

**EVALUACIÓN DEL EFECTO “SKIN” COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR
EL TRANSPORTE DE CRUDOS PESADOS POR OLEODUCTOS.**

**LUIS CARLOS MONTAGUT OJEDA
JHON EDINSON TORRES VEGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**EVALUACIÓN DEL EFECTO “SKIN” COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR
EL TRANSPORTE DE CRUDOS PESADOS POR OLEODUCTOS.**

**LUIS CARLOS MONTAGUT OJEDA
JHON EDINSON TORRES VEGA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título
Ingeniero de Petróleos**

**Director:
MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS
MSc en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Primero a Dios, Jesús Nazareno y a Nuestra Virgen de la Lajita, que me permitieron vivir esta experiencia y me acompañaron día a día.

A mi Mami sin ella su apoyo incondicional en momentos donde parecía desfallecer muchas gracias, mi razón de ser y de vivir, ser mi ejemplo a seguir como profesional y como persona, TE AMO.

A mi Papi la persona que más me admira en la vida, el que me dio esa chispa de alegría que me caracteriza, por haber ayudado a educarme de la mejor manera, de forma de convertirme en lo que soy hoy, TE AMO.

A mi Nono Ramón que desde el cielo me acompañó en gran parte de este recorrido por ser ese abuelo alcahueta y sobre todo por ayudarme a ser un buen elemento para la sociedad.

A Miguelito por quererme como un hijo más, este triunfo también es para él, por el apoyo que me brindó durante este recorrido y por tener fe en este profesional.

A mis familiares, en especial mi Tía Alba, Nana, Oscar “El Cuchito”, Shemas, y demás miembros de esta numerosa familia por estar siempre ahí.

A mis amigos y compañeros de la U, Rafita, Jordi, Petite, Tibu, Barretales, Richard y demás, por estar siempre ahí para estudiar para parciales y también para ir de rumba, gracias por todo muchachos.

A Luis Ojeda y su familia por ser una segunda casa durante mi estadía en Barrancabermeja.

*A la Universidad Industrial de Santander por haberme permitido formar como profesional y como persona, a mis docentes y empleados de esta.
Mil Gracias.*

Luis Carlos Montagut Ojeda

DEDICATORIA

Primero a Dios, gracias a sus bendiciones y que me ha permitido vivir esta experiencia y me acompañaron día a día.

A mi Mami la mujer de mi vida sin ella esto no sería posible mi motor mi todo, en los momentos que creía que no lo iba a lograr ella fue mi apoyo y mi todo TE AMO MUCHO.

A mi Papá la persona mas alegre cariñosa y carismática siempre estuvo en los momentos correctos lo quiero mucho.

A mi abuela Amelia, mi abuelita rosa que me han brindado mucho cariño apoyo consejos y bendiciones que con su amor, paciencia y buenos consejos han hecho esto más posible.

A mis hermanos Erica Torres, Yanina Torres y Mario Torres mis ejemplos grandes profesionales, padres y personas me han apoyado mucho y me han brindado todo su amor y buenos consejos

A mis familiares, mi tía Yamile vega, mi tío Humberto vega y Edwin Araujo que Dios me lo tenga en su santa gloria, por todos sus buenos consejos.

A mis amigos y compañeros de la UIS, Lizeth Hernández, Richard Barrios, Jesús Sabogal, Roni Rocha, Ivan Barrios, Rafa Ospino, Jordi Jaimes, Julián Becerra, Jorge Infante, gracias por tan buenos momentos por las horas que pasamos estudiando y formando una buena amistad.

*A la Universidad Industrial de Santander por haberme permitido formar como profesional y como persona, a mis docentes y empleados de esta.
Mil Gracias.*

Jhon Edinson Torres Vega

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. EFECTO “SKIN”	17
1.1 FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE EFECTOS SKIN.	17
1.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN	19
1.2.1. Mantenimiento de temperatura	20
1.2.2. Aislamiento térmico.....	20
1.2.3. Soportes de tubería y anclajes.....	21
1.2.4. Detección y control de temperatura	21
1.3 COMPONENTES DEL SISTEMA	23
1.3.1. Operación de Control.....	23
1.3.2. Consideraciones de Seguridad.....	25
1.4 OLEODUCTO MANGALA, RAJASTHAN, INDIA.	25
1.4.1 Ventajas Efecto “SKIN”	27
1.4.2 Capacidad del oleoducto.....	28
1.4.3. Cable calentador tracing electric tipo cobre niquelado.....	28
1.5 POLIURETANO	29
1.5.1 Poliuretano rígido.....	30
1.5.2 Propiedades del Poliuretano rígido.	30
1.6 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD	31
1.6.1 Propiedades del polietileno de alta densidad.....	31
2. FENÓMENOS TERMOELÉCTRICOS	33
2.1 EFECTO JOULE	34
2.1.1 Calculo de la energía disipada.....	34
2.2 EFECTO SEEBECK	35
2.2.1 Coeficiente Seebeck	36

2.3 EFECTO PELTIER	37
2.3.1 Coeficiente de Peltier	39
2.4 EFECTO THOMSON	40
2.4.1 Coeficiente efecto Thomson	41
2.5 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.	41
2.5.1 Balance de energía para sistemas cerrados.....	43
2.5.2 Balance de energía para sistemas de flujo estacionario.....	44
2.5.3 Balance de energía en la superficie.....	46
2.5.4 Mecanismos de transferencia de calor	46
2.6 CONDUCCIÓN.	47
2.6.1 Conductividad térmica.....	48
2.6.2 Difusividad térmica.....	52
2.7 CONVECCIÓN.....	53
2.7.1 Convección forzada.	55
2.7.2 Convección con cambio de fase	57
2.7.3 Convección libre o natural.....	57
2.7.4 Transmisión del calor por conducción y convección a través de paredes cilíndricas.....	58
2.7.4.1 Condiciones de primera especie en paredes cilíndricas compuestas.....	60
2.8 RADIACIÓN	61
3. APLICACIÓN DE CONCEPTOS SOBRE EL OLEODUCTO AL PACÍFICO (OAP).....	65
3.1 ASSAY DE CRUDO PESADO EN COLOMBIA	69
3.2 OLEODUCTO AL PACÍFICO (OAP)	70
3.3 CÁLCULOS DE LA APLICACIÓN FINAL	73
3.3.1 Número de estaciones necesarias para calentar el oleoducto.....	74
3.3.2 Temperatura máxima y mínima del oleoducto	74
3.3.3 Tiempo crítico para las estaciones de energía.....	75
3.3.4 Simulación en HYSYS	78
4.CONCLUSIONES	98

5. RECOMENDACIONES.....99
BIBLIOGRAFÍA.....100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Acople cable ferromagnético y tubo conductor	19
Figura 2. Componentes del sistema efecto “SKIN”	23
Figura 3. Vista oleoducto Mangala y gasoducto Rajasthan	27
Figura 4. Ilustracion Efecto Seebeck	36
Figura 5. Ilustración Efecto Thomson	40
Figura 6. Ilustración transferencia de energía a través de un sistema estacionario.....	42
Figura 7. Gasto de masa de un fluido que fluye en un tubo.....	44
Figura 8. Balance de energía para un sistema estacionado en volumen de control.....	45
Figura 9. Rangos de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente.....	50
Figura 10. Los mecanismos de conducción en las diferentes fases de una sustancia.....	52
Figura 11 Transmisión del calor: conducción y convección.....	56
Figura 12. Conducción de un cilindro a una pared simple.....	59
Figura 13. Conducción de un cilindro a una pared múltiple.....	59
Figura 14. Razón a la cual una superficie absorbe la radiación.....	62
Figura 15. Razón neta de transferencia de calor por radiación.....	63
Figura 16. Campos productores más importantes en la cuenca llanos orientales .	66
Figura 17. Perfil topográfico de la ruta OPA	71
Figura 18. Ilustración frontal del aislamiento del oleoducto	73
Figura 19. Tramo de tubería del km 280 al 300	78
Figura 20. Tramo de tubería del km 280 al 300 segunda imagen.....	79
Figura 21. Simulación Hysys.....	80

Figura 22. Grafica de Viscosidad vs Distancia del comportamiento del efecto SKIN	84
Figura 23. Grafica de comportamiento de la viscosidad vs distancia sin la aplicación del efecto SKIN	86
Figura 24. Grafica del comportamiento de la presión vs distancia usando la tecnología del efecto skin.	89
Figura 25. Presión vs distancia del comportamiento sin la tecnología del efecto SKIN.	91
Figura 26. Grafica del perfil de temperatura usando la tecnología skin.	94
Figura 27. Grafica del perfil de temperatura vs distancia en el caso base.	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características del cobre niquelado.....	29
Tabla 2. Comparativa de coeficientes de conductividad térmica de espumas de Poliuretano y otros materiales.....	30
Tabla 3. Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente...49	49
Tabla 4. Producción acumulada y producción promedio.. ..	68
Tabla 5. Propiedades del crudo	69
Tabla 6. Del perfil topográfico de la ruta OPA.....	71
Tabla 7. Viscosidad vs distancia del comportamiento del efecto SKIN.....	83
Tabla 8. Comportamiento de Viscosidad vs Distancia sin la aplicación del efecto SKIN.	85
Tabla 9. Comportamiento de la presión vs distancia con la tecnología del efecto SKIN.	87
Tabla 10. Comportamiento de la presión vs distancia sin la tecnología del efecto SKIN.	89
Tabla 11. Datos del perfil de temperatura vs distancia usando la tecnología skin. 92	92
Tabla 12. Perfil de temperatura vs distancia en el caso base.	94

RESUMEN

TITULO: Evaluación del efecto “SKIN” como alternativa para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos*.

AUTORES: Luis Carlos Montagut Ojeda
Jhon Edinson Torres Vega **

PALABRAS CLAVES: Efecto SKIN, fenómenos de transferencia de calor, fenómenos termo electricos, cálculos operacionales, Crudo Pesado, transporte en oleoductos.

DESCRIPCION: la tecnología efecto skin se caracteriza por un sistema de calentamiento de una tubería con un trazado eléctrico determinado para proporcionarle calor al oleoducto de manera uniforme a lo largo de la línea de tubería aislada. En esta, el tubo de calor está soldado a la tubería de transporte, la baja resistencia térmica de la soldadura proporciona una excelente transferencia de calor al oleoducto. Se presentan 2 tipos de fenómenos al aplicar esta tecnología los cuales son los fenómenos termo eléctricos y los fenómenos termodinámicos; los fenómenos termo eléctricos se basan en la interacción entre un fenómeno eléctrico y otro térmico, en estos se caracterizan cuatro efectos que se relacionan entre si los cuales son El efecto Seebeck, el efecto Peltier, el efecto Thomson y el efecto Joule, los fenómenos termodinámicos se basan, en la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura, El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación.

En este trabajo se analizará el comportamiento de un fluido (crudo pesado) al ser transportado por oleoducto utilizando un sistema de recubrimiento y calentamiento, se determinan los parámetros operacionales que hacen efectivo en la tecnología por medio de información descrita en literatura y análisis basados en cálculos matemáticos y aplicación de un software.

Los análisis de resultados de los cálculos matemáticos y del software observando los comportamientos de la viscosidad, presión y perfiles de temperatura determinaron que la tecnología efecto SKIN cumple con los parámetros óptimos para ser implementada.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos Director Manuel Enrique Cabarcas Simancas

ABSTRACT

TITLE: Evaluation of the “SKIN” effect as an alternative to improve the transport of de heavy crude oil through oil pipelines*.

AUTHORS: Luis Carlos Montagut Ojeda
Jhon Edinson Torres Vega**

KEYWORDS: SKIN effect, heat transfer phenomena, thermoelectric phenomena, operational calculations, heavy crude oil, transportation in oil pipelines.

DESCRIPTION: Skin effect technology is characterized by a heating system of a pipe with a determined electrical layout to provide heat to the pipeline evenly along the isolated pipeline. In this, the heat pipe is welded to the transport pipe, the low heat resistance of the weld provides excellent heat transfer to the pipeline. Two types of phenomena are presented when applying this technology, which are thermoelectric phenomena and thermodynamic phenomena; the thermoelectric phenomena are based on the interaction between an electrical phenomenon and a thermal one, in these four effects are characterized that are related to each other which are the Seebeck effect, the Peltier effect, the Thomson effect and the Joule effect, the thermodynamic phenomena are based, in the form of energy that can be transferred from one system to another as a result of the temperature difference, heat can be transferred in three different modes: conduction, convection and radiation.

In this paper we will analyze the behavior of a fluid (heavy crude) when transported by pipeline using a coating and heating system, determine the operational parameters that make effective in the technology through information described in literature and analysis based on calculations mathematicians and application of software.

The analysis of the results of the mathematical calculations and the software observing the behavior of the viscosity, pressure and temperature profiles determined that the SKIN effect technology meets the optimal parameters to be implemented.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos Director Manuel Enrique Cabarcas Simancas

INTRODUCCIÓN

Los problemas presentes en la operación de transporte por oleoductos de hidrocarburos han generado pérdidas millonarias a lo largo de la historia de esta industria. En esta investigación presentamos una evaluación detallada de una tecnología usada en INDIA y poco conocida en la industria.

La tecnología lleva como nombre efecto “SKIN”, que en español significa efecto “PIEL”, esto hace referencia a que el efecto se aplica sobre la coraza que lleva el fluido en este caso la piel serán los oleoductos que transportan hidrocarburos. Como base principal esta coraza permanecerá caliente y a su vez también habrá transferencia de calor con el fluido que allí se encuentre, este captará la energía dependiendo de la capacidad calorífica del mismo.

Se presentará una revisión bibliográfica sobre el uso de esta tecnología, con el fin de dar a conocer algunos antecedentes, y así empezar a entender un poco más a fondo el uso de esta.

También se encontrará con las correlaciones Termoeléctricas por las cuales funciona la misma, para ello se explicará cada una de estas.

Y para finalizar esta investigación se dará a conocer el concepto de la evaluación al aplicar los conocimientos teóricos en los cuales se basa el efecto “SKIN” aplicado a un oleoducto de crudo pesado en Colombia.

1. EFECTO “SKIN”

El trazado del sistema del efecto “SKIN” es ideal para oleoductos de larga distancia, 25 km (15 millas) por circuito. Cuando se le suministra energía al sistema, se genera calor en la superficie interna de un tubo de calor ferromagnético que a su vez está acoplado térmicamente al tubo portador del fluido. Un conductor eléctricamente aislado y resistente a la temperatura, está dentro del tubo ferromagnético y conectado a una fuente de voltaje AC en una conexión en serie. Este método de calentamiento se denomina calentamiento del efecto “SKIN” o efecto piel en español, por que la trayectoria de retorno de la corriente del circuito y de calor va hacia la superficie interna (1mm aproximadamente) del tubo calor, tanto por la piel como por los efectos de proximidad entre el tubo de calor y el conductor¹.

1.1 FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE EFECTOS SKIN.

El calentamiento del efecto skin es una tecnología de calentamiento eléctrico de circuito serie basada en dos fenómenos bien establecidos en teoría eléctrica: "efecto skin" y "efecto de proximidad".

La densidad de corriente en un conductor que transporta corriente alterna no es uniforme en la sección transversal del conductor, pero es más grande cerca de la superficie, mostrando así un fenómeno conocido como "efecto skin". Por lo tanto, se reduce la sección eficaz del conductor que transporta corriente y, por lo tanto, aumenta su resistencia efectiva.

¹ PENTAIR THERMAL BUILDING, “Raychem SKIN Effect Heat- Tracing System”, [en línea] [Consultado Noviembre 15, 2017] disponible en: <https://www.pentairthermal.co.uk/products/engineered-products/skin-effect>

El efecto skin en un conductor se produce por la fuerza electromotriz autoinducida establecida por las variaciones en el flujo interno en un conductor y tiene un efecto mayor a frecuencias más altas de la fuente de CA.

El calor se genera en la superficie interna de un tubo de calor ferromagnético por la pérdida (I^2R) del flujo de corriente de retorno y por la histéresis y las corrientes parásitas inducidas por el campo magnético alterno alrededor del conductor aislado que está conectado a la tubería. Además, se produce una pequeña cantidad de calor por la pérdida (I^2R) en el conductor aislado.

El cable con aislamiento térmico y aislamiento eléctrico se instala dentro del tubo de calor y se conecta a él en la terminación del extremo. Una fuente de voltaje CA está conectada entre el tubo de calor y el cable aislado. La interacción inductiva entre la corriente en el conductor aislado y la corriente de retorno en el tubo de calor hace que la corriente en el tubo de calor se concentre en la superficie interna del tubo de calor.

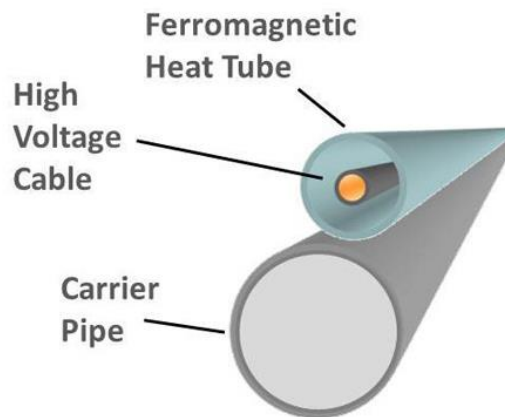
La concentración de corriente en la superficie interna del tubo de calor es tan completa que virtualmente no hay voltaje mensurable en la pared exterior del tubo de calor. No hay corriente que fluya en la superficie exterior del tubo de calor, manteniéndolo seguro y moldeable.

El tubo de calor está conectado a la tubería de proceso, permitiendo que el calor se transfiera a la tubería de proceso. El método de fijación del tubo de calor a la tubería tendrá un impacto en la transferencia de calor.

Los sistemas de calentamiento por efecto skin son inherentemente seguros, sin potencial eléctrico en el exterior de la tubería de soporte o el tubo de calor. El calor útil se transfiere directamente al tubo portador a diferenciales de muy baja temperatura.

Debido a que el tubo de calor se aplica uniformemente al tubo portador, las variaciones de temperatura a lo largo de la línea son mínimas. El elemento de calentamiento es una pieza de tubería y, por lo tanto, es difícil de dañar en el campo. Si el cable conductor se daña, las cajas de arrastre incorporadas en el sistema permiten una fácil extracción y reemplazo del cable.

Figura 1. Acople cable ferromagnético y tubo conductor



Fuente. PENTAIR THERMAL BUILDING, “Raychem SKIN Effect Heat- Tracing System”, [en línea] [Consultado Noviembre 15, 2017] disponible en: <https://www.pentairthermal.co.uk/products/engineered-products/skin-effect>

1.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

El sistema de corriente del efecto “SKIN”, es un sistema de calentamiento de una tubería con un trazado eléctrico determinado para proporcionarle calor al oleoducto de manera uniforme a lo largo de la línea de tubería aislada. El tubo de calor está soldado a la tubería de transporte, la baja resistencia térmica de la soldadura proporciona una excelente transferencia de calor al oleoducto. La temperatura es monitoreada continuamente por un controlador que está ubicado en el cuarto de control.

La temperatura se mantiene constante activando y desactivando el sistema según sea necesario, cuando la temperatura de la tubería cae por debajo de la temperatura establecida, el sistema se enciende y permanece encendido hasta que la temperatura de la tubería vuelve a su valor establecido².

1.2.1. Mantenimiento de temperatura. El objetivo principal del sistema de trazado de calor es compensar la pérdida de calor de la tubería a la atmósfera.

Los circuitos de calentamiento con efecto skin están diseñados para funcionar muy por debajo de su capacidad máxima en el modo de operación normal, lo que extiende la expectativa de vida del sistema en general. Es habitual instalar sistemas de calentamiento de efecto skin con un margen de seguridad de diseño de 25-40%.

1.2.2. Aislamiento térmico. Como en cualquier aplicación de trazado de calor, la calidad y la selección de los sistemas de aislamiento térmico adecuados desempeñan un papel vital en el rendimiento satisfactorio de la tubería con trazado de calor.

A menudo, la opción preferida es un sistema de aislamiento compuesto con una capa interna con material de aislamiento rígido de alta temperatura, como perlita expandida o lana mineral de alta densidad. La capa externa a menudo consistirá en aislamiento de espuma de alta densidad de celda cerrada con altas capacidades de temperatura de exposición.

La cubierta exterior sirve para proteger el material aislante subyacente del entorno externo y para reducir o evitar la entrada de agua en el material aislante. Los materiales comunes de la cubierta exterior son chapa (aluminio o acero

² PERMA-PIPE, INC. "Installation and operation manual for SKIN Effect electrically traced piping systems" [en línea] [Consultado Noviembre 18, 2017] disponible en: http://www.permapipe.com/uploads/products/documents/installationguides/Skin%20Effect%20Current%20Tracing_Installation%20manual.pdf

galvanizado), polietileno de alta densidad (HDPE) o hypalon. Los sistemas de chaqueta HDPE e hypalon utilizan adhesivos y soldaduras de fusión para evitar la entrada de agua.

1.2.3. Soportes de tubería y anclajes. En general, los soportes de tubería y los anclajes de tubería son las principales fuentes de pérdida de calor localizada que afecta negativamente el equilibrio térmico de una tubería calentada. Con aplicaciones de alta temperatura, el diseño y la selección de soportes de tubos, anclajes de tuberías y otros materiales estructurales desempeñan un papel importante para garantizar un funcionamiento sin problemas.

1.2.4. Detección y control de temperatura. El sistema de control de potencia de un sistema de calentamiento con efecto skin requiere un control de temperatura en bucle cerrado donde la temperatura del tubo portador se monitorea continuamente y se compara con la temperatura del punto de ajuste de referencia. A medida que la tubería se enfría por debajo del punto de ajuste, el sistema de trazado eléctrico se energiza y se reemplaza la energía térmica.

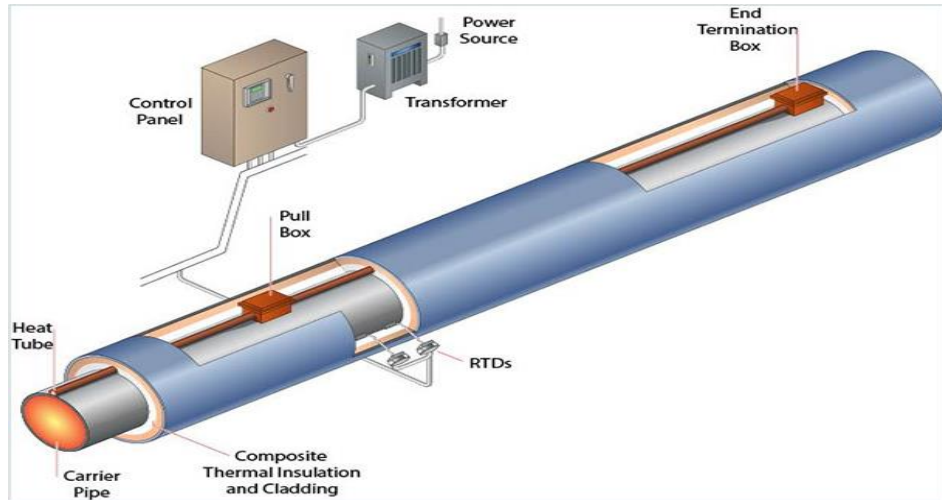
La aplicación de potencia al circuito de calefacción se realiza por medio de un contactor o interruptor de circuito. La instalación típica incluirá un interruptor de circuito de media tensión primario (o un interruptor de aislamiento fusionado, según corresponda), un transformador y un contactor secundario separado que se utilizará para el control real de encendido de la potencia del calentador

El controlador secundario normalmente será un contactor de vacío fusionado. El contactor es controlado por una entrada del sistema de control de temperatura. Los modos de control típicos son:

- **Modo de mantenimiento automático:** en este caso, el promedio de las temperaturas del sensor se usa para activar o desactivar el seguimiento para mantener una temperatura preestablecida de la tubería.
- **Modo de encendido / apagado manual:** se usa una entrada remota para activar o desactivar el rastreo manualmente. Este modo solo debe usarse junto con el modo de límite alto.
- **Modo de límite alto:** la configuración de alarma de alta temperatura se usa para desactivar el seguimiento en caso de que los sensores de temperatura detecten altas temperaturas. Este modo se proporciona principalmente para proteger contra el daño al calentador de efecto skin que resulta de temperaturas excesivamente altas.
- **Modo de recalentamiento:** la configuración máxima de potencia de salida se utiliza para suministrar la máxima cantidad de calor posible del sistema de calefacción en caso de que se desee la restitución iniciada por el operador. Además del sistema de control convencional utilizado en el pasado, este artículo aboga por la implementación de tecnología de fibra óptica tecnológicamente avanzada para monitorear y controlar las tuberías de crudo.

1.3 COMPONENTES DEL SISTEMA

Figura 2. Componentes del sistema efecto “SKIN”



Fuente. PENTAIR THERMAL BUILDING, “Raychem SKIN Effect Heat- Tracing System”.

Las cajas de empalme se ubican a lo largo de la línea en los principales cambios de dirección, así como en los intervalos en los que sea necesario con el fin de facilitar la instalación y mantenimiento del cable de corriente del efecto “SKIN”.

El panel de control alberga todos los dispositivos de energía eléctrica y controladores. Dependiendo del tamaño del transformador de potencia, es el tamaño del panel de control o del cuarto de control.

El sistema de corriente de efecto “SKIN” es físicamente similar a un solo conductor de acero rígido. Mientras la corriente fluye dentro del tubo ferromagnético, la superficie del tubo no tiene corriente. Sin corriente superficial no hay voltaje por lo que el tubo de calor está en potencial de tierra, para seguridad de los operadores.

1.3.1. Operación de Control. Los controles eléctricos para su sistema de seguimiento de corriente de efecto skin están diseñados para proporcionar el control deseado del sistema de calefacción y para proporcionar indicaciones funcionales.

Los controles están alojados en un recinto industrial resistente diseñado para la clasificación del área en la que se ubicarán. Los dibujos del sistema dan la clasificación NEMA del gabinete de control.

El sistema de seguimiento de la corriente del efecto skin se proporciona con modos de control automático y manual. El modo manual está destinado a utilizarse solo durante el inicio, las comprobaciones de mantenimiento y la solución de problemas del sistema eléctrico. Cuando se usa el modo de control manual, se debe tener cuidado de monitorear continuamente la operación del sistema.

En el modo manual, el controlador de temperatura se pasa por alto y el sistema continuará calentándose mientras se mantenga el modo manual. El indicador de temperatura y las alarmas están activos en el modo manual.

El modo automático proporciona control e indicación de temperatura en bucle cerrado. El sensor de temperatura de la tubería proporciona una señal continua al controlador de temperatura que indica. El controlador de temperatura compara esta señal con la señal de referencia (temperatura de punto de ajuste). Cuando la temperatura de la tubería está por encima del punto establecido, el sistema estará "apagado". Cuando la temperatura de la tubería está por debajo del punto establecido, el sistema estará "encendido".

El controlador de temperatura tiene contactos de alarma de baja temperatura y alta temperatura.

La protección contra sobrecorriente detecta una corriente por encima de la corriente de arranque en frío. Si la corriente del sistema de seguimiento de la corriente del efecto de la piel se eleva al valor establecido, el sistema se apagará y se requiere reiniciar el sistema para reiniciar.

La protección de corriente diferencial detecta la diferencia en la corriente de dos secciones. Si la corriente en una sección se eleva o cae por debajo de la otra sección, se producirá la anunciación y el apagado del sistema. Después de encontrar y reparar la causa del apagado, reinicie manualmente para "encender" la calefacción del sistema.

1.3.2. Consideraciones de Seguridad. Su sistema de seguimiento de corriente de efecto skin es físicamente similar a un solo conductor en un conducto de acero rígido. Mientras la corriente fluye dentro del tubo de calor, la superficie del tubo no tiene corriente. Sin corriente superficial, no hay voltaje y el tubo de calor está esencialmente en potencial de tierra. El sistema de tuberías puede estar conectado a tierra en cualquier punto de su longitud.

El sistema de tuberías normalmente funciona a una temperatura elevada. El aislamiento térmico debe mantenerse en su lugar para proteger al personal contra el contacto con superficies calientes.

Solo personal calificado debe operar y dar servicio a los controles eléctricos. El sistema de control está provisto de un medio de desconexión de seguridad. Esto debe bloquearse (abrirse) durante el mantenimiento de la línea y / o del sistema.

1.4 OLEODUCTO MANGALA, RAJASTHAN, INDIA.

CAIRN INDIA, construyó el oleoducto con aislamiento térmico más grande del mundo. 700 km de tubería para llevar el crudo del campo Mangala en Rajasthan. La ruta va desde la fuente de producción en Mangala hasta la costa de Gujarat, abarca 8 distritos y más de 250 aldeas. Además, tiene 4 ramificaciones que varían desde los 2.5 km hasta los 21 km que sirven para entregar crudo a clientes durante la ruta.

La necesidad de sacar el crudo de Rajasthan que es de naturaleza pesada, y necesita mantenerse a más de 65 °C para garantizar su flujo dio como resultado esta nueva tecnología de efecto "SKIN". La tubería se encuentra aislada con espuma de Poliuretano de 9 mm (PUR), para evitar la pérdida de calor con el entorno además incluye también una chaqueta de Polietileno de alta densidad de 5 mm (HDPE), para protegerlo del sol y del agua y evitar una mayor corrosión superficial.

Este oleoducto cuenta con estaciones generadoras de potencia de alrededor 1 Mega Vattios (MW) instaladas cada 20 km, un total de 36 estaciones fueron instaladas a lo largo del oleoducto que en este caso es de 24" de diámetro.

Se utiliza el gas producido como combustible de los motores que producen la energía para la calefacción de la tubería, se transporta en una tubería de 8" de diámetro paralelo a la tubería principal de 24".

Figura 3. Vista oleoducto Mangala y gasoducto Rajasthan



Fuente. CAIRN INDIA LIMITED, "SKIN Effect Heat Management System".

La principal fuente de gas proviene del campo Raageshwari de Cairn en Rajasthan³.

1.4.1 Ventajas Efecto "SKIN" El sistema de gestión de calor del efecto "SKIN" se eligió como una solución adecuada debido a lo siguiente:

- **Largos recorridos:** Skin Effect se puede utilizar para recorridos de tubería de hasta 15 millas (25 km) de longitud.
- **Tensión de alimentación única:** el efecto skin solo requiere la terminación de la tensión en un extremo del sistema de calefacción, lo que simplifica el tiempo de instalación.
- **Costo de instalación bajo:** el sistema de efecto skin se instala junto con los sistemas de tuberías y el aislamiento, sin interferencias.
- **Bajos costos de operación:** la conexión directa del tubo y la tubería proporciona una transferencia de calor eficiente al proceso.

³ CAIRN INDIA LIMITED, "SKIN Effect Heat Management System", [en línea] disponible en: [Consultado Noviembre 29, 2017] <https://www.cairnindia.com/sites/default/files/technical-brochure/Technical-Brochure-SEHMS.pdf>

- **Bajos costos de mantenimiento:** sin partes móviles significa un mantenimiento anual mínimo requerido para un sistema totalmente operativo. Cualquier reemplazo se puede hacer sin perturbar el aislamiento.
- **Operación 'invisible':** el efecto skin no interfiere con los sistemas de protección catódica. No hay voltaje residual presente en la superficie del tubo.
- **Certificación de terceros:** los sistemas pueden certificarse para uso ordinario o de áreas peligrosas.
- **Control eficaz de la calefacción:** los sistemas se pueden proporcionar para usos múltiples, calentar para situaciones de puesta en marcha o temperatura de mantenimiento para la fase de operación.

1.4.2 Capacidad del oleoducto La tubería de 24” de acero tiene una capacidad de operación de 175.000 BOPD, capacidad con la cual se hizo el plan de desarrollo del campo Mangala de propiedad de CAIRN INDIA LIMITED. Este oleoducto es operado por CAIRN INDIA LIMITED con un 70% de participación en el proyecto, el 30% restante es propiedad de OIL AND NATURAL GAS CORPORATION (ONGC).

El oleoducto se construyó en dos fases, la primera fase de 367 millas (590 km) en 2010 y la construcción de la sección restante 49 millas (78,8 km) se hizo en el tercer trimestre del año 2012⁴.

1.4.3. Cable calentador tracing electric tipo cobre niquelado El cable usado para calentar el sistema esta compuesto por una aleación de cobre niquelado tipo ELSR-N resistente a productos químicos, aceites y combustibles.

⁴ HYDROCARBONS TECHNOLOGY, “Mangala development pipeline project India”. [en línea] Consultado Noviembre 29, 2017] disponible en: <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/mangala-development-pipeline-india-crude-oil> [

Tabla 1. Características del cobre niquelado.

Cubierta exterior	TPE-O (Polimero)
Hilo	Cobre Niquelado
Temperatura máxima	80 °C
Temperatura mínima	65 °C
Radio de curvatura	25 mm

Fuente: EL THERM El therm traceado eléctrico en zonas peligrosas [en línea] disponible en:
<https://eltherm.com/site/assets/files/1244/eltherm-traceado-electrico-en-zonas-peligrosas.pdf>

Aplicaciones:

- Protección contra heladas
- Trazado eléctrico en indicadores de nivel
- Industria química
- Industrial Petrolera
- Calentamiento de la base de depósitos de GNL

1.5 POLIURETANO

El poliuretano (PU, también denominado PUR) es un polímero que se obtiene mediante condensación de bases hidroxílicas combinadas con diisocianatos (en general se utiliza TDI o MDI). Los poliuretanos se clasifican en dos grupos, definidos por su estructura química, diferenciados por su comportamiento frente a la temperatura. De esta manera pueden ser de dos tipos: Poliuretanos termoestables o poliuretanos termoplásticos (según si degradan antes de fluir o si fluyen antes de degradarse, respectivamente). Los poliuretanos termoestables más habituales son espumas, muy utilizadas como aislantes térmicos y como espumas resilientes⁵.

⁵ HEPBURN, C. Polyurethane Elastomers. Elsevier 1992

1.5.1 Poliuretano rígido Los poliuretanos rígidos de densidad 30-60 kg/m³, son muy utilizados como aislantes térmicos. Sus principales aplicaciones son la aislación térmica de heladeras, freezers, cámaras frigoríficas y chapas para galpones y techos industriales (espuma moldeada dentro de una matriz). También se utilizan como aislación térmica proyectada, para galpones industriales, etc. La capacidad de aislamiento térmico del poliuretano se debe al gas aprisionado en las celdillas cerradas del entramado del polímero.

1.5.2 Propiedades del Poliuretano rígido. La espuma rígida de Poliuretano está constituida por materiales orgánicos y, por tanto, consta como un material de construcción inflamable. No obstante, con diversas formulaciones de las materias primas pueden cumplirse todas las exigencias técnicas en la protección contra incendios, que pueden ser muy diversas, en función del campo de aplicación, su uso final y las regulaciones de cada país.

- Elevado poder aislante a pesar de utilizar espesores reducidos.
- Aplicación posible en un elevado margen de temperaturas.
- Peso reducido.
- Transformación simple y económica.
- Propiedades mecánicas elevadas.
- Óptima resistencia al envejecimiento.
- Estabilidad química y biológica.
- Ausencia de goteo en caso de incendio.

Tabla 2. Comparativa de coeficientes de conductividad térmica de espumas de Poliuretano y otros materiales.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m·K)
Chapa de Aluminio	2.700	2,04
Hormigón	2.400	1,63
Vidrio plano	2.500	0,81

Material	Densidad (kg/m³)	Conductividad térmica (W/m·K)
Ladrillo macizo	1.600	0,81
Tejas (plana)	1.800	0,76
Yeso (placas)	1.000	0,44
Hormigón liviano	1.000	0,36
Madera (pino)	700	0,17
Lana de vidrio	70	0,031
Lana de vidrio	100	0,032
Poliuretano rígido	35	0,020
Poliuretano proyectado	30	0,024

Fuente: Norma IRAM 11601. (Argentina)

1.6 POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

El polietileno de alta densidad es un polímero de la familia de los polímeros olefínicos (polipropileno), o de los polietilenos. Su fórmula es $(-CH_2-CH_2-)_n$. Es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Se designa como HDPE (por sus siglas en inglés, High Density Polyethylene) o PEAD (polietileno de alta densidad).

El polietileno de alta densidad se puede copolimerizar con propileno. Algunas de sus aplicaciones son: Bolsas plásticas. Envases de alimentos, detergentes, y otros productos químicos.

1.6.1 Propiedades del polietileno de alta densidad

- Mayor rigidez que el de baja densidad.
- Mayor dureza.
- Muy resistente a agentes químicos.
- Produce barreras al vapor de agua.

- Excelente resistencia térmica y química.
- Muy buena resistencia al impacto.
- Es flexible, aún a bajas temperaturas.
- Es más rígido que el polietileno de baja densidad.
- Su densidad se encuentra en el entorno de 0.940 – 0.970 g/cm³.

2. FENÓMENOS TERMOELÉCTRICOS

Se denomina fenómenos termoeléctricos principalmente a los fenómenos relacionados entre sí por las relaciones de Thomson, descubiertas por Kelvin. El efecto Seebeck, el efecto Peltier, el efecto Thomson y el efecto Joule⁶.

La interacción entre un fenómeno eléctrico y térmico se conoce desde el siglo XIX, cuando Joule observó que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada se disipa en forma de calor.

El efecto Peltier fue descubierto en 1834 por el físico francés Peltier J. C. A. surgió sobre la base del descubrimiento del físico alemán Seebeck T.J. en 1821, quien observó que, en un circuito formado por dos conductores distintos, cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con temperaturas distintas, aparece entre ambos una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial es función de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperaturas. Este dispositivo se conoce como termopar.

El efecto Thomson, descubierto en 1857 por Thompson W., consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico, con un gradiente de temperaturas, por el cual circula una corriente eléctrica.

Ya en 1885 el físico inglés Rayleigh J.W. planteó la posibilidad del uso de dispositivos termoeléctricos como generadores de corriente eléctrica. Sin embargo, pese a que los fenómenos termoeléctricos son bien conocidos desde hace ya más

⁶ NYE J.F., Physical properties of crystals, Oxford University Press, 1957, P. 216-218

de cien años, su desarrollo, tanto como generador de corriente o como refrigeración, estuvo totalmente frenado debido a los escasos rendimientos que se obtenían⁷.

2.1 EFECTO JOULE

La más conocida interacción entre un fenómeno eléctrico, la conducción de corriente eléctrica, y su fenómeno térmico asociado, el calentamiento del conductor por el que circula la corriente, es este efecto. Es un fenómeno irreversible por el cual un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor. El movimiento de los electrones en un cable es desordenado, esto provoca continuas colisiones entre los núcleos atómicos y como consecuencia un aumento de temperatura del propio cable⁸.

2.1.1 Calculo de la energía disipada. La energía disipada en un conductor atravesado por una corriente eléctrica se calcula de la siguiente manera:

$$P = V * I \quad E = P * t$$

Reemplazando:

$$E = V * I * t$$

La potencia **P** disipada en un conductor es igual a la diferencia de potencial **V** a la que esta sometido multiplicado por la corriente que lo atraviesa **I**. La energía desarrollada **E** es el producto de la potencia **P** y el tiempo transcurrido, luego la energía **E** es el producto de la tensión **V** por la intensidad **I** y por el tiempo **t**.

⁷ SANTAMARÍA, German "Electrotecnia". EDITEX, S.A. 2009

⁸ FOUILLE, André "Compendio de Electrotecnia". MARCOMBO, S.A 1979

Si a esta expresión añadimos la Ley de Ohm:

$$E = V * I * t \quad I = \frac{V}{R}$$

Reemplazando:

$$E = I^2 * R * t \quad \text{es equivalente} \quad E = \frac{V^2}{R} * t$$

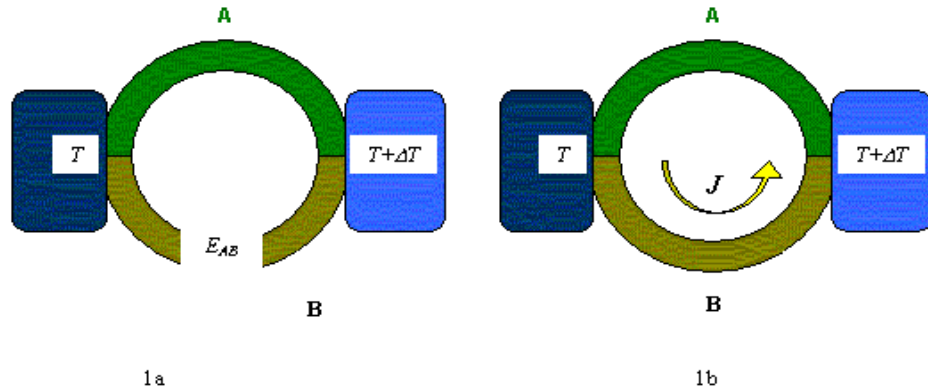
2.2 EFECTO SEEBECK

El efecto Seebeck es la conversión de diferencias de temperatura en electricidad. Thomas Johann Seebeck descubrió que la aguja de una brújula se desviaba cuando se formaba un circuito cerrado de dos metales unidos en dos lugares con una diferencia de temperatura entre las uniones. Esto se debe a que los metales responden diferentemente a la diferencia de temperatura, creando una corriente de circuito, que produce un campo magnético. Seebeck, aun así, en ese momento no reconoció allí una corriente eléctrica implicada, así que llamó al fenómeno el efecto termomagnético, pensando que los dos metales quedaban magnéticamente polarizados por el gradiente de temperatura. El físico Danés Hans Christian Oersted jugó un papel vital en la explicación y concepción del término “termoelectricidad”.

El efecto es que un voltaje, la FEM termoeléctrica, se crea en presencia de una diferencia de temperatura entre dos metales o semiconductores diferentes. Esto ocasiona una corriente continua en los conductores si ellos forman un circuito completo. El voltaje creado es del orden de varios micro-voltios por kelvin de

diferencia. Una de esas combinaciones, cobre-constatan, tiene un coeficiente Seebeck de 41 micro-voltios por kelvin a temperatura ambiente⁹.

Figura 4. Ilustracion Efecto Seebeck



Fuente: UNIVERSIDAD DE NAVARRA, Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica. “Efecto Seebeck”

2.2.1 Coeficiente Seebeck Una diferencia de temperatura dT entre las uniones de dos materiales distintos a y b implica una diferencia de potencial eléctrico dV , según la ecuación:

$$S_{AB} = \frac{dV}{dT}$$

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T))dt$$

S_A y S_B son los coeficientes Seebeck también llamados potencia termoeléctrica o termo-potencia de los metales A y B en función de la temperatura, T_1 y T_2 son las temperaturas de las dos uniones. Los coeficientes Seebeck no son lineales en función de la temperatura, y dependen de la temperatura absoluta, material y

⁹ DOMENICALI C. A., Stationary temperature distribution in an electrically heated conductor, Journal of Applied Physics, Vol. 25 1954. P 1310

estructura molecular de los conductores. Si los coeficientes Seebeck son efectivamente constantes para el rango de temperatura medido, la fórmula anterior puede aproximarse a

$$V = (S_B - S_A) * (T_2 - T_1)$$

El efecto Seebeck se usa comúnmente en dispositivos llamados termopar (porque está hecho de un acople o unión de materiales, generalmente metales) para medir una diferencia de temperatura directamente o para medir una temperatura absoluta colocando un extremo a una temperatura conocida. Una sonda metálica mantenida a una temperatura constante en contacto con un segundo metal de composición desconocida puede clasificarse por este efecto TE. Instrumentos de control de calidad industriales usan este efecto Seebeck para identificar aleaciones metálicas. Esto se conoce como clasificación Termoeléctrica de aleación.

Varios termopares cuando se conectan en serie son llamados termopila, la cual se construye a veces para aumentar el voltaje de salida ya que el voltaje inducido sobre cada acople es bajo. Este es también el principio de trabajo detrás de los diodos térmicos y generadores termoeléctricos (tales como los generadores termoeléctricos de radioisótopos o GTR) los cuales se usan para crear potencia a partir de la diferencia de calor.

El coeficiente de Seebeck, también conocido como “Poder Termoeléctrico”, se mide en $V.K^{-1}$.

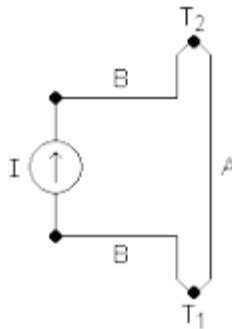
2.3 EFECTO PELTIER

El efecto Peltier es una propiedad termoeléctrica descubierta en 1834 por Jean Peltier, trece años después del descubrimiento del mismo fenómeno, de forma

independiente, por Thomas Johann Seebeck. El efecto Peltier hace referencia a la creación de una diferencia de temperatura debida a un voltaje eléctrico. Sucede cuando una corriente se hace pasar por dos metales o semiconductores conectados por dos “junturas de Peltier”. La corriente propicia una transferencia de calor de una juntura a la otra: una se enfría en tanto que otra se calienta.

Una manera para entender cómo es que este efecto enfría una juntura es notar que cuando los electrones fluyen de una región de alta densidad a una de baja densidad, se expanden (de la manera en que lo hace un gas ideal) y se enfría la región.

Lo que lo hace aún más interesantes es el hecho de que, al invertir la polaridad de alimentación, se invierta también su funcionamiento; es decir: la superficie que antes generaba frío empieza a generar calor, y la que generaba calor empieza a generar frío¹⁰.



Fuente: pl.wikipedia.org/wiki/Efek_tPeltiera.

Cuando una corriente se hace pasar por el circuito, el calor se genera en la juntura superior (T_2) y es absorbido en la juntura inferior (T_1). A y B indican los materiales.

Este efecto realiza la acción inversa al efecto Seebeck. Consiste en la creación de una diferencia térmica a partir de una diferencia de potencial eléctrico. Ocurre

¹⁰ BESANÇON, Robert M. The Encyclopedia of Physics. Van Nostrand Reinhold Company. 1985

cuando una corriente pasa a través de dos metales diferentes o semiconductores (tipo-n y tipo-p) que están conectados entre sí en dos soldaduras (uniones Peltier). La corriente produce una transferencia de calor desde una unión, que se enfría, hasta la otra, que se calienta. El efecto es utilizado para la refrigeración termoeléctrica.

Este efecto lleva el nombre de Jean-Charles Peltier (físico francés) quien lo descubrió en 1834, el efecto calórico de una corriente en la unión de dos metales diferentes. Cuando una corriente I se hace fluir a través del circuito, se produce calor en la unión superior (at T_2), y absorbido por la unión inferior (at T_1). Como se muestra en la ecuación el calor Peltier absorbido por la unión inferior por unidad de tiempo, Q es igual a

$$Q = \pi_{AB}I = (\pi_B - \pi_A)I$$

2.3.1 Coeficiente de Peltier El calor de Peltier absorbido por la unión inferior por unidad de tiempo, Q es igual a:

$$Q = (II_B - II_A) * I$$

Donde:

II es el coeficiente Peltier II_{AB} de todo el termopar, y II_A y II_B son los coeficientes de cada material. El silicio tipo-P normalmente tiene un coeficiente Peltier positivo (pero no mayor $\sim 550K$), y silicio tipo-n es normalmente negativo como sugiere su nombre.

Los coeficientes Peltier representan cuanta corriente de calor se lleva por unidad de carga a través de un material dado.

2.4 EFECTO THOMSON

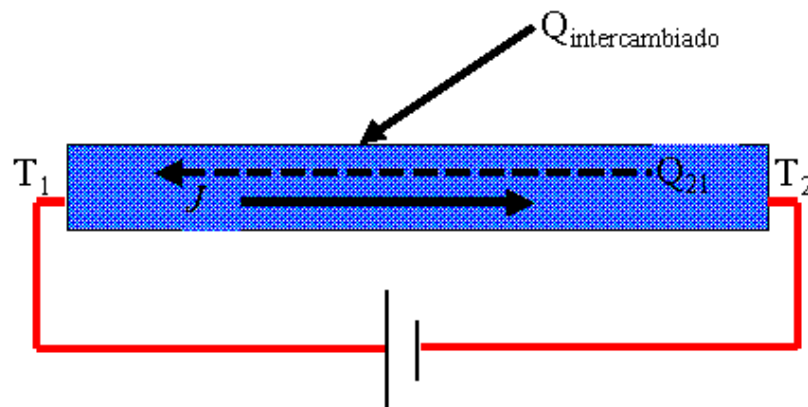
Describe el calentamiento o enfriamiento de un conductor portador de corriente con un gradiente de temperatura.

Algún conductor portador de corriente (excepto para superconductor), con una diferencia de temperatura en dos puntos, o bien absorberá o emitirá calor, según el material.

En metales como zinc y cobre, que tienen un extremo caliente a mayor potencial y un extremo frío a menor potencial, cuando la corriente se mueve de un extremo caliente al extremo frío, se mueve de un alto a un bajo potencial, hay una producción de calor. Que se llama efecto Thomson positivo.

En metales como cobalto, níquel y hierro, que tienen un extremo frío a mayor potencial y un extremo caliente a menor potencial, cuando la corriente se mueve de un bajo a un alto potencial, hay una absorción de calor. Que se llama efecto Thomson negativo.

Figura 5. Ilustración Efecto Thomson



Fuente: UNIVERSIDAD DE NAVARRA, Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica. "Efecto Thomson"

2.4.1 Coeficiente efecto Thomson El coeficiente Thomson es único entre los tres coeficientes principales termoeléctricos pues es el único coeficiente termoeléctrico directamente medible para materiales individuales.

Thomson halló las dos relaciones, ahora llamadas relaciones de Thomson o Kelvin, entre los coeficientes correspondientes. La temperatura absoluta T , el coeficiente II de Peltier y el coeficiente Seebeck S se relacionan por la primera relación de Thomson¹¹.

$$II = S * T$$

predijo el efecto Thomson antes de que fuera realmente formalizado. Estos se relacionan al coeficiente Thomson μ por la segunda relación de Thomson.

$$\mu = T \frac{dS}{dT}$$

2.5 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

La primera ley de la termodinámica, también conocida como principio de conservación de la energía, expresa que, en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; sólo puede cambiar las formas. Por lo tanto, toda pequeña cantidad de energía debe tomarse en cuenta en el curso de un proceso. El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso. Es decir,

¹¹ ROWE, D. M. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Taylor & Francis. 2006

$$\left(\text{Energía total que entra en el sistema} \right) - \left(\text{Energía total que sale del sistema} \right) = \left(\text{Cambio en la energía total del sistema} \right)$$

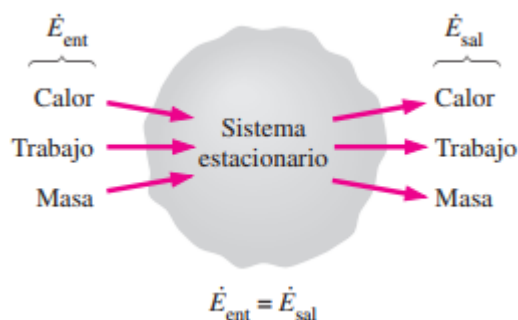
Dado que la energía se puede transferir hacia un sistema, o hacia afuera de éste, por medio de calor, trabajo y flujo de masa, y que la energía total de un sistema simple compresible consta de las energías interna, cinética y potencial, el balance de energía para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como,

$$\underbrace{E_{ent} - E_{sal}}_{\text{Transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa.}} = \underbrace{\Delta E_{sistema}}_{\text{Cambio en la energía interna, cinética potencial etc.}}$$

Transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa. Cambio en la energía interna, cinética potencial etc.

La energía es una propiedad y el valor de una propiedad no cambia a menos que cambie el estado del sistema. Por lo tanto, el cambio en la energía de un sistema es cero ($\Delta E_{sistema} = 0$) si el estado de ese sistema no cambia durante el proceso, entonces el proceso es estacionario. En este caso, el balance de energía se reduce a.

Figura 6. Ilustración transferencia de energía a través de un sistema estacionario



Fuente: YUNUS A. CENGEL, *tercera edición, McGraw Hill*, transferencia de calor y masa, capítulo 1.

$$\underbrace{E_{ent}} = \underbrace{E_{sal}}$$

Razón de transferencia neta de energía hacia a dentro por calor trabajo y masa.

Razón de transferencia neta de energía hacia afuera por calor trabajo y masa.

En ausencia de efectos significativos eléctricos, magnéticos, de movimiento, gravitatorios y de tensión superficial (es decir, para sistemas compresibles simples estacionarios), el cambio en la energía total de un sistema durante un proceso es sencillamente el cambio en su energía interna; es decir, $\Delta E(\text{sistema}) = \Delta U(\text{sistema})$. En esos casos resulta conveniente escribir un balance de calor y tratar la conversión de las energías nuclear, química, mecánica y eléctrica hacia energía térmica como generación de calor.

$$\underbrace{Q_{ent} - Q_{sal}} + \underbrace{E_{gen}} = \underbrace{\Delta E_{termica, sistema}}$$

Transferencia neta de calor

Generación de calor

Cambio en la energía térmica del sistema.

2.5.1 Balance de energía para sistemas cerrados. Un sistema cerrado consta de una masa fija. La energía total E para la mayor parte de los sistemas que se encuentran en la práctica consiste en la energía interna U . Éste es en especial el caso para los sistemas estacionarios, ya que no comprenden cambios en la velocidad o elevación durante el proceso.

Sistema cerrado estacionario: $E_{ent} - E_{sal} = \Delta U = cm_v \Delta T$

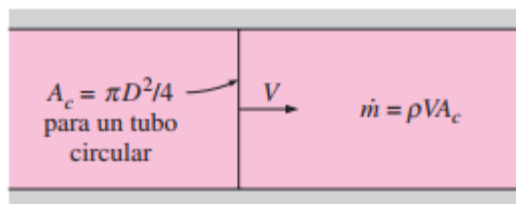
Cuando el sistema sólo comprende transferencia de calor y ninguna interacción de trabajo cruza su frontera, la relación del balance de energía se reduce todavía más.

Sistema cerrado estacionario, sin trabajo: $Q = cm_v \Delta T$

donde Q es la cantidad neta de la transferencia de calor que entra o sale del sistema.

2.5.2 Balance de energía para sistemas de flujo estacionario. El término estacionario significa ningún cambio con el tiempo en una ubicación específica. Lo opuesto a estacionario es no estacionario o transitorio. Asimismo, el término uniforme implica ningún cambio con la posición en toda una superficie o región en un tiempo específico. El contenido total de energía de un volumen de control durante un proceso de flujo estacionario permanece constante ($E_{vc} = constante$). Es decir, el cambio en la energía total del volumen de control durante un proceso de este tipo es cero ($\Delta E_{vc} = 0$). Por tanto, la cantidad de energía que entra en un volumen de control en todas las formas (calor, trabajo, transferencia de masa) para un proceso de flujo estacionario debe ser igual a la cantidad de energía que sale de él. La cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal de un aparato de flujo, por unidad de tiempo, se llama gasto de masa y se denota por \dot{m} . Un fluido puede fluir hacia adentro o hacia afuera de un volumen de control a través de tubos o ductos. El gasto de masa de un fluido que fluye en un tubo o ducto es proporcional al área de la sección transversal A_c de ese tubo o ducto, la densidad ρ y la velocidad del fluido.

Figura 7. Gasto de masa de un fluido que fluye en un tubo.



Fuente: YUNUS A. CENGEL, segunda edición, McGraw Hill, transferencia de calor y masa, capítulo 1.

$$\dot{m} = \rho V A_c \quad \left(\frac{kg}{s}\right)$$

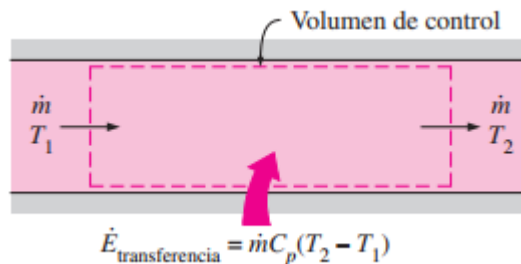
en donde ρ es la densidad del fluido $^{\circ}V$, es la velocidad promedio del mismo en la dirección del flujo y A_c es el área de la sección transversal del tubo o ducto. El volumen de un fluido que fluye por un tubo o ducto por unidad de tiempo se llama gasto volumétrico \dot{V} y se expresa como;

$$\dot{V} = \rho V A_c = \dot{m} / \rho \quad (m^3/s)$$

Para un sistema de flujo estacionario con una entrada y una salida, la velocidad del flujo de masa hacia adentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad del flujo de masa hacia afuera de él; es decir, $\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal} = \dot{m}$. Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son despreciables, que es el caso más común, y no se tiene interacción de trabajo, el balance de energía para tal sistema de flujo estacionario se reduce a

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta h = \dot{m} c_p \Delta T \quad \left(\frac{kJ}{s}\right)$$

Figura 8. Balance de energía para un sistema estacionado en volumen de control.



Fuente: YUNUS A. CENGEL, *segunda edición*, McGraw Hill, transferencia de calor y masa, capítulo 1.

en donde \dot{Q} es la velocidad de la transferencia neta de calor hacia adentro o hacia afuera del volumen de control.

2.5.3 Balance de energía en la superficie. Como se mencionó al inicio del capítulo, el calor se transfiere por los mecanismos de conducción, convección y radiación y, a menudo, el calor cambia de vehículos a medida que se transfiere de un medio a otro. Una superficie no contiene volumen ni masa y, por tanto, tampoco energía. Por lo mismo, una superficie se puede concebir como un sistema ficticio cuyo contenido de energía permanece constante durante un proceso (precisamente como un sistema de estado estacionario o de flujo estacionario).

Balance de energía en la superficie: $E_{ent} = E_{sal}$

Esta relación es válida tanto para condiciones estacionarias como transitorias y el balance de energía en la superficie no comprende generación de calor puesto que una superficie no tiene volumen.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$

donde \dot{Q}_1 es la conducción a través de la pared hasta la superficie, \dot{Q}_2 es la convección de calor de la superficie hacia el aire del exterior y \dot{Q}_3 es la radiación neta de la superficie hacia los alrededores.

2.5.4 Mecanismos de transferencia de calor En la sección anterior se definió el calor como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía es la transferencia de calor. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de

calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura. El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación.¹²

2.6 CONDUCCIÓN.

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x = L$ y área A , La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$. Los experimentos han demostrado que la razón de la transferencia de calor, \dot{Q} , a través de la pared se duplica cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de la transferencia de calor; pero se reduce a la mitad cuando se duplica el espesor L de la pared.

$$\text{razon de conduccion del calor } \alpha \frac{(\text{area})(\text{diferencia de temperaturas})}{\text{espesor}}$$

¹² YUNUS A. CENGEL, Transferencia de calor y masa, *Segunda edición, McGraw Hill*, capítulo 1 - página 17.

O bien:

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W)$$

en donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W)$$

Aquí, dT/dx es el gradiente de temperatura, el cual es la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama T-x (la razón de cambio de T con respecto a x), en la ubicación x.

El área A de transferencia de calor siempre es normal (o perpendicular) a la dirección de esa transferencia.

2.6.1 Conductividad térmica. Se ha visto que los diferentes materiales almacenan calor en forma diferente y se ha definido la propiedad de calor específico C_p como una medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica.

La conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante. En la tabla 3 se dan las conductividades térmicas de algunos materiales comunes a la temperatura ambiente.

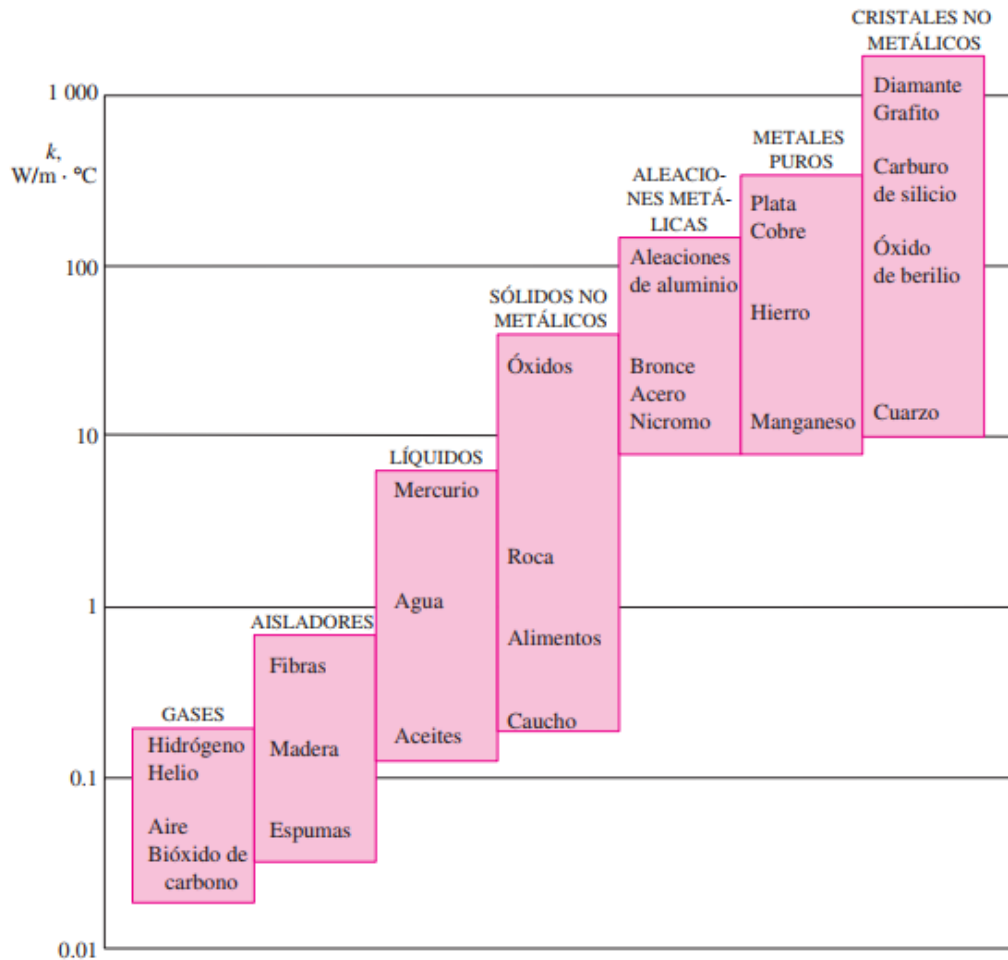
Tabla 3. Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente.

MATERIAL	K, W/M.°C*
DIAMANTE	2300
PLATA	429
COMBRE	401
ORO	317
ALUMINIO	237
HIERRO	80.2
MERCURIO	8.54
VIDRIO	0.78
LADRILLO	0.72
AGUA	0.607
PIEL HUMANA	0.37
MADERA (ROBLE)	0.17
HELIO	0.152
CAUCHO SUAVE	0.13
FIBRA DE VIDRIO	0.043
AIRE	0.026
URETANO	0.026

Fuente: YUNUS A. CENGEL, Transferencia de calor y masa, *segunda edición*, McGraw Hill, capítulo1.

Las conductividades térmicas de los materiales varían sobre un amplio intervalo, como se muestra en la figura (9).

Figura 9. Rangos de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente.



Fuente: YUNUS A. Cengel, *segunda edición, McGraw Hill*, transferencia de calor y masa, capítulo 1.

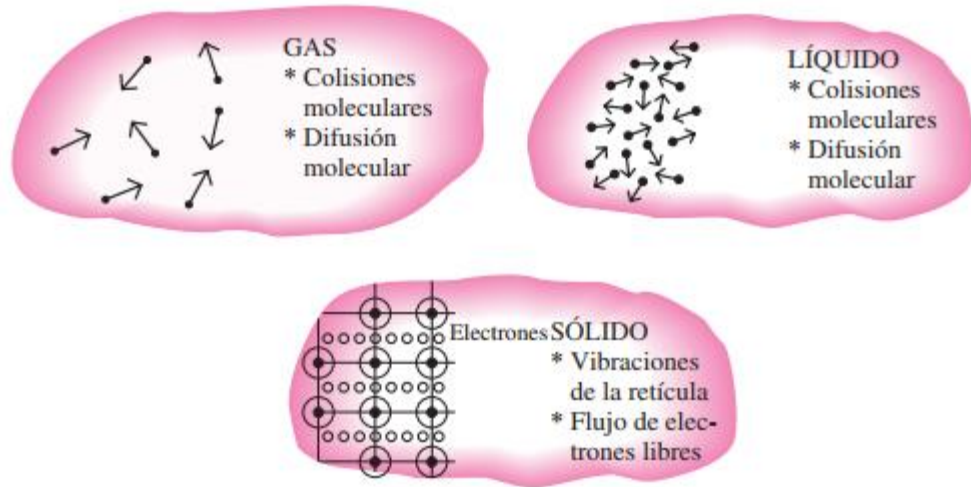
La temperatura es una medida de las energías cinéticas de las partículas, como las moléculas o los átomos de una sustancia. En un líquido o gas, la energía cinética de las moléculas se debe a su movimiento aleatorio de traslación, así como a sus movimientos de vibración y rotación. Entre más alta es la temperatura, más rápido se mueven las moléculas, mayor es el número de las colisiones y mejor es la transferencia de calor.

La teoría cinética de los gases predice, y los experimentos lo confirman, que la conductividad térmica de los gases es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura termodinámica T e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa molar M . Por lo tanto, la conductividad térmica de un gas crece al aumentar la temperatura y al disminuir la masa molar.

El mecanismo de conducción del calor en un líquido se complica por el hecho de que las moléculas están más cercanas entre sí y ejercen un campo de fuerzas intermoleculares más intenso. Las conductividades térmicas de los líquidos suelen encontrarse entre las de los sólidos y las de los gases. Normalmente, la conductividad térmica de una sustancia alcanza su valor máximo en la fase sólida y el mínimo en la fase gaseosa.

En los sólidos la conducción del calor se debe a dos efectos: las ondas reticulares de vibración inducidas por los movimientos de vibración de las moléculas, colocadas en posiciones más o menos fijas de una manera periódica conocida como red cristalina, y la energía transportada por medio del flujo libre de electrones en el sólido (figura 10). La conductividad térmica de un sólido se obtiene al sumar la componente reticular y la electrónica. La componente reticular de la conductividad térmica depende con intensidad de la manera en que las moléculas están dispuestas.

Figura 10. Los mecanismos de conducción en las diferentes fases de una sustancia.



Fuente: YUNUS A. CENGEL, *segunda edición, McGraw Hill*, transferencia de calor y masa, capítulo 1.

A diferencia de los metales, los cuales son buenos conductores de la electricidad y el calor, los sólidos cristalinos, como el diamante y los semiconductores como el silicio, son buenos conductores del calor, pero malos conductores eléctricos. Como resultado, esos materiales encuentran un uso muy amplio en la industria electrónica.

2.6.2 Difusividad térmica. El producto rC_p , que se encuentra con frecuencia en el análisis de la transferencia de calor, se llama capacidad calorífica de un material. Tanto el calor específico c_p como la capacidad calorífica rC_p representan la capacidad de almacenamiento de calor de un material. Pero c_p la expresa por unidad de masa, en tanto que rC_p la expresa por unidad de volumen, como se puede advertir a partir de sus unidades $J/kg \cdot ^\circ C$ y $J/m^3 \cdot ^\circ C$, respectivamente. Otra propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del calor en régimen transitorio es la difusividad térmica, la cual representa cuán rápido se difunde el calor por un material y se define como:

$$\alpha = \frac{\text{calor conducido}}{\text{calor almacenado}} = \frac{k}{C_p} \quad \left(\frac{m^2}{s}\right)$$

Note que la conductividad térmica k representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica ρc_p representa cuánta energía almacena un material por unidad de volumen. Por lo tanto, la difusividad térmica de un material se puede concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen¹³.

2.7 CONVECCIÓN

Cuando en un fluido que se encuentra en un campo gravitatorio hay regiones de distinta densidad, siendo las zonas más densas por más frías las que se encuentran en la parte superior, éstas se mueven hacia las zonas de menor densidad que se encuentran en la parte inferior (más caliente) desplazando el fluido que allí se encuentra. En un sentido más general, denominaremos convección a todo proceso de transferencia de calor entre dos zonas a distinta temperatura como consecuencia del movimiento de materia caliente hacia las zonas frías y de materia fría hacia las zonas calientes. Obviamente la convección aparecerá únicamente en fluidos, que es donde puede producirse este movimiento de materia.

Consideremos una superficie sólida que se encuentra a una temperatura T , en contacto con un fluido a una temperatura T_f . En estas condiciones se produce convección, caracterizada por un flujo térmico transmitido dado por una relación empírica conocida como ley de enfriamiento de Newton.

$$\phi = h(T - T_f)S$$

h no es un parámetro fijo, sino que depende, de una forma en general compleja, de distintas variables como la geometría del problema (con las dimensiones del sistema

¹³YUNUS A. CENGEL, Transferencia de calor y masa *tercera edición*, McGraw Hill, , capítulo1 - página 25.

y la posible presencia de otras superficies que limiten la convección), el estado de las superficies, las temperaturas, la velocidad del fluido o el tipo de convección. lo que se conoce como h es en realidad un valor promedio en la superficie, el coeficiente de convección promedio.

$$\bar{h} = \frac{1}{S} \int_S h ds$$

Otra forma de definir el coeficiente de convección es a través de un parámetro adimensional denominado número de Nusselt que está definido como:

$$Nu = \frac{\bar{h}L}{\lambda}$$

en función de la conductividad térmica del material λ , del coeficiente de convección promedio en la superficie \bar{h} y de una longitud característica del modelo dado por L . El número de Nusselt es una medida de la relación entre las tasas de transferencia de calor por convección y por conducción en un fluido.

El movimiento del fluido producido por la convección a lo largo de la superficie tiene características similares a las que se estudian en los libros de hidrodinámica. Así en la misma superficie se satisface la denominada condición de no deslizamiento en la que el fluido está en reposo respecto a la superficie como consecuencia del predominio absoluto de las fuerzas viscosas sobre las de inercia. Si nos separamos de la superficie, la influencia de las fuerzas de inercia va aumentando, aunque en una primera zona, denominada capa límite siguen predominando las fuerzas viscosas y se dice que el flujo es laminar. Más lejos de la superficie el flujo se vuelve turbulento. El paso de régimen laminar a turbulento se caracteriza mediante el número de Reynolds Re dado por.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu}$$

El número de Reynolds representa una cierta relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en el flujo.

La convección puede ser natural o forzada. Se dice que la convección es natural cuando las paredes en contacto con el sistema están en reposo, mientras que se dice que la convección es forzada cuando algunas de las paredes en contacto con el fluido se mueven favoreciendo la circulación de éste.† Como hemos visto, en convección natural el fluido se mueve espontáneamente en el campo de fuerza gravitatorio como consecuencia de la diferencia de densidades entre zonas calientes y frías.

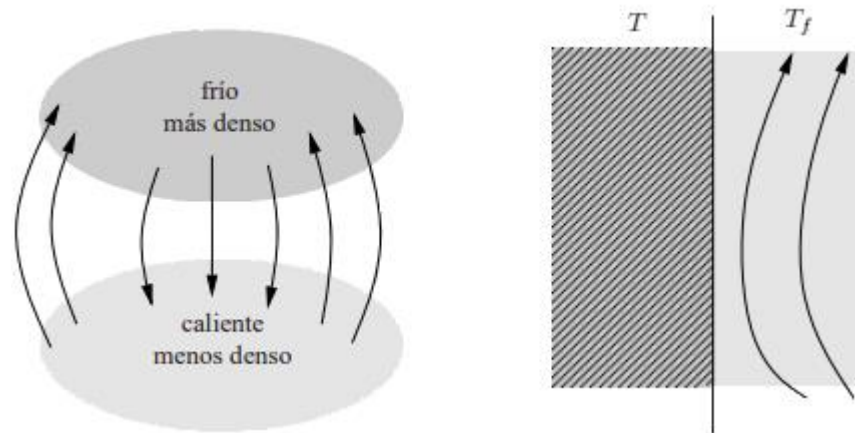
2.7.1 Convección forzada. En buena parte de los casos el número de Nusselt para la convección forzada puede ajustarse por una expresión de la forma:

$$Nu = cte Re^m Pr^n$$

Dado Re es el número de Reynolds y Pr es el número de Prandtl, dado por.

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{Cp\mu}{\lambda}$$

Figura 11 Transmisión del calor: conducción y convección.



Fuente: MARTÍN DOMINGO, Agustín amd-apuntes-transmision-calor.pdf, capitulo 1.

con α la difusividad térmica del fluido. L es una dimensión característica del sistema y cte , n y m son parámetros función de la geometría y del rango de números de Reynolds. Para los gases el número de Prandtl Pr apenas depende de la temperatura y en el caso concreto del aire puede tomarse $Pr = 0,7$. Dependiendo del tipo de flujo (laminar o turbulento) y de la geometría de las superficies se utilizan distintas expresiones para el número de Nusselt. Así, para superficies planas en régimen laminar se utiliza una expresión de la forma.

$$N_u = 0,664R_e^{1/2}Pr^{1/3}$$

válida en el rango $Pr < 0,6$ y $Re < 5 \times 10^5$.

Para una superficie plana en régimen turbulento se utiliza la expresión.

$$N_u = 0,037R_e^{4/5}Pr^{1/3}$$

válida en el rango $0,6 < Pr < 60$ y $5 \times 10^5 < Re < 10^7$.

A menudo la lámina es lo suficientemente grande para que se tenga una combinación de flujo laminar y turbulento en este caso.

$$N_u = (0,037R_e^{4/5} - 871)Pr^{1/3}$$

válida en el rango $0,6 < Pr < 60$ y $5 \times 10^5 < Re < 10^7$.

Una expresión utilizada para convección forzada en el interior de una tubería cilíndrica es la siguiente.

$$N_u = 0,02R_e^{0,8}$$

2.7.2 Convección con cambio de fase. Cuando los procesos de convección tienen lugar junto a un cambio de fase, como ocurre en los procesos de convección asociados a la condensación o a la ebullición se producen unos intercambios de calor muy intensos, incluso más intensos que en la convección forzada.

2.7.3 Convección libre o natural. En convección libre se observa experimentalmente que puede ajustarse el valor del número de Nusselt mediante una expresión de la forma.

$$N_u = cte(GrPr)^n \quad (i)$$

donde cte y n se ajustarán experimentalmente y Gr es el número de Grashoff que se define como.

$$N_u = \frac{g\alpha_v(T_s - T_f)L^3}{\nu^2}$$

donde α_V es el coeficiente de dilatación de volumen. El número de Grashoff desempeña en convección libre. En concreto, representa la relación entre las fuerzas de flotabilidad y las fuerzas viscosas en la corriente de convección natural.

Se denomina al producto de los números de Gr y Pr que aparece en la ecuación (i) número de Rayleigh, definido en la forma.

$$Ra = GrPr$$

2.7.4 Transmisión del calor por conducción y convección a través de paredes cilíndricas: Condiciones de contorno de primera especie en una pared cilíndrica simple.

Ahora no es posible hacer una extensión directa de lo que se ha visto para el caso de una pared plana salvo que el espesor de la pared sea mucho menor que su radio, ya que las áreas de las caras interna y externa son distintas. Sin embargo, si consideramos un tubo cilíndrico de radio r y espesor infinitesimal dr dentro de la pared cilíndrica, como el que se muestra en la figura 12, sí es posible considerar las superficies interna y externa como prácticamente similares, y por tanto, es posible aplicar entre ellas la ley de Fourier en la forma:

$$\vec{q} = \frac{d\Phi}{dS} \vec{u}_r = -\lambda \vec{\nabla} T = -\lambda \frac{dT}{dr} \vec{u}_r$$

donde se ha tenido en cuenta que la única dependencia de la temperatura es con la distancia r al eje del cilindro. El área total es $S = 2\pi rL$, siendo L la longitud del cilindro, y el flujo térmico total a través de la pared cilíndrica es Φ , quedando:

$$\frac{\Phi}{S} = q_r = -\lambda \frac{dT}{dr} \rightarrow \frac{\Phi}{2\pi rL} dr = -\lambda dT$$

Es decir, la diferencia de temperaturas entre las caras interior y exterior del cilindro viene dada por:

$$(T_1 - T_2) = \frac{\phi}{2\pi\lambda L} * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Figura 12. Conducción de un cilindro a una pared simple.

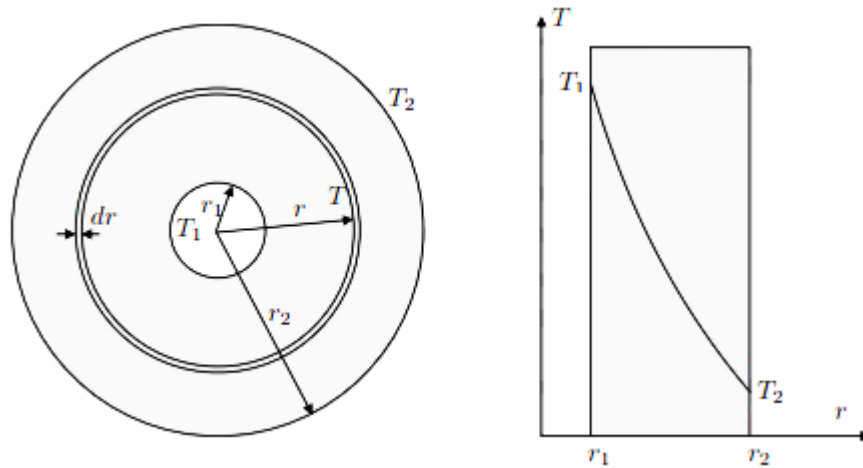
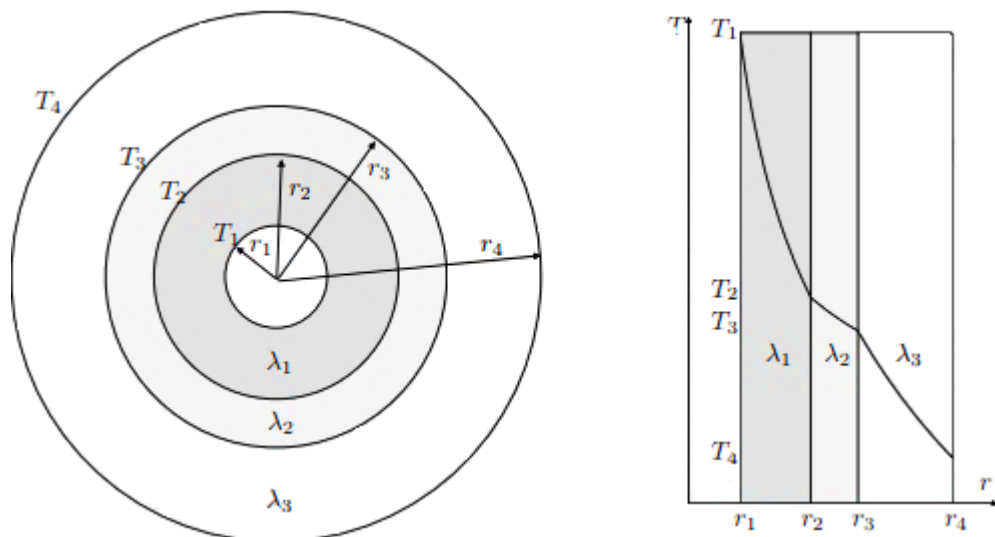


Figura 13. Conducción de un cilindro a una pared múltiple.



Fuente: MARTÍN DOMINGO Agustín, amd-apuntes-transmision-calor.pdf, capitulo 1.

2.7.4.1 Condiciones de primera especie en paredes cilíndricas compuestas. Si en vez de tenerse una única capa cilíndrica como en el apartado anterior, se tiene una pared cilíndrica de distintas capas, todas ellas cilíndricas, como la que se muestra en la figura 13, es fácil obtener la relación entre las distintas conductividades térmicas, los radios interior y exterior del cilindro compuesto y las temperaturas en las superficies externa e interna. Si r_i son los radios internos de cada capa, T_i sus temperaturas, y λ_i sus conductividades térmicas.

$$(T_1 - T_2) = \frac{\Phi}{2\pi\lambda_1 L} * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad \text{y} \quad (T_2 - T_3) = \frac{\Phi}{2\pi\lambda_2 L} * \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)$$

$$(T_{n-1} - T_n) = \frac{\Phi}{2\pi\lambda_{n-1} L} * \ln\left(\frac{r_n}{r_{n-1}}\right) \quad \text{y} \quad (T_n - T_{n+1}) = \frac{\Phi}{2\pi\lambda_n L} * \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right)$$

Ahora bien, el flujo térmico Φ es el mismo para todas las capas, por lo que al restar y sacar factor común queda la expresión.

$$T_1 - T_{n+1} = T_{int}^{sup} - T_{ext}^{sup} = \frac{\Phi}{2\pi L} * \left\{ \frac{1}{\lambda_n} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \dots + \frac{r_{n+1}}{r_n} \right\}$$

que en forma más esquemática puede escribirse como.¹⁴

$$T_1 - T_{n+1} = \frac{\Phi}{2\pi L} * \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) \right\}$$

¹⁴ MARTÍN DOMINGO, Agustín amd-apuntes-transmision-calor.pdf, pagina 12 – capitulo 1.

2.8 RADIACIÓN

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío.

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como.

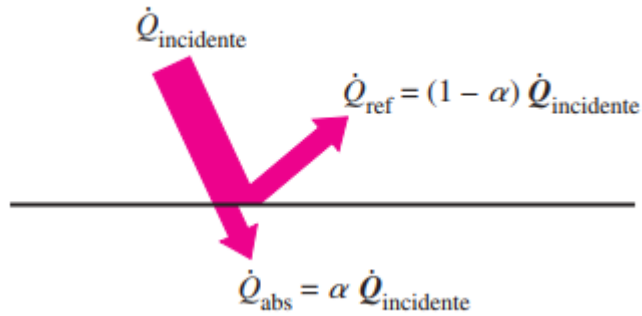
$$Q_{emitted,max} = \sigma A_s \dot{T}_s \quad (W)$$

Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su absorptividad a , la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta.

La ley de Kirchhoff de la radiación afirma que la emisividad y la absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales. La razón a la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de (figura14)

$$Q_{absorption} = \sigma Q_{incidencia}$$

Figura 14. Razón a la cual una superficie absorbe la radiación.



Fuente: YUNUS A. CENGEL, *tercera edición, McGraw Hill*, transferencia de calor y masa, capítulo 1.

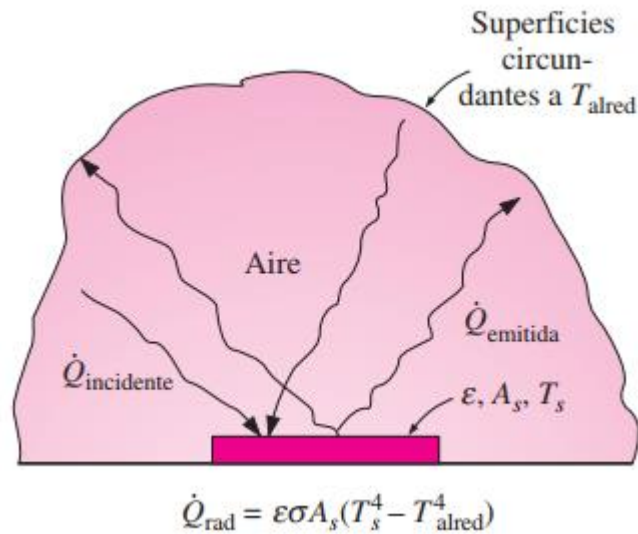
donde $\dot{Q}_{\text{incidente}}$ es la razón a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorptividad de la superficie.

La diferencia entre las razones de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está ganando energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está perdiendo energía por radiación.

Cuando una superficie de emisividad ϵ y área superficial A_s , a una temperatura termodinámica T_s , está por completo encerrada por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura termodinámica T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por (figura 15).

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4) \quad (W)$$

Figura 15. Razón neta de transferencia de calor por radiación.



Fuente: YUNUS A. CENGEL, *tercera edición, McGraw Hill*, transferencia de calor y masa, capítulo 1.

En este caso especial la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación. La transferencia de calor por radiación hacia una superficie, o desde ésta, rodeada por un gas como el aire, ocurre paralela a la conducción (o convección, si se tiene un movimiento masivo del gas) entre esa superficie y el gas. Por tanto, la transferencia total de calor se determina al sumar las contribuciones de los dos mecanismos de transferencia. Por sencillez y conveniencia esto se lleva a cabo con frecuencia mediante la definición de un coeficiente combinado de transferencia de calor, $h_{combinado}$, que incluye los efectos tanto de la convección como de la radiación.

$$\dot{Q}_{total} = h_{combinado}A_s(T_s - T_{\infty}) \quad (W)$$

Note que, en esencia, el coeficiente combinado de transferencia de calor es un coeficiente de transferencia de calor por convección modificado para incluir los efectos de la radiación.¹⁵

¹⁵ YUNUS A. CENGEL, Transferencia de calor y masa, *tercera edición*, McGraw Hill, capítulo 1 – página 53 - 61.

3. APLICACIÓN DE CONCEPTOS SOBRE EL OLEODUCTO AL PACÍFICO (OAP)

A lo largo de esta investigación se conocieron y entendieron todos los aspectos técnicos necesarios para hacer la evaluación del efecto “SKIN” en un oleoducto que transporta crudo pesado en Colombia.

El oleoducto seleccionado para el estudio es el Oleoducto Al Pacífico (OAP), un proyecto en estudio y proceso de construcción, que llevara crudo pesado desde los llanos orientales, hasta Buenaventura en el Pacífico colombiano.

La Cuenca Llanos en la región oriental de Colombia, que cubre un área aproximada de 220,000 km², Geológicamente limita al Sur por la Saliente del Vaupés o Arco del Guaviare, al Oriente por el Escudo Guayanés, al Occidente por la Cordillera Oriental y al Norte se prolonga en Venezuela más allá del río Arauca.

La producción de la Cuenca proviene de areniscas del Cretáceo Superior (Formación Guadalupe) y del Terciario Inferior (Formaciones Barco, Mirador y Carbonera). Su cubierta sedimentaria involucra secuencias del Paleozoico, Cretácico Superior y Terciario. Al Norte de la saliente del Vaupés, se extiende el Sector del Meta. Dentro del sector Meta, se destaca el Bloque Apiay, en donde hasta la presente se ha descubierto acumulación de hidrocarburos en rocas del Cretácico Superior y Terciario inferior en los campos de Apiay y Guayuriba, Suria y La Reforma.

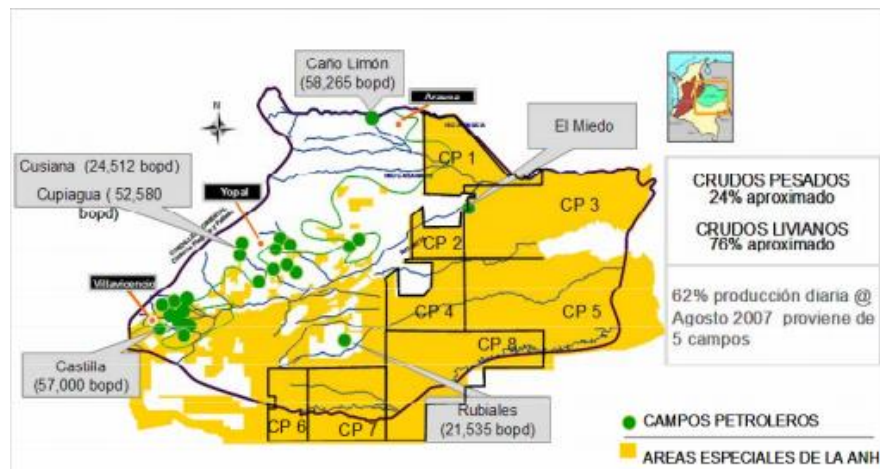
El cinturón de crudos pesados localizado al oriente del límite de gravedad o API < 20, hasta el límite geográfico aproximado del sistema petrolífero Gachetá-Mirador. Se extiende desde el campo Apiay, incluye el campo Rubiales en donde podría tener

entre 80 y 100 Km. de ancho y continúa en dirección noreste hacia el campo El Miedo en donde convergen los límites de las gravedades API < 20 y la del sistema petrolífero Gachetá-Mirador. En esta zona se han detectado acuíferos y situaciones estructurales favorables para la acumulación de hidrocarburos. Acuíferos de los miembros C7 al C3 de la Formación Carbonera contra el basamento cristalino o contra el Paleozoico en sector oriental de la provincia.

INFORMACION DE LOS CAMPOS PRODUCTORES DE PETROLEO DE LA CUENCA LLANOS ORIENTALES (FORMAS 9 SUMINISTRADAS POR EL MM&E).

correspondiente a 135 campos productores de un total reportados de 145. La producción diaria es de 345,377 BPPD y se cuenta con una producción acumulada de 3,045 MMBls (millones de barriles). En las Figura 6.2, se pueden observar los campos productores de la cuenca destacándose los campos de Caño Limón, Cusiana, Cupiagua, Castilla y Rubiales, que representan el 62 % de la producción total de la Cuenca.

Figura 16. Campos productores más importantes en la cuenca llanos orientales



Fuente: ECOPELROL, MM&E, ACIPET, EPIS, proyecto de crudos pesados: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Informe_de_Prospectividad.pdf

Información de los campos productores de crudo pesado en la cuenca Llanos Orientales.

Los crudos pesados y las arenas bituminosas son petróleos líquidos o semi-sólidos que se encuentran en forma natural en el medio poroso sea éste, arenas o carbonatos. Estos crudos son caracterizados por su viscosidad y densidad. La viscosidad libre de gas para los crudos pesados varía entre 100 y 10000 centipoises con una gravedad °API entre 10 y 20 a temperatura de 15,6 °C, mientras que en las arenas bituminosas la viscosidad es mayor de 10000 centipoise con una gravedad °API menor 10. Generalmente estos crudos pesados contienen un porcentaje apreciable de azufre y metales lo cual hace su proceso de mejoramiento más complicado.

El espaciamiento entre pozos está entre 250 y 600 metros dependiendo de la estrategia de agotamiento del campo. Normalmente se comienza con espaciamientos mayores para posteriormente ir a ínter espaciado de acuerdo al volumen de crudo remanente. La arquitectura de pozo generalmente contempla pozos horizontales, multilaterales, verticales con hoyos ampliados todo esto con el fin de disminuir daño y aumentar productividad. Los pozos son completados con revestimientos ranurados con empaque de grava o rejillas preempacadas para control de arena y utilizan sistemas de levantamiento artificial para levantar el crudo hasta la superficie tales como bombeo mecánico, cavidad progresiva, electro sumergible y levantamiento por gas dejando siempre provisiones para la inyección de diluyente en fondo de pozo.

A nivel de superficie estos pozos pueden estar agrupados en arreglos que contienen desde 6 a 12 pozos dependiendo del yacimiento. La productividad de los pozos varía entre 20-1400 BPPD (barriles de petróleo por día) dependiendo de las propiedades del yacimiento.

La producción de fluido de estas localizaciones es enviada a través de líneas de recolección a las estaciones de flujo, donde se realiza el proceso de separación de la mezcla líquido/gas. La mezcla de crudo y agua es bombeada a una Estación Central de Procesamiento, donde se deshidrata el crudo y donde se realizan las etapas de desalación y tratamiento del agua para su posterior inyección a los pozos de disposición de agua. Igualmente, el gas es transferido a la Estación Central para ser comprimido y deshidratado.

La comercialización de estos crudos se realiza mediante elaboración de tipos de mezcla cuya composición y tipo sea apropiada para refinerías específicas o son mejorados para convertirlos en crudos de menor gravedad para posteriormente ser procesados en refinerías especiales para ese tipo de crudo.

La cuenca de los Llanos tiene hoy una producción acumulada de crudos pesados de unos 429 MMBls (millones de barriles) y una producción diaria de 103,000 BPPD. En la Tabla 1 se muestran la producción acumulada y la producción promedio mes en BPPD (barriles de petróleo por día) para los principales campos de crudo pesado de la cuenca Llanos Orientales.

Tabla 4. Producción acumulada y producción promedio. ¹⁶.

Campo	Acumulado barriles	Promedio mes BPPD
Apiay	71,316,803	6490
Apiay Este	2,410,420	549
Campo Rico	2,082,146	1,407
Castilla	148,361,492	20,504
Castilla Este	2,892,929	804
Castilla Norte	39,169,562	35,886
Chichimene	40,030,777	5,800
Entrerios	972,844	1,187

¹⁶ ANH Áreas de crudos pesados, Informe De Prospectividad, [en línea] disponible en: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Informe_de_Prospectividad.pdf.

Campo	Acumulado barriles	Promedio mes BPPD
Estero (palo blanco)	2,391,210	280
Gavan	1,382,555	547
Guatiquia	15,873,385	2,123
La Gloria	27,339,139	1,795
La Gloria Norte	15,833,112	490
Pirrito	531,212	131
Rubiales	14,493,024	21,535
Santiago	43,407,546	2,756
Vigia	526,528	669
Totales	429,014,864	102,953

Fuente: Boletín estadístico de ACIPET.

En este capítulo se explica detalladamente la aplicación de los conceptos técnicos ya aprendidos anteriormente sobre el oleoducto en estudio.

3.1 ASSAY DE CRUDO PESADO EN COLOMBIA

Tabla 5. Propiedades del crudo

	Test temperature	100°C(212F)
	kinematic viscosity, cSt	69.94
ASTM D4294	sulfur content, % mass	1.50
ASTM D3279	n-heptane insoluble, wt%	2.06
ASTM D2501	viscosity- gravity constant (VGC)	0.9245
ASTM D482	ash content, %mass	0.1740
ASTM D6560	asphaltenes, %m/m	1.94
ASTM D664	total acid number/mg KOH/g	6,36/6,36
	average acid number/mg KOH/g	6.36
ASTM D3230	salt content, PTB	25
ASTM D86	initial Boiling point, °C	200.0
ASTM D5184 Method B	aluminum, ppm(mg/kg)	3.98
	silicon, ppm(mg/kg)	9.262
UOP 389	iron, ppm(m/m)	48.88
	nickel, ppm(m/m)	63.2
	vanadium, ppm(m/m)	66.6

		copper, ppm(m/m)	<0,02
		sodium, ppm(m/m)	53.59
		calcium, ppm(m/m)	424.10
		magnesium, ppm(m/m)	3.89
UOP 375		characterization factor	11.17
ASTM D323		reid vapor pressure, psi	0.10
UOP 46		wax content, %mass	6.80
ASTM D240		gross calorific value, MJ/Kg	40.70
ASTM D4530		micro carbon residue, %mass	8.93
ASTM D56		Flash point, °C	105.0

Coeficiente de película aproximado: $48 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$

3.2 OLEODUCTO AL PACÍFICO (OAP)

Requerimientos técnicos del Oleoducto al Pacífico (OPA):

- Transporte de crudos pesados (1.200 cSt) sobre una longitud de ≈ 780 km en tierra y ≈ 25 km en el mar ($\varnothing 30''$, $36''$).
- Líneas de Exportación de Crudo e Importación de Diluyentes.
- Capacidad de transporte de crudo: Inicial 250 kbpd, con opción de expandirse hasta 400 kbpd.
- Capacidad de la línea de diluyente: 80 kbpd (diámetro 14").
- Unidad de carga (TLU) (monoboya, sistema de amarre y PLEM) y mangueras flotantes. Veril de -40 m.

Figura 17. Perfil topográfico de la ruta OPA



Fuente: CÁMARA COLOMBIANA DE LA INFRAESTRUCTURA en: www.infraestructura.org.co/filef.php?IDe=1476.

Tabla 6. Del perfil topográfico de la ruta OPA

DISTANCIA (Km)	CAMBIO DE ALTURA (msnm)	DISTANCIA (Km)	CAMBIO DE ALTURA (msnm)
0-20	30	400-420	20
20-40	70	420-440	80
40-60	20	440-460	200
60-80	10	460-470	400
80-100	40	470-475	-420
100-120	40	475-480	1050
120-140	40	480-483	-720
140-150	20	483-490	360
150-160	-20	490-500	420
160-172	-20	500-510	900
172-180	8	510-520	-300
180-188	12	520-540	910
188-190	60	540-544	410
190-200	40	544-550	-1180
200-210	10	550-552	300
210-215	210	552-560	-750

DISTANCIA (Km)	CAMBIO DE ALTURA (msnm)	DISTANCIA (Km)	CAMBIO DE ALTURA (msnm)
215-218	-200	560-565	800
218-220	300	565-570	-820
220-225	-60	570-575	835
225-230	50	575-580	-1730
230-235	-30	580-585	670
235-240	60	585-590	-1000
240-245	-80	590-600	100
245-250	0	600-605	-100
250-256	-70	605-620	-190
256-260	60	620-623	70
260-270	-15	623-636	-60
270-275	-105	636-640	550
275-280	110	640-650	210
280-283	310	650-660	-200
283-290	-330	660-665	80
290-292	720	665-670	-400
292-294	-500	670-678	495
294-297	630	678-680	-290
297-300	-740	680-685	210
300-308	1180	685-690	100
308-312	-420	690-695	-780
312-314	280	695-700	1090
314-320	-500	700-710	-210
320-323	705	710-715	420
323-330	-400	715-720	-1000
330-331	80	720-725	-690
331-340	-500	725-730	610
340-342	-510	730-740	-910
342-350	1130	740-745	110
350-360	-200	745-750	-90
360-365	-510	750-755	160
365-370	150	755-760	-110
370-374	-800	760-770	80
374-380	450	770-775	-180
380-390	-640	775-780	100

DISTANCIA (Km)	CAMBIO DE ALTURA (msnm)	DISTANCIA (Km)	CAMBIO DE ALTURA (msnm)
390-400	-30		

3.3 CÁLCULOS DE LA APLICACIÓN FINAL

Figura 18. Ilustración frontal del aislamiento del oleoducto



Fuente: Autores

En la figura anterior se muestra el perfil frontal del aislamiento de la tubería de forma de entender con mayor facilidad cada componente. Esto permitirá hacer la configuración de las ecuaciones para los cálculos, hallar el tiempo crítico y así poder calcular un “setup” para la activación y desactivación del sistema de calentamiento.

Una de las primeras consideraciones a tener en cuenta es: El oleoducto en estudio tendría un diámetro y material igualmente parecido al oleoducto que aplico esta

tecnología en la India, por ende, no se necesita cambiar la configuración de las estaciones de suministro calor. Teniendo en cuenta lo anterior se puede asumir que cada estación instalada puede calentar hasta 20 km de tubería uniformemente, lo que resta es conocer cuantas estaciones son necesarias para aplicar la tecnología en el Oleoducto Al Pacífico (OAP), que transporta crudo pesado desde Los Llanos Orientales hasta Buenaventura. Y la configuración de estas con respecto al tiempo de activación y la configuración de seguridad debe conocerse de acuerdo a cuanta temperatura debemos suministrarle al oleoducto para que el crudo fluya (Sin diluyentes) que en este caso no debe ser menor a 32 °F ya que este es el Pour Point del crudo a transportar.

3.3.1 Número de estaciones necesarias para calentar el oleoducto. Como ya se dio a conocer la capacidad de cada estación que puede calentar hasta 20 km de tubería de acero. Procedemos a hacer el cálculo:

1 estación de suministro de energía → calienta 20 km de tubería
 Oleoducto al Pacífico → 780 km de longitud total.

$$\# \text{ de estaciones necesarias} = \frac{1 \text{ estacion}}{20 \text{ km}} * 780 \text{ km}$$

$$\# \text{ de estaciones necesarias} = 39 \text{ estaciones}$$

Estas estaciones funcionarían con el sistema eléctrico que tendría el oleoducto con capacidad para generar hasta 60,5 MW.

3.3.2 Temperatura máxima y mínima del oleoducto Teniendo en cuenta que el crudo producido en los llanos tiene un punto de fluidez aproximado de 32 °F, esta será la temperatura en la cual se garantiza el flujo del crudo por la tubería. Por ende se le agregará un factor de seguridad de 40 °F para que se encienda el sistema y

no permita un mayor enfriamiento del crudo previniendo la formación ceras dentro de la tubería y así prevenir posibles taponamientos.

Entonces, se tendrá como temperatura de crítica del oleoducto:

$$\textit{Temperatura Crítica} = 32 \text{ }^{\circ}\text{F} + 40 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Por consiguiente, el oleoducto tendría una temperatura mínima de 72 °F temperatura en la cual el crudo fluye y el sistema se activará.

Esta temperatura mínima será el sistema de seguridad del principal sistema de funcionamiento y una temperatura máxima de 190 °F, ya que el crudo a transportar cuenta con un flash point de 221 °F.

3.3.3 Tiempo crítico para las estaciones de energía. Este será el principal mecanismo de funcionamiento de las estaciones, las estaciones tendrán un tiempo establecido para activarse una vez hayan alcanzado la temperatura máxima de operación, este tiempo se determina teniendo en cuenta el delta de temperatura que pierde el crudo.

En el numeral 2.7.4 se explicó las condiciones de transferencia de calor en paredes cilíndricas. Por lo que se puede hacer los cálculos necesarios.

$$Q = h_p \pi D_1 L (T_1 - T_2)$$

$$(T_1 - T_2) = \frac{Q}{h_p \pi D_1 L}$$

Esta es la correlación para la transferencia de energía del fluido con el tubo de acero. Ahora seguiremos con el resto del sistema:

Para el acero:

$$Q = K_1 \frac{2\pi L}{\ln \frac{D_2}{D_1}} * (T_2 - T_3)$$

$$(T_2 - T_3) = \frac{Q}{2\pi L K_1} * \ln \frac{D_2}{D_1}$$

Para el Poliuretano Rígido, tenemos una relación parecida a la anterior:

$$(T_3 - T_4) = \frac{Q}{2\pi L K_2} * \ln \frac{D_3}{D_2}$$

La siguiente será la relación de transferencia para el polietileno:

$$(T_4 - T_5) = \frac{Q}{2\pi L K_3} * \ln \frac{D_4}{D_3}$$

Ahora Sumando todas las relaciones anteriores, se cancelan las temperaturas intermedias y obtenemos la relación final:

$$Q_1 = \frac{(T_1 - T_5) * \pi L}{\left(\frac{1}{h_p D_1} + \frac{1}{2K_1} * \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2K_2} * \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2K_3} * \ln \frac{D_4}{D_3}\right)}$$

Con esta ecuación si:

$$\begin{array}{llll} T_1 = 360.7 \text{ K} & T_5 = 295 \text{ K} & L = 20000 \text{ m} & h_p = 48 \frac{W}{m^2 K} \\ D_1 = 0,5969 \text{ m} & D_2 = 0,6096 \text{ m} & D_3 = 0,6186 \text{ m} & D_4 = 0,6236 \text{ m} \\ K_1 = 52 \frac{W}{m K} & K_2 = 0,020 \frac{W}{m K} & K_3 = 0,48 \frac{W}{m K} & \end{array}$$

Obtenemos una potencia de transferencia de calor:

$$Q_1 = 10071354,31 \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad Q_1 = 36256875,52 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

En unidades W equivale a J/s por lo que tomamos se puede afirmar que esa es la energía en 10071354.31 J o $36256875,52 \text{ KJ}$ que tiene que perder el sistema para llegar a la temperatura crítica del sistema.

Ahora volvemos a utilizar la relación final ya que el sistema se enfría progresivamente con respecto a la temperatura ambiente, la temperatura ambiente tomada como referencia es la temperatura promedio del punto más alto del perfil topográfico en la Cordillera Central aproximadamente (-5°C o 268 K). Ya que es a temperatura más baja entre las localidades por las cuales pasa el oleoducto.

$$Q_2 = \frac{(T_1 - T_a) * \pi L}{\left(\frac{1}{h_p D_1} + \frac{1}{2K_1} * \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2K_2} * \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2K_3} * \ln \frac{D_4}{D_3}\right)}$$

$$T_1 = 360,7 \text{ K} \quad T_a = 268 \text{ K} \quad L = 1000 \text{ m} \quad h_p = 48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$D_1 = 0,5969 \text{ m} \quad D_2 = 0,6096 \text{ m} \quad D_3 = 0,6186 \text{ m} \quad D_4 = 0,6236 \text{ m}$$

$$K_1 = 52 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad K_2 = 0,020 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad K_3 = 0,48 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

Obtenemos de nuevo la potencia que debe perder el sistema en J/s para que se enfríe progresivamente a temperatura ambiente:

$$Q_2 = 710513,35 \frac{\text{J}}{\text{s}} \quad Q_2 = 2557848,06 \text{ KJ/h}$$

Ahora dividiendo Q_1/Q_2 obtenemos el tiempo crítico:

$$t = \frac{36256875,52 \text{ KJ}}{2557848,06 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}}$$

$$t = 14.17 \text{ hr}$$

3.3.4 Simulación en HYSYS Para el desarrollo de la simulación se tomó el Assay de crudo pesado en Colombia para trabajar con características y comportamientos reales del crudo.

Se usaron tramos de tubería de 20 km cada uno debido a que las estaciones calientan uniformemente esta longitud de tubería, cada tramo tiene un perfil topográfico distinto de acuerdo a los puntos en la tabla de cambio de altura en msnm (metros sobre el nivel del mar).

Figura 19. Tramo de tubería del km 280 al 300

Design	Rating	Worksheet	Performance	Flow Assurance	Dynamics
Rating					
Sizing					
Heat Transfer					
Length - Elevation Profile					
Segment	1	2	3		
Fitting/Pipe	Pipe	Pipe	Pipe		
Length/Equivalent Length	9843	2.297e+004	6562		
Elevation Change	1017	-1083	2362		
Outer Diameter	24.00	24.00	24.00		
Inner Diameter	23.50	23.50	23.50		
Material	Mild Steel	Mild Steel	Mild Steel		
Roughness	1.500e-004	1.500e-004	1.500e-004		
Pipe Wall Conductivity	26.00	26.00	26.00		
Increments	5	5	5		
FittingNo	<empty>	<empty>	<empty>		

Fuente: Autores

Figura 20. Tramo de tubería del km 280 al 300 segunda imagen

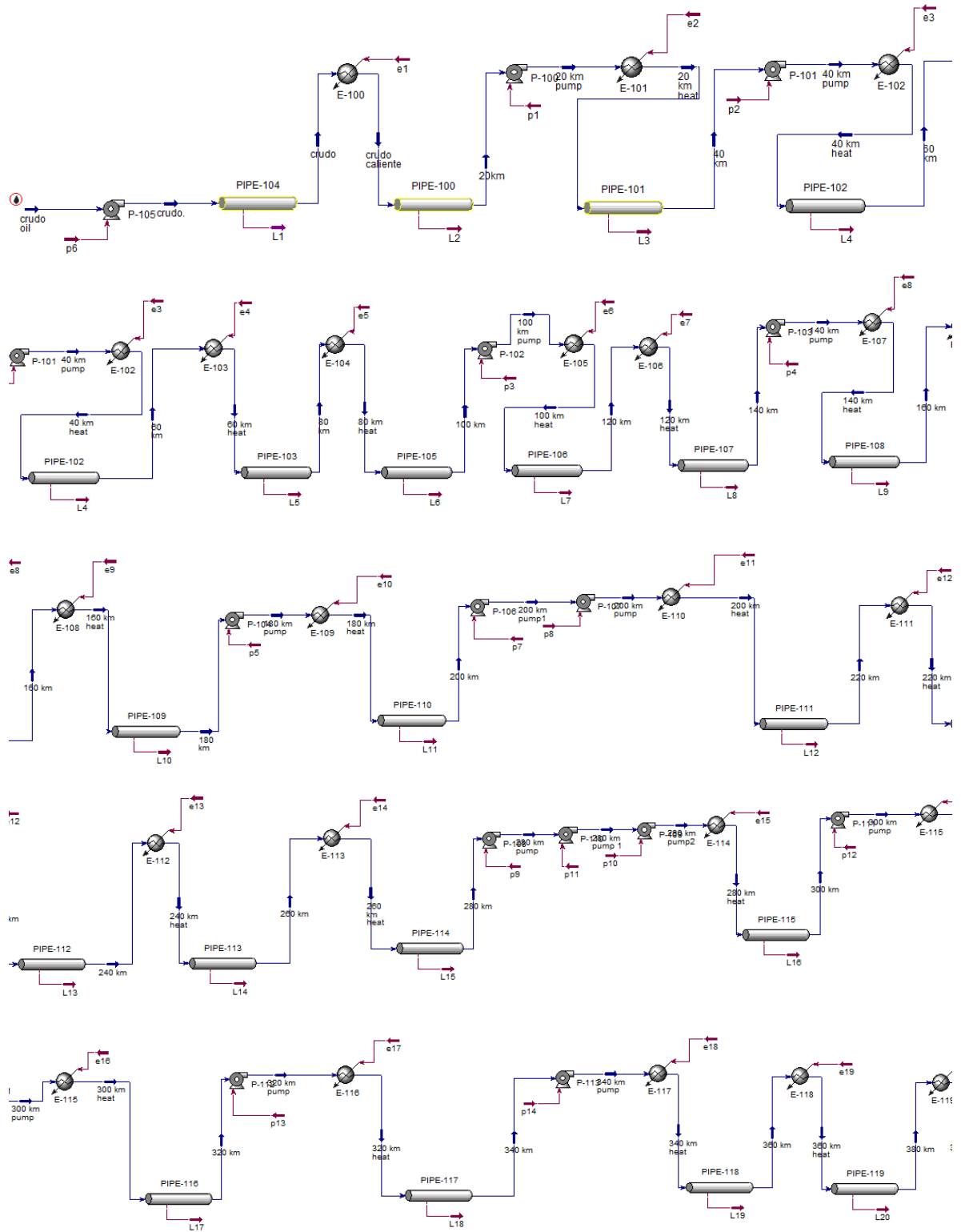
Design	Rating	Worksheet	Performance	Flow Assurance	Dynamics
Rating		Length - Elevation Profile			
Sizing		3	4	5	6
Heat Transfer		Pipe	Pipe	Pipe	Pipe
		6562	6562	9843	9843
		2362	-1640	2067	-2428
		24.00	24.00	24.00	24.00
		23.50	23.50	23.50	23.50
		Mild Steel	Mild Steel	Mild Steel	Mild Steel
		1.500e-004	1.500e-004	1.500e-004	1.500e-004
		26.00	26.00	26.00	26.00
		5	5	5	5
		<empty>	<empty>	<empty>	<empty>

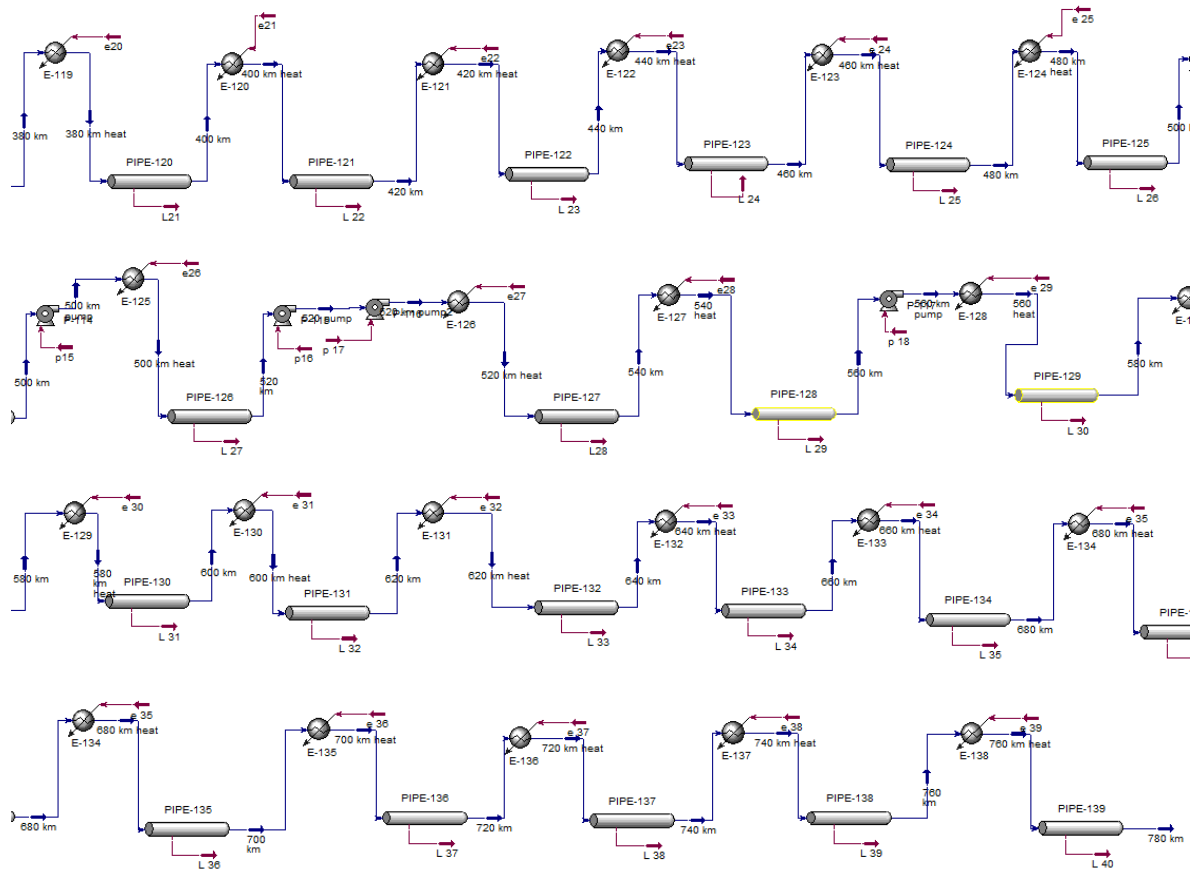
Fuente: Autores

En las dos figuras anteriores se puede observar la distancia en la cual se da el desnivel de tubería y el cambio de elevación positivo o negativo según corresponda, esto con el fin de analizar las pérdidas en la tubería y observar un posible pronóstico en la temperatura del fluido.

El calentamiento en el simulador se hace por medio de intercambiadores de calor cada 20 km, con una transferencia de calor uniforme para llevar el crudo a temperatura aproximada de 190 °F por lo mencionado anteriormente con respecto al Flash Point del crudo utilizado en la simulación. También se usan bombas según corresponda para recuperar las pérdidas de presión generadas por los cambios de elevación.

Figura 21. Simulación Hysys





En la simulación podemos ver los tramos de tubería cada 20 km, el ciclo de calentamiento y bombeo según corresponda. Con una nomenclatura fácil de interpretar.

$$V = \pi * (0,97915)^2 * (2559055,1181102)$$

$$V = 7707756,199 \text{ ft}^3 * \frac{1 \text{ Bbl}}{5,6146 \text{ ft}^3} = 1372805.93 \text{ Bbl}$$

Si dividimos el volumen por el caudal de operación que es 100.000 bbl/día puedo conocer el tiempo que dura el flujo en el oleoducto.

Flujo en el oleoducto

$$t = \frac{\text{volumen}}{\text{flujo}} \rightarrow \frac{1372805,93 \text{ Bbl}}{100.000 \frac{\text{Bbl}}{\text{día}}} = 13,72 \text{ días}$$

La potencia de las estaciones es de 23500 hp o 17523,9 Kw/h y se estima que estarán encendida alrededor de 9.3 horas al día.

Requerimiento de las estaciones

$$\text{potencia} = 17523,9 \frac{\text{kw}}{\text{h}} * \frac{9.3 \text{ h}}{1 \text{ día}} * 13,72 \text{ día} = 2235979.54 \text{ Kw}$$

Cada Kw tiene un valor de 226 pesos.

Las estaciones calientan hasta 20 km de tubería, el volumen que tenemos en una trayectoria de 20 km es igual a 35200,15 Bbl.

Costos por barril.

$$\frac{\text{potencia (Kw)} * \text{presio (Kw) en pesos}}{\text{volumen del crudo en 20 km}} = \text{precio por barril}$$

$$\frac{2235979.54 \text{ Kw} * 226 \frac{\text{pesos}}{\text{Kw}}}{35200,15 \text{ Bbl}} = 11974 \frac{\text{pesos}}{\text{barril}}$$

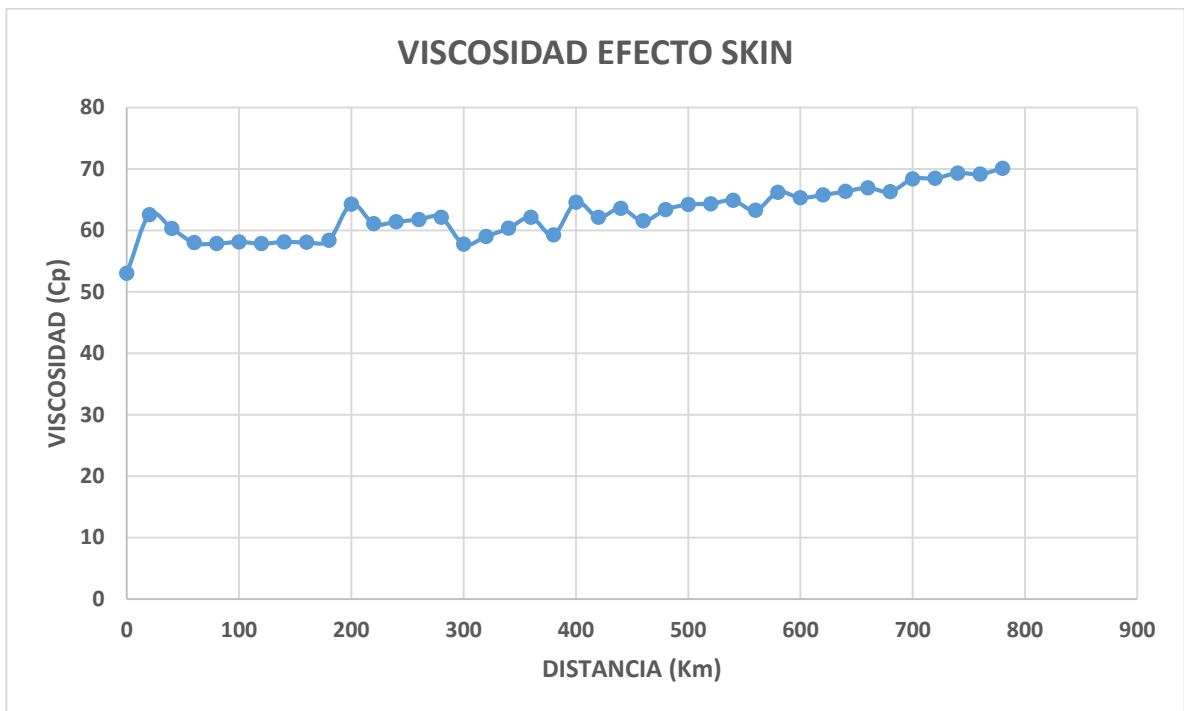
De acuerdo a lo calculado se gasta 11974 pesos/barril para transportar el crudo a una distancia de 780 km.

Tabla 7. Viscosidad vs distancia del comportamiento del efecto SKIN.

KM	VISCOSIDAD (Cp)
0	21,19
20	62,55
40	60,31
60	57,99
80	57,84
100	58,13
120	57,84
140	58,13
160	58,07
180	58,39
200	64,28
220	61,09
240	61,39
260	61,77
280	62,11
300	57,75
320	59,02
340	60,34
360	62,13
380	59,26
400	64,58
420	62,15
440	63,57
460	61,54
480	63,38
500	64,21
520	64,34
540	64,87
560	63,25
580	66,21
600	65,32
620	65,76
640	66,34
660	66,92
680	66,29

KM	VISCOSIDAD (Cp)
700	68,37
720	68,46
740	69,34
760	69,14
780	70,12

Figura 22. Grafica de Viscosidad vs Distancia del comportamiento del efecto SKIN



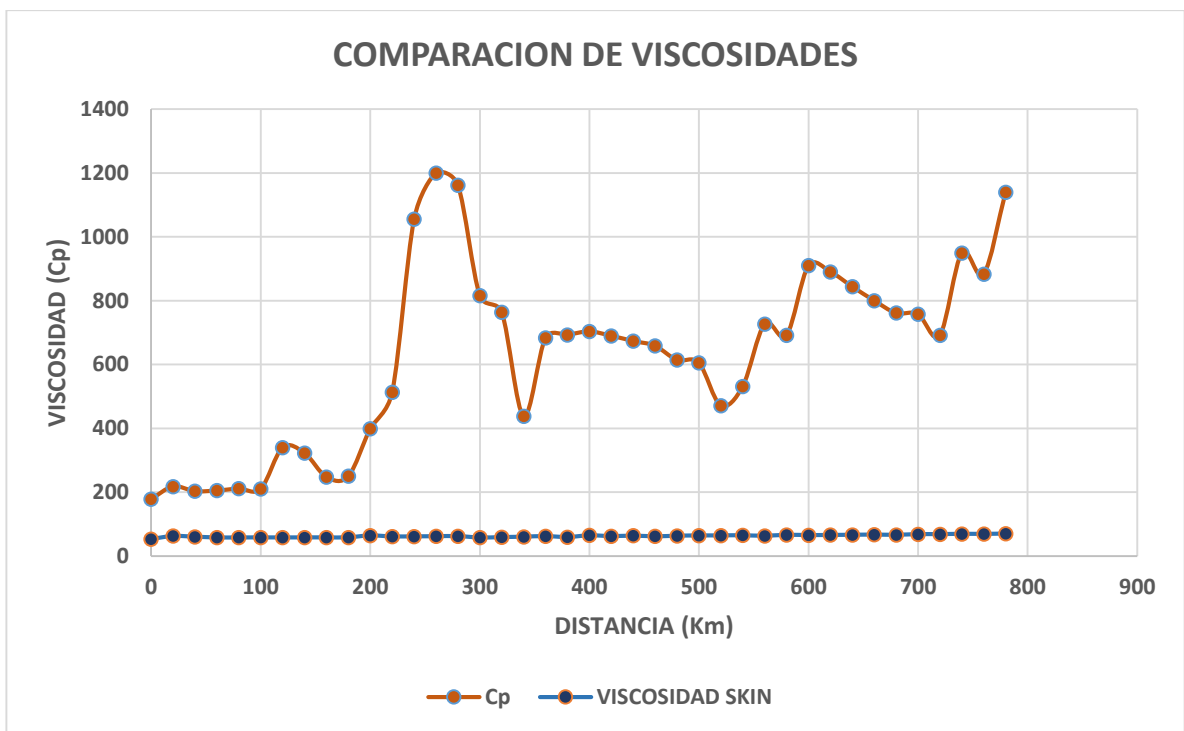
Analizando la gráfica anterior del comportamiento de la viscosidad según la simulación del efecto “SKIN”, se puede observar la gran ventaja de mantener un crudo pesado en una viscosidad promedio de 62.63 cp lo que facilita tener un desplazamiento óptimo dentro de la línea.

Tabla 8. Comportamiento de Viscosidad vs Distancia sin la aplicación del efecto SKIN.

Km	Cp
0	178,3
20	217,5
40	202,9
60	204,9
80	210,9
100	210,2
120	340
140	322,2
160	247,3
180	250,1
200	399,2
220	513,2
240	1055
260	1200
280	1162
300	815,6
320	763,8
340	437,9
360	683,4
380	692,9
400	703,3
420	689,9
440	673,4
460	658,2
480	614
500	604,9
520	471
540	531,3
560	726,7
580	691,3
600	909,7
620	890,1
640	844
660	800,2

Km	Cp
680	761,3
700	757,8
720	691,5
740	949,6
760	883,4
780	1140

Figura 23. Grafica de comportamiento de la viscosidad vs distancia sin la aplicación del efecto SKIN



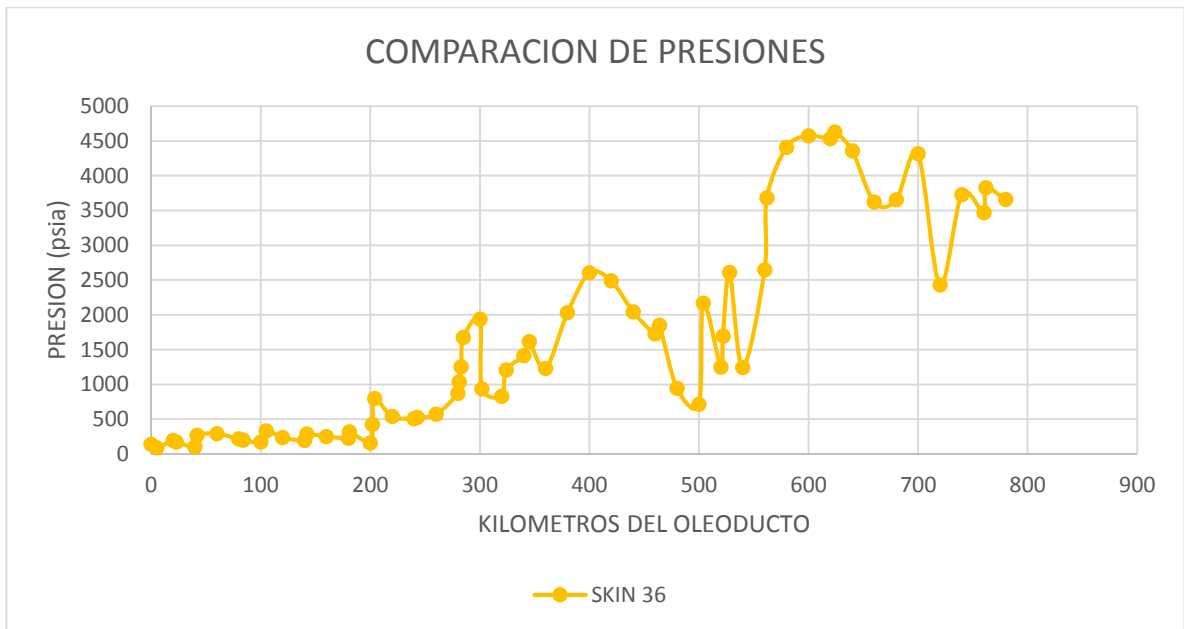
En la gráfica anterior se pudo comparar el comportamiento de la viscosidad del caso base con respecto a la simulación del efecto "SKIN". Se puede observar claramente que el fluido sin la implementación de la tecnología tendría mayor problema para poderse desplazar dentro de la línea debido a la alta viscosidad que presenta durante el recorrido. Que es uno de los principios claros que maneja la tecnología para optimizar el transporte, disminuir la viscosidad por medio de mantener caliente la tubería y a su vez el fluido que allí se transporte.

Tabla 9. Comportamiento de la presión vs distancia con la tecnología del efecto SKIN.

Km	PSIA
0	143,6
5	500
20	423,8
23	500
40	392,1
42	400
60	336,5
80	286,3
84	800
100	708,3
105	1100
120	998,1
140	875,6
142	1100
160	200
180	173
181	700
200	489,3
202	650
204	1400
220	873,8
240	716,2
243	1600
260	1462
280	284,9
281	1000
283	2000
285	3200
300	2980
302	3100
320	773,3
324	1700
340	350
345	2200

Km	PSIA
360	1900
380	2812
400	3656
420	3509
440	3277
460	2876
464	3000
480	1423
500	1232
504	3600
520	2660
522	3100
528	3700
540	2316
560	3962
562	5000
580	5804
600	5948
620	5903
624	6000
640	5730
660	4993
680	5027
700	5688
720	3804
740	5101
760	4843
762	5200
780	5031

Figura 24. Grafica del comportamiento de la presión vs distancia usando la tecnología del efecto skin.



En esta grafica podemos observar y analizar las pérdidas de presión debido a los cambios de topografía y perdidas en la línea. Esta gráfica es fundamental para determinar la ventaja de la aplicación de la tecnología al ser comparada con un caso base.

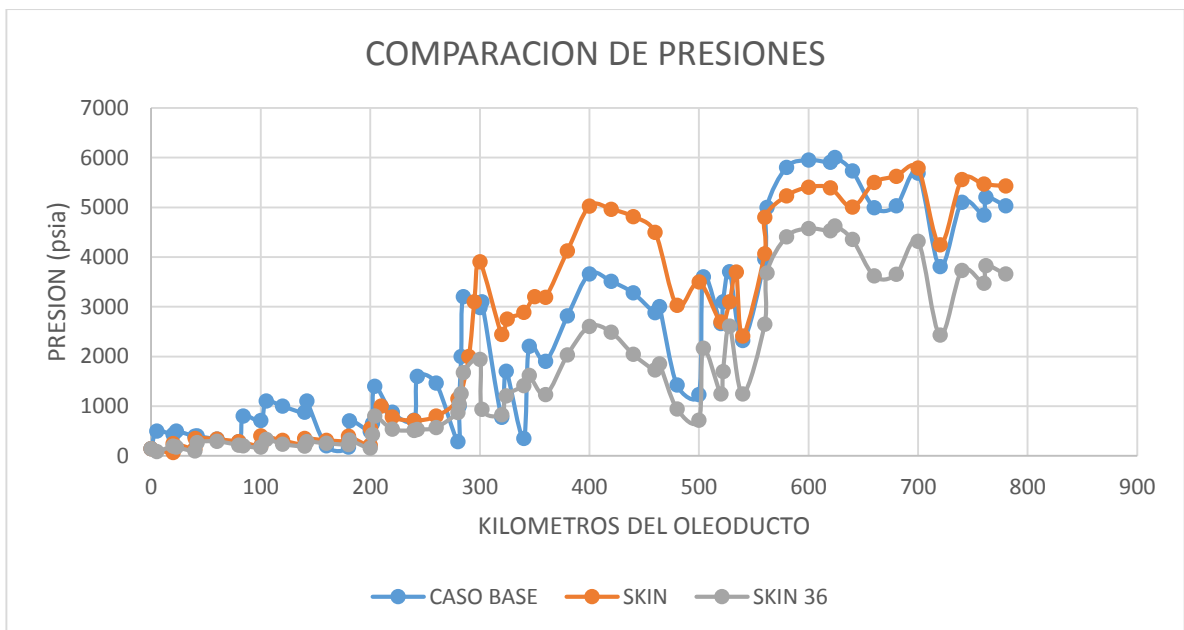
Tabla 10. Comportamiento de la presión vs distancia sin la tecnología del efecto SKIN.

Km	PSIA
0	143,6
5	500
20	423,8
23	500
40	392,1
42	400
60	336,5
80	286,3
84	800

Km	PSIA
100	708,3
105	1100
120	998,1
140	875,6
142	1100
160	200
180	173
181	700
200	489,3
202	650
204	1400
220	873,8
240	716,2
243	1600
260	1462
280	284,9
281	1000
283	2000
285	3200
300	2980
302	3100
320	773,3
324	1700
340	350
345	2200
360	1900
380	2812
400	3656
420	3509
440	3277
460	2876
464	3000
480	1423
500	1232
504	3600
520	2660

Km	PSIA
522	3100
528	3700
540	2316
560	3962
562	5000
580	5804
600	5948
620	5903
624	6000
640	5730
660	4993
680	5027
700	5688
720	3804
740	5101
760	4843
762	5200
780	5031

Figura 25. Presión vs distancia del comportamiento sin la tecnología del efecto SKIN.



Al analizar la gráfica anterior se puede observar que se manejan unos valores de presión similares en ciertos puntos de la trayectoria, pero haciendo un estudio más profundo de esta gráfica y los valores que allí contienen, podemos observar que la presión promedio que maneja la tecnología de efecto “SKIN” es de 1629.58 psia, con una infraestructura de 36 bombas, por su parte el caso base maneja 2404.94 psia de presión promedio con una infraestructura igualmente de 36 bombas. Durante el estudio se observó que con un planteamiento de 18 bombas se manejan presión promedio de 2630.08 psia similares a las del caso base.

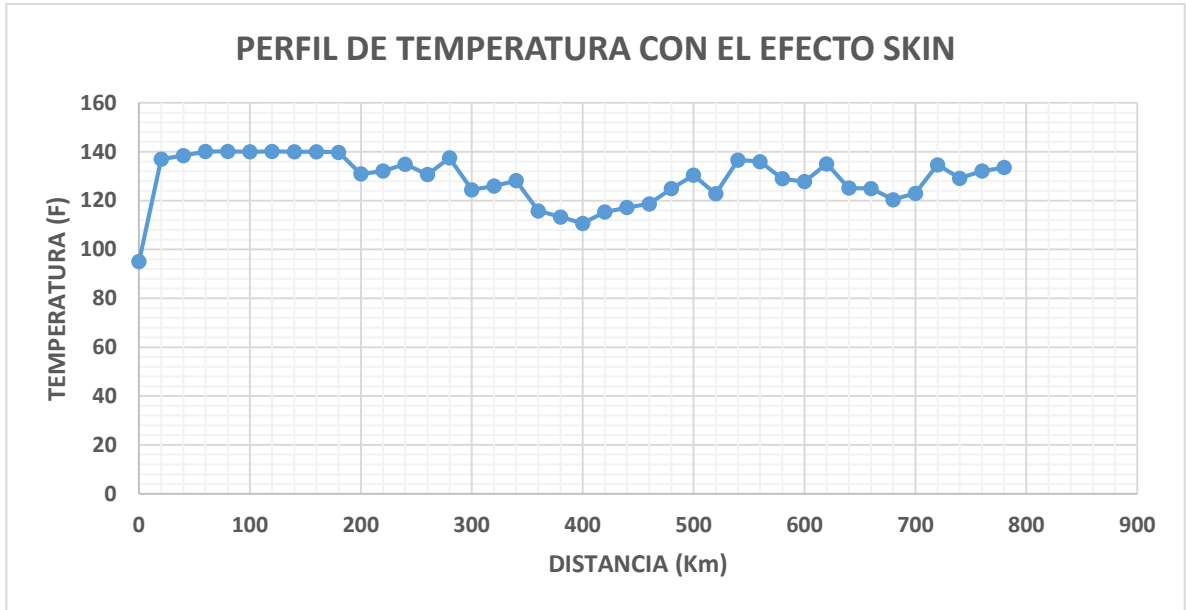
Esto permite observar que la tecnología ayuda a disminuir las pérdidas de presión durante el recorrido.

Tabla 11. Datos del perfil de temperatura vs distancia usando la tecnología skin.

Km	T (F)
0	95
20	136,962794
40	138,436293
60	140,082812
80	140,172204
100	139,941686
120	140,176762
140	139,946333
160	140,014459
180	139,78791
200	130,928147
220	132,110028
240	134,890182
260	130,669822
280	137,449217
300	124,4478
320	125,937415
340	128,147218
360	115,802507

Km	T (F)
380	113,27572
400	110,679368
420	115,335811
440	117,144265
460	118,681972
480	124,867612
500	130,406606
520	122,82835
540	136,597178
560	135,973332
580	128,961747
600	127,778303
620	135,053963
640	125,193004
660	124,981619
680	120,371148
700	122,99341
720	134,632889
740	129,135738
760	132,129084
780	133,516101

Figura 26. Grafica del perfil de temperatura usando la tecnología skin.



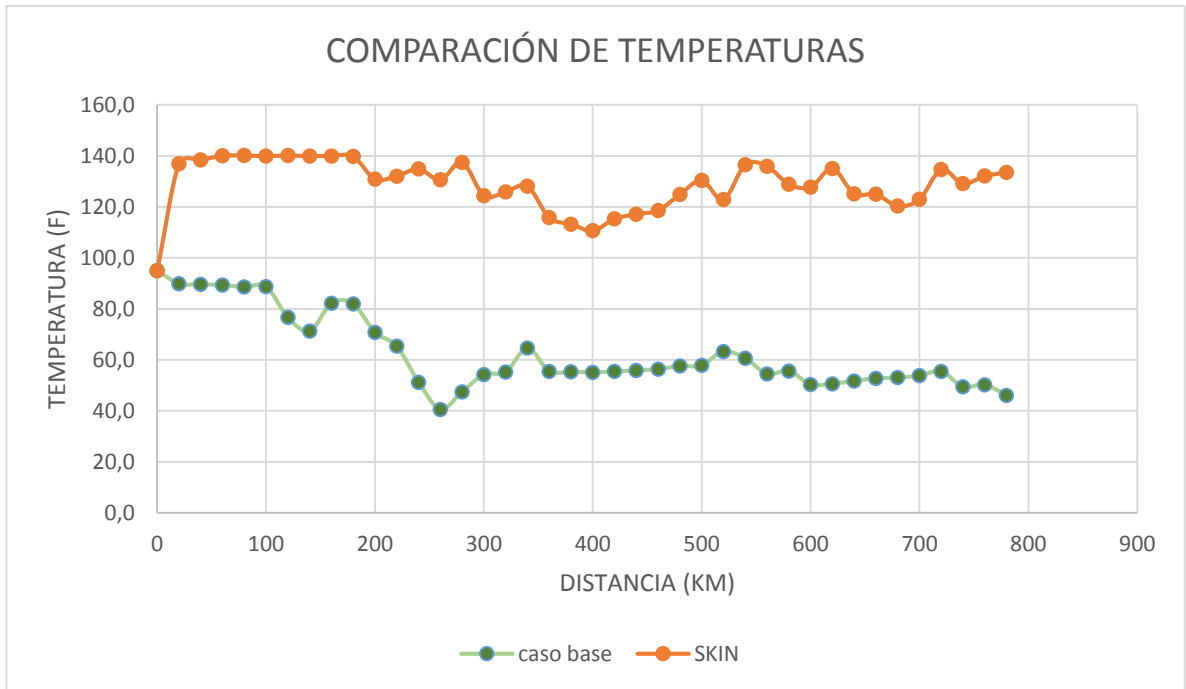
En la gráfica anterior se observa el perfil de temperatura con el cual trabaja la simulación de efecto “SKIN”. Se observa claramente como la temperatura permanece en un valor óptimo para mantener lo suficientemente caliente la tubería y a su vez el fluido que allí se encuentre, analizando los datos de la simulación se observa una temperatura promedio de 128.78 F durante todo el recorrido de la línea, valor que como lo pudimos observar en la gráfica de viscosidad nos ayuda a mantener el crudo en condiciones optimar para mejorar su desplazamiento.

Tabla 12. Perfil de temperatura vs distancia en el caso base.

Km	T (F)
0	95
20	89,939095
40	89,6606408
60	89,3822204
80	88,5865278
100	88,7582284
120	76,6976768
140	71,2726448

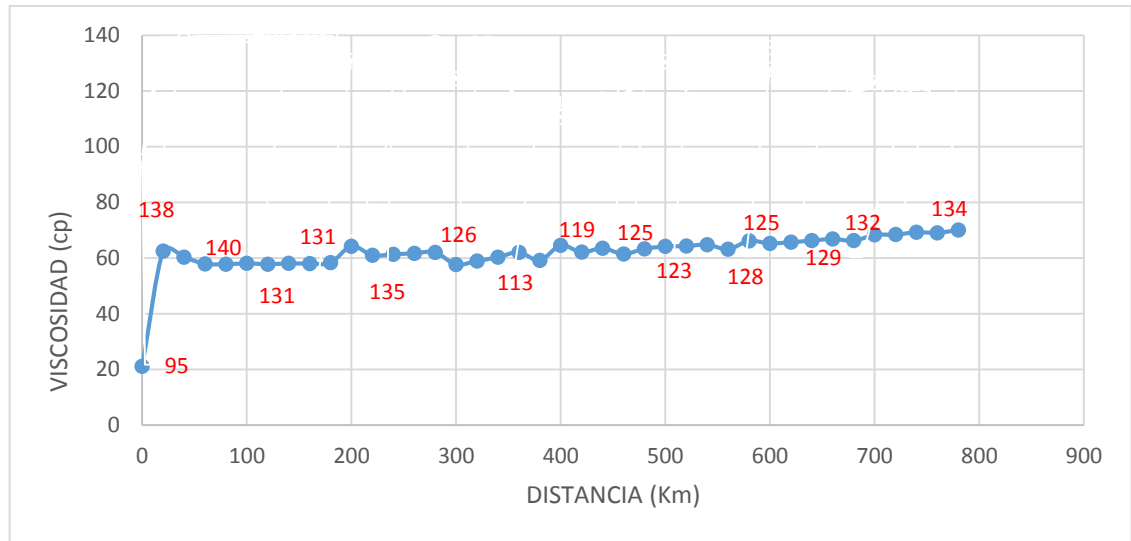
160	82,2453911
180	81,9897891
200	70,8145844
220	65,3564106
240	51,2604497
260	37,8243699
280	47,4780714
300	54,1957182
320	55,2487121
340	64,6203776
360	55,5126405
380	55,3234631
400	55,1043685
420	55,4719871
440	55,8734147
460	56,3518997
480	57,6110225
500	57,8928779
520	63,3074865
540	60,6913795
560	54,487608
580	55,6545139
600	50,3691557
620	50,6285903
640	51,7342017
660	52,6983051
680	53,0496792
700	53,8043672
720	55,441082
740	49,4774494
760	50,2140492
780	46,0971671

Figura 27. Grafica del perfil de temperatura vs distancia en el caso base.



En la gráfica anterior se puede comparar el comportamiento de temperaturas ya sea en el caso base o en la tecnología de efecto “SKIN”. Se puede observar la ventaja que tiene la tecnología “SKIN” al mantener una temperatura que optimiza el transporte de crudo por la línea esto debido a los recubrimientos térmicos que se instalan en la línea los cuales ayudan a reducir la perdida de energía del sistema.

Figura 29. Grafica del perfil de viscosidad y temperatura en cada instante.



En la gráfica anterior se puede observar de nuevo el perfil de viscosidad correspondiente a la simulación de la tecnología del efecto “SKIN”, y en rojo los valores aproximados de temperatura en ese instante.

4.CONCLUSIONES

- Se estableció por medio de la implementación de la tecnología efecto “SKIN” un precio de 11974 pesos como costo para transportar un barril de crudo a través de los 780 Km del Oleoducto al Pacífico.
- Se evidenció por medio de la simulación un aprovechamiento energético en la tecnología “SKIN” con respecto al caso base de comparación. Esto se refleja en las curvas de presión, la tecnología “SKIN” manejó una presión promedio de 1629.58 psia y el caso base obtuvo una presión promedio de 2404.94 psia.
- Conforme se desarrolló esta evaluación y analizando los datos que mostró el simulador HYSYS se pudo determinar una infraestructura de 36 bombas, 39 estaciones de transferencia con una tubería de 24” y un recubrimiento de poliuretano rígido y polietileno, para los 780 kilómetros del oleoducto al pacífico.
- La tecnología del efecto “SKIN” permitió optimizar la operación de transporte de crudo pesado, y mantuvo unos valores de viscosidad por debajo de 100 Cp, esto ayuda a que haya menos pérdidas de energía del fluido.
- Igualmente, de la bibliografía se concluyó que la tecnología del efecto “SKIN” es fácil de implementar y puede adaptarse a climas áridos

5. RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio económico-financiero, comparando la tecnología del efecto “SKIN” con otra tecnología de optimización de transporte para crudo pesado.
2. Diseñar un software para trazar curvas de viscosidad y presiones en tiempo real.
3. Estudiar nuevos materiales que ayuden a optimizar el proceso de aislamiento de la temperatura y así poder obtener mejores resultados al aplicar la tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

ANH Área crudo pesados. [en línea] Disponible en:
http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Informe_de_Propectividad.pdf

BESANÇON, Robert M. (). The Encyclopedia of Physics. Van Nostrand Reinhold Company. 1985

CAIRN INDIA LIMITED, "SKIN Effect Heat Management System". [en línea] Disponible en: <https://www.cairnindia.com/sites/default/files/technical-brochure/Technical-Brochure-SEHMS.pdf>.

CENGEL Yunes Transferencia de calor y masa enfoque práctico. [en línea] Disponible en: www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi_blog/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Yunus_Cengel_-_Tercera_Edicion.pdf

[CHROMALOX.com/-/media/files/catalog/resources/en-us/mod-sehs.pdf](http://www.chromalox.com/-/media/files/catalog/resources/en-us/mod-sehs.pdf)
<http://www.chromalox.com/es-mx/catalog/heat-trace/xtremeduty/skin-effect-heat-trace-system/skin-effect-heat-trace-system>.

DOMENICALI C. A., Stationary temperature distribution in an electrically heated conductor, Journal of Applied Physics, Vol. 25 1954

FOUILLE, André "Compendio de Electrotecnia". MARCOMBO, S.A. 1979

HYDROCARBONS TECHNOLOGY, “Mangala development pipeline project India”. [en línea] Disponible en: <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/mangala-development-pipeline-india-crude-oil>.

MARTÍN DOMINGO Agustín Apuntes de transmisión de calor. [en línea] Disponible en: <http://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>

NYE J.F., Physical properties of crystals, Oxford University Press, 1957

ODL Informe de sostenibilidad. [en línea] Disponible en: https://www.odl.com.co/odl/images/rse/pdf_files/INFORME_2014/INFORME_SOSTENIBILIDAD_2014.pdf

ODLN Oleoducto de los llanos orientales. [en línea] Disponible en: https://www.odl.com.co/odl/images/rse/INFORME_2016/Flipbook/html5forpc.html?page=0

PENTAIR THERMAL BUILDING, “Raychem SKIN Effect Heat- Tracing System”. [en línea] Disponible en: <https://www.pentairthermal.co.uk/products/engineered-products/skin-effect>

PERMA-PIPE, INC. “Installation and operation manual for SKIN Effect electrically traced piping systems”. [en línea] Disponible en: http://www.permapipe.com/uploads/products/documents/installationguides/Skin%20Effect%20Current%20Tracing_Installation%20manual.pdf

PERMAPIPE.COM/uploads/products/documents/installationguides/Skin%20Effect%20Current%20Tracing_Installation%20manual.pdf.

SANTAMARÍA, German “Electrotecnia”. EDITEX, S.A. 2009

UNET Fenómenos de transporte. [en línea] Disponible en:
http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-165.htm