16}

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido.

Dependiendo de cómo se origina el movimiento del fluido la convección se clasifica:

- Convección Natural: se produce cuando una superficie sólida está en contacto con un fluido de temperatura distinta a la de la superficie. Las diferencias de densidad proporcionan la fuerza del cuerpo que se requiere para desplazar el fluido.
- Convección forzada: cuando hay una fuerza externa que origina el movimiento del fluido: ventilador, bomba, viento.

La transferencia de calor por convección se expresa por la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_S(T_S - T_\infty)$$

h = coeficiente de transferencia de calor por convección [W/ (m²·K)]

A_S = Área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor [m²]

T_S = Temperatura de la superficie [K]

T_∞ = Temperatura del fluido lejos del sólido [K]

Las principales diferencias entre convección libre y forzada en sistemas no isotérmicos se describen en la siguiente tabla:

¹⁴ INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Op. cit., p. 22-25.

¹⁵ PERRY, Robert H.; DON, Green W. y MALONEY, James O. Op. cit., p. 10-12.

¹⁶ BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E. y LIGHTFOOT, Edwin N. Fenómenos de transporte. 1 ed. México: Reverté S.A. p. 9-30.

Tabla 1. Diferencias entre convección libre y forzada en sistemas no isotérmicos

Convección Forzada	Convección Libre
Las características del flujo están determinadas fundamentalmente por una fuerza externa	Las características del flujo están determinadas por el efecto de flotación del fluido caliente.
Primeramente se hallan los perfiles de velocidad, que se utilizan después para calcular los perfiles de temperatura (procedimiento general para fluidos cuyas propiedades físicas son constantes)	Los perfiles de velocidad y temperatura están íntimamente relacionados.
El número de Nusselt depende de los números de Reynolds y Prandtl.	El número de Nusselt depende de los números de Grashof y Prandtl.

Fuente: BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E. y LIGHTFOOT, Edwin N. Fenómenos de transporte. 1 ed. México: Reverté S.A. p. 9-30.

En la siguiente tabla se encuentran relacionados los valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección:

Tabla 2. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Tipo de Convección	Coficiente de transferencia de calor (h) [W/(m ² K)]
Convección libre (Gases)	2-25
Convección libre (liquidos)	50-1000
Convección forzada (Gases)	25-250
Convección forzada (liquidos)	50-20.000
Convección con cambio de fase Ebullición o Condensación	2500-100.000

Fuente: INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: PEARSON, 1999, p. 25.

1.6.3. Transferencia de calor por Radiación.¹⁷

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Aunque centraremos nuestra atención en la radiación de superficies sólidas, esta radiación también puede provenir de líquidos y gases. Sin

¹⁷ INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Op. cit., p. 25-27.

importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos.

La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). De hecho, la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío.

La transferencia de calor por radiación entre diferentes cuerpos está dada por la ley de Stefan-Boltzman:

$$\dot{Q} = A\varepsilon\sigma(T_S^4 - T_{alr}^4)$$

A = Área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor [m²]

ε = Emisividad de la superficie (0 < ε ≤ 1)

σ = constante de Stefan-Boltzman (5,67*10⁻⁸ W/m².K⁴)

T_S = temperatura de la superficie [K]

T_{alr} = temperatura de los alrededores [K]

1.7. NÚMEROS ADIMENSIONALES

En el análisis de la convección, es común quitar las dimensiones a las expresiones matemáticas que modelan el mecanismo y agrupar variables, dando lugar a los números adimensionales. A continuación se describen los números adimensionales usados en los problemas de convección¹⁸.

1.7.1. Numero de Reynolds.¹⁹

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la configuración geométrica de la superficie, de su aspereza, de la velocidad de la corriente libre de la

¹⁸ MEJIA HERNANDEZ, Luis Fernando. y GOMEZ MERCADO, Pedro Saúl. Diseño y construcción de un banco de pruebas para determinar el coeficiente de calor por convección forzada, a través del método grafico de Wilson. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2011. 95 p.

¹⁹ CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor. 2 ed. México: McGraw-Hill. 2004, p. 343.

temperatura superficie y del tipo de fluido, entre otras cosas. Después de la realización de experimentos exhaustivos en la década de 1880. Osborn Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de las fuerzas de inercia con respecto a las fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se conoce como el número de Reynolds, el cual es una cantidad adimensional y se expresa mediante la ecuación:

$$R_e = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{V \cdot L_c}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot L_c}{\mu}$$

V = velocidad característica del fluido

L_c = longitud característica de la configuración geométrica

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = viscosidad cinemática del fluido

μ = viscosidad dinámica del fluido

ρ = densidad del fluido

En los números grandes de Reynolds las fuerzas de inercia, que son proporcionales a la densidad y a la velocidad del fluido, son grandes en relación con las fuerzas viscosas y, por tanto, estas últimas no pueden impedir las fluctuaciones aleatorias y rápidas de ese fluido. Sin embargo, en los números pequeños de Reynolds las fuerzas viscosas son suficientemente grandes como para vencer a las de inercia y mantiene el fluido en línea. Por consiguiente, en el primer caso el flujo es turbulento y en el segundo laminar.

1.7.2. Número Nusselt.²⁰

El número de Nusselt representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa. Entre mayor sea el número de Nusselt,

²⁰ CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor, Op. cit., p. 336-385.

más eficaz es la convección. Un número de Nusselt de $Nu=1$ para una capa de fluido representa transferencia de calor a través de esta por conducción pura.

$$N_u = \frac{\text{Transferencia de calor por conveccion}}{\text{Transferencia de calor por conduccion}} = \frac{h \cdot L_c}{\kappa}$$

h = coeficiente de transferencia de calor

L_c = longitud característica

κ = conductividad térmica del fluido

Para el cálculo del número de nusselt promedio en lo relativo al flujo cruzado sobre un cilindro se calcula por la ecuación propuesta por Churchill y Bernstein:

$$N_u = 0.3 + \frac{0.62 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0.4 * Pr)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} * \left[1 + \left(\frac{Re}{28200}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$$

Re = número de Reynolds

Pr = número de Prandtl

Esta ecuación es válida para $Re * Pr \geq 0.2$, las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película $T_f = \frac{1}{2}(T_\infty + T_s)$ la cual es el promedio de las temperaturas de la corriente libre y de la superficie.

1.7.3. Numero de Prandtl.²¹

La mejor manera de describir el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica promedio del parámetro número de Prandtl adimensional, se define como:

$$P_r = \frac{\text{velocidad de difusion de cantidad de movimiento}}{\text{velocidad de difusion de calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$$

²¹CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor, Op. cit., p. 341-342.

ν = es la viscosidad cinemática

α = es la difusividad térmica

C_p = es la capacidad calorífica a presión constante

μ = viscosidad dinámica

k = es la conductividad térmica

En la siguiente tabla se encuentran los valores típicos de los números de Prandtl para fluidos comunes:

Tabla 3. Rangos típicos de los números de Prandtl

FLUIDO	Pr
Metales líquidos	0.004-0.03
Gases	0.7-1.0
Agua	1.7-13.7
Aceites	50-100 000
Glicerina	2000-100 000

Fuente: CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor. 2 ed. México: McGraw-Hill. 2004, p. 342.

1.7.4. Numero de Grashof. ²²

Este número adimensional representa la razón entre la fuerza de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, rige el régimen de flujo en la convección natural.

$$G_r = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu}$$

g = es la aceleración de la gravedad

β = es el coeficiente de expansión térmica

T_s = es la temperatura de una superficie

T_∞ = es la temperatura ambiente

L = es una longitud característica.

ν = es la viscosidad cinemática

²² CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor, Op. cit., p. 465.

2. DESCRIPCIÓN DE PRODUCCIÓN DE CRUDO EN CAMPO QUIFA

2.1. GEOLOGIA

El bloque Quifa está localizado en la cuenca de los Llanos Orientales la cual forma parte de una gran cuenca tipo “foreland” que cubre un área cercana a los 200.000 km² en la parte centro-oriental de Colombia, limitada al occidente por la Cordillera Oriental y al oriente por el Escudo de Guyana. La cuenca se extiende hacia el norte en Venezuela, donde es conocida como la Cuenca de Barinas. En la parte central de los Llanos Orientales, el basamento económico corresponde a sedimentos paleozoicos, la mayoría lutitas marinas oscuras de edad Ordovícica con intercalaciones de areniscas.²³

En el bloque Quifa, la principal unidad productora de hidrocarburos lo representa la unidad areniscas basales de la formación carbonera. El sistema petrolífero considerado para esta región sería el mismo probado para la cuenca de los llanos orientales más hacia el oriente y el mismo que llenó la estructura del campo Rubiales.²⁴

La roca generadora del petróleo almacenado en la cuenca de los Llanos Orientales se ha atribuido a la formación Gachetá de origen marino y edad Cretácico Tardío, que se encuentra al occidente, en el área del Piedemonte Llanero, donde alcanzó el enterramiento y madurez térmica necesaria para la generación y expulsión de hidrocarburos.²⁵

²³ COLOMBIA. PACIFIC RUBIALES ENERGY. Manual general de producción. p. 17.

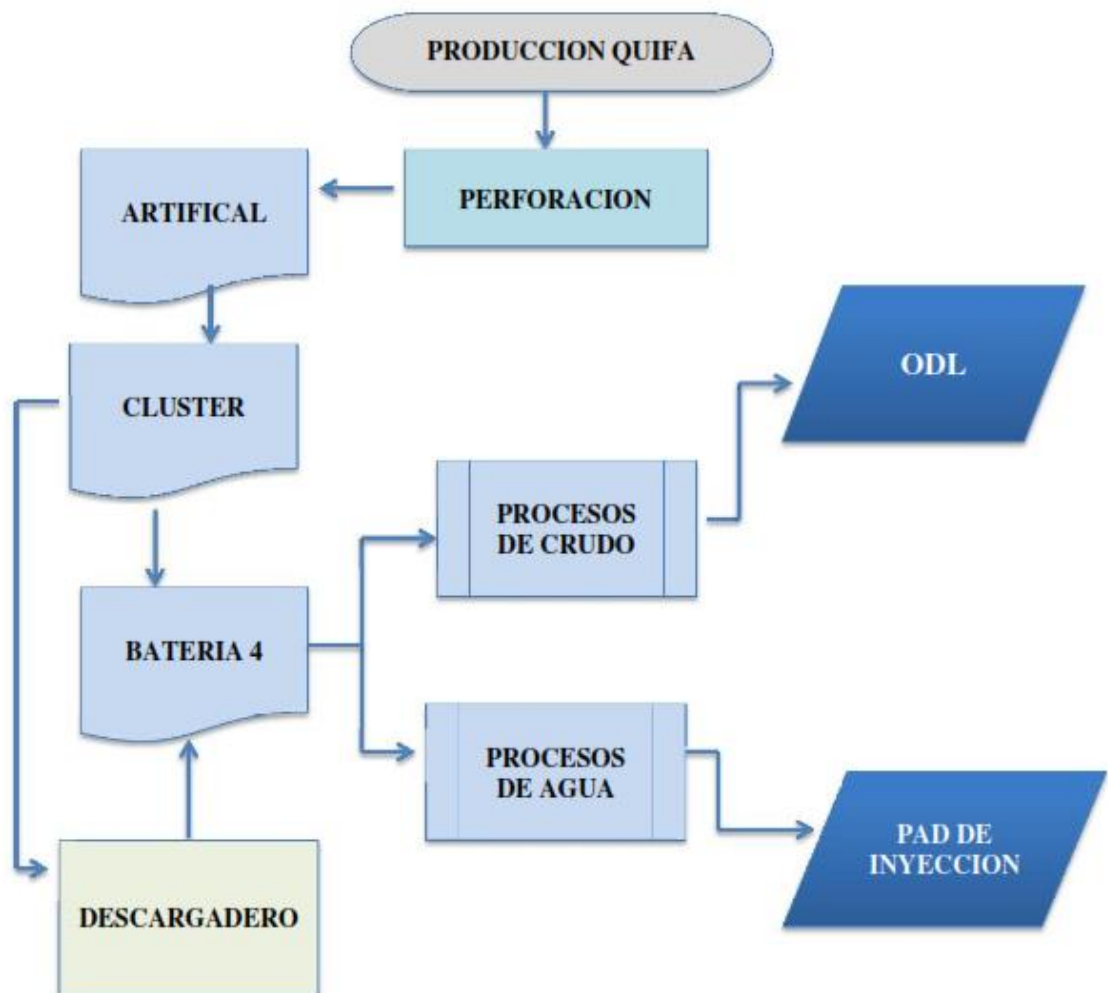
²⁴ *Ibíd.*, p. 18.

²⁵ *Ibíd.*, p. 18-19.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCES

En la siguiente figura se encuentra representado el esquema general de la producción de campo Quifa:

Figura 5. Esquema General de producción en campo Quifa



Fuente: COLOMBIA. PACIFIC RUBIALES ENERGY. Manual general de producción. p. 8.

En campo Quifa los pozos producen crudo con un BSW promedio del 94%, este fluido es levantado por las bombas de cavidad progresiva (PCP) y electrosumergibles (ESP) instaladas en la cabeza de cada pozo. En cada clúster, el

crudo fluye desde los pozos por líneas independientes hacia el cabezal de producción general del manifold de recibo, en donde se mezclan para fluir conjuntamente por una línea troncal hasta conectar en una de las troncales principales que llegan a la facilidad de producción Bateria 4²⁶.

Figura 6. Facilidat de producci3n Bateria 4



Fuente: COLOMBIA. PACIFIC RUBIALES ENERGY. Manual general de producci3n. p. 27.

En Bateria 4 se recibe el 100% de la producci3n de crudo de los pozos de campo Quifa, actualmente ingresa el fluido a la facilidad por el manifold 1 y 2 que permiten distribuir el fluido con un 94 % de BSW por dos l3neas independientes hacia los tanques FWKO's, estos tanques est3n dise1ados para realizar un proceso de lavado y separaci3n de agua libre, adem3s de aumentar la temperatura al fluido por transferencia de calor con los seis serpentines instalados por los cuales fluye vapor, agua y crudo deshidratado, el agua libre asociada a la producci3n es transferida a los Skim-Tank mediante el uso de las bombas centrifugas, el crudo rebosa de los tanques FWKO's con un BSW promedio de 23% y con una temperatura aproximada de 153°F ,el cual es enviado

²⁶ COLOMBIA. PACIFIC RUBIALES ENERGY. Op. cit., p. 25.

a los tanques de cabeza para continuar separando el agua a través de un tiempo de residencia y calentamiento por medio del condensado y vapor de las calderas que circulan por los serpentines, donde el crudo rebosa aproximadamente con un BSW de 15% y una temperatura de 180°F .²⁷

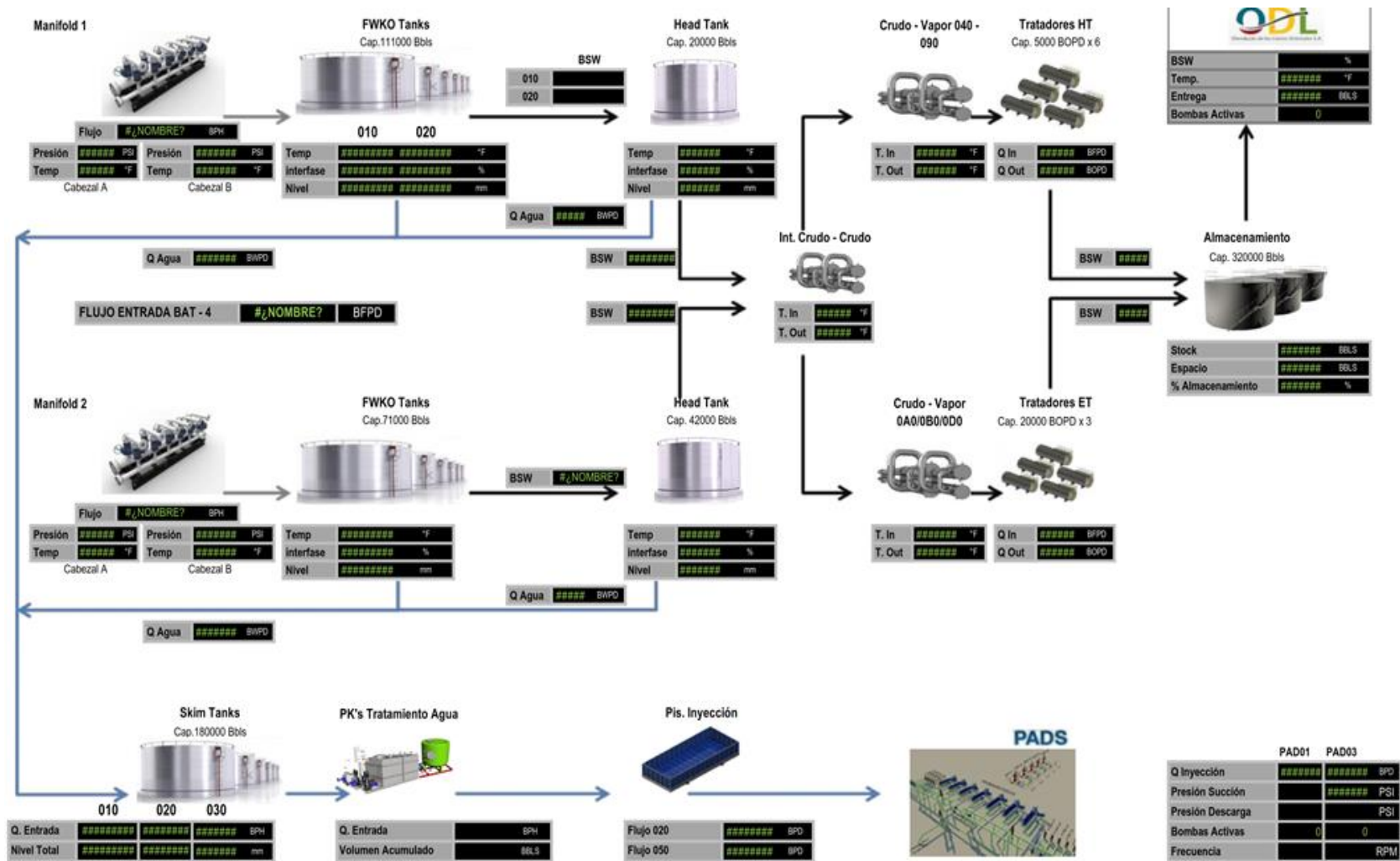
El crudo bombeado desde los tanques de cabeza pasa por las bombas de desplazamiento positivo (PLENTY-HILLMAN) enviando el fluido a los intercambiadores crudo-crudo en los cuales elevan la temperatura del fluido a 188°F , (estos equipos aprovechan la temperatura que lleva el aceite deshidratado de los tratadores electroestático y térmicos), el crudo que sale de estos intercambiadores ahora ingresa a los intercambiadores crudo-vapor el cual es un sistema de calentamiento que emplea vapor generado de las calderas donde se incrementa la temperatura del fluido a 212°F para luego ser direccionado a los tratadores (electroestáticos - térmicos) en los cuales el crudo sale con un BSW de 1%. El fluido que sale de los tratadores es enviado los intercambiadores crudo-crudo para aprovechar su temperatura y luego ingresa a los serpentines de los tanques FWKO's con un temperatura aproximada de 203 °F y terminando el proceso en los tanques de almacenamiento, en los cuales en ocasiones se han recibido fluido con temperaturas superiores o iguales a 195°F.²⁸ En la siguiente figura...ver figura 7...se encuentra representado el proceso que se maneja actualmente en la facilidad.

Debido a las altas temperaturas del crudo que se han manejado en los tanques de almacenamiento se evaluarán algunas alternativas con las cuales se busca mejorar la transferencia de calor en el proceso y así poder disminuir la temperatura del crudo cuando ingresa a los tanques de almacenamiento. En el siguiente capítulo se encuentra un análisis detallado de cada una de las cuatro alternativas las cuales son el objetivo de estudio de la presente monografía

²⁷ COLOMBIA. PACIFIC RUBIALES ENERGY. Op. cit., p. 27-28.

²⁸ *Ibíd.*, p. 28.

Figura 7. Diagrama del proceso de la facilidad Bateria 4



Fuente: Pacific Rubiales Energy.

3. TÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL ENFRIAMIENTO DEL CRUDO DE VENTA.

En este capítulo se desarrolla el análisis técnico lo cual implica los respectivos balances de transferencia de calor y los cálculos de cada una de las cuatro alternativas propuestas para el enfriamiento del crudo de venta de la facilidad de producción Bateria 4 en campo Quifa.

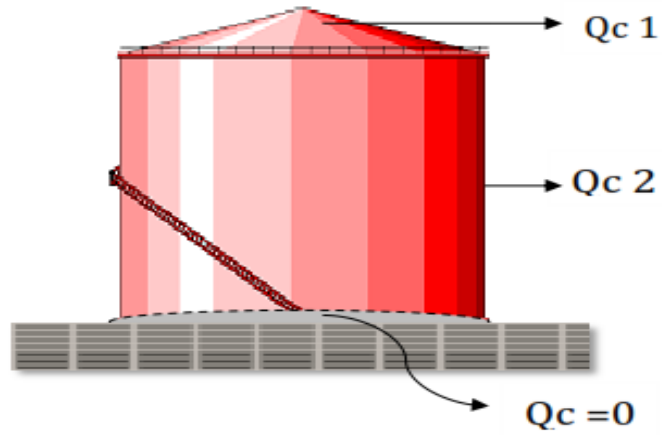
3.1. ELIMINAR EL AISLAMIENTO DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE 40.000 Y 100.000 Bbls

Consideraciones

- En el interior del tanque de almacenamiento se asume condición de mezcla perfecta para así considerar una temperatura constante en todo el volumen de control del tanque con el fin de simplificar los cálculos.
- La densidad de flujo de calor a través de la cara inferior del tanque es despreciable debido a que está apoyado en base de concreto y la conductividad térmica del mismo es muy baja.
- El flux de calor a través de la tapa superior del tanque es despreciable cuando el tanque está en el proceso de llenado, pero si es considerado después que el tanque se encuentra lleno.

En la siguiente figura se encuentra representado gráficamente cada una de las consideraciones tenidas en cuenta para el desarrollo de esta alternativa lo cual nos permite visualizar el fenómeno que se está presentando.

Figura 8. Tanque de almacenamiento sin aislamiento térmico



Fuente: Los autores

Balance de energía

$$F_e \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_e - T_{tank(t)}) - Q = \rho \cdot V(t) \cdot C_p \cdot \frac{dT_T(t)}{dt} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Aplicando la ley de Fourier

$$Q = -K_{acero} \cdot 2\pi r H \frac{dT}{dr}$$

$$\Delta T = (T_{tank}(t) - T_1) = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right)}{2 \cdot \pi \cdot H(t) \cdot k_{acero}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Aplicando la ley de enfriamiento

$$Q = A \cdot h \cdot (T_1 - T_{amb})$$

$$(T_1 - T_{amb}) = \frac{Q}{A(t) \cdot h} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Sumando las ecuaciones (2) y (3) obtenemos:

$$Q = \frac{[T_{tank}(t) - T_{amb}]}{\frac{\ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right)}{2 \cdot \pi \cdot H(t) \cdot k_{acero}} + \frac{1}{A(t) \cdot h}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Reemplazando la ecuación (4) en (1):

Cuando $0 < t < t_{llenado}$

Ecuación (5)

$$F_e \cdot \rho \cdot C_p * (T_e - T_{tank}(t)) - \left[\frac{[T_{tank}(t) - T_{amb}]}{\frac{\ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right)}{2 \cdot \pi \cdot H(t) \cdot k_{acero}} + \frac{1}{A(t) \cdot h}} \right] = \rho \cdot V(t) \cdot C_p \cdot \frac{dT_{tank}(t)}{dt}$$

Si:

$$A(t) = 2 \cdot F_e \cdot \frac{t}{r_o}; \quad H(t) = \frac{F_e \cdot t}{\pi \cdot r_o^2} \quad V(t) = F_e \cdot t$$

Reemplazando y reordenando tenemos que:

Ecuación (6)

$$F_e \cdot \rho \cdot C_p * (T_e - T_{tank}(t)) - \left[\frac{2 * k_{acero} \cdot F_e t \cdot h \cdot [T_{tank}(t) - T_{amb}]}{\ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right) \cdot r_o^2 \cdot h + r_o \cdot k_{acero}} \right] = F_e \cdot \rho \cdot t \cdot C_p \cdot \frac{dT_{tank}(t)}{dt}$$

F_e = flujo de entrada del crudo [m³/h]

ρ = Densidad del crudo [kg/m³]

C_p = Calor específico promedio [J/kg. °C]

T_e = Temperatura entrada del crudo [°C]

T_{tank} = Temperatura del tanque [°C]

T_{amb} = Temperatura ambiente [°C]

K_{acero} = Conductividad térmica del acero al carbón [J/(hr.m.°C)]

h = coeficiente de transferencia de calor de la película de aire [J/m².hr.°C]

r_m = radio promedio exterior del tanque [m]

r_o = radio promedio interior del tanque [m]

t = tiempo [hr]

Cuando $t \Rightarrow t_{llenado}$; t' , entonces se consideran la transferencia de calor de la tapa del tanque en el transporte por convección forzada.

$$A_{Total\ pelicula} = \pi r_o^2 + 2\pi r_o L_{tank\ lleno}$$

$$A_{Total\ pelicula} = \pi \cdot [r_o^2 + 2\pi r_o L_{tank\ lleno}]$$

Ecuación (7)

$$\left[\frac{-(T_{tank}(t) - T_{amb})}{\frac{\ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L_{tank\ lleno} \cdot k_{acero} + \frac{1}{\pi \cdot [r_o^2 + 2\pi r_o L_{tank\ lleno}] \cdot h}}} \right] = \rho \cdot V_{tank\ lleno} \cdot C_p \cdot \frac{dT_T(t)}{dt'}$$

Donde para condición inicial es $T_T(t' = 0) = T_T(t = t_{llenado})$.

C_p = Calor específico promedio [J/kg. °C]

T_{tank} = Temperatura del tanque [°C]

T_{amb} = Temperatura ambiente [°C]

K_{acero} = Conductividad térmica del acero al carbón [J/(hr.m.°C)]

h = coeficiente de transferencia de calor [J/m².hr.°C]

r_m = radio promedio exterior del tanque [m]

r_o = radio promedio interior del tanque [m]

$V_{tank\ lleno}$ = volumen del tanque lleno [m³]

$L_{tank\ lleno}$ = nivel del tanque lleno [m]

En la siguiente tabla se encuentra resumida la información la cual corresponden a los datos de operación y propiedades del crudo en el campo:

Tabla 4. Propiedades del crudo y Datos operativos

Variable	Tanque de 40.000 Bbls	Tanque de 100.000 Bbls	Unidades
Calor específico promedio (C_p)	1923	1923	J/Kg°C
Densidad del crudo @ 60 °F	921,3	921,3	Kg/m ³
Flujo de entrada del crudo	292,86	292,86	m ³ /h
Temperatura entrada del crudo	90,56	90,56	°C
Radio promedio interior del tanque	12,664	18,292	m
Radio promedio exterior del tanque	12,671	18,299	m
Temperatura ambiente día	41,11	41,11	°C
Temperatura ambiente noche	25,0	25,0	°C

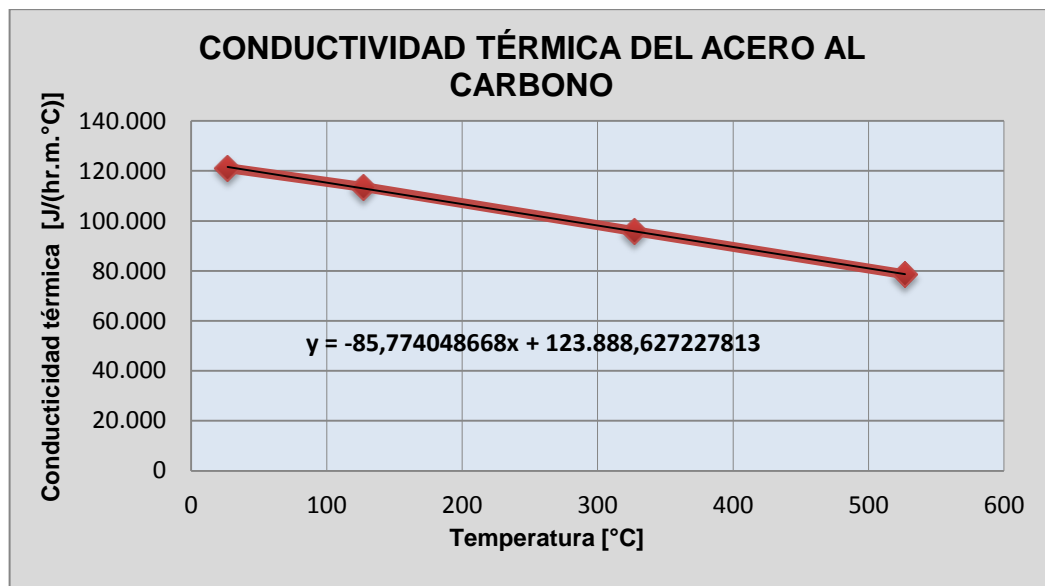
Fuente: Los autores

Tabla 5. Conductividad térmica del acero carbono

Temperatura (R)	Conductividad (Btu/hr.ft.R)	Temperatura (°C)	Conductividad (J/hr.m.C)
540,00	35,00	26,85	121.151,44
720,00	32,80	126,85	113.536,21
1.080,00	27,70	326,85	95.882,71
1.440,00	22,70	526,85	78.575,36

Fuente: Modificado. CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor. 2 ed. México: McGraw-Hill. 2004, p. 748.

Grafica 1. Conductividad térmica del acero a diferentes temperaturas



Fuente: Los autores

➤ Calculo del coeficiente de transferencia de la película de aire [h].

$$h = \frac{Nu * K_{aire}}{D} \quad \text{Ecuación (8)}$$

K_{aire} = conductividad térmica del aire

D = longitud característica del objeto que sufre el fenómeno de transporte, para este caso del cilindro vertical, es el diámetro, para la placa superior es el radio.

En este caso como el fluido se encuentra en régimen turbulento para el cálculo del número de Nusselt se emplea la siguiente ecuación:

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0.4 * Pr)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} * \left[1 + \left(\frac{Re}{28200}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Re = número adimensional de Reynolds

Pr = número adimensional de Prandtl

los coeficientes y los numeros adimensionales relacionados para el calculo del coeficiente de transferencia de la pelicula de aire son evaluados a las condiciones de la pelicula media :

$$T_{ev} = \frac{(T_{prom\ tank} + T_{amb})}{2} \quad \text{Ecuación (10)}$$

T_{ev} = temperatura evaluada

$T_{prom\ tank}$ = temperatura promedio del tanque

T_{amb} = temperatura ambiente.

En la siguiente tabla se encuentran los resultados del calculo del coeficiente de tranferencia de la pelicula de aire :

Tabla 6. Calculo del coeficiente de transferencia de la película de aire en el tanque

Variable	TK 100.000 Bbls		TK 40.000 Bbls	
	Día	Noche	Día	Noche
Capacidad real [m ³]	15.255,17		7.510,16	
Presión [Pa]	101.325,00		101.325,00	
Temperatura amb [°C]	41,11	25,00	41,11	25,00
Temperatura promedio del Tanque [°C]	87,78			
Temperatura media [°C]	64,44	56,39	64,44	56,39
Densidad [Kg/m ³]	1,05	1,07	1,05	1,07
Capacidad calórica [J/kg°C]	999,28	997,81	999,28	997,81
Viscosidad [kg/m.hr]	0,07	0,07	0,07	0,07
Conductividad térmica [J/hr.m.°C]	98,42	96,52	98,42	96,52
Velocidad viento [m/hr]	12.600,00	12.600,00	12.600,00	12.600,00
Longitud característica. [m]	36,59	36,59	25,33	25,33
Reynolds	6.477.676,32	6.754.847,77	4.484.976,53	4.676.882,92
Prandt	0,76	0,76	0,76	0,76
Nusselt	6.749,21	7.020,81	4.792,04	4.982,06
hpared[J/m ² .hr.°C]	18.154,06	18.520,19	18.616,58	18.981,34

Fuente: Los autores

De acuerdo a la solución de las ecuaciones diferenciales (6) y (7) aplicando el método numérico Runge Kutta de cuarto orden se obtiene el perfil de temperatura de los tanques de almacenamiento con capacidades de 40.000 Bbls y 100.000 Bbls sin aislamiento.

En el modelado del fenómeno de transferencia de calor en los tanques de almacenamiento sin recubrimiento térmico se tuvo en cuenta el cambio de temperatura ambiente del día y la noche.

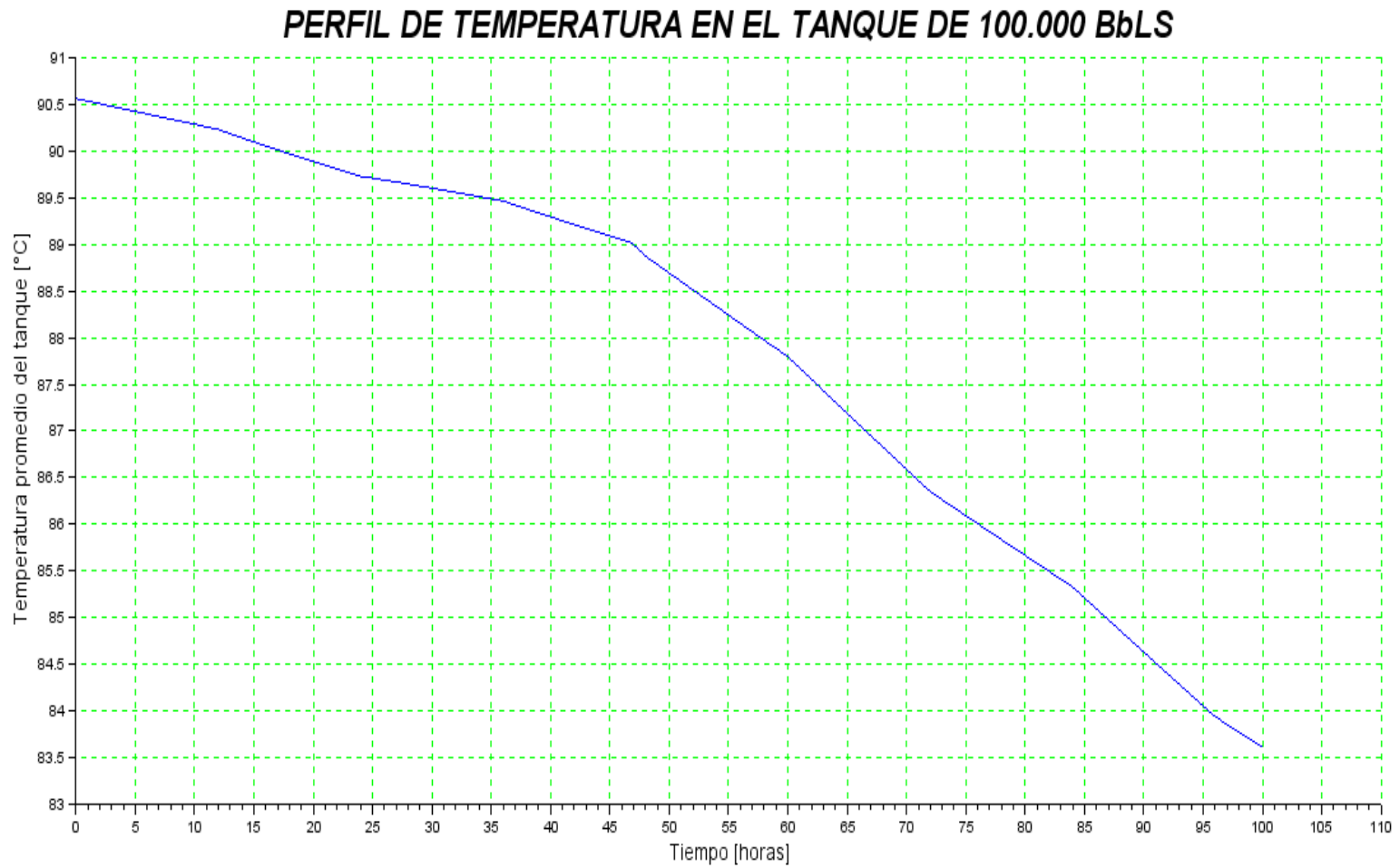
En las gráficas 2 y 3 se encuentra representando el perfil de temperatura de cada tanque y se obtiene los siguientes resultados:

- El comportamiento del perfil de la temperatura en función del tiempo en el tanque de 40.0000 Bbls sin recubrimiento térmico se puede observar en la siguiente gráfica....Ver la gráfica 2....Donde el tanque demora aproximadamente 23 h en llenarse y para alcanzar la temperatura requerida para permitir el inicio de bombeo hacia ODL que son 185°F (85°C) se logra a las 57 h. De acuerdo a lo anterior durante el llenado la temperatura del crudo se reduce a razón de 1,2°C/día (2,2°F/día) y cuando el tanque está lleno hasta el momento de alcanzar la temperatura requerida esta decrece a razón de 3,1°C/día (5,6°F/día).
- El comportamiento del perfil de temperatura en función del tiempo del tanque de 100.000 Bbls sin recubrimiento térmico se puede observar en la siguiente gráfica....Ver la gráfica 3....el tanque se demora aproximadamente en llenarse 47 h durante este tiempo la temperatura del crudo decrece a razón 0,8°C/día (1,4°F/día) y para lograr la temperatura requerida para poder bombear el crudo se logra a las 87 h. Desde el momento que el tanque se encuentra lleno hasta que el crudo alcance la temperatura requerida que son 185°F (85°C) la temperatura del crudo en el tanque va disminuyendo a razón de 2,4°C/día (4,3°F/día).

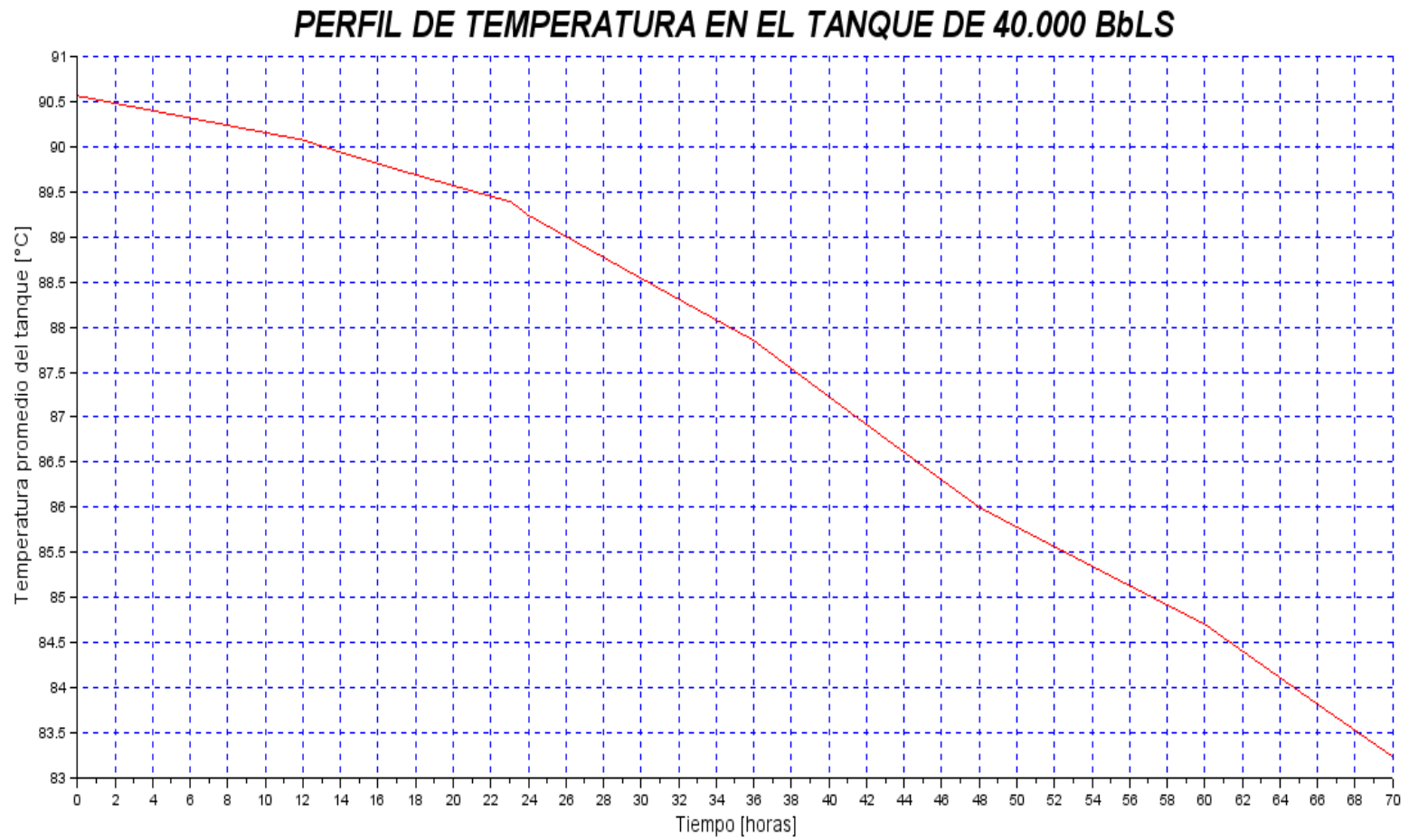
Desventaja que se debe tener en cuenta al implementar el retiro del recubrimiento térmico de los tanques de almacenamiento:

- Al momento de retirar el aislamiento térmico de los tanques de almacenamiento, dependemos de las condiciones climáticas las cuales no podemos controlar (lluvia, velocidad del viento y temperatura ambiente), estas son variables que afectan de forma directa la transferencia de calor en los tanques y pueden causar que se pierda más temperatura de lo debido, lo cual conllevaría a un aumento del consumo de combustible en las calderas para volver calentar el crudo.

Grafica 2. Comportamiento de la temperatura en el tanque de 40.000 Bbls sin aislamiento.



Grafica 3. Comportamiento de la temperatura en el tanque de 100.000 Bbls sin aislamiento.

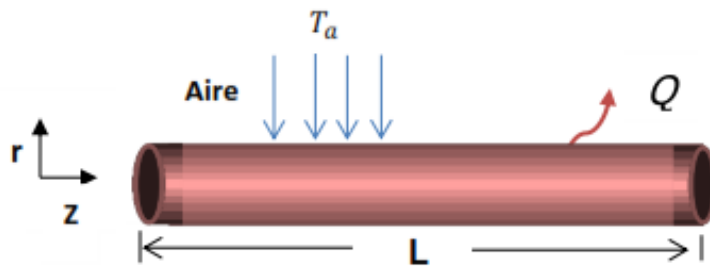


3.2. ELIMINAR EL AISLAMIENTO DE LA LINEA DE TRANSFERENCIA A ODL.

Consideraciones

- A las condiciones de caudal máximo de crudo de entrada, el régimen de flujo es turbulento.
- Todo el calor desprendido por el crudo conforme avanza en la tubería, es retirado a través de esta. No hay acumulación de energía (calor) en el sistema.

Figura 9. Tramo de tubería sin recubrimiento térmico



Fuente: Los autores.

Balance de energía

$$\rho \cdot C_p \cdot \Delta T - Q = 0 \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(q^l + q^t)] = Q \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde, q^l y q^t es la contribución de flujo de calor laminar y turbulenta.

Puesto que el Reynolds es bastante alto ($Re \approx 21400$), se asume que la corriente de crudo está bien mezclada y que, a lo largo del radio de la tubería, la temperatura es cuasi-uniforme; por ende, se promedia en el tiempo y en dirección radial:

$$q^l + q^t = \bar{q} = \frac{Q}{A}$$

Donde, Q es el flujo de calor se transfiere a través de la pared de la tubería; dicho flujo de energía se rige de acuerdo a la siguiente expresión (modelo de resistencias en serie):

$$Q = UA(T - T_a) \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde, U es el coeficiente de transferencia de calor, A es el área de transferencia, T es la temperatura del crudo, y T_a es la temperatura ambiente.

Aplicando la ley de Fourier

$$Q = -K \cdot 2\pi r L \frac{dT}{dr}$$

$$(T - T_1) = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{K \cdot 2\pi L} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Aplicando la ley de enfriamiento

$$Q = \pi D_i L * h * (T_1 - T_a)$$

$$(T_1 - T_a) = \frac{Q}{\pi D_i L \cdot h} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Sumando las ecuaciones (4) y (5) obtenemos:

$$Q = \frac{(T - T_a)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{2\pi L K} + \frac{1}{\pi D_i L h} \right]} \quad \text{Dónde:} \quad UA = \frac{1}{\left[\frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{2\pi L K} + \frac{1}{\pi D_i L h} \right]}$$

Se desprecia la resistencia de la capa límite de crudo adyacente a la pared interna del tubo debido a su régimen de flujo, por lo tanto se plantea el siguiente balance de energía:

$$\rho C_p v_o \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(T - T_a)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{2\pi L K} + \frac{1}{\pi D_i L h} \right]} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Para hallar el coeficiente de transferencia de energía h a través de la capa de aire que rodea el fluido el cual se calcula con la siguiente correlación:

$$h = \left(0,3 + \frac{0,62 * Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right) * \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} \frac{K_{aire}}{D_i} \quad \text{Ecuación (7)}$$

K_{aire} = conductividad térmica del aire

D_i = longitud característica del objeto que sufre el fenómeno de transporte, para este caso del cilindro vertical, es el diámetro, para la placa superior es el radio.

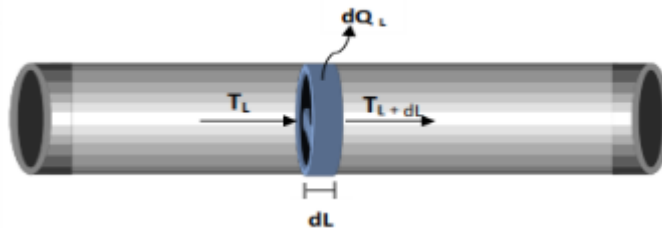
Re = número adimensional de Reynolds

Pr = número adimensional de Prandtl

Discretización de la tubería

Con el objetivo de transformar la ecuación diferencial en un sistema de ecuaciones lineales, en la siguiente figura se discretiza la longitud de la tubería en n elementos en dirección del flujo lo cual se encuentra representado en la figura:

Figura 10. Discretización de la tubería



Fuente: Los autores

Por cada elemento diferencial de volumen $\pi D_o dL$, el balance de energía está dado por la siguiente ecuación:

$$\rho f C_p (T_{L+dL} - T_L) = \frac{(T_{L+dL} - T_a)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{2\pi K dL} + \frac{1}{\pi D_i h dL} \right]} \quad \text{Ecuación (8),} \quad \text{Dónde : } dL = \frac{L}{n}$$

f = flujo de crudo [m^3/h]

ρ = Densidad del crudo [kg/m^3]

C_p = Calor específico promedio [$\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$]

T_{L+dL} = Temperatura de salida del elemento diferencial de la tubería [$^\circ\text{C}$]

T_L = Temperatura de entrada del elemento diferencial de la tubería [$^\circ\text{C}$]

T_a = Temperatura ambiente [$^\circ\text{C}$]

D_i = diámetro externo de la tubería [m]

D_o = diámetro interno de la tubería [m]

K = Conductividad térmica del acero al carbón [$\text{J}/(\text{hr} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$] (ver grafica 1)

h = coeficiente de transferencia de calor de la película de aire [$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$]

L = longitud de la tubería [m]

n = El paso en este caso es de 0,1m

Tabla 7. Datos operativos de la tubería y propiedades del crudo

Variable	Valores	Unidades
Calor específico promedio (C_p)	1923	J/Kg $^\circ\text{C}$
Densidad del crudo @ 60 $^\circ\text{F}$	921,3	Kg/ m^3
Flujo de crudo	635.949	m^3/h
Temperatura entrada del crudo	89,17	$^\circ\text{C}$
Diámetro interno de la tubería	0,3635	M
Diámetro externo de la tubería	0,4064	M
Temperatura ambiente día	41,11	$^\circ\text{C}$
Temperatura ambiente noche	25	$^\circ\text{C}$
Longitud de la tubería	7600	M

Fuente: Los autores

los coeficientes y los numeros adimensionales relacionados para el calculo del coeficiente de transferencia de la pelicula de aire son evaluados a las condiciones de la pelicula media :

$$T_{ev} = \frac{(T_{prom\ tuber\ ia} + T_{amb})}{2} \quad \text{Ecuación (9)}$$

T_{ev} = temperatura evaluada

$T_{prom\ tuber\ ia}$ = temperatura promedio del tanque

T_a = temperatura ambiente

En la siguiente tabla se encuentran los resultados del calculo del coeficiente de transferencia de la pelicula de aire :

Tabla 8. Calculo del coeficiente de transferencia la película aire

Variable	Día	Noche
Presión [Pa]	101.325	101.325
Temperatura ambiente [°C]	41,11	25,00
Temperatura prom. Tuberia [°C]	87,08	87,08
Temperatura media [°C]	64,10	56,04
Densidad [Kg/m ³]	1,05	1,07
Capacidad calórica [J/kg°C]	999,28	997,81
Viscosidad [kg/m.hr]	0,07	0,07
Conductividad térmica [J/hm°C]	98,42	96,52
Velocidad viento [m/hr]	12.600	12.600
Longitud característica. [m]	0,38	0,38
Reynolds	68.149,23	71.065,25
Prandtl	0,76	0,76
Nusselt	171,54	176,27
hpared [J/m ² .hr.°C]	43.858,34	44.197,26

Fuente: Los autores

En el modelado del fenómeno de transferencia de calor de la tubería sin recubrimiento térmico se tuvo en cuenta el cambio de temperatura ambiente del día y la noche.

De acuerdo a la solución de la ecuación diferencial (8) aplicando el método numérico diferencias finitas se obtiene el perfil de temperatura a lo largo de la tubería. En la gráfica 4 se encuentra representado el perfil de temperatura a lo largo de la tubería y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Al bombear el crudo a través de la tubería durante las horas día se requiere retirar aproximadamente 4.600 metros de recubrimiento térmico para lograr alcanzar la temperatura de 85 °C (185 °F) la cual es la temperatura máxima que el crudo debe tener para la venta.
- Y al bombear el crudo a través de la tubería durante las horas de la noche se requiere retirar aproximadamente 3.350 metros de recubrimiento térmico para lograr la temperatura de 85 °C (185 °F).

De acuerdo a los resultados obtenidos se requiere retirar mayor longitud de recubrimiento térmico de la tubería si el crudo es bombeado en las horas del día que cuando es bombeado en las horas de la noche, esto se debe que durante las horas del día se presentan mayor temperatura ambiente que en la horas de la noche, por lo tanto el flux de calor va ser menor en cada elemento diferencial de volumen de la tubería.

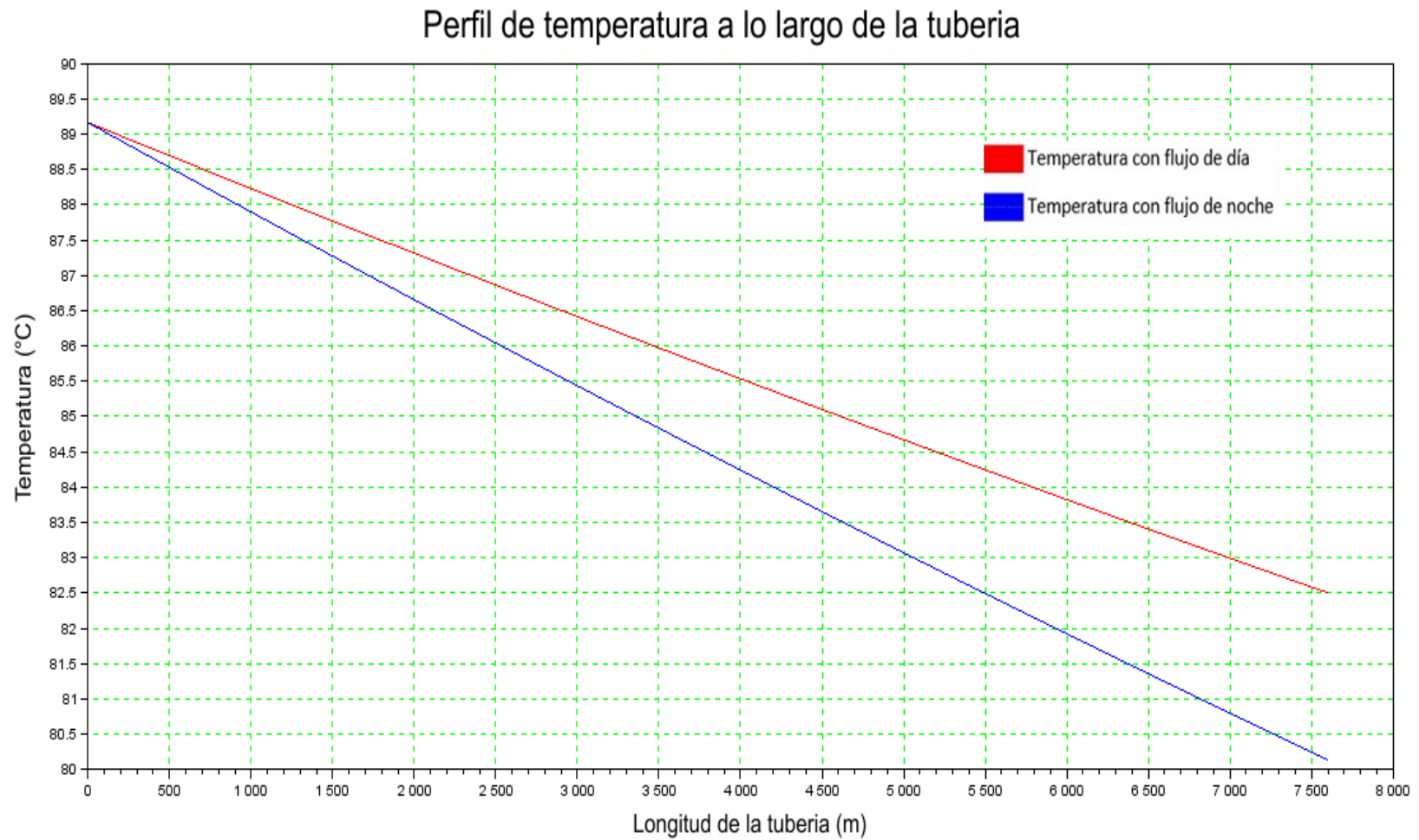
Desventajas que se debe tener en cuenta al implementar el retiro del recubrimiento térmico de la tubería:

- Al momento de retirar el aislamiento térmico de la tubería dependemos de las condiciones climáticas las cuales no podemos controlar (lluvia, velocidad del viento y temperatura ambiente). Por lo tanto no podemos controlar la

transferencia de calor y en caso de una parada del bombeo el crudo podría enfriarse más de lo requerido causando un taponamiento en la tubería.

- Al eliminar el aislamiento de la tubería se presentarían inconvenientes con la parte HSE, debido a que una tubería sin su recubrimiento térmico puede afectar la integridad de las personas, la fauna y flora del sitio.

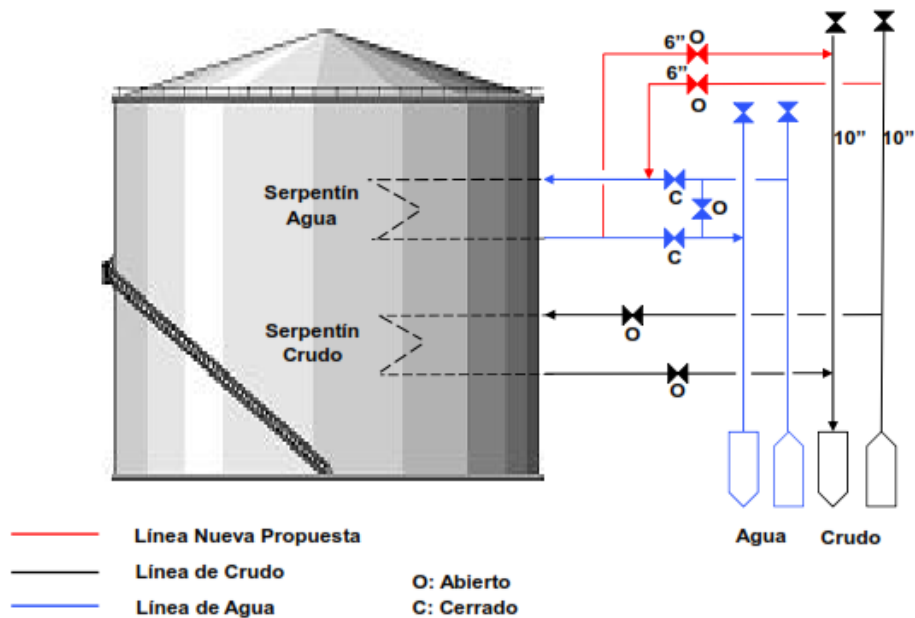
Grafica 4. Perfil de temperatura a lo largo de la temperatura



Fuente: Los autores

3.3. INTERCONEXIÓN DE LOS SERPENTINES EN EL TANQUE FWKO

Figura 11. Interconexión de los serpentines de crudo y de agua en el FWKO



Fuente: Los autores

Balance de energía en las corrientes de crudo que entran y salen del tanque FWKO:

Suposiciones

- Se asume una temperatura promedio en todo el tanque FWKO debido al caudal tan grande que maneja.
- La composición de la corriente de crudo que se separa por diferencia de densidad es de 23% BSW, reporte dado del campo.
- La corriente que sale por la parte inferior del tanque FWKO se asume 100% agua

De acuerdo a las anteriores suposiciones el balance de energía está dado por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} mmf * C_{pmf} * (T_{emf} - T_o) \\ = mcf * C_{pcf} * (T_s - T_o) + maf * C_{paf} * (T_s - T_o) + Q_t \end{aligned}$$

Ecuación (1)

Dónde:

mmf = flujo másico de la mezcla crudo-agua que entra al FWKO. [Kg/h]

C_{pmf} = Capacidad Calórica específica de la mezcla crudo-agua que entra al FWKO. [J/kg°C].

T_{emf} = Temperatura de entrada al FWKO de la mezcla crudo-agua. [°C]

mcf = Flujo másico de crudo que sale por la parte superior del tanque. [Kg/h].

C_{pcf} = Capacidad calórica específica de la corriente que sale por la parte superior del tanque. [J/kg°C].

maf = flujo másico que sale por la corriente inferior del tanque. [Kg/h]

C_{paf} = Capacidad calórica de la corriente de agua que sale por la parte inferior del tanque. [J/kg°C].

T_s = Temperatura promedio del tanque FWKO. [°C]

Q_t = Calor transferido por los serpentines. [J/h]

T_o = Temperatura de referencia para el cálculo del Cp, para este caso es 0 °C.

Al discretizar la longitud de cada serpentín en n elementos en dirección del flujo se obtiene los siguientes balances:

Aplicando la ley de Fourier

$$dQ = \frac{2 * \pi * dl * (-k) * (T_s - T_l)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right)}$$

Ecuación (2)

Balance en el elemento infinitesimal de volumen:

$$\rho_{sp} * f_{sep} * C_{pc} * (T_l - T_{l+dl}) = dQ$$

Ecuación (3)

Reemplazando la ecuación (2) en (3) obtenemos la siguiente ecuación la se soluciona a largo de cada serpentín:

$$T_{l+dl} = \frac{-2 * \pi * dl * (-k) * (T_s - T_l)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right) * \rho_{sp} * f_{sep} * Cp_c} + T_l \quad \text{Ecuación (4)}$$

T_{l+dl} = Temperatura a la salida del elemento de volumen de solución. [°C]

dl = Longitud del diferencial de longitud de solución para el serpentín [m]

k = Conductividad térmica del material del serpentín. [J/hora.m.°C]

T_s = Temperatura promedio del tanque FWKO. [°C]

T_l = Temperatura a la entrada del elemento de volumen de solución. [°C]

ρ_{sp} = Densidad del crudo que atraviesa el serpentín. [Kg/m³]

Cp_c = Capacidad calórica específica del crudo pasa a través del serpentín. [J/kg°C]

r_m = Radio exterior del serpentín. [m]

r_o = Radio interior del serpentín. [m]

Entonces, el calor total cedido por cada serpentín está dado por:

$$Q_{sp} = \rho_{sp} * f_{sp} * Cp_c * (T_{ent} - T_{sal}) \quad \text{Ecuación (5)}$$

ρ_{sp} = Densidad del crudo que entra por los serpentines [Kg/m³]

f_{sp} = Flujo que pasa por el serpentín [m³/h]

Cp_c = Capacidad calórica específica del crudo pasa a través del serpentín. [J/kg°C]

T_{ent} = temperatura del crudo que entra por el serpentín. [°C]

T_{sal} = temperatura del crudo que sale por el serpentín. [°C]

Q_{sp} = el calor total cedido por el serpentín. [J/h]

Balance de energía en el colchón de crudo

$$mcf * Cp_{cf} * (T_{emf} - T_s) + Q_{sp} - Q_{sa} = 0 \quad \text{Ecuación (6)}$$

mcf = Flujo másico de crudo que sale por la parte superior del tanque. [Kg/h].

Cp_{cf} = Capacidad calórica específica de la corriente que sale por la parte superior del tanque. [J/kg°C].

T_{emf} = Temperatura de entrada al FWKO de la mezcla crudo-agua. [°C]

T_s = Temperatura promedio del tanque FWKO. [°C]

Q_{sp} = el calor total cedido por el serpentín. [J/h]

Q_{sa} = el calor total cedido al colchón de agua. [J/h]

Aplicando la ley de Fourier entre los colchones (Crudo- Agua) del tanque FWKO

$$Q_{sa} = -K \cdot \pi r^2 \frac{dT}{dy} \quad \text{dónde: } K = AT + B$$

$$\frac{-\pi r_{if}^2}{2L_{ca}} AT_s^2 - \frac{\pi r_{if}^2}{L_{ca}} BT_s + \frac{\pi r^2}{L_{ca}} \left(\frac{AT_{sa}^2}{2} + BT_{sa} \right) + Q_{sa} = 0 \quad \text{Ecuación (7)}$$

T_s = Temperatura promedio del tanque FWKO. [°C]

T_{sa} = Temperatura a la que sale el agua por la parte inferior del tanque FWKO. [°C]

r_{if} = Radio interno del tanque FWKO. [m]

L_{ca} = altura del colchón de agua en el tanque FWKO. [m]

Q_{sa} = el calor total cedido al colchón de agua. [J/h]

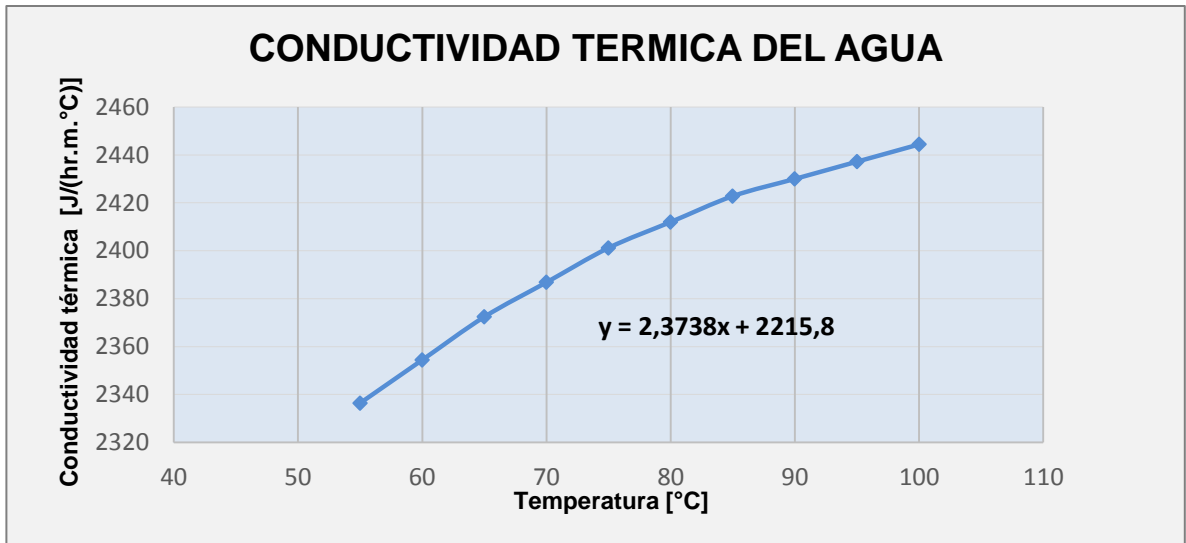
A y B = constantes.

Tabla 9. Conductividad térmica del agua

Temperatura (°C)	Conductividad (J/hr.m.°C)
55	2336,4
60	2354,4
65	2372,4
70	2386,8
75	2401,2
80	2412
85	2422,8
90	2430
95	2437,2
100	2444,4

Fuente: Modificado. CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor. 2 ed. México: McGraw-Hill. 2004, p. 730.

Grafica 5. Conductividad térmica del agua a diferentes temperaturas



Fuente: Los autores

Tabla 10. Variables del fluido

Variable	Valores	Unidades
mmf	3'434.000	Kg/h
$Cpmf$	4.187	J/kg°C
mcf	374.000	Kg/h
$Cpcf$	2437	J/kg°C
maf	3'059.00	Kg/h
$Cpaf$	4336	J/kg°C
$Temf$	64,22	°C
Cpc	1943	J/kg°C
ρ_c	918,5	Kg/m ³
$Tecs$	94,86	°C
Ft_{sp}	292,8	m ³ /h
A	2,3738	
B	2215,8	

Fuente: Los Autores

Tabla 11. Especificaciones del tanque FWKO

Variable	Valor	Unidades
Capacidad nominal de tanque	7510,16	m ³
Altura del tanque	12,8016	m
Diámetro interno del tanque	27,432	m
Diámetro externo del serpentín de crudo	0,1683	m
Diámetro interno del serpentín de crudo	0,1541	m
Diámetro externo del serpentín de Agua	0,1143	m
Diámetro interno del serpentín de Agua	0,1023	m
Longitud del serpentín de crudo	2190	m
Longitud del serpentín de Agua	1810	m
Altura del colchón de Agua	6,6568	m

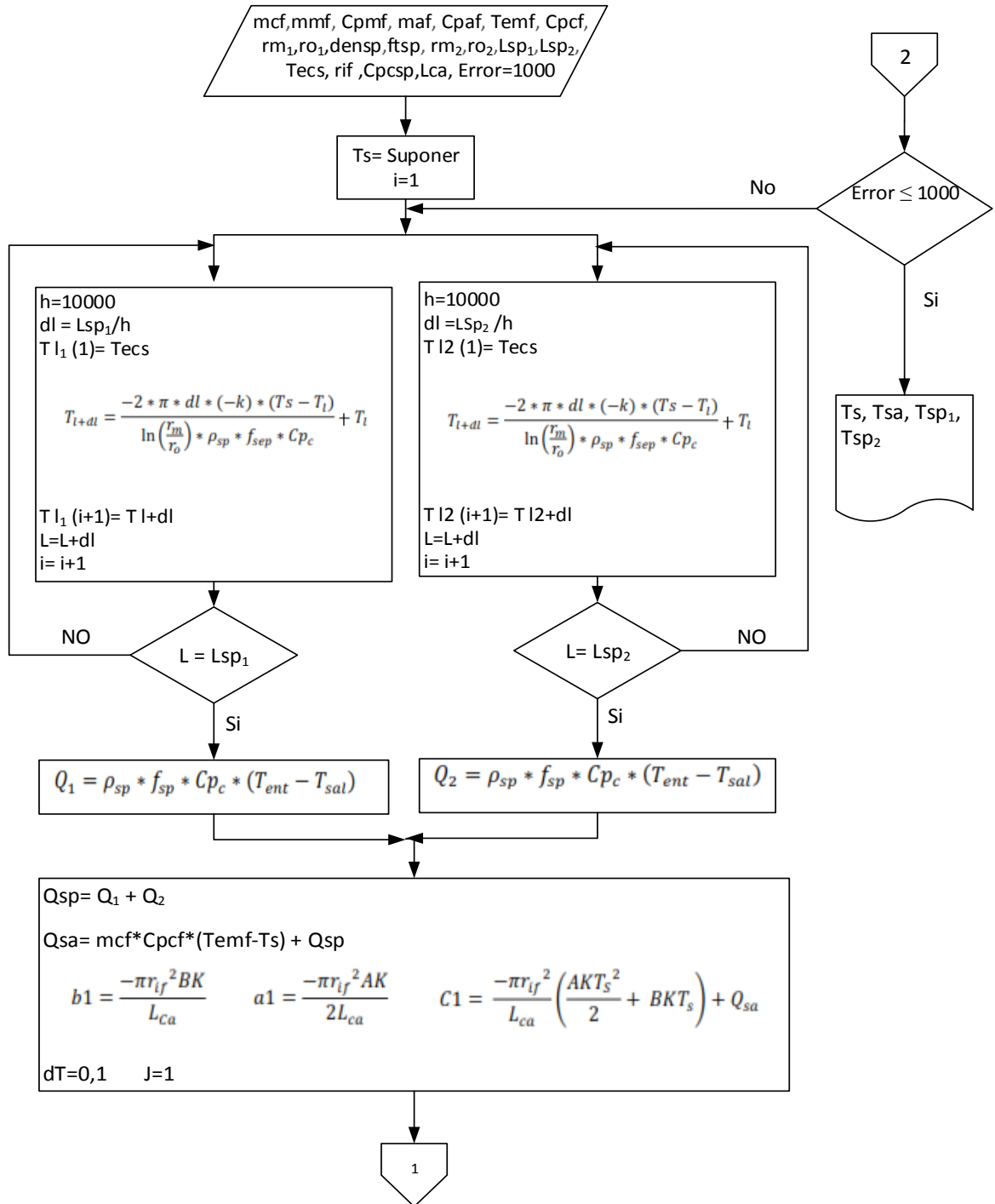
Fuente: Los autores.

Con el fin de conocer la temperatura promedio del crudo deshidratado que sale de los serpentines de crudo y agua hacia los tanques de almacenamiento se procede a la solución del algoritmo el cual hace referencia al modelado de transferencia de calor al interconectar los serpentines de crudo y agua....ver la figura 12 y 13...

En Las gráficas 6 y 7 se encuentra representado el perfil de temperatura a lo largo de los serpentines (crudo y agua) a diferentes ratas de flujo y se obtuvieron los siguientes resultados:

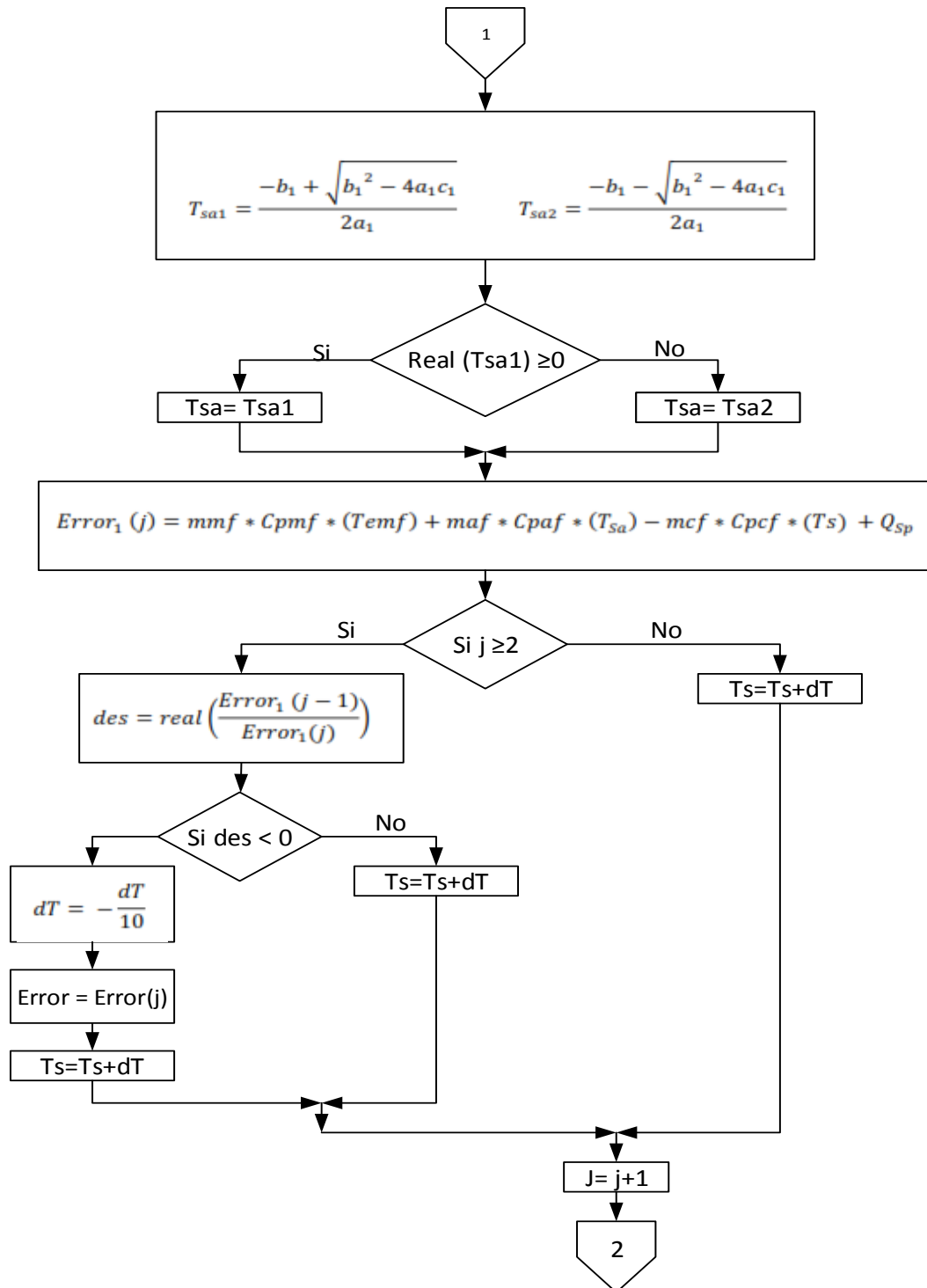
- Al realizar diferentes distribuciones de flujo del crudo deshidratado proveniente de los intercambiadores calor a través de los serpentines de crudo y agua del tanque FWKO se logra disminuir la temperatura del crudo desde 94,86 °C (202,7 °F) hasta 83,4°C (182,1 °F), para lograr esta reducción de temperatura se realiza la distribución del flujo total el cual es de 292,8 m³/h (1841,7 bbls/h) de la siguiente manera: distribuir el 60% del flujo total por el serpentín de crudo y el otro 40 % por el serpentín de agua. Al interconectar los serpentines del tanque se transfiere 4280,4 MJ/h (4,06 MBTU/h) desde el crudo deshidratado hacia el fluido de pozo en el tanque FWKO.

Figura 12. Algoritmo de solución del sistema de ecuaciones



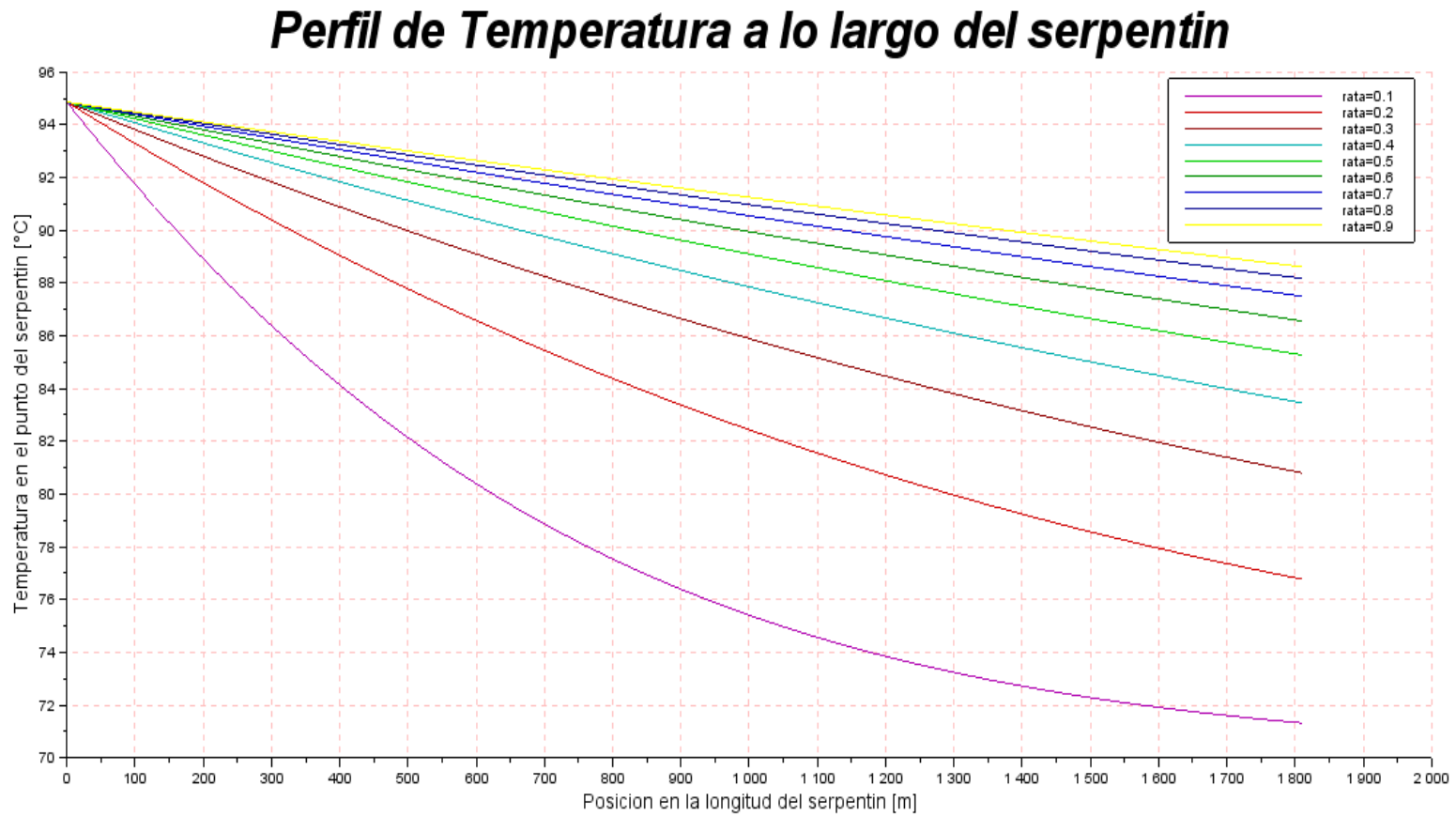
Fuente: Los Autores.

Figura 13. Continuación del Algoritmo de solución del sistema de ecuaciones



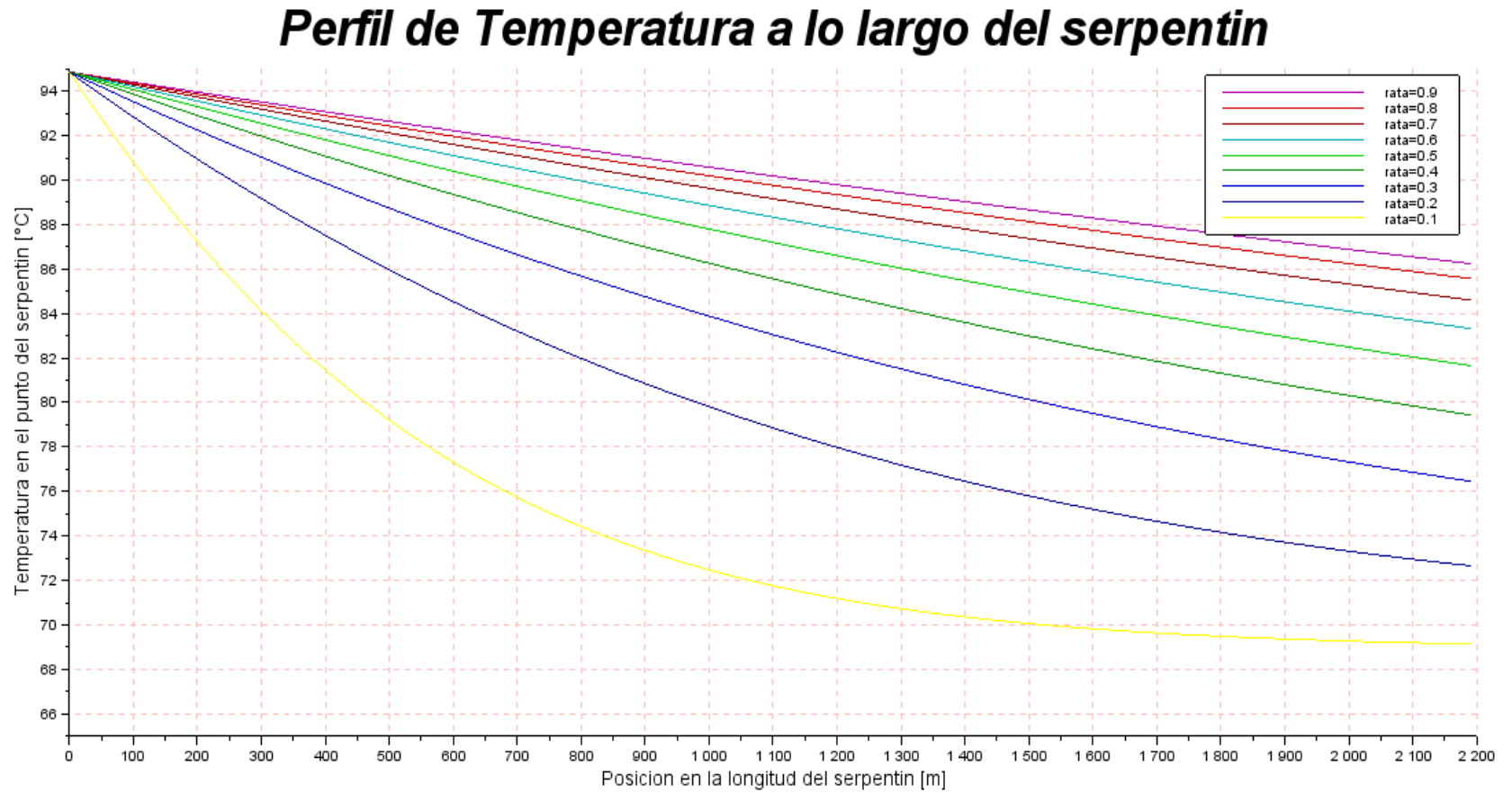
Fuente: Los Autores.

Grafica 6. Perfil de temperatura a lo largo del serpentín de agua



Fuente: Los autores.

Grafica 7. Perfil de temperatura a lo largo del serpentín de crudo



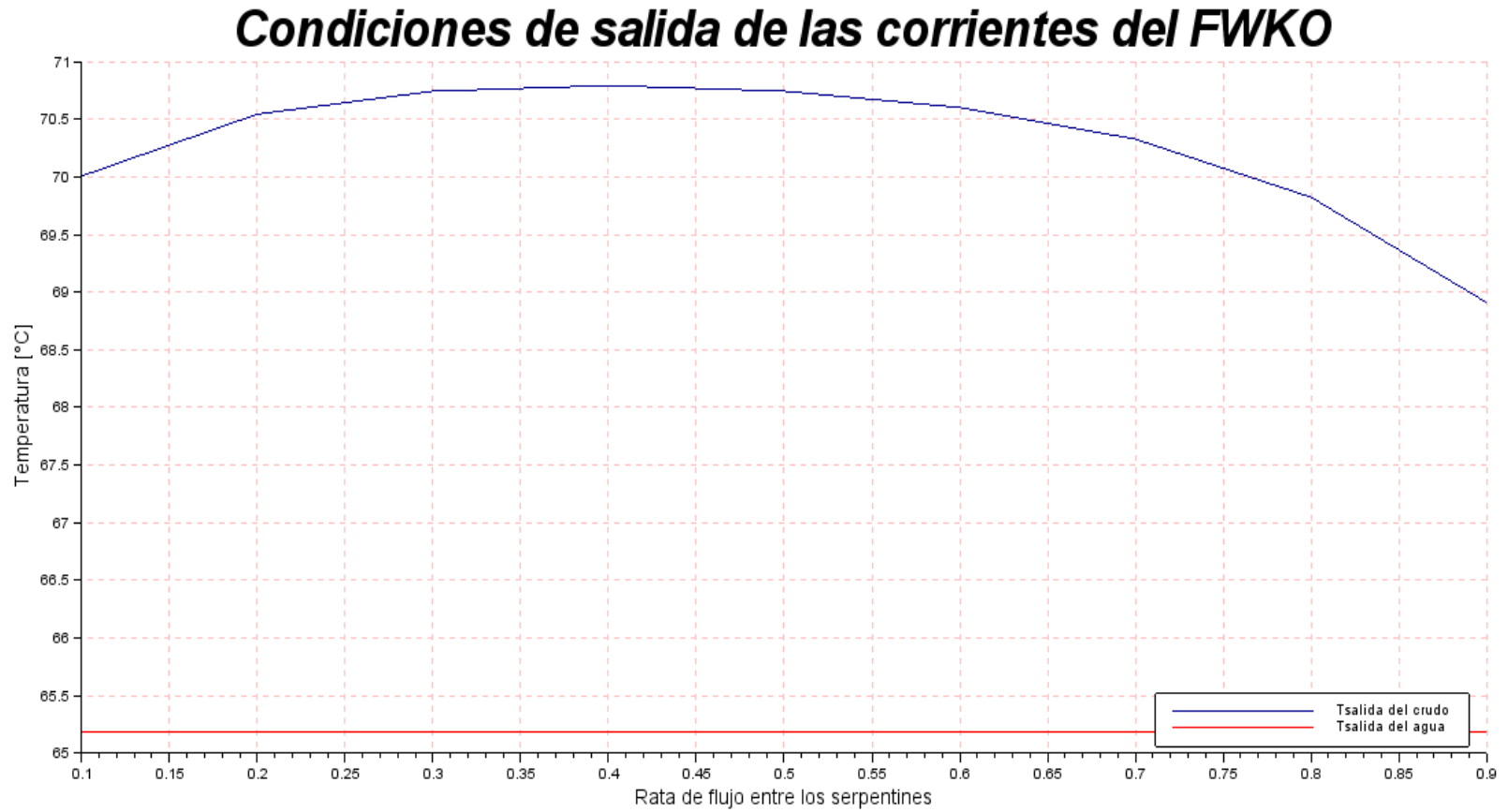
Fuente: Los autores.

Grafica 8. Temperatura promedio del crudo que sale de los serpentines del FWKO



Fuente: Los autores.

Grafica 9. Condiciones de salida de las corrientes que salen del FWKO



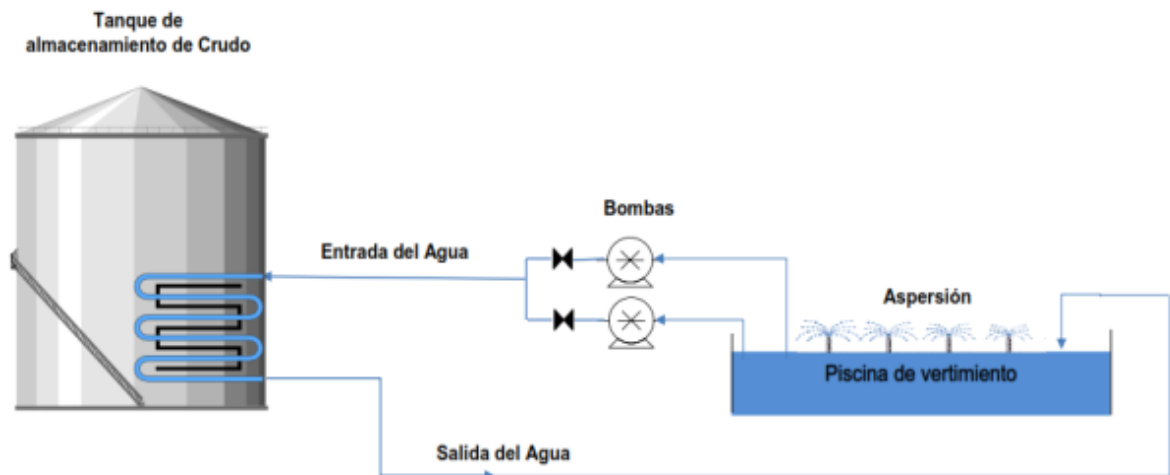
Fuente: Los autores.

3.4. ENFRIAMIENTO CON AGUA A TRAVÉS DEL SERPENTÍN INTERNO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Consideraciones

- A las condiciones de caudal máximo de agua de entrada, el régimen de flujo es turbulento.
- Todo el calor desprendido por el crudo, es ganado por el agua que circula a través del serpentín

Figura 14. Enfriamiento con agua a través del serpentín interno.



Fuente: **Los autores.**

Balance de energía

$$\rho C_v V \frac{\partial T}{\partial t} = -Q \quad \text{Ecuación (1)}$$

El término de acumulación en el tanque es igual al calor transferido, a través de las paredes del serpentín, hacia el agua de enfriamiento.

El flujo de energía transferido se rige de acuerdo a la siguiente expresión (modelo de resistencias en serie):

$$Q = UA(T_t - T_A) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde, U es el coeficiente de transferencia de calor; A es el área de transferencia; T_t es la temperatura del crudo, la cual cambia en el tiempo; y T_A es la temperatura del agua de enfriamiento, que también cambia en el tiempo. Es de precisar que debido al régimen de flujo (Re) el cual es turbulento, se asume uniforme la temperatura del agua en dirección radial.

El coeficiente de transferencia está definido por la siguiente ecuación:

$$UA = \frac{1}{\left[\frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{2\pi z K} \right]} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Como se asume que todo el calor transferido es ganado por el agua, se plantea el siguiente balance de energía:

$$\rho C_p v_o \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(T_t - T_A)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{2\pi z K} \right]} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Con el objetivo de transformar la ecuación diferencial en un sistema de ecuaciones lineales, se discretiza la longitud de la tubería en n elementos en dirección del flujo (similar a lo realizado en la alternativa 2). Por cada elemento diferencial de volumen, el balance de energía será:

$$\rho f C_p (T_{A_{L+dL}}^k - T_{A_L}^k) = \frac{(T_t^k - T_{A_{L+dL}}^k)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_o}\right)}{2\pi K d_L} \right]} \quad \text{Ecuación (6),} \quad \text{Dónde: } dL = \frac{L}{n}$$

f = flujo de crudo [m^3/h]

ρ = Densidad del crudo [kg/m³]

C_p = Calor específico promedio [J/kg. °C]

T_{AL+dL} = Temperatura de salida del elemento diferencial del serpentín [°C]

T_{AL} = Temperatura de entrada del elemento diferencial del serpentín [°C]

T_t = Temperatura del crudo [°C]

D_i = diámetro externo del serpentín. [m]

D_o = diámetro interno del serpentín. [m]

K = Conductividad térmica del acero al carbón [J/(hr.m.°C)] (ver grafica 1)

h = coeficiente de transferencia de calor a través de la capa del fluido [J/m².hr.°C]

L = longitud del serpentín [m]

n = El paso en este caso es de 0,1m

Por otra parte, vale aclarar que el superíndice k se utiliza para indicar el instante de tiempo en el que se evalúa la temperatura del crudo.

Las propiedades fisicoquímicas del crudo son las mismas a las referenciadas para la primera alternativa.

Algoritmo de solución utilizado

1. Fijar temperatura del crudo (195 °F) en el tiempo cero.
2. Para $k=1$, determinar la temperatura de salida de agua de enfriamiento (Ecuación 6).
3. Calcular el calor retirado $Q = mC_p\Delta T$ (calor sensible ganado por el agua)
4. Determinar la temperatura del crudo para $k= k+1$ (ecuación 1)
5. Si la temperatura del crudo para $k= k+1$ es igual o menor a 185 °F, parar.
6. Si la temperatura del crudo para $k= k+1$ no igual o menor a 185 °F, repetir desde el paso 2 con la nueva temperatura de crudo calculada.

Tabla 12. Especificaciones del líquido utilizado para enfriar y las dimensiones de los serpentines.

Variables	TK 40.000 Bbls	TK 100.000 Bbls
Flujo de agua de enfriamiento (m ³ /h)	60	60
Temperatura de entrada del agua (°C)	54,44	54,44
Temperatura de crudo en el tanque (°C)	88,89	88,89
Flujo de descarga de crudo (m ³ /h)	640	640
Capacidad Calorífica del agua (J/Kg.K)	4181,3	4181,3
Capacidad Calorífica del crudo (J/Kg.K)	1923	1923
Densidad del Agua (Kg/ m ³)	1000	1000
Densidad del crudo (Kg/ m ³)	921,3	921,3
Diámetro interno del serpentín (m)	0,0762	0,0762
Diámetro externo del serpentín (m)	0,0889	0,0889
Longitud del serpentín (m)	785	1435
Radio del tanque (m)	12,664	18,292
Altura del colchón de crudo en contacto con los serpentines (m)	3,5	3,5
Volumen del colchón de crudo en contacto con los serpentines (m ³)	1763,44	3679,09

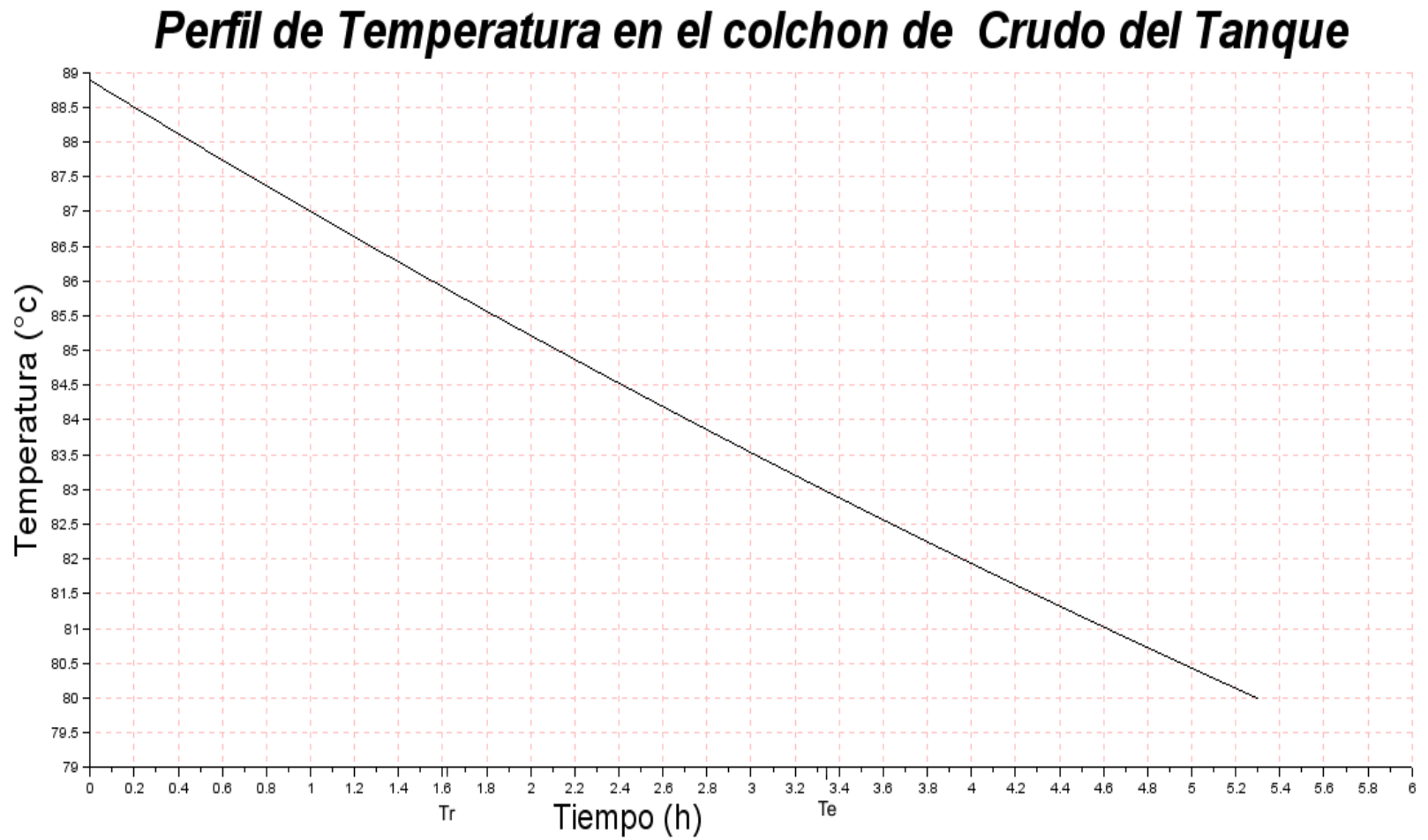
Fuente: Los Autores.

En las siguientes graficas...Ver las gráficas 10 y 11.... Se encuentra representado el perfil de temperatura para cada uno de los tanques utilizando 9.000 BPD de agua a 130°F por cada serpentín para enfriar el crudo, y se obtuvieron los siguientes resultados para llegar a una temperatura de 83°C (181,4 °F):

Capacidad del tanque	Tiempo de residencia del crudo en el volumen ocupado por el serpentín	Tiempo requerido para enfriar el crudo en el volumen ocupado por el serpentín
40.000 Bbls	1,61 horas	3,33 horas
100.000 Bbls	3,37 horas	6,94 horas

De acuerdo al cuadro anterior la implementación de esta alternativa no es viable, porque el tiempo de residencia del crudo en el volumen ocupado por el serpentín en el tanque de almacenamiento es menor que el tiempo requerido para enfriarlo hasta la temperatura óptima para la venta.

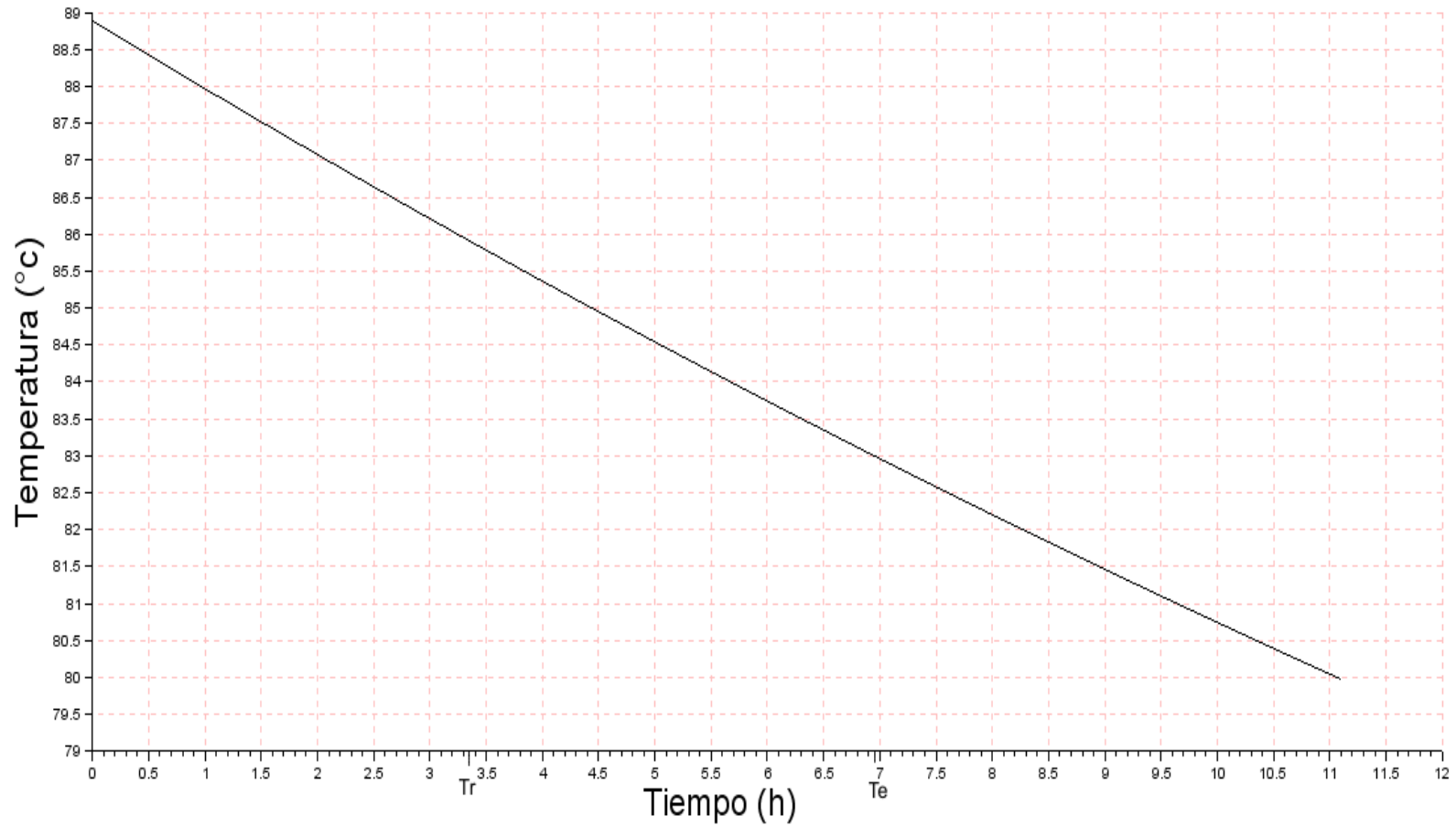
Grafica 10. Perfil de temperatura en el colchón de crudo del tanque de 40.000 Bbls.



Fuente: Los Autores.

Grafica 11. Perfil de temperatura en el colchón de crudo del tanque de 100.000 Bbls.

Perfil de Temperatura en el colchon de Crudo del Tanque



Fuente: Los Autores.

4. EVALUACIÓN TÉCNICO- ECONOMICA

En las siguientes tablas se encuentra relacionados los costos directos e indirectos de cada una de las propuestas analizadas en el capítulo anterior, a las cuales se le realizara una evaluación de acuerdo a la eficiencia y presupuesto de cada una de las alternativas ya que es un proyecto de mejora que se requiere para operar y garantizar la disminución de las perdidas por diferidas durante el año por alta temperatura en el despacho de crudo hacia ODL.

Tabla 13. Presupuesto para retirar el aislamientos de los tanques de Almacenamiento

RETIRO AISLAMIENTO TANQUES DE ALMACENAMIENTO						
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
1	MECANICA					\$ 285.600.000
1.1	Armado y desarmado de andamios	Global	4	\$ 2.000.000	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
1.2	Retiro aislamiento térmico	Tanque	4	\$ 15.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000
1.3	Disposición de material sobrante	Tanque	4	\$ 15.000.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000
1.4	Alquiler andamios	Tanque	4	\$ 6.000.000	\$ 24.000.000	\$ 24.000.000
1.6	Pintura	Tanque	4	\$ 30.000.000	\$ 120.000.000	\$ 120.000.000
1.7	Marcación de tanques	Tanque	4	\$ 1.400.000	\$ 5.600.000	\$ 5.600.000
1.8	Marcación de la línea de interconexión	ML	100	\$ 80.000	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
4	CIVIL					\$ 47.000.000
4.2	Conformación del terreno	Un	1	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000
4.3	Reforestación y arreglo paisajístico	Un	1	\$ 10.000.000	\$ 10.000.000	\$ 10.000.000
4.6	Arreglo dique de tanques	Un	1	\$ 12.000.000	\$ 12.000.000	\$ 12.000.000
5	SUMINISTROS					\$ 99.700.000
5.20	Camioneta	un/dia	60	\$ 220.000	\$ 13.200.000	\$ 13.200.000
5.21	Camión grúa	un/dia	10	\$ 650.000	\$ 6.500.000	\$ 6.500.000
5.23	Ingeniería	un	1	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000
6	PERSONAL					\$ 41.800.000
6.1	Supervisor	Un/ mes	1	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000
6.2	Técnicos	Un/ mes	2	\$ 2.800.000	\$ 5.600.000	\$ 5.600.000

Fuente: Los Autores.

Tabla 13. (Continuación)

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
6.3	Ayudantes	Un/mes	12	\$ 2.400.000	\$ 28.800.000	\$ 28.800.000
6.6	Técnico HSE	Un/ mes	1	\$ 3.200.000	\$ 3.200.000	\$ 3.200.000
COSTO DIRECTO						\$ 332.600.000
GESTION DE COMPRAS (5%)						\$ 16.630.000
IMPREVISTOS (20%)						\$ 66.520.000
PRECOMMISSIONIG Y COMMISSIONIG (15%)						\$ 49.890.000
COSTO TOTAL \$						\$ 565.340.000

Tabla 14. Presupuesto para retirar el aislamiento de la línea de transferencia de crudo al ODL

RETIRO AISLAMIENTO LINEA DE TRANSFERENCIA DE CRUDO AL ODL						
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
1	MECANICA					\$ 365.720.000
1.1	Armado y desarmado de andamios	Global	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
1.2	Retiro aislamiento térmico	MI	4000	\$ 15.000	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000
1.3	Disposición de material sobrante	Global	1	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000
1.4	Alquiler andamios	Global	1	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000
1.6	Pintura	ML	4000	\$ 70.000	\$ 280.000.000	\$ 280.000.000
1.7	Marcación de líneas	Un	30	\$ 80.000	\$ 2.400.000	\$ 2.400.000
1.8	Marcación de la línea de interconexión	Global	4	\$ 80.000	\$ 320.000	\$ 320.000
4	CIVIL					\$ 30.000.000
4.3	Reforestación y arreglo paisajístico	Un	3	\$ 10.000.000	\$ 30.000.000	\$ 30.000.000
5	SUMINISTROS					\$ 102.100.000
5.1	Avisos señalización alta temperatura	ml	30	\$ 80.000	\$ 2.400.000	\$ 2.400.000
5.20	Camioneta	un/día	60	\$ 220.000	\$ 13.200.000	\$ 13.200.000
5.21	Camión grúa	un/día	10	\$ 650.000	\$ 6.500.000	\$ 6.500.000
5.23	Ingeniería	un	1	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000
6	PERSONAL					\$ 27.400.000
6.1	Supervisor	Un/mes	1	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000
6.2	Técnicos	Un/mes	2	\$ 2.800.000	\$ 5.600.000	\$ 5.600.000
6.3	Ayudantes	Un/mes	6	\$ 2.400.000	\$ 14.400.000	\$ 14.400.000

Fuente: Los Autores.

Tabla 14. (Continuación)

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
6.6	Técnico HSE	Un/mes	1	\$ 3.200.000	\$ 3.200.000	\$ 3.200.000
COSTO DIRECTO						\$ 395.720.000
GESTION DE COMPRAS (5%)						\$ 19.786.000
IMPREVISTOS (20%)						\$ 79.144.000
PRECOMMISSIONIG Y COMMISSIONIG (15%)						\$ 59.358.000
COSTO TOTAL \$						\$ 656.108.000

Tabla 15. Presupuesto para interconectar los serpentines del tanque FWKO

INTERCONECTAR SERPENTINES						
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
1	TUBERIA					\$ 94.060.000
1.8	Montaje Bomba de recirculación	Un	2	\$ 8.000.000	\$ 16.000.000	\$ 16.000.000
1.13	Marcación de líneas asociadas a las bombas	Un	48	\$ 70.000	\$ 3.360.000	\$ 3.360.000
1.14	Montaje de aspersores (10)	Un	10	\$ 2.000.000	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
1.15	Montaje de marco H	Un	30	\$ 1.450.000	\$ 43.500.000	\$ 43.500.000
1.16	Suministro y montaje Filtro de canasta	Un	2	\$ 5.600.000	\$ 11.200.000	\$ 11.200.000
2	ELECTRICIDAD					\$ 50.100.000
2.1	Conexión bomba Recirculación	Un	2	\$ 1.500.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000
2.2	Puesta a tierra	Un	4	\$ 900.000	\$ 3.600.000	\$ 3.600.000
2.3	Iluminación	Un	14	\$ 600.000	\$ 8.400.000	\$ 8.400.000
2.4	Planta eléctrica	Un/mes	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
2.5	Tablero de distribución eléctrico	Un	2	\$ 6.500.000	\$ 13.000.000	\$ 13.000.000
2.8	Banco de ductos y cableado	MI	15	\$ 620.000	\$ 9.300.000	\$ 9.300.000
2.9	Variador de velocidad	Un	1	\$ 14.800.000	\$ 14.800.000	\$ 14.800.000
3	INSTRUMENTOS					\$ 5.400.000
3.1	desconexión y conexión transmisores de señal	Un	8	\$ 180.000	\$ 1.440.000	\$ 1.440.000
3.2	Montaje e Interconexión Transmisor Temperatura TIT	Un	4	\$ 180.000	\$ 720.000	\$ 720.000
3.3	Montaje e Interconexión Transmisor de nivel LIT	Un	6	\$ 300.000	\$ 1.800.000	\$ 1.800.000
3.4	Montaje e Interconexión Transmisor Temperatura y presión en bombas	Un	8	\$ 180.000	\$ 1.440.000	\$ 1.440.000

Fuente: Los Autores.

Tabla 15. (Continuación)

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
4	CIVIL					\$ 25.000.000
4.2	Conformación del terreno	Un	1	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000
5	SUMINISTROS					\$ 706.400.000
5.1	Avisos señalización alta temperatura	ml	95	\$ 80.000	\$ 7.600.000	\$ 7.600.000
5.2	Suministro y montaje Tubería 3" SCH 40	ml	450	\$ 280.000	\$ 126.000.000	\$ 126.000.000
5.3	Suministro y montaje de chaquetas para aislamiento de Tubería 3" y 4" SCH 40	ml	900	\$ 210.000	\$ 189.000.000	\$ 189.000.000
5.4	Suministro y montaje Tubería 4" SCH 40	ml	450	\$ 380.000	\$ 171.000.000	\$ 171.000.000
5.5	Suministro y montaje Válvulas de Cheque 3"	Un	4	\$ 850.000	\$ 3.400.000	\$ 3.400.000
5.6	Suministro y montaje Válvulas de Compuerta 4"	Un	6	\$ 920.000	\$ 5.520.000	\$ 5.520.000
5.7	Suministro y montaje Válvulas de Compuerta 3"	Un	4	\$ 820.000	\$ 3.280.000	\$ 3.280.000
5.9	Suministro y montaje Válvulas de Cheque 4"	Un	40	\$ 1.100.000	\$ 44.000.000	\$ 44.000.000
5.10	Suministro y montaje de accesorios de tubería (bridas,empaques,tes,codos y esparragos)	Global	1	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000
5.20	Camioneta	un/dia	30	\$ 220.000	\$ 6.600.000	\$ 6.600.000
5.21	Camión grua	un/dia	20	\$ 650.000	\$ 13.000.000	\$ 13.000.000
5.23	Ingeniería	Un	1	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000
5.24	Bomba centrifuga (2) gpm @ 50 psig / skip petrolero	Un	2	\$ 21.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000
6	PERSONAL					\$ 58.600.000
6.1	Supervisor	Un/mes	1	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000
6.2	Técnicos	Un/mes	2	\$ 2.800.000	\$ 5.600.000	\$ 5.600.000
6.3	Ayudantes	Un/mes	4	\$ 2.400.000	\$ 9.600.000	\$ 9.600.000
6.4	cuadrilla soldador API	Un/mes	6	\$ 5.500.000	\$ 33.000.000	\$ 33.000.000
6.5	Tubero	Un/mes	1	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000
6.6	Técnico HSE	Un/mes	1	\$ 3.200.000	\$ 3.200.000	\$ 3.200.000
	COSTO DIRECTO					\$ 174.560.000
	GESTION DE COMPRAS (5%)					\$ 8.728.000
	IMPREVISTOS (20%)					\$ 34.912.000
	PRECOMMISSIONIG Y COMMISSIONIG (15%)					\$ 26.184.000
	COSTO TOTAL \$					\$ 950.784.000

Tabla 16. Presupuesto para el enfriamiento con agua a través del serpentín interno del tanque de Almacenamiento.

ENFRIAMIENTO CON AGUA A TRAVÉS DEL SERPENTÍN INTERNO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO						
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
1	MECANICA					\$ 21.880.000
1.3	Disposición de material sobrante	Global	1	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000
1.4	Alquiler andamios	Global	1	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000
1.7	Marcación de líneas	Un	9	\$ 80.000	\$ 720.000	\$ 720.000
1.11	Marcación de la línea de interconexión	Global	2	\$ 80.000	\$ 160.000	\$ 160.000
1	TUBERIA					\$ 94.060.000
1.8	Montaje Bomba de recirculación	Un	2	\$ 8.000.000	\$ 16.000.000	\$ 16.000.000
1.13	Marcación de líneas asociadas a las bombas	Un	48	\$ 70.000	\$ 3.360.000	\$ 3.360.000
1.14	Montaje de aspersores (10)	Un	10	\$ 2.000.000	\$ 20.000.000	\$ 20.000.000
1.15	Montaje de marco H	Un	30	\$ 1.450.000	\$ 43.500.000	\$ 43.500.000
1.16	Suministro y montaje Filtro de canasta	un	2	\$ 5.600.000	\$ 11.200.000	\$ 11.200.000
2	ELECTRICIDAD					\$ 50.100.000
2.1	Conexión bomba Recirculación	Un	2	\$ 1.500.000	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000
2.2	Puesta a tierra	Un	4	\$ 900.000	\$ 3.600.000	\$ 3.600.000
2.3	Iluminación	Un	14	\$ 600.000	\$ 8.400.000	\$ 8.400.000
2.4	Planta eléctrica	Un/mes	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
2.5	Tablero de distribución eléctrico	Un	2	\$ 6.500.000	\$ 13.000.000	\$ 13.000.000
2.8	Banco de ductos y cableado	MI	15	\$ 620.000	\$ 9.300.000	\$ 9.300.000
2.9	Variador de velocidad	Un	1	\$ 14.800.000	\$ 14.800.000	\$ 14.800.000
3	INSTRUMENTOS					\$ 5.400.000
3.1	desconexión y conexión transmisores de señal	Un	8	\$ 180.000	\$ 1.440.000	\$ 1.440.000
3.2	Montaje e Interconexión Transmisor Temperatura TIT	Un	4	\$ 180.000	\$ 720.000	\$ 720.000
3.3	Montaje e Interconexión Transmisor de nivel LIT	Un	6	\$ 300.000	\$ 1.800.000	\$ 1.800.000
3.4	Montaje e Interconexión Transmisor Temperatura y presión en bombas	Un	8	\$ 180.000	\$ 1.440.000	\$ 1.440.000
4	CIVIL					\$ 37.000.000
4.1	Replanteo	Un	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
4.2	Conformación del terreno	Un	1	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000	\$ 25.000.000
4.3	Reforestación y arreglo paisajístico	Un	1	\$ 10.000.000	\$ 10.000.000	\$ 10.000.000

Fuente: Los Autores.

Tabla 16. (Continuación)

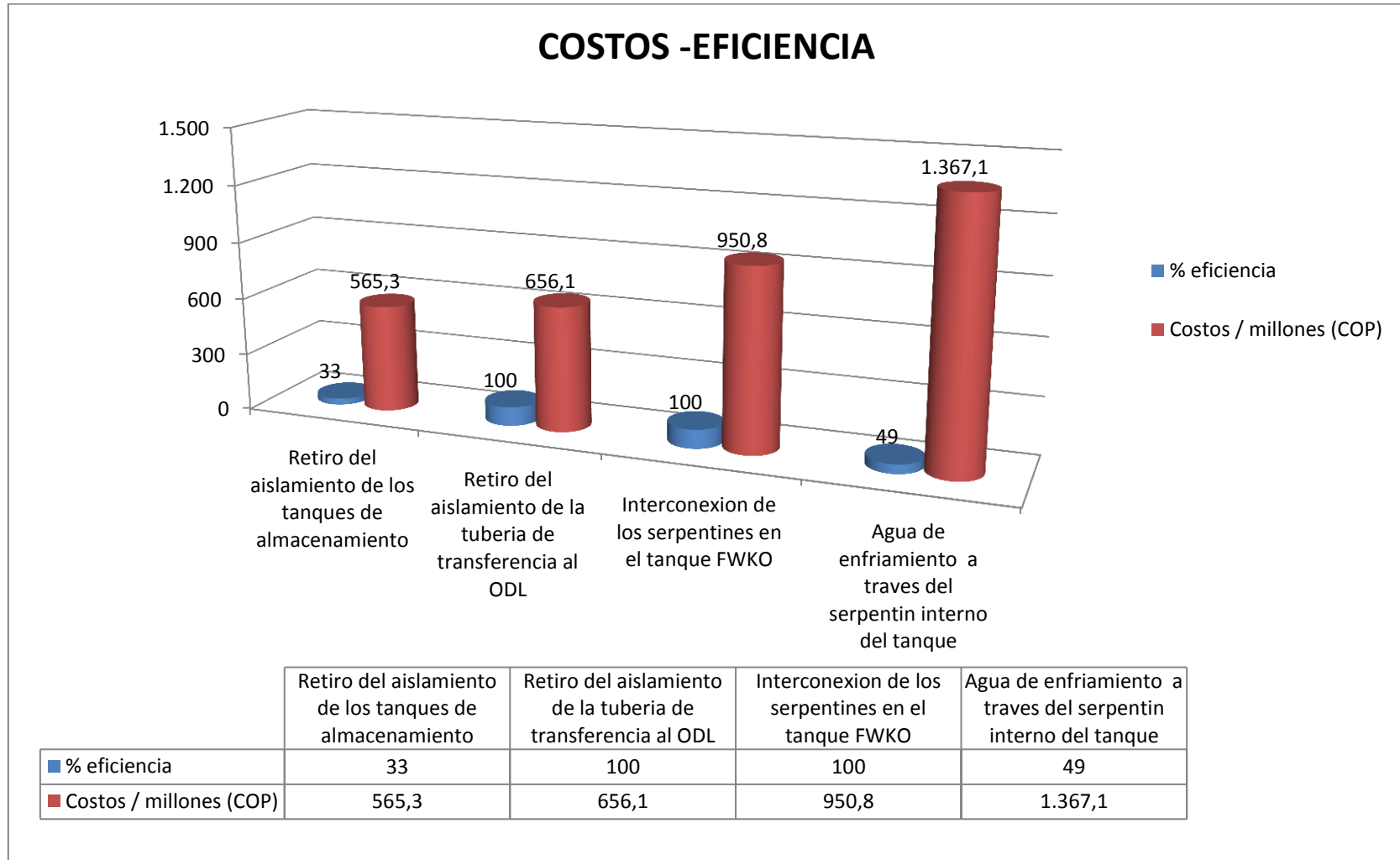
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL ITEM	TOTAL
5	SUMINISTROS					\$1.075.250.000
5.1	Avisos señalización alta temperatura	ml	95	\$ 80.000	\$ 7.600.000	\$ 7.600.000
5.2	Suministro y montaje Tubería 3" SCH 40	ml	450	\$ 280.000	\$ 126.000.000	\$ 126.000.000
5.3	Pintura y suministro y montaje de chaquetas para aislamiento de Tubería 3" y 4" SCH 40	ml	900	\$ 350.000	\$ 315.000.000	\$ 315.000.000
5.4	Suministro y montaje Tubería 4" SCH 40	ml	450	\$ 380.000	\$ 171.000.000	\$ 171.000.000
5.5	Suministro y montaje Válvulas de Cheque 3"	Un	4	\$ 850.000	\$ 3.400.000	\$ 3.400.000
5.6	Suministro y montaje Válvulas de Compuerta 4"	un	6	\$ 920.000	\$ 5.520.000	\$ 5.520.000
5.7	Suministro y montaje Válvulas de Compuerta 3"	un	4	\$ 820.000	\$ 3.280.000	\$ 3.280.000
5.9	Suministro y montaje Válvulas de Cheque 4"	un	40	\$ 1.100.000	\$ 44.000.000	\$ 44.000.000
5.10	Suministro y montaje de accesorios de tubería (empaques, tes, codos, espar ragos, bridas)	Global	1	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000
5.11	Suministro y montaje Tubería 3" SCH 40	ml	200	\$ 650.000	\$ 130.000.000	\$ 130.000.000
5.12	Suministro y montaje Tubería 3" SCH 40 con aislamiento	ml	200	\$ 450.000	\$ 90.000.000	\$ 90.000.000
5.20	Camioneta	un/día	60	\$ 220.000	\$ 13.200.000	\$ 13.200.000
5.21	Camión grúa	un/día	45	\$ 650.000	\$ 29.250.000	\$ 29.250.000
5.23	Ingeniería	un	1	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000	\$ 80.000.000
5.24	Bomba centrífuga (2) gpm @ 50 psig / skip petrolero	un	2	\$ 21.000.000	\$ 42.000.000	\$ 42.000.000
6	PERSONAL					\$ 119.800.000
6.1	Supervisor	Un/mes	2	\$ 4.200.000	\$ 8.400.000	\$ 8.400.000
6.2	Técnicos	Un/mes	4	\$ 2.800.000	\$ 11.200.000	\$ 11.200.000
6.3	Ayudantes	Un/mes	32	\$ 2.400.000	\$ 76.800.000	\$ 76.800.000
6.4	cuadrilla soldador API	Un/mes	2	\$ 5.500.000	\$ 11.000.000	\$ 11.000.000
6.5	Tubero	Un/mes	2	\$ 3.000.000	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000
6.6	Técnico HSE	Un/mes	2	\$ 3.200.000	\$ 6.400.000	\$ 6.400.000
COSTO DIRECTO						\$ 208.440.000
GESTION DE COMPRAS (5%)						\$ 10.422.000
IMPREVISTOS (20%)						\$ 41.688.000
PRECOMMISSIONIG Y COMMISSIONIG (15%)						\$ 31.266.000
COSTO TOTAL \$						1.367.066.000

En la siguiente grafica...Ver grafica 10... se encuentra representado los costos y la eficiencia de cada una de las alternativas estudiadas en el capítulo anterior, como se puede observar: la alternativa de retirar el aislamiento en los tanques de almacenamiento y la de enfriar con agua a través del serpentín interno del tanque de almacenamiento tienen una eficiencia baja de acuerdo a los resultados obtenidos por lo tanto no son viables su implementación ya que no cumplimos el objetivo de disminuir la temperatura deseada en el tiempo que nos permite la operación.

La alternativa de retirar el aislamiento en la línea de transferencia al ODL tiene una eficiencia alta de acuerdo a los resultados obtenidos, pero esta alternativa no es viable su implementación ya que depende de una variable que no podemos controlar la cual es clima, y en caso de una parada el crudo se puede enfriar más de lo requerido por lo tanto no se puede controlar la transferencia de calor, también se tendrían inconvenientes con la parte HSE debido a que una tubería sin su recubrimiento térmico puede afectar la integridad de las personas, la fauna y flora del sitio.

De acuerdo a lo anterior la alternativa que es viable implementar es la de interconectar los serpentines crudo y agua en el tanque FWKO la cual tiene una eficiencia alta porque se cumple con el objetivo de disminuir la temperatura en el tiempo requerido operacionalmente y su costo (COP \$ 950'784.000) es relativamente bajo porque podemos disminuir las pérdidas por diferidas por alta temperatura, tener una pérdida por diferida por altura temperatura de una hora mensual equivale perder a 1875 de Bbls de producción los cuales tienen costo de US \$ 187.500 y si estas pérdidas se hacen acumulativas por mes durante un año podemos estar hablando de US \$ 2'250.000 de pérdidas. Según lo anterior al implementar esta alternativa su costo se recuperaría en menos de un año y además estamos garantizando que el crudo deshidratado que llega a los tanques de almacenamiento cumple con la temperatura requerida para el bombeo.

Grafica 12. Costos - Eficiencia de las alternativas analizadas.



Fuente: Los Autores.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación técnico-económica de las alternativas para el enfriamiento de crudo de venta se concluye:

La alternativa de interconectar los serpentines de crudo y agua en el tanque FWKO se logra disminuir la temperatura del crudo deshidratado de venta en el tiempo requerido por la operación. Realizando esta interconexión estamos aumentando el área de transferencia de calor entre crudo deshidratado que ingresa por los serpentines y el fluido de los pozos que ingresa al tanque FWKO. El crudo deshidratado entra por los serpentines del tanque a una temperatura de 202 °F y se reduce hasta 182.1 °F a la salida, por lo tanto el fluido llegaría a los tanques de almacenamiento con una temperatura adecuada para su despacho, la cual está por debajo de los 185°F que es el valor máximo de temperatura permitido operacionalmente para el bombeo del producto. Además con esta alternativa se lograría disminuir las pérdidas por diferidas por alta temperatura y su costo se recuperaría en menos de un año.

La alternativa de retirar el aislamiento de la tubería de transferencia al ODL alcanza cumplir con el objetivo de disminuir la temperatura del crudo de venta al valor óptimo de entrega, pero no es viable su implementación ya que esta alternativa depende de una variable que no podemos controlar la cual es el clima y en caso de una parada del bombeo el crudo podría enfriarse más de lo requerido causando un taponamiento en la tubería. Además al tener una tubería sin recubrimiento térmico a esa temperatura se presentaría inconvenientes con la parte HSE debido que puede afectar la integridad de las personas, la fauna y flora del sitio.

Las alternativas de retirar el aislamiento de los tanques de almacenamiento y la de utilizar agua de enfriamiento a través del serpentín interno del tanque de almacenamiento, no se obtuvieron resultados satisfactorios de acuerdo a sus evaluaciones técnicas, porque el crudo de venta no se alcanza enfriar a una temperatura óptima para su despacho dentro el tiempo permitido por la operación por lo tanto no es viable su implementación.

BIBLIOGRAFIA

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E. y LIGHTFOOT, Edwin N. Fenómenos de transporte. 1 ed. México: Reverté S.A.

CENGEL, Yunes A. y BOLES, Michael A. Termodinámica. 7 ed. México: McGraw-Hill. 2011.

CENGEL, Yunes. A. Transferencia de calor. 2 ed. México: McGraw-Hill. 2004.

CHAPRA, Steven C. y CANALE, Raymond P. Numerical Methods for Engineers. 5 ed. Singapore: McGraw-Hill. 2006.

COLOMBIA. PACIFIC RUBIALES ENERGY. Manual general de producción.

Gravedad API del crudo quifa [en línea].

<http://www.bnamericas.com/news/petroleoygas/Pacific_Rubiales_descubre_petroleo_en_pozo_Quifa-7 > [Citado 24 de octubre del 2014] .

HOLMAN, J P. Transferencia de Calor. 10 ed. México: CECSA, 1999.

INCROPERA, Frank P. y DE WITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: PEARSON, 1999.

MEJIA HERNANDEZ, Luis Fernando. y GOMEZ MERCADO, Pedro Saúl. Diseño y construcción de un banco de pruebas para determinar el coeficiente de calor por convección forzada, a través del método grafico de Wilson. Trabajo de grado

Ingeniero mecánico. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2011.

Ministerio de minas y energía. Ubicación de campo quifa [en línea].

<<http://www.minminas.gov.co/documents/10180/23400/03->

[HIDROCARBUROS2010-2011.pdf/9d122c7e-5cfc-4368-97c0-5fbebce02f34](http://www.minminas.gov.co/documents/10180/23400/03-HIDROCARBUROS2010-2011.pdf/9d122c7e-5cfc-4368-97c0-5fbebce02f34)>

[Citado 24 de octubre del 2014].

PERRY, Robert H.; DON, Green W. y MALONEY, James O. Manual del ingeniero químico. 6 ed. México: McGraw-Hill.

Portafolio. Producción campo Quifa [en línea].

<<http://www.portafolio.co/negocios/produccion-petroleo-colombia-1>> [Citado 9 de

Agosto del 2013].

Wikipedia. Transferencia de calor [en línea].

<http://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor> [Citado 9 de Agosto del

2013].