

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN  
OLEODUCTO TRANSPORTADOR DE CRUDO PESADO SOMETIDO A  
CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.

NADDIA DELFINA ARENAS ZAPATA  
JAIME ANDRES ARTEAGA MONDRAGON

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

2013

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN  
OLEODUCTO TRANSPORTADOR DE CRUDO PESADO SOMETIDO A  
CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.

NADDIA DELFINA ARENAS ZAPATA  
JAIME ANDRES ARTEAGA MONDRAGON

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO DE PETROLEOS

Director

M.Sc. NELSON ENRIQUE QUINTERO VALERO  
Ingeniero de petróleos

Co-director

Ing. Andrés Felipe Cándelo Aguilar  
Ingeniero de petróleos

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

2013

## DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María por su guía y bendiciones durante toda mi carrera. A mi madre Orfelía Zapata por su apoyo incondicional sin desfallecer un solo instante, aun cuando el cielo estaba más oscuro, a mi padre José Enrique Arenas Corpas por ser mi inspiración en el cumplimiento de todas mis metas propuestas e inculcar en mí la pasión por el estudio. A mis hermanos: Natalli, José Enrique y Raphael por participar en mi educación y formación como persona y profesional con su ejemplo y dedicación. A mis familiares por creer en mí, mis primos Luis Miguel y Carolina por cuidarme al estar lejos de mi casa y enseñarme a no perderme en el camino al conocimiento.

A mis sobrinos Gabriella, Isabella y Santiago por NACER y brindarnos un rayo de luz a cada anochecer con solo una sonrisa.

A la que siempre estuvo, y ahora no está Natacha, que no dudó de mis capacidades, y apoyó cada paso y sé que aunque no te podamos ver celebras esta meta cumplida.

A todos y cada uno de mis amigos los que no me dejaron caer, los que creyeron en mí incluso cuando no veía mi horizonte e impulsaron mi carrera lejos y cerca pues hasta en la distancia sus voces llegaron a mi corazón. A Gomez por impulsar mis pasos para lograr esta gran meta.

Naddia Delfina Arenas Zapata

## DEDICATORIA

Este triunfo es dedicado a Dios por darme las fuerzas y la sabiduría para la realización de este trabajo, grande eres tú mi señor por todas tus bendiciones. A mis padres Jaime Arteaga y Stella Mondragón quienes con su amor y apoyo incondicional me motivaron para cumplir este sueño.

A mi novia Cristina Rosso, quien siempre estuvo conmigo para superar todos estos obstáculos, con tu amor siempre fue mucho más fácil, este triunfo es de los dos.

A mis hermanos Julian, Camilo, Yair, Michell, Edwin, Luz Stella con los cuales siempre cuento con ellos.

A mis amigos Naddia, Schneider, Ricardo, Gustavo por todos los buenos momentos que pasamos en la universidad de los cuales me llevo muchos recuerdos, eso nunca se olvida.

A mi hermano del alma Oscar Cuartas y a todas aquellas personas que siempre creyeron en mí y me dieron su voto de confianza.

Jaime Andrés Arteaga.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al ingeniero Nelson Enrique Quintero Valero, por su guía y apoyo incondicional para superar todas las etapas de este proyecto.

Al ingeniero Andrés Cándelo, quien con sus aportes y comentarios colaboro para la realización de este trabajo.

Al Doctor Juan Francisco Maradey, quien muy amablemente nos brindó un espacio de su tiempo para nuestras consultas y su asesoramiento ofrecido.

Al señor Edison Zuluaga, quien gentilmente nos brindó la información acerca del transporte de crudo pesado.

A la universidad industrial de Santander, alma mater quien nos formó profesionalmente, además de darnos la oportunidad de realizar y cumplir nuestras metas

## CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	22
<i>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</i> .....	24
<i>1.1 CRUDOS PESADOS</i> .....	24
<i>1.1.1 Reservas de crudos pesados</i> .....	24
<i>1.1.2 Propiedades de los crudos pesados</i> .....	26
<i>1.1.3 Viscosidad de los crudos pesados</i> .....	26
<i>1.1.4 Comportamiento de la viscosidad con la presión</i> .....	27
<i>1.1.5 Efecto de la temperatura en la viscosidad de los crudos pesados</i> .....	28
<i>1.1.6 Correlaciones para el cálculo de la viscosidad</i> .....	28
<i>1.1.7 Clasificación de los crudos pesados</i> .....	29
<i>1.2 TRANSPORTE DE CRUDOS PESADOS EN OLEODUCTOS</i> .....	30
<i>1.2.1 Métodos convencionales</i> .....	31
<i>1.2.2 Métodos no convencionales</i> .....	32
<i>1.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE OLEODUCTOS</i> .....	34
<i>1.3.1 Aspectos generales.</i> .....	34
<i>1.3.2 Características de la tubería</i> .....	35
<i>1.3.3 Aislamiento térmico en tuberías</i> .....	38
<i>1.3.4 Tuberías usadas en oleoductos</i> .....	42
<i>1.3.5 Especificaciones de tubería.</i> .....	44
<i>2. VARIABLES QUE INTERFIEREN EN EL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR</i> .....	45
<i>2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR</i> .....	45
<i>2.1.1 Los mecanismos de transferencia de calor</i> .....	45
<i>2.1.2 Transferencia de calor por conducción</i> .....	46
<i>2.1.3 Transferencia de calor por radiación</i> .....	50
<i>2.1.4 Transferencia de calor por convección</i> .....	51
<i>2.1.4.1 Región de entrada</i> .....	54

2.1.4.2	Longitudes de entrada .....	56
2.1.4.4	Análisis térmico general.....	59
2.1.4.5	Flujo constante de calor en la superficie .....	59
2.1.4.6	Temperatura superficial constante.....	61
2.1.4.7	Diferencia media logarítmica de temperatura .....	63
2.1.4.8	Número de Reynolds .....	63
2.1.4.9	Número de Reynolds en la transferencia de calor .....	64
2.1.4.10	Número de Prandtl.....	65
2.1.4.11	Número de Nusselt .....	65
2.1.4.12	Convección forzada dentro de tubos y ductos .....	66
2.1.4.13	Velocidad promedio .....	66
2.1.4.14	Temperatura promedio.....	67
2.1.4.15	Convección en flujo laminar y turbulento .....	68
2.1.4.16	Caída de presión.....	71
2.1.4.17	Pérdida de carga.....	72
2.1.4.18	Perfil de temperatura.....	74
2.1.4.19	Convección libre .....	75
2.1.5	Selección de la temperatura de referencia del fluido .....	76
2.2	CONCEPTOS ELECTRICOS GENERALES.....	77
2.2.1	Carga eléctrica.....	77
2.2.2	Voltaje.....	78
2.2.3	Corriente eléctrica.....	78
2.2.4	Resistencia eléctrica .....	80
2.2.5	Resistencias eléctricas en la industria petrolera .....	81
3.	SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.....	82
3.1	CONSTRUCCIÓN MODELO SIMULACIÓN.....	83
3.1.1	Selección de software de simulación .....	83
3.1.2	Dimensiones del modelo de simulación.....	84

3.2	COMPORTAMIENTO DE FLUJO DEL OLEODUCTO SIN CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.....	85
3.3	COMPORTAMIENTO DE FLUJO DEL OLEODUCTO CON CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.....	89
3.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN UN CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.....	92
3.4.1	Análisis de sensibilidad de coeficiente global de transferencia de calor y temperatura.....	93
3.4.2	Sensibilidad de la presión de operación.....	95
3.4.3	Sensibilidad diámetro del oleoducto .....	97
3.4.4	Sensibilidad tasa de flujo del oleoducto .....	98
	CONCLUSIONES .....	100
	RECOMENDACIONES.....	102
	BIBLIOGRAFÍA.....	104
	ANEXOS.....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reservas mundiales de petróleo. ....	25
Figura 2. Comportamiento típico de la Viscosidad vs Presión a temperatura constante .....	27
Figura 3. Gravedad API de diferentes fluidos. ....	30
Figura 4. Diagrama de Moody.....	37
Figura 5. Conductividad térmica del aislante cañuela.....	40
Figura 6. Conductividad térmica vs Temperatura media.....	42
Figura 7. Flujo radial de calor en un cilindro hueco.....	49
Figura 8. Desarrollo de la capa límite de velocidad en un tubo.....	55
Figura 9. Necesidad de potencia de bombeo para un sistema de tubos con flujo laminar .....	73
Figura 10. Representación modelo del oleoducto.....	84
Figura 11. Caída de presión de la tubería.....	86
Figura 12. Sensibilidad de la presión de operación. ....	87
Figura 13. Sensibilidad de la tasa de flujo de crudo.....	88
Figura 14. Sensibilidad del diámetro interno de la tubería. ....	88
Figura 15. Comportamiento de la presión y temperatura del petróleo en una tubería desnuda.....	90
Figura 16. Comportamiento de la presión y temperatura del petróleo con una segunda zona de calentamiento. ....	91
Figura 17. Comportamiento de la presión y temperatura del petróleo en una tubería aislada térmicamente.....	92
Figura 18. Variación de la presión a lo largo de la tubería. ....	94
Figura 19. Variación de la temperatura a lo largo de la tubería. ....	95
Figura 20. Sensibilidad de la presión de operación. ....	96
Figura 21. Sensibilidad del diámetro del oleoducto.....	97
Figura 22. Sensibilidad de tasas de petróleo. ....	99

Figura 23. Balance de energía en tubo.....	110
Figura 24. Representación del oleoducto envuelto con la resistencia eléctrica. .	116
Figura 25. Representación de la tubería recubierta con resistencia y aislante térmico.....	117
Figura 26. Figura vista trasversal del oleoducto.....	120

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de tubería. ....	44
Tabla 2. Conductividad térmica de algunos materiales.....	48
Tabla 3. Tipos de flujo.....	65
Tabla 4. Características de oleoducto.....	84
Tabla 5. Condiciones operativas el oleoducto. ....	85
Tabla 6. Coeficientes globales de transferencia d calor.....	94
Tabla 7. Valores de la presión de operación del oleoducto en la sensibilización...	96
Tabla 8. Valores de diámetros del oleoducto.....	97
Tabla 9. Valores de diámetros del oleoducto.....	98
Tabla 10. Descripción de las características del petróleo pesado. ....	108
Tabla 11. Constantes de la correlación de Hausen. ....	113
Tabla 12. Resultados cálculos del espesor aislante. ....	119
Tabla 13. Coeficientes globales de transferencia de calor.....	123

## LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXO A CÁLCULOS TEÓRICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN OLEODUCTO SOMETIDO A UN CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO</i>	<i>107</i>
<i>ANEXO B. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO .....</i>	<i>124</i>

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN OLEODUCTO TRANSPORTADOR DE CRUDO PESADO SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.\*

### **AUTORES:**

ARENAS Zapata Naddia Delfina  
ARTEAGA Mondragón Jaime Andrés \*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Calentamiento eléctrico resistivo, crudo pesado, transferencia de calor, simulación, sensibilidad, oleoducto.

### **DESCRIPCIÓN**

Es inminente el aumento de la demanda energética en el mundo, al igual que la declinación de los crudos convencionales por lo cual se hace necesario la explotación y producción de los hidrocarburos pesados, los cuales al tener una viscosidad tan alta hace que sea compleja su explotación y producción, los diferentes métodos de transporte del hidrocarburo pesado están basados en la disminución de la viscosidad para así disminuir la resistencia al flujo, entre los métodos de transporte se encuentra el calentamiento eléctrico resistivo el cual es el método de transporte no convencional en el que le transmite un flujo de calor al oleoducto por medio de resistencia eléctricas a lo largo del mismo, con el fin de disminuir la viscosidad del crudo pesado para así aumentar su capacidad de flujo. Por medio de una simulación numérica se pudo observar como es el flujo de crudo pesado en un oleoducto, las características que se involucran en el transporte del fluido y los parámetros operativos a cumplir para transportar el hidrocarburo pesado. Aplicando los conceptos de transferencia de calor y calculando el calor y distancia requerida para aumentar la temperatura del crudo pesado para la disminución de la viscosidad se hizo un análisis de sensibilidad que permitió analizar las variables que interfieren en el proceso de transferencia de calor y el transporte de crudo pesado que permitió establecer la viabilidad de la aplicación del método de calentamiento eléctrico resistivo y los parámetros operativos que se pueden establecer con la ejecución de éste método.

\* Trabajo de Grado.

\*\* Aspirantes al título de Ingeniero de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director. Ing. QUINTERO Valero Nelson Enrique. Codirector Ing. CANDELO Aguilar. Andrés Felipe

## ABSTRACT

### TITLE:

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN A PIPELINE CONVEYING HEAVY OIL SUBJECTED TO ELECTRICAL RESISTIVE HEATING \*

### AUTHORS:

ARENAS Zapata Naddia Delfina  
ARTEAGA Mondragón Jaime Andrés \*\*

### KEY WORDS:

Resistive electrical heating, heavy oil, heat transfer, simulation, sensibility pipeline.

### DESCRIPTION

Is imminent rising energy demand in the world, like the decline of conventional crude oil which is necessary to the development and production of heavy hydrocarbons, which to have such a high viscosity makes it complex exploitation and production, different transportation methods are based heavy hydrocarbon in the decrease of viscosity in order to reduce flow resistance between the transport methods is resistive electrical heating which is the not conventional method of transport in which conveys a heat flow on the pipeline by means of electrical resistance along the same, in order to lower the viscosity of heavy crude oil so as to increase their flow capacity. By means of a numerical simulation was observed as heavy oil flow in a pipeline, the features that are involved in fluid transport and operating parameters to meet to transport heavy oil. Applying the concepts of heat transfer and calculating the distance required to heat and increase the temperature of the heavy oil to lower viscosity, an analysis of sensibility which allowed analyzing the variables which interfere in the process of heat transfer and transport heavy oil could establish the feasibility of applying resistive electrical heating method and operating parameters that can be set with the execution of this method.

\* Degree Project.

\*\* Petroleum Engineers Candidates of the Industrial University of Santander. Faculty of Physical Chemistry. School of Petroleum Engineering. Director QUINTERO Valero Nelson Enrique. Codirector CANDELO Aguilar Andrés Felipe.

## NOMENCLATURA

$A$  = Área transversal para el flujo de calor,  $ft^2$ .

$A$  =: Tolerancia a la corrosión,  $\frac{pulg}{año}$ .

$B$  = Gradiente de densidad,  $1/^\circ F$ .

$C_o$  = Calor específico del petróleo,  $\frac{BTU}{lb-^\circ F}$ .

$c_p$  = Capacidad calorífica,  $\frac{BTU}{lb-^\circ F}$ .

$D_o$  = Diámetro externo de la tubería,  $pulg$ .

$D_i$  = Diámetro interno de la tubería,  $pulg$ .

$D_{aisl}$  = Diámetro aislante,  $pulg$ .

$\varepsilon$  = Rugosidad absoluta de la superficie de la pared de tubería,  $pulg$ .

$E$  = Factor de soldadura longitudinal.

$f$  = Factor de fricción para el flujo laminar completamente desarrollado para un tubo circular.

$F$  = Factor de diseño.

$G$  = Gravedad,  $\frac{ft}{sg^2}$ .

$G.E$  = Gravedad específica.

$h_L$  = Pérdida de carga.

$\bar{h}$  = Coeficiente de transferencia de calor interno promedio,  $\frac{BTU}{hr-ft^2-^\circ F}$

$\bar{h}_i$  = Coeficiente de transferencia de calor interno promedio interno,  $\frac{BTU}{hr-ft^2-^\circ F}$ .

$\bar{h}_o$  = Coeficiente de transferencia de calor interno promedio externo,  $\frac{BTU}{hr-ft^2-^\circ F}$ .

$I$  = Intensidad de corriente en amperios.

$k_{ais}$  = Conductividad térmica aislante,  $\frac{BTU}{hr-ft-^\circ F}$ .

$k_a$  = Conductividad térmica aislante,  $\frac{BTU}{hr-ft-^\circ F}$ .

$k_1$  = Constante ecuación de Hausen.  
 $k_2$  = Constante ecuación de Hausen.  
 $L$  = Longitud, *ft.*  
 $L_h$  = Longitud hidrodinámica de entrada, *ft.*  
 $L_T$  = Longitud térmica de entrada, *ft.*  
 $\dot{m}$  = Flujo másico,  $\frac{lb}{hr}$ .  
 $\overline{Nu}$  = Numero de nusselt promedio.  
 $Nu$  = Numero de nusselt.  
 $Pr$  = Numero de Prandtl.  
 $P$  = Presión, *psi.*  
 $\dot{Q}$  = Tasa de calor,  $\frac{BTU}{hr}$ .  
 $\rho$  = Densidad del fluido,  $\frac{lb_m}{ft^3}$ .  
 $Re$  = Numero de Reynolds.  
 $R$  = Resistencia,  $\Omega$  ohmios.  
 $r_o$  = Radio externo de la tubería, *pulg.*  
 $r_i$  = Radio interno de la tubería, *pulg.*  
 $S$  = Resistencia mínima a la cedencia, *psi.*  
 $T_{sup}$  = Temperatura de superficie, °F.  
 $T$  = Temperatura, °F.  
 $T_f$  = Temperatura del fluido, °F.  
 $T_{ri}$  = Temperatura radio interno, °F.  
 $T_{ro}$  = Temperatura radio externo, °F.  
 $T_{ais}$  = Temperatura aislante, °F.  
 $T_{amb}$  = Temperatura ambiente, °F.  
 $T_{prom}$  = Temperatura promedio, °F.  
 $T_m$  = Temperatura media o promedio, °F.  
 $T_i$  = Temperatura entrada, °F.  
 $T_e$  = Temperatura salida, °F.

$T_2$  = Temperatura a la que se desea calentar el petróleo, °F.

$T_1$  = Temperatura ambiente, °F.

$\Delta T_{lm}$  = Diferencia media logarítmica, °F.

$t$  =: Espesor de la pared de la tubería, *pulg.*

$U$  = Coeficiente global de transferencia de calor,  $\frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ .

$U_{ro}$  = Coeficiente global de transferencia de calor tubería desnuda,  $\frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ .

$U_{aisl}$  = Coeficiente global de transferencia de calor tubería desnuda,  $\frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ .

$U$  = Tasa volumétrico,  $\frac{ft^3}{hr}$ .

$u_{max}$  = Velocidad máxima,  $\frac{ft}{sg}$ .

$v_{prom}$  = Velocidad promedio,  $ft/s$ .

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido,  $\frac{ft^2}{sg}$ .

$V$  = Es la diferencia de potencial en voltios.

$\gamma$  = Esfuerzo de corte, en  $\frac{ft^2}{seg}$ .

$\mu_o$  = Viscosidad el petróleo, *centipoise*.

$\mu_{prom}$  = Viscosidad a temperatura promedio del fluido, *centipoise*.

$\mu_{sup}$  = Viscosidad a temperatura de superficie de la tubería, *centipoise*.

$\alpha$  = Difusividad térmica,  $\frac{ft^2}{sg}$ .

$\frac{dT}{dx}$  = Gradiente de temperatura.

$\frac{dP}{dx}$  = Gradiente de presión.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día la industria petrolera se encuentra frente a un gran desafío, el de encontrar la solución al problema de auto eficiencia energética que se presenta por la disminución de la producción de crudo convencional y por la no restitución de reservas en el mundo del mismo, los altos precios del crudo y la necesidad de buscar otras fuentes energéticas hacen atractivos la explotación de yacimientos de crudo pesado. Las reservas probadas de los yacimientos de crudo pesado constituyen 3 veces las reservas de petróleo convencional en el mundo, pero anteriormente se había ignorado este tipo de crudo por las dificultades que presenta en la producción, transporte y refinación. Pero hoy en día su explotación es rentable y se puede ver como un recurso que va desempeñar un rol muy importante en la industria.

Colombia ha experimentado un aumento en las reservas y producción de crudos pesados en la cuenca de los Llanos Orientales y en el Magdalena Medio, cuenta con un campo con gran proyección como es Rubiales ubicado en los Llanos Orientales y extrae en promedio 205 mil barriles por día por lo cual se hace evidente la necesidad de aplicar nuevas tecnologías y metodologías para afrontar la nueva demanda de hidrocarburos pesados en el país.

El mayor desafío para la explotación de los crudos pesados radica en su movilidad, lograr que este tenga una mayor capacidad de flujo a través de tuberías, ya que al poseer una viscosidad tan alta impide un mayor movimiento a lo largo de los oleoductos; por esto se busca y se ensayan técnicas que estén enfocadas a disminuir la viscosidad del crudo para optimizar su transporte. Estas técnicas se pueden diferenciar entre métodos convencionales y no convencionales desarrolladas a lo largo de los años teniendo en cuenta la necesidad de mejorar el transporte del hidrocarburo y basándose en prácticas y conceptos ingenieriles,

pero las cuales tienen un interés en común aumentar la capacidad de flujo en el transporte del crudo pesado. Uno de los sistemas de tratamiento para el transporte de crudo pesado, es la implementación de resistencias eléctricas a largo del oleoducto. Las resistencias eléctricas emiten un flujo de calor sobre el oleoducto, aumentando la temperatura del crudo dando como resultado una disminución de su viscosidad y mejorando el transporte.

El calentamiento eléctrico resistivo al ser un tratamiento no convencional para el transporte de crudo pesado en este caso aplicado a un oleoducto, hace necesario investigar más sobre su ejecución analizar los parámetros que intervienen en el proceso de desarrollo del mismo, las ventajas y dificultades que presenta, desde lo operacional hasta lo económico, por consiguiente se analizara la aplicación de este método por medio de una simulación numérica donde se pueda observar el comportamiento que presenta la viscosidad del fluido en función de la temperatura por la aplicación de resistencias eléctricas a lo largo de un oleoducto y como se ve afectada la movilidad del petróleo; si aumenta la capacidad de flujo, y si es operacional viable la ejecución este tratamiento para la industria.

# 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 1.1 CRUDOS PESADOS

El crudo pesado está definido como la fracción de hidrocarburo con una gravedad API entre 8-19, comparados con los crudos convencionales poseen una alta viscosidad desde 20 cP [0.02 Pa.s] y más de 1,000,000 cP [1,000 Pa.s]<sup>1</sup> lo que hace que el transporte del mismo sea tan costoso y complejo, razones por la cual no representaba un atractivo económico la explotación de este tipo de crudo.

Al tener una viscosidad y punto de fluidez elevada, el transporte de crudo pesado por oleoducto requiere que el aceite tenga determinadas características en condiciones de tubería.<sup>2</sup>

1. Encontrarse en una temperatura por encima de la del punto de fluidez
2. Estar con una viscosidad suficientemente baja, de tal manera que los requerimientos de bombeo sean mínimos y económicos.

### 1.1.1 Reservas de crudos pesados

El petróleo pesado generalmente se dejaba al lado como recurso energético debido a las dificultades y costos asociados con su producción, en la actualidad gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas de recuperación y transporte, al igual que la disminución de los crudos livianos, la explotación del hidrocarburo pesado se ha convertido en una valiosa inversión para la industria petrolera

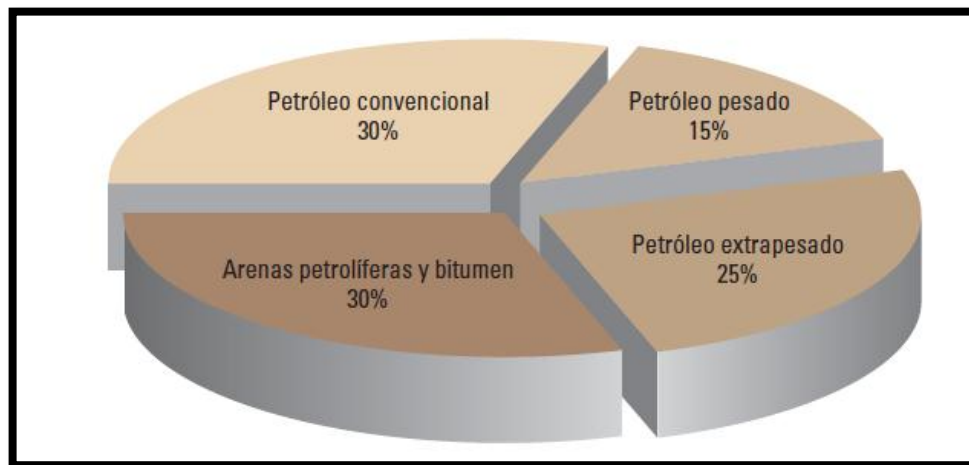
---

<sup>1</sup> ALBOUDWAREJ, Hussein, FELIX, Joao. "La importancia del petróleo pesado". Oilfield Review. Pág. 39. Otoño de 2006

<sup>2</sup> ARCE, Gloria, HERNANDEZ, Luis. "Estudio y Análisis de las Principales Técnicas Utilizadas para el Transporte de Crudo Pesado por Oleoducto". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 1985.

El petróleo pesado, el petróleo extrapesado y el bitumen conforman aproximadamente un 70% de los recursos de petróleo totales del mundo, que oscilan entre 9 y 13 trillones de barriles.

**Figura 1.** Reservas mundiales de petróleo.



Fuente: Hussein Alboudwarej, Joao (John) Felix “La importancia del petróleo pesado”. Oilfield Review, otoño de 2006

En Colombia, como parte de la estrategia de Ecopetrol S.A., al año 2020 la producción de crudos pesados es uno de los pilares de crecimiento en la producción de la empresa. Los campos del bloque Cubarral, principalmente Castilla y Chichimene, de operación directa; Nare–Teca, en asociación con la compañía Mansarovar (conformada por Sinopec de China y ONGC de la India); y Rubiales y Quifa, operado por Metapetroleum, son el eje de este objetivo estratégico. Rubiales, Quifa, Castilla y Chichimene se localizan en la Cuenca Llanos Orientales, y Nare–Teca en el Valle Medio del Magdalena.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> <http://www.minminas.gov.co>

### 1.1.2 Propiedades de los crudos pesados

Los crudos pesados son el producto que se genera en el yacimiento debido al proceso químico de oxidación bacteriana de los crudos convencionales, estos poseen diversas propiedades físicas y químicas presentadas a continuación:

- Baja Gravedad API
- Alta viscosidad
- Alto punto de fluidez: 80 °F – 100 °F
- Alto contenido de asfáltenos
- Alto contenido de azufre y nitrógeno
- Baja relación gas aceite
- Salinidad del crudo
- Producción de arena

### 1.1.3 Viscosidad de los crudos pesados

Es la medida a la resistencia de flujo de un fluido cuando se le es aplicada una fuerza externa. La viscosidad juega un papel muy importante en el transporte de hidrocarburo ya que esta indica directamente el grado de facilidad o complejidad con que el crudo se desplaza en el oleoducto calificando o certificando que la técnica que fue implementada.

En general, la viscosidad del petróleo disminuye con el aumento de temperatura. La reducción es mayor entra más viscoso sea el petróleo.

La viscosidad se clasifica en:

**Viscosidad absoluta o dinámica:** es la propiedad de los fluidos que indica la mayor o menor resistencia que estos ofrecen al desplazamiento o las deformaciones internas. Se da en unidades de poise en el sistema CGS.

**Viscosidad cinemática:** se mide por el tiempo que gasta el volumen dado del fluido en pasar a través de un capilar sumergido en un baño de temperatura

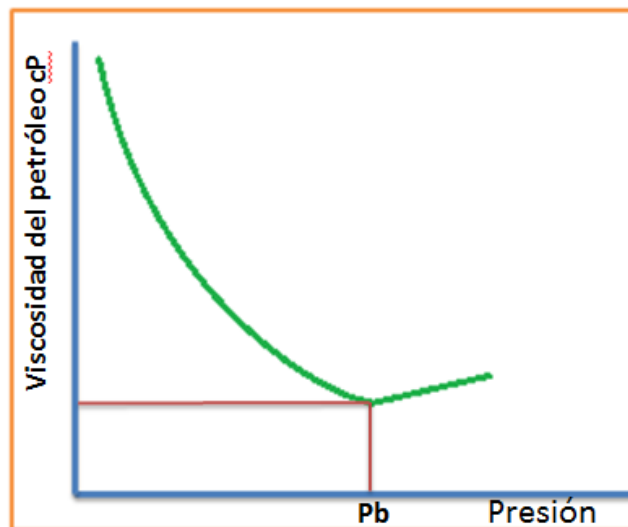
constante, bajo un diferencial de presión determinado, generalmente, por la altura de la columna en el capilar<sup>4</sup>.

Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad, se da en unidades de Stokes en el sistema CGS.

#### 1.1.4 Comportamiento de la viscosidad con la presión

En el caso del petróleo deben distinguirse dos tipos de viscosidad: viscosidad de un petróleo sin gas en solución, y viscosidad de un petróleo a determinada presión y temperatura llevando consigo la cantidad de gas, que puede disolverse en esas condiciones (Rs). Para la presión del crudo en el primer caso aumenta la viscosidad y en el segundo la disminuye, ya que el efecto de la disminución de la viscosidad por gas en solución es solución es mayor que el efecto por compresibilidad del petróleo.<sup>5</sup>

**Figura 2.** Comportamiento típico de la Viscosidad vs Presión a temperatura constante



**Fuente:** Modificada (Correlaciones Numéricas) por Carlos Banzer.

<sup>4</sup> GOMEZ, Luis. "RECUPERACION MEJORADA DE HIDROCARBUROS INYECCION CICLICA Y CONTINUA DE VAPO". Publicación Universidad Industrial de Santander. 1989.

<sup>5</sup> BANZER, Carlos. "Correlaciones Numéricas P.V.T". Universidad de Zulia, Instituto de Investigaciones Petroleras, Fundación Laboratorio de Servicios Técnicos Petroleros. Maracaibo, Enero de 1996.

### 1.1.5 Efecto de la temperatura en la viscosidad de los crudos pesados

Se puede decir que el mayor problema que enfrenta el transporte de crudos pesados es la viscosidad que posee este tipo de hidrocarburo. La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia interna al movimiento de un fluido por razón de las fuerzas de cohesión entre moléculas o grupos moleculares.

En los crudos pesados la temperatura produce un cambio drástico en la viscosidad absoluta del mismo esto debido a que la estructura molecular de los crudos pesados es inestable por lo tanto esta puede ser alterada por los cambios mínimos de temperatura.

Generalmente se puede alcanzar una reducción del 90% al incrementar en 100 °F la temperatura de los crudos a partir de la temperatura ambiente.

Para determinar la viscosidad de un fluido se recurre a correlaciones que dependen de la temperatura del mismo.

### 1.1.6 Correlaciones para el cálculo de la viscosidad

- Ecuación Egbogah-Jacks modificada<sup>6</sup>

➤ Crudos extra pesados

$$\mu_{od} = (10)^{10(1.90296 - 0.0122619 \cdot \text{API} - 61748 \cdot \log(T))} - 1 \quad (1)$$

➤ Crudos pesados

$$\mu_{od} = (10)^{10(2.06492 - 0.0179 \cdot \text{API} - 0.7022 \cdot \log(T))} - 1 \quad (2)$$

---

<sup>6</sup> M.S. Hossain, C.Sarica, H. Q. Zhang "Assesment and Development of Heavy-Oil Viscosity Correlations". Society of Petroleum Engineers. 2005. Pág 19

- **Benninson<sup>7</sup>**

$$\mu_{od} = 10^{(0.10231*API^2 - 3.9464*API + 43.5037)} * T^{(-0.04542*API^2 + 1.70405*API - 19.18)}$$

(3)

- **Correlación M.S. Hossain<sup>8</sup>**

$$\mu_{od} = 10^{(-0.71523API + 22.13766)} * T^{(0.269024API - 8.268047)}$$

(4)

### 1.1.7 Clasificación de los crudos pesados

Los crudos pesados se pueden clasificar dependiendo de las cantidades relativas de cera y asfaltos que estos contengan, así:

1. Crudos ligeramente parafínicos: contenido de ceras ligeramente bajo
2. Crudos parafínicos: crudos con alto contenido de cera y un relativamente bajo contenido de asfaltos en el residuo.
3. Crudos nafténicos o asfálticos: son crudos con pequeñas cantidades de cera y alto contenido de asfalto en el residuo.
4. Crudos aromáticos: crudo con alto contenido de aromáticos

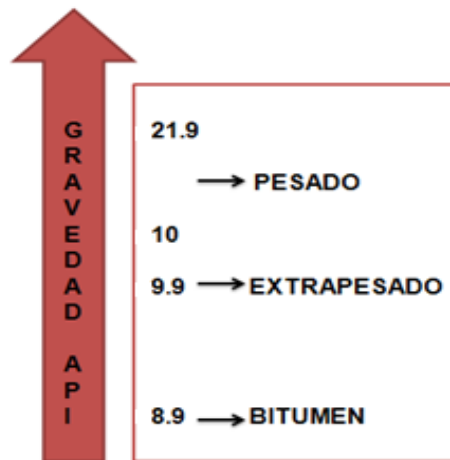
---

<sup>7</sup> M.S. Hossain, C.Sarica, H. Q. Zhang "Assesment and Development of Heavy-Oil Viscosity Correlations". Society of Petroleum Engineers. 2005. Pág 10

<sup>8</sup> M.S. Hossain, C.Sarica, H. Q. Zhang "Assesment and Development of Heavy-Oil Viscosity Correlations". Society of Petroleum Engineers. 2005. Pág. 6

Este tipo de hidrocarburo también puede ser clasificado teniendo en cuenta su gravedad API:

**Figura 3.** Gravedad API de diferentes fluidos.



Fuente: el autor.

## 1.2 TRANSPORTE DE CRUDOS PESADOS EN OLEODUCTOS

Es de conocerse que en la actualidad de la industria petrolera se están asumiendo nuevos retos y desafíos en la producción de hidrocarburos, esto causado por la declinación de los crudos convencionales los cuales cuentan con un proceso menos complejo en cuanto al tratamiento que este requiere, frente al crudo pesado.

Se ha catalogado como crudo pesado, al tipo de petróleo con un grado *API* menor de 20, el cual no fluye con rapidez gracias a la alta viscosidad que posee; como se puede analizar al tener una resistencia de flujo tan alta, anteriormente se omitía, o no era de mayor importancia su explotación, ya que requiere un alto costo en producción y transporte, Ante la nueva situación en la

que se enfrenta el mundo energético, la depleción de los crudos, se toma una nueva posición, la de generar herramientas, métodos, proyectos que sean de ayuda para no enfrentar una déficit, en el abastecimiento de hidrocarburos, para implementar cada una de estas nuevas técnicas o ideas es necesario tener en cuenta ciertos factores significativos:

1. Uso final y destinación del crudo.
2. Disponibilidad de combustible y energía eléctrica en el trazado.
3. Disponibilidad de un disolvente.
4. Propiedades físicas y químicas de la emulsión.
5. Acceso de vías.
6. Inversión contra costos de operación.

El transporte del crudo pesado se ve influenciado directamente por la elevada viscosidad que posee por lo tanto se recurre a la aplicación de diferentes técnicas convencionales y no convencionales.

### **1.2.1 Métodos convencionales**

#### **Método de calentamiento**

La viscosidad del fluido disminuye con el aumento de temperatura al que este se encuentre sometido, en los crudos pesados gracias a su inestabilidad molecular los cambios de temperatura afectan abruptamente al fluido reduciendo la viscosidad y optimizando el flujo en tubería.

El método de calentamiento consiste en mejorar la viscosidad del crudo, precalentándolo a una temperatura no mayor de 200 °F para evitar gasificación, cavitación de las bombas y deterioro del aislante si la tubería fuera recubierta. Dependiendo de la tubería, en algunas ocasiones es necesario instalar estaciones de recalentamiento, debido a la pérdida de calor que el crudo cede en su movimiento, produciendo un aumento de la viscosidad.

La viabilidad de la aplicación del método de calentamiento, está directamente relacionada con los costos operativos y a la disponibilidad de energía térmica. A medida que se requiera de etapas de calentamiento, para reducir el coste de bombeo, el costo por calentamiento se verá incrementado. Así pues esta técnica la define generalmente por el análisis económico determinado en el campo<sup>9</sup>

### **Método de dilución**

Consiste en la mezcla de un crudo pesado con uno liviano o con un solvente al realizar este procedimiento la estructura molecular del crudo original sufre cambios, por lo cual adquiere una estructura intermedia con distancias moleculares mayores, disminuyendo así la viscosidad y densidad del crudo original.

Los diluyentes más usados para la aplicación de este método son los crudos livianos, nafta, gasolina natural entre otros, para la realización de esta técnica es necesaria una relación aproximada de 20-30% lo cual puede evitar en ocasiones altas caídas de presión o ahorrar la necesidad de recurrir a altas temperaturas, facilitando las operaciones de deshidratación y desalado. Usar dilución como método para modificar las propiedades del crudo pesado sería un método viable, sin embargo varias reservas de crudo pesado están localizadas en áreas remotas, donde no hay diluyente disponible<sup>10</sup>.

## **1.2.2 Métodos no convencionales**

### **Emulsificación**

Una emulsión es una mezcla heterogénea de dos líquidos inmiscibles. Uno de los líquidos de la mezcla en fase dispersa y el otro en forma de pequeñas gotas.

---

<sup>9</sup> DOMÍNGUEZ, J.C.v "Transporte de crudo pesado a través de oleoducto, Evaluación de diferentes tecnologías" Ingeniería Química No.465 (2008) p. 54-65.

<sup>10</sup> ARCE, Gloria, HERNANDEZ, Luis. "Estudio y Análisis de las Principales Técnicas Utilizadas para el Transporte de Crudo Pesado por Oleoducto". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 1985.

El líquido que representa la fase acuosa (*W*) es altamente polar y su naturaleza es hidrofílica. El otro líquido es de naturaleza lipofílica (*O*) y representa la fase oleica de la emulsión<sup>11</sup>.

Las emulsiones se pueden clasificar dependiendo la fase continua de la emulsión:

### **Emulsión normal**

En este tipo de emulsión el aceite se encuentra en fase continua y el agua en pequeñas gotas formando la fase dispersa se dice que hay agua en crudo (w/o)

### **Emulsión inversa**

La fase continua es el agua y el aceite se encuentra en pequeñas gotas conformando la fase dispersa; se dice que hay crudo en el agua (o/w)

En este método de transporte se busca disminuir la viscosidad con un alto contenido de crudos pesados a unas determinadas proporciones de aceite en agua (emulsión normal), para que se logre la emulsión se necesita energía (sistemas de agitación, rotor-estator), al igual que la adición de modificadores de tensión interfacial y energía mecánica.

### **Flujo Anular (CAF)**

En esta técnica de transporte, el crudo fluye en un oleoducto rodeado con una película de agua, la cual actúa como lubricante mejorando la fluidez del crudo, y reduciendo la caída de presión a causa de la fricción. Se basa en la introducción de una película de agua al interior de la tubería, el fluido núcleo interno es el crudo pesado, lo que conlleva a un gradiente de presión longitudinal reducido por lo cual se presenta una caída de presión total similar al del agua en movimiento.

---

<sup>11</sup> LEON, Jhon. "Guía Práctica Laboratorio de Fluidos". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2011.

Este método presenta problemas operacionales ya que se presenta inconsistencia con la capa de agua, debido a que el hidrocarburo tiende adherirse a la tubería, provocando bloqueo en el sistema de flujo<sup>12</sup>.

### 1.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE OLEODUCTOS

Un oleoducto es un sistema para transportar petróleo a través de una red de tuberías la cual parte de los campos de producción a las refinerías y de estas a los centros de consumo y transporte.

Clases:

- Oleoductos: fluido que transporta es petróleo.
- Gaseoductos: fluido que transporta es gas.
- Poliductos: transporta varios productos.

#### 1.3.1 Aspectos generales.

**Capacidad de la línea:** tasa de flujo para llenar la línea Volumen/Tiempo; la máxima capacidad de la línea es el flujo cuando la presión de trabajo en la estación de bombeo es la más alta permisible para una separación segura.

**Tiempo de Pasaje:** Tiempo que tarda el frente de un bombeo en ir desde la estación de despacho hasta la de recibo.

**Presión requerida para el flujo a través de la tubería:** la pérdida de presión en la línea puede ser causada por:

- Resistencia a la fricción de la superficie interna de la tubería
- Viscosidad del fluido
- Gravedad específica o densidad
- Perdidas especiales como:

Entrada de tubería

---

<sup>12</sup> CUBIDES L., PEÑA P.v “Sensibilidad de las variables operacionales en el transporte de crudo pesado” [Tesis de Pregrado] Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2009.

Cambio de diámetro de tubería

Obstrucciones debido a accesorios, medidores, raspadores o sedimentos en línea

Para computar la tasa de flujo a través de la tubería se debe conocer:

- Diámetro de tubería
- Longitud de la línea
- Diferencia de la elevación
- Presión de operación
- Viscosidad del líquido

**Gradiente hidráulico:** es un perfil mostrando la presión o cabeza en cualquier punto a lo largo de la línea, si se habla de un flujo de líquido con velocidad uniforme y diámetro constante a lo largo de una tubería, el gradiente hidráulico sería una línea recta, que solamente representaría la pérdida de presión debido a la fricción presente en el medio.

**Bombas:** la selección del tipo de bombas en los oleoductos depende de parámetros como:

- Tasa de flujo
- Presiones requeridas
- Condiciones de succión y descarga
- Limitaciones de espacio
- Tipo de fluido a bombear

### 1.3.2 Características de la tubería

Hay tres parámetros que se deben considerar en el diseño:

**Diámetro interno:** cuando el diámetro interno de la tubería disminuye, la pérdida de presión debido a la fricción se incrementa drásticamente siempre y cuando el

diámetro más pequeño al igual que el más grande estén manejando el mismo flujo.

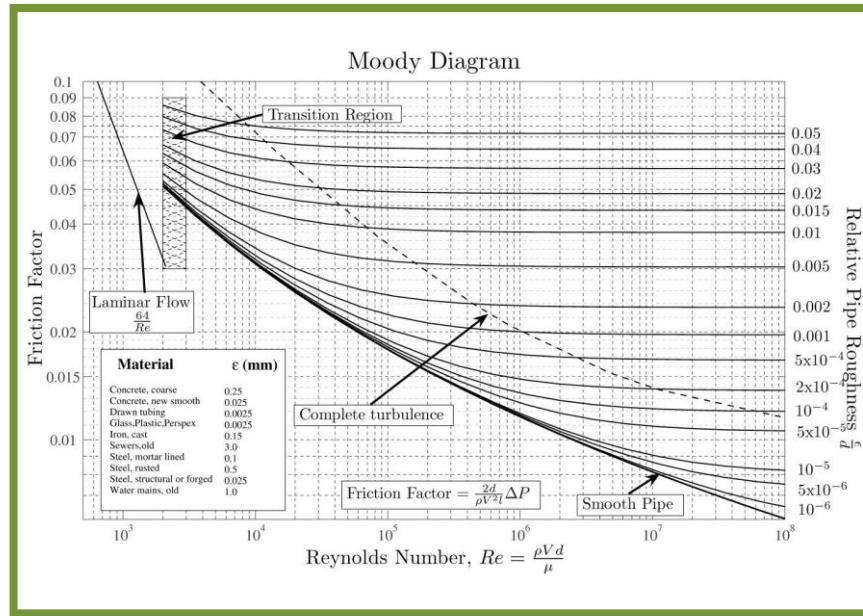
**Longitud de la tubería:** entre mayor sea la longitud de un segmento en un oleoducto, mayor será la caída total de presión a través de ese segmento. En consecuencia la pérdida de la presión por fricción para una tasa de flujo dada varía directamente con la distancia entre dos estaciones

**Rugosidad interna de la tubería:**

**El factor de fricción:** es determinado experimentalmente mediante la correlación del Número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería con la fricción del fluido dentro de la tubería. A medida que la rugosidad de la pared interna de la tubería se incrementa, el factor de fricción aumenta para condiciones de flujo turbulento

**Diagramas de Moody:** relaciona el factor de fricción  $f$ , con los dos parámetros adimensionales, el Número de Reynolds,  $Re$ , y la rugosidad relativa de la pared interna de la tubería,  $e/D$ . los factores de fricción usualmente son seleccionados de una gráfica (**figura 4**)

**Figura 4.** Diagrama de Moody.



**Fuente:** <http://es.scribd.com/doc/94325078/Fundamentos-Para-El-Diseno-de-Oleoductos>

La rugosidad relativa está definida como la relación de rugosidad absoluta de la pared de la tubería (una medida de la altura promedio de las “protuberancias (imperfecciones)” en la superficie de la pared de la tubería) y el diámetro interno de la tubería

$$\text{rugosidad relativa} = \frac{\epsilon}{D} \tag{5}$$

$\epsilon$  = Rugosidad absoluta de la superficie de la pared de tubería (in)

$D$  = Diámetro interno de la tubería (in)

### 1.3.3 Aislamiento térmico en tuberías

El aislamiento térmico es utilizado para reducir las pérdidas la disipación de energía al medio al cual no se desea transmitir. El aislamiento es utilizado para mantener estable la temperatura del crudo y evitar que se pare el bombeo por incremento de la viscosidad.

El crudo debe alcanzar una temperatura de 65 °C (149 °F), para ser bombeado por tuberías hasta instalaciones de filtrado. El aislamiento es utilizado para mantener estable la temperatura del crudo y evitar que se pare el bombeo por incremento de la viscosidad<sup>13</sup>

Para su selección la capa de aislante térmico debe ser capaz además de sus características de aislamiento, puede requerir resistencia al ataque químico resistencia a la abrasión, etc., esto condiciona la elección del aislamiento no solamente por su temperatura máxima de trabajo.

Una buena clasificación se puede realizar en función de la temperatura máxima de trabajo como se indica a continuación:

- Productos refractarios densos.
- Productos refractarios aislantes.
- Productos aislantes no refractarios (hasta 800 °C – 1000°C).
- Productos calorífugos.
- Fibras cerámicas.

**Productos refractarios densos:** son materiales que resisten temperaturas elevadas. En estos materiales no se pueden hablar de temperatura de fusión por realizarse en una amplia gama de temperaturas (fusión pastosa).

---

<sup>13</sup> FIBERGLASS en Campo Rubiales – Pacific Rubiales Energy. Aislamiento térmicos en el principal yacimiento de crudo pesado. Octubre de 2010.

**Productos de sílice:** deben contener, de acuerdo con la clasificación un mínimo de 93 por 100 de sílice pura ( $\text{SiO}_2$ ). Por la acción del calor la sílice pura se transforma en:

- Tridimita por encima de los  $867^\circ\text{C}$  hasta  $1.470^\circ\text{C}$
- Cristobalita por encima de los  $1.470^\circ\text{C}$  hasta  $1.725^\circ\text{C}$
- Sílice fundida a partir de los  $1.725^\circ\text{C}$

Una propiedad importante de la sílice es su coeficiente de dilatación térmica, que es prácticamente nulo a partir de los  $600^\circ\text{C}$ .

**Productos aislantes no refractarios:** Los materiales más importantes a utilizar son:

- La sílice fósil o diatomita (y los materiales derivados).
- El carbonato de magnesio.
- Las fibras minerales (lana de vidrio, de escoria, de roca).
- La vermiculita.
- La arcilla y la perlita expandidas.
- El silicato cálcico.

**Sílice fósil o diatomita:** llamada también harina fósil, harina de sílice, tierra de moler, etc. Los depósitos de sílice fósil son generalmente friables y pulverulentos. Se utilizan bien en forma de polvo para formar borras y mantas aislantes, bien en forma de ladrillos o piezas especiales. Su densidad varía desde 200 a  $800 \text{ kg/m}^3$  en ladrillos o bloques, su conductividad térmica desde  $0,07 \text{ W/mK}$  a  $100^\circ\text{C}$  hasta  $0,25 \text{ W/mK}$  a  $700^\circ\text{C}$ .

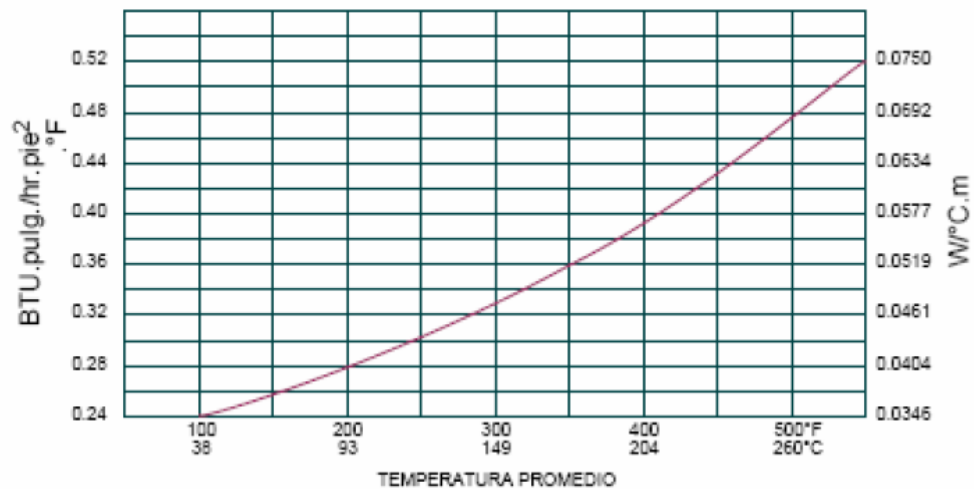
**Carbonato de magnesio:** el carbonato de calcio pulverulento, muy ligero y muy aislante bajo esta forma, se mezcla con fibras de diversos materiales, además de otras sustancias ligantes. Este carbonato se descompone a partir de los  $300^\circ\text{C}$ , lo que limita a su temperatura de empleo.

**Lanas minerales:** a partir de vidrio fundido, de rocas naturales fundidas y de escorias metalúrgicas se fabrican las fibras o lanas correspondientes. Las fibras obtenidas pueden tener, además de un alto contenido de sílice, una buena resistencia a la corrosión química y soportar temperaturas relativamente elevadas (700°C).

Se utilizan en borras preparadas de antemano bajo diversas formas y espesores. Las formas moldeadas pueden ser coquillas, placas, barras de diferentes diámetros, etc. Pueden ser flexibles, rígidos o semirrígidos.

Las lanas minerales, cuyas cualidades han mejorado enormemente en los últimos años, constituyen hoy uno de los mejores aislamientos. Además de sus propiedades de aislamiento térmico, tiene la ventaja de su combustibilidad y su capacidad de aislamiento sónico.

**Figura 5.** Conductividad térmica del aislante cañuela



Fuente: [www.fiberglasscolombia.com](http://www.fiberglasscolombia.com)

**Fibras cerámicas de alta temperatura:** mientras que las lanas minerales no pasan de temperatura máxima de 700°C y no resisten además la acción directa de

las llamas, las fibras cerámicas se han desarrollado en los últimos años y se han utilizado ampliamente en aislamientos de cara caliente y temperaturas máximas hasta de 1.500°C.

Para su fabricación se funden materiales aluminosos de diversos contenidos de alúmina y zircona, y en el vertido se produce la fibrilización por soplado con aire comprimido o vapor o centrifugado, dando lugar a este segundo procedimiento a la formación de fibras más largas y de menor cantidad de polvo.

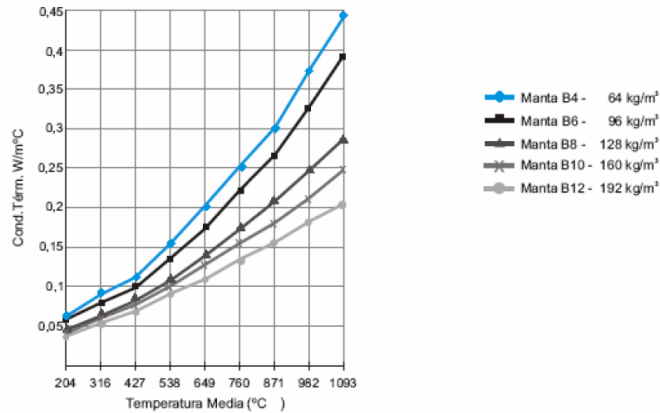
Normalmente se fabrica en cuatro calidades bajo diferentes contenidos de  $Al_2O_3$ . Se aglomeran en mantas de varias densidades comprendidas entre 50 y 130  $Kg/m^3$ , aunque se suministran en forma de borra, papel, cartón fieltro húmedo, pieza de forma, etc. En la figura 6 se señalan las conductividades térmicas de las mantas de fibra en función de la temperatura. Tiene un calor específico medio de 1,13Kj/Kg\*K. Sus propiedades principales son:

- Rendimiento térmico elevado, por su baja conductividad térmica y su reducida capacidad de acumulación de vapor.
- Facilidad de instalación y de reparación, mucho mayor que las construcciones a base de ladrillos o masas refractarias.
- Resistencia muy elevada al choque térmico, por su propia naturaleza fibrosa que permite calentamientos y enfriamientos sin limitación de velocidad<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> GUERRERO Adriana, VACA Luis. "Mejoramiento (upgrading) de crudos pesados y extra - pesados por inyección de vapor sobrecalentado y catalizadores en oleoductos (Tuberías)". Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2007.

**Figura 6.** Conductividad térmica vs Temperatura media



Fuente: [www.unifrax.com.br](http://www.unifrax.com.br)

### 1.3.4 Tuberías usadas en oleoductos

Las tuberías que transportan actualmente el crudo pesado en el mundo se clasifican en diferentes categorías<sup>15</sup>.

- Tuberías de grandes diámetros y longitud que fueron diseñadas para transportar crudos convencionales o ligeros.
- Tuberías de gran diámetro y longitud diseñadas para operar con crudos pesados
- Tuberías de diámetro menor y de longitud más corta para propósitos especiales, diseñadas para crudos pesados.

Para conocer la presión máxima de diseño se recurre a la ecuación:

$$P = \frac{2.S.(t-A)F.E}{D} \quad (6)$$

Dónde:

<sup>15</sup> OÑATE, J; RODRIGUEZ, R. "Evaluación de las alternativas de transporte de crudo pesado por tuberías: caso aplicado al campo rubiales". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012

- $P$  : Presión máxima de diseño (*psi*).
- $S$  : Resistencia mínima a la cedencia (*psi*).
- $t$  : Espesor de la pared de la tubería (*pulg*).
- $A$  : Tolerancia a la corrosión ( $\frac{\text{pulg}}{\text{año}}$ ).
- $D$  : Diámetro externo de la tubería (*pulg*).
- $F$  : Factor de diseño.
- $E$  : Factor de soldadura longitudinal.

Se recomienda trabajar con una tolerancia a la corrosión de 0,005 pulgadas por año. En cuanto al factor de diseño, se debe recalcar la relación que existe entre este tipo y el tipo de construcción que va a instalarse, como también el lugar donde se desarrollará la obra; en este sentido el factor de diseño tiene un valor de 0,72 para áreas pobladas y campos petrolíferos. El factor  $E$  tiene un valor de 1 para tuberías sin costuras

### 1.3.5 Especificaciones de tubería.

**Tabla 1.** Especificaciones de tubería.

Diámetro nominal NPS	Diámetro externo		Espesor		Designación	Peso		Diámetro interno	
	mm	inch	mm	inch		kg/m	lb/ft	mm	inch
<b>16</b>	406,4	16,000	12,7	0,5	XS	123,30	82,85	381,0	15,000
<b>18</b>	457,0	18,000	12,7	0,5	XS	139,15	93,54	431,6	17,000
<b>20</b>	508,0	20,000	12,7	0,5	XS	155,12	104,23	482,6	19,000
<b>22</b>	559,0	22,000	12,7	0,5	XS	171,09	114,92	533,6	21,000
<b>24</b>	610,0	24,000	12,7	0,5	XS	187,06	125,61	584,6	23,000
<b>26</b>	660,0	26,000	12,7	0,5	XS	202,72	136,30	634,6	25,000
<b>30</b>	762,0	30,000	12,7	0,5	XS	234,67	157,68	736,6	29,000

**Fuente:** TROUVAY and CAUVIN, Piping Equipment, Norma API 5L, Tubos de conducción, 2001.

## **2. VARIABLES QUE INTERFIEREN EN EL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

### **2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR**

La transferencia de calor se puede definir como el flujo de energía de un cuerpo o fluido a otro debido a la diferencia de temperaturas que existe entre ellos hasta que alcancen un equilibrio térmico.

#### **2.1.1 Los mecanismos de transferencia de calor**

Hay tres formas diferentes de transmisión de calor: conducción, radiación, convección. Estrictamente hablando, únicamente la conducción y la radiación debería ser considerada como procesos de transferencia de calor, porque solamente estos dos mecanismos dependen de su operación, solo de la existencia de una diferencia de temperatura. El último de los tres, la convección no cumple rigurosamente con la definición de transferencia de calor, porque depende del transporte mecánico de masa. Pero puesto que en la convección también se efectúan transmisiones de energía desde regiones de temperaturas más altas a regiones de temperaturas más bajas, ha sido generalmente aceptado el término transferencia de calor por convección.<sup>16</sup>

En muchos de las situaciones que se presentan en la naturaleza, el calor fluye no por uno, sino por varios de este mecanismo que actúan en forma simultánea. En ingeniería es muy importante conocer la forma cómo interactúan los diferentes modos de transferencia de calor, en virtud de que en la práctica, cuando uno de los mecanismos domina cualitativamente, se obtienen soluciones útiles

---

<sup>16</sup> PADILLA, Pablo, SUAREZ, Edgar. "Tratamiento eléctrico experimental para el transporte de crudos pesados en oleoductos". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 1997.pag-39

aproximadas, despreciando todos los mecanismos, excepto el que domina en el proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario, además de reconocer los modos de transferencia de calor que juegan un papel importante en el proceso, determinar si ese proceso es o no estable. Cuando la rapidez del flujo de calor en un sistema no varía con el tiempo, la temperatura de cualquier punto no cambia y prevalecen condiciones en estado estable. Bajo las condiciones de estado estable, la rapidez del flujo de calor en cualquier punto del sistema debe ser igual a la rapidez con la que entra a dicho flujo y no puede tener lugar cambio de energía interna.

El flujo de calor en un sistema es transitorio o inestable, cuando las temperaturas de varios puntos del sistema cambian con el tiempo. Puesto que un cambio de la temperatura indica un cambio de energía interna, se concluye que una parte de la energía se almacena y la otra constituye un flujo de calor inestable. Los problemas de flujo de calor en estado inestable, son más complejos que aquellos en estado estable y con frecuencia pueden ser resolverse únicamente por métodos aproximados.

### **2.1.2 Tránsito de calor por conducción**

La transferencia de calor en un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de temperatura baja dentro de un medio sólido, líquido o gaseoso, como también entre medios diferentes en contacto físico directo. En el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas.

De acuerdo con la teoría cinética, la temperatura de un elemento de materia es proporcional a la energía cinética medida de sus constituyentes moleculares. La energía que posee un elemento de materia debido a la velocidad y a la posición relativa de las moléculas, recibe el nombre de energía interna. Cuando las

moléculas de una región adquieren una energía cinética medida mayor que la de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperatura, las moléculas que poseen mayor energía transmitirán parte de ella a las moléculas de la región a más baja temperatura.

La transferencia de energía podría realizarse por el choque elástico (por ejemplo en fluidos) o por difusión de los electrones rápidos desde la región de alta temperatura a la región de baja temperatura (por ejemplo en los metales). Independientemente del mecanismo exacto, que no está completamente entendido, el efecto observable de la conducción del calor es un equilibrio de temperaturas. Sin embargo si las diferencias de temperatura se mantienen por la adición y remoción de calor en diferentes puntos, se establecerá un flujo continuo de calor de la región más caliente a la región más fría.

La conducción es el único mecanismo por el cual puede fluir calor en sólidos opacos. La conducción es también importante en fluidos, pero en medios no sólidos esta generalmente combinada con la convección y en algunos casos también con la radiación.

La relación básica para la transferencia de calor por convección fue propuesta en 1882 por el francés J.B.J Fourier. Estableció que la rapidez del flujo de calor por conducción  $q$  en un material.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

En la ecuación la rapidez del flujo de calor  $q$  se expresa en  $btu/h$ , el área  $A$  en  $ft^2$  y el gradiente de temperatura  $\frac{dT}{dx}$  en  $\frac{^{\circ}F}{ft}$ . La conductividad térmica  $k$  es una propiedad del material e indica la cantidad de calor que fluirá a través de un área unitaria si el gradiente de temperatura es la unidad.

Entre las unidades de  $k$  es muy común utilizar  $\frac{BTU}{hr-ft-^{\circ}F}$ .

Los materiales que tienen una alta conductividad térmica se llaman conductores, mientras que los materiales de baja conductividad térmica se conocen como aisladores. En general, la conductividad térmica varía con la temperatura pero en muchas situaciones de ingeniería la variación es tan pequeña que puede despreciarse.

### Conductividad térmica

La conductividad térmica ( $k$ ) es una de las características de cada material e indica la cantidad de energía que puede fluir a través de una sección transversal unitaria, en un gradiente unitario de temperatura bajo condiciones de estado estacionario y en la ausencia de cualquier movimiento de fluido o partículas<sup>17</sup>.

**Tabla 2.** Conductividad térmica de algunos materiales.

MATERIAL	K, Btu/hr.ft.°F
Gases	0.0196-1.502
Materiales aislantes	0.0196-0.121
Metales líquidos	4.969-43.912
Metales puros	30.045-236.897
Líquidos no metálicos	0.0208-0.398

### Conducción unidimensional de calor en estado estable para cilindros huecos.

El flujo radial de calor por conducción a través de un cilindro hueco, es un problema unidimensional de conducción de gran importancia práctica.

La conducción a lo largo de tubos y a través de aislamientos para tubos son ejemplos muy comunes.

<sup>17</sup> VALENCIA, H. "Transferencia de Calor". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1988.

Si el cilindro es homogéneo y lo bastante largo para permitir pasar por altos los efectos en los extremo y si la temperatura de la superficie interior es contante  $T_i$  mientras la temperatura de la superficie exterior se mantiene uniforme en un valor  $T_o$ , la rapidez de conducción de calor es a partir de la siguiente ecuación.

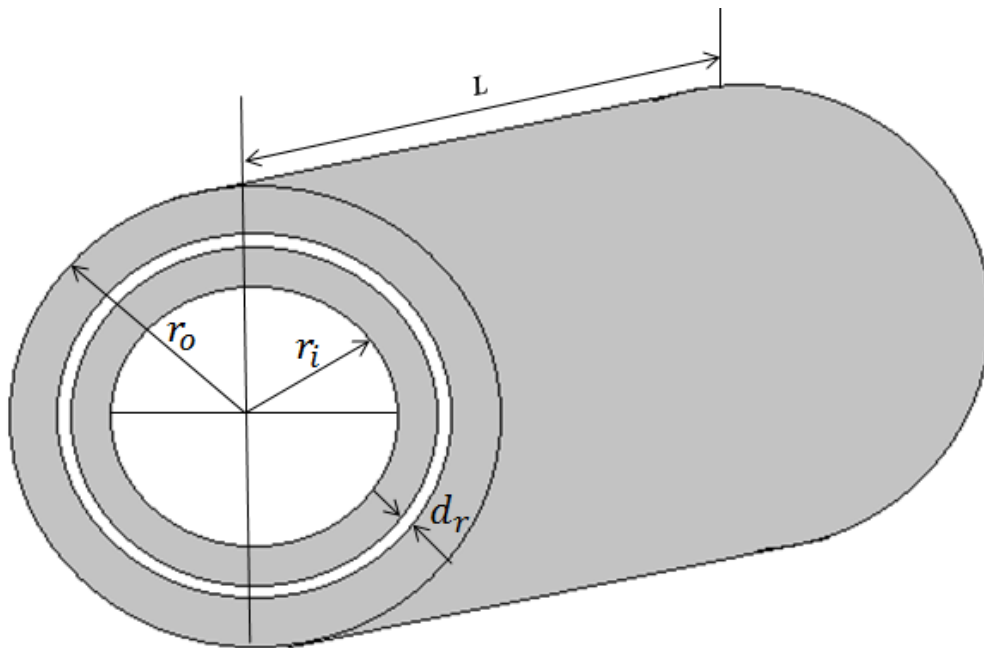
$$q = -kA \frac{dT}{dr} \quad (8)$$

Donde  $\frac{dT}{dr}$  es igual al gradiente de temperatura en la dirección radial.

Para el cilindro hueco de la figura 1. El área está en función del radio, por lo cual

$$A = 2\pi r l \quad (9)$$

**Figura 7.** Flujo radial de calor en un cilindro hueco.



Fuente: Modificado de PADILLA, Juan Pablo. SUAREZ, Edgar Alberto. "Tratamiento eléctrico experimental para el transporte de crudos pesados en oleoductos".

Donde  $r$  es el radio y  $l$  la longitud del cilindro. Por lo tanto, la rapidez del flujo de calor por conducción puede expresarse como:

$$q = -k2\pi rl \frac{dT}{dr} \quad (10)$$

Separando variables e integrando entre  $T_0$  para  $r_0$  y  $T_i$  para  $r_i$  se obtiene:

$$T_i - T_0 = \frac{q}{2\pi kl} \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) \quad (11)$$

Despejando  $q$  de la ecuación se obtiene

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{\ln(r_0/r_i)}{2\pi kl}} \quad (12)$$

Que es la ecuación para calcular la velocidad de conducción del calor a través de un cilindro hueco por ejemplo una tubería u oleoducto que es el objeto de nuestro estudio.

### 2.1.3 Transferencia de calor por radiación

La transferencia es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a un cuerpo de baja temperatura, cuando estos están separados por un escenario por un espacio que incluso puede ser el vacío. El término radiación es generalmente aplicado a todas las clases de fenómenos de ondas electromagnéticas, pero en transferencia de calor únicamente son de interés los fenómenos que son el resultado de la temperatura y por medio de los cuales se establece un transporte de energía a través de un medio no transparente o a través del espacio. La energía transmitida en esta forma recibe el nombre de calor radiante.

Todos los cuerpos emiten calor radiante en forma continua. La intensidad de la emisión depende de la temperatura y la de la naturaleza de la superficie. La energía radiante viaja a la velocidad de la luz y es un fenómeno semejante a la radiación de la luz. En realidad de acuerdo con la teoría electromagnética, la luz y la radiación térmica difieren únicamente en sus respectivas longitudes de onda.

El calor radiante es emitido por un cuerpo en forma de paquetes o cuantos de energía. El movimiento del calor radiante en el espacio es similar al de la propagación de la luz y puede describirse con la teoría ondulatoria. Cuando las ondas de radiación encuentran algún otro objeto, su energía es absorbida cerca de su superficie. La importancia de la transferencia de calor por radiación se hace mayor conforme se incrementa la temperatura de un objeto. En aquellas situaciones que involucran temperaturas que se aproximan a las del medio ambiente, el calentamiento por radiación frecuentemente puede ser menospreciado.

#### **2.1.4 Transferencia de calor por convección**

Es un modo de transferencia de energía entre una superficie sólida o gas adyacente que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento másico de fluido, la transferencia de calor entre la superficie sólida el luido adyacente es conducción pura. La presencia de movimiento másico del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de transferencia.

La transferencia de energía por convección, desde una superficie cuya temperatura es superior a la del fluido que la rodea, se realiza en varias etapas. Primero, el calor fluirá por conducción desde la superficie hacia las partículas adyacentes del fluido. La energía así transferida servirá para incrementar la

temperatura y la energía interna de esas partículas del fluido. Entonces, las partículas del fluido se moverán hacia una región del fluido con temperaturas más bajas, donde se mezclarán y transferirán una parte de su energía a otras partículas del fluido. El flujo, en este caso, es de fluido y de su energía. Realmente la energía es almacenada en las partículas del fluido y transportada como resultado del movimiento de masa. Por su operación este mecanismo no depende únicamente de la diferencia de temperaturas y por lo tanto, no está estrictamente de acuerdo con la definición de transferencia de calor. Sin embargo, el efecto neto es un transporte de energía y, puesto que ocurre en la dirección de un gradiente de temperatura, está clasificado como un modo de transferencia de calor y conocido como flujo de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se clasifica, de acuerdo con la forma de inducir el flujo, en convección libre y convección forzada. Cuando el movimiento de mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por los gradientes de temperatura, se habla de convección natural o convección libre. Cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una bomba o agitador, el proceso se conoce como convección forzada.

La eficiencia de transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido. Como consecuencia, un estudio de la transferencia de calor por convección se basa en el conocimiento de las características del flujo del fluido.

La rapidez de calor transferido por convección entre una superficie y un fluido, puede calcularse por la relación.

$$q_c = h_c A \Delta T \quad (13)$$

Donde

$q_c$  = rapidez de calor transferido por convección en  $\frac{BTU}{hr}$

$A$  = área transferida de calor en  $ft^2$ .

$\Delta T$  = diferencia entre la temperatura de la superficie  $T_s$  ya la temperatura de la superficie del fluido  $T_\infty$  en  $^{\circ}F$  .

El valor de  $h_c$  para un sistema, depende de la geometría de la superficie y de la velocidad así como de las propiedades físicas del fluido y frecuentemente también de la diferencia de temperaturas  $\Delta T$ . Se debe distinguir entre el coeficiente promedio. El coeficiente local está definido por:

$$dq = h_c dA(T_s - T_m) \quad (14)$$

Donde

$dq$  = variación de la rapidez de flujo de calor.

$h_c$  = coeficiente local de transferencia.

$T_s$  = temperatura superficie.

$T_m$  = temperatura media del fluido.

Mientras que el coeficiente promedio puede definirse en términos del valor del coeficiente local, por:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A} \iint h_c dA \quad (15)$$

Usando la ecuación

$$q_c = h_c A \Delta T \quad (16)$$

Se puede definir la conductancia térmica  $K_c$  para la transferencia de calor por convección como:

$$K_c = \bar{h}_c A \quad (17)$$

Y la resistencia térmica para transferencia de calor por convección  $R_c$  que es igual al recíproco de la conductancia como.

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c A} \quad (18)$$

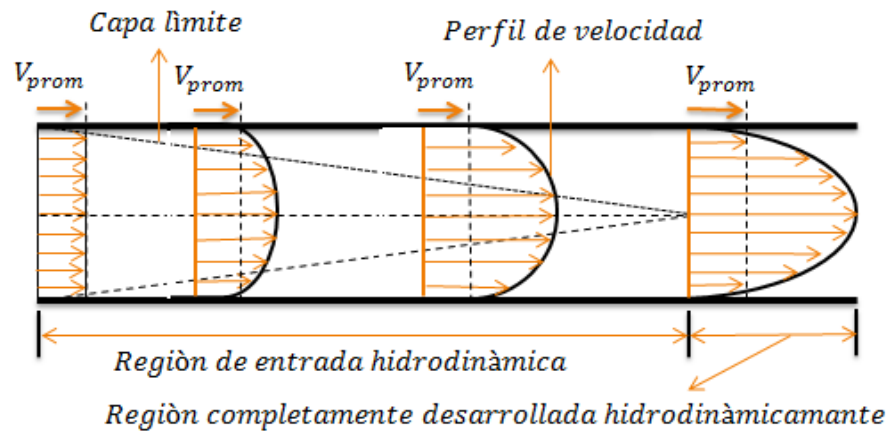
#### 2.1.4.1 Región de entrada

Si un fluido entra a un tubo circular con velocidad uniforme debido a la condición de no deslizamiento, las partículas del fluido en la capa en contacto con la superficie del tubo que llegan a detenerse por completo. Esta capa también causa que las partículas del fluido en las capas adyacentes se desaceleren en forma gradual como resultado de la fricción. Para compensar esta reducción en la velocidad, la velocidad del fluido en el centro del tubo tiene que incrementarse a fin de mantener constante el flujo de masa por el tubo. Como resultado, se desarrolla un gradiente de velocidad a lo largo del tubo.

La región del tubo en la cual se sienten los efectos de las fuerzas cortantes viscosas causadas por la viscosidad del fluido se llama capa límite de velocidad, capa límite hidrodinámica o solo capa límite. Una superficie fronteriza hipotética divide en dos regiones el flujo en un tubo: la región de capa límite, en la cual los efectos viscosos y los cambios en la velocidad son significativos, y la región del flujo irrotacional (central), en la cual los efectos de la fricción son despreciables y la velocidad permanece especialmente constante en la dirección radial.

El espesor de esta capa límite se incrementa en la dirección del flujo hasta que esa capa llega al centro del tubo y, como consecuencia, llena éste por completo, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 8.** Desarrollo de la capa límite de velocidad en un tubo.



Fuente: modificado de Yunus A. Cengel. "Transferencia de calor". Mc Graw-Hill

Página 469

La región que existe desde la entrada del tubo hasta el punto donde la capa límite se une en la línea central se llama región de entrada hidrodinámica, y la longitud de esta región se conoce como longitud de entrada hidrodinámica,  $L_h$ . En la región de entrada se menciona como flujo hidrodinamicamente en desarrollo, ya que en esta región se desarrolla el perfil de velocidad. La región que se encuentra más allá de la región de entrada, en la cual el perfil de velocidad está completamente desarrollado y permanece inalterado, se conoce como región completamente desarrollada hidrodinamicamente. El perfil de velocidad en la región completamente desarrollada es parabólico, en el flujo laminar, y un tanto más plano o más lleno en el flujo turbulento, debido al movimiento arremolinado y al mezclado más vigoroso en la dirección radial. Se considera ahora un fluido a una temperatura uniforme que entra en un tubo circular cuya superficie se mantiene a una temperatura diferente. Esta ocasión, las partículas del fluido que están en la capa en contacto con la superficie del tubo toman la temperatura de esta superficie. Esto iniciará la transferencia por convección en el tubo y el

desarrollo de una capa límite térmica a lo largo de este último. El espesor de la capa límite también aumenta en la dirección del fluido hasta que alcanza el centro del tubo y, de este modo, lo llena por completo. La región del flujo se llama región de entrada térmica y la longitud de esta región se llama longitud de entrada térmica  $L_t$ . el flujo en la región de entrada térmica se llama flujo en desarrollo térmico, ya que es ahí donde se desarrolla el perfil de temperaturas. La zona que se encuentra más allá de la región de entrada térmica, en la que el perfil de temperaturas adimensionales, expresado como:  $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ , permanece inalterado se llama región térmica completamente desarrollada. La región en la cual el fluido está tanto hidrodinámica como térmicamente desarrollada y donde, como consecuencia, tanto el perfil de velocidades como el de temperaturas adimensionales permanecen inalterados, se llama flujo completamente desarrollado<sup>18</sup>: es decir,

- Completamente desarrollado hidrodinámicamente:

$$\frac{\partial \mathbf{u}(r,x)}{\partial x} = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{u} = \mathbf{u}(r) \quad (19)$$

- Completamente desarrollado térmicamente

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r,x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right] = \mathbf{0} \quad (20)$$

2.1.4.2 Longitudes de entrada. La longitud de entrada hidrodinámica suele tomarse como la distancia de entrada al tubo hasta aquella sección transversal donde el esfuerzo cortante en la pared (y por consiguiente, el factor de fricción) se aproxima el valor del flujo completamente desarrollado dentro de 2% de diferencia. En el flujo laminar, las longitudes de entrada hidrodinámica y térmica se dan de manera aproximada

---

<sup>18</sup> CENGEL, Yunus. "Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill

$$L_{h,laminar} = 0.05 Re D \quad (21)$$

$$L_{t,laminar} = 0.05 Re Pr D = Pr L_{h,laminar} \quad (22)$$

En el flujo turbulento, el intenso mezclado que se efectúa en el curso de las fluctuaciones aleatorias suele dominar los efectos de la difusión molecular y, por lo tanto, las longitudes de entrada hidrodinámica y térmica tiene más o menos el mismo tamaño y son independientes del número de Prandtl. Como cabe esperar la longitud de entrada es mucho menor en el flujo turbulento y su dependencia del número de Reynolds es más débil.

$$L_{h,turbulento} \approx L_{t,turbulento} \approx 10D \quad (23)$$

Cuando se da la variación del número Nusselt local a lo largo de un tubo en flujo turbulento, tanto para la temperatura superficial constante como para el flujo constante de calor uniforme en la superficie se pueden hacer análisis importantes como:

- Los números de Nusselt y, por consiguiente, los coeficientes de transferencia de calor por convección son muchos más altos en la región de entrada.
- El número de Nusselt alcanza un valor constante a una distancia de 10 diámetros y, por lo tanto, se puede suponer que el flujo está completamente desarrollado para  $x > 10D$
- Los números de Nusselt para las condiciones de temperatura superficial constante y flujo de calor constante son idénticos en las regiones completamente desarrolladas y casi idénticos en las regiones de entrada. Por lo tanto, el número de Nusselt no es sensible al tipo de condición de frontera térmica y se pueden usar las correlaciones de flujo turbulento para cualquiera de los dos tipos de esa condición<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> CENGEL, Yunus. " Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill

2.1.4.3 Capa límite térmica. Se define la capa límite de velocidad como la región en la cual la velocidad del flujo varía desde cero hasta  $0.99V$ . De modo semejante, se desarrolla una capa límite térmica cuando un fluido de una temperatura específica fluye sobre una superficie que está a temperatura diferente. Si se tiene un fluido a una temperatura uniforme de  $T_{\infty}$  sobre una placa isotérmica a la temperatura  $T_s$ . Las partículas del fluido en la capa adyacente a la superficie alcanzan el equilibrio térmico con la placa y tomarán la temperatura superficial  $T_s$ . Entonces estas partículas del fluido intercambiarán energía con las partículas de la capa adjunta, y así sucesivamente. Por lo cual se desarrolla un perfil de temperatura que va desde  $T_s$ , en la superficie, hasta  $T_{\infty}$  suficientemente lejos de ésta. La región del flujo sobre la superficie en la cual la variación de la temperatura en la dirección normal a la superficie es significativa es la capa límite térmica. El espesor de la capa límite térmica  $\delta_t$  en cualquier lugar de a lo largo de la superficie se define como la distancia, desde la superficie a la cual la temperatura  $T - T_s$  es igual a  $0.99(T_{\infty} - T_s)$ . El espesor de la capa límite térmica aumenta en la dirección del flujo, ya que, corriente más abajo, se sienten los efectos de la transferencia de calor a distancias más grandes de la superficie.

La razón de la transferencia de calor por convección en cualquier parte a lo largo de la superficie está relacionada directamente con el gradiente de temperatura en ese lugar. Por lo tanto, la forma del perfil de temperaturas en la capa límite térmica impone la transferencia de calor por convección entre la superficie sólida y el fluido sobre ella. En el flujo sobre una superficie calentada (o enfriada), tanto la capa límite de la velocidad como la térmica se desarrollan en forma simultánea. Dado que la velocidad del fluido tendrá una fuerte influencia sobre el perfil de temperaturas, el desarrollo de la capa límite de velocidad en relación con la térmica tendrá un fuerte efecto sobre la transferencia de calor por convección<sup>20</sup>.

---

<sup>20</sup> CENGEL, Yunus. " Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill

2.1.4.4 Análisis térmico general. La ecuación de conservación de la energía para el flujo estacionario de un fluido en un tubo se puede expresar como

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_e - T_i) \quad (24)$$

Donde  $T_i$  y  $T_e$  son las temperaturas medias del fluido en la entrada y salida del tubo, respectivamente, y  $Q$  es la razón de transferencia de calor hacia el fluido o desde éste.

Las condiciones térmicas en la superficie por lo común se pueden aproximar con razonable precisión como temperatura superficial constante ( $T_s = \text{constante}$ ) o flujo constante de calor en la superficie ( $q_s = \text{constante}$ ).

El flujo de calor en la superficie se expresa como:

$$q_s = h_x(T_s - T_m) \quad (25)$$

$h_x$  = Coeficiente de transferencia de calor local

$T_s$  y  $T_m$  = Son las temperaturas en la superficie y media del fluido en esta sección transversal

La temperatura media del fluido  $T_m$  de un fluido que fluye en un tubo debe cambiar durante el calentamiento o el enfriamiento. Por lo tanto, cuando  $h_x = h = \text{constante}$  la temperatura superficial  $T_s$  debe cambiar cuando  $q_s = \text{constante}$ . Por lo tanto, se puede tener  $T_s = \text{constante}$  ó  $q_s = \text{constante}$ . En la superficie del tubo, pero no ambas<sup>21</sup>.

2.1.4.5 Flujo constante de calor en la superficie En el caso de  $q_s = \text{constante}$ , la razón de la transferencia de calor también se puede expresar como:

$$Q = \dot{q}_s A_s = \dot{m}c_p(T_e - T_i) \quad (26)$$

---

<sup>21</sup> CENGEL, Yunus. " Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill

Entonces, la temperatura media del fluido en la salida del tubo queda:

$$T_e = T_i + \frac{\dot{q}_s A_s}{\dot{m} c_p} \quad (27)$$

La temperatura media del fluido se incrementa linealmente en la dirección del flujo en el caso de flujo de calor constante en la superficie, puesto que el área superficial aumenta en forma lineal en esa dirección.

En el caso de calor constante en la superficie  $\dot{q}_s$ , la temperatura superficial se puede determinar a partir de

$$\dot{q}_s = h_x(T_s - T_m) \rightarrow T_s = T_m + \frac{\dot{q}_s}{h} \quad (28)$$

En la región completamente desarrollada, la temperatura superficial  $T_s$  también se incrementará linealmente en la dirección de flujo, dado que  $h$  es constante y, por lo tanto  $T_s - T_m = \text{constante}$ . Por supuesto, esto se cumple cuando las propiedades del fluido de la temperatura media del fluido  $T_m$  en un diagrama T-x mediante la aplicación de un balance de energía de flujo estacionario a una rebanada del tubo de espesor  $dx$  se da:

$$\dot{m} c_p dT_m = \dot{q}_s (\rho dx) \rightarrow \frac{dT_m}{dx} = \frac{\dot{q}_s P}{\dot{m} c_p} = \text{constante} \quad (29)$$

Puesto que  $\dot{q}_s$  y  $h$  son constantes, la derivación de la ecuación con respecto a  $x$  da:

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{dT_s}{dx} \quad (30)$$

Asimismo, el requisito de que el perfil de temperatura adimensional permanezca inalterado en la región completamente desarrollada da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right] = 0 \rightarrow \frac{1}{T_s - T_m} \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T_s}{\partial x} \quad (31)$$

Se concluye que en el flujo completamente desarrollado en un tubo sujeto a un flujo constante de calor en la superficie, el gradiente de temperatura es independiente de  $x$  y, por lo tanto el perfil de temperatura no cambia a lo largo del tubo.

La expresión para la variación de la temperatura media a lo largo del tubo para el caso de flujo constante de calor sería<sup>22</sup>:

$$T_m = T_i + \frac{q_s P}{m C_p} x \quad (32)$$

#### 2.1.4.6 Temperatura superficial constante

En el caso de la temperatura superficial constante ( $T_s = \text{constante}$ ),  $\Delta T_{prom}$  se puede expresar aproximadamente por la diferencia media aritmética de temperatura  $\Delta T_{ma}$  como:

$$\Delta T_{prom} \approx \Delta T_{ma} = \frac{\Delta T_i + \Delta T_e}{2} = \frac{(T_s - T_i) + (T_s - T_e)}{2} = T_s - \frac{T_i + T_e}{2} \quad (33)$$

Donde  $T_b = \frac{(T_i + T_e)}{2}$  es la temperatura promediada entre su entrada y salida del fluido, la cual es el promedio aritmético de las temperaturas medias del fluido en la admisión y la salida del tubo.

Si se considera el calentamiento de un fluido en un tubo de sección transversal constante cuya superficie interior se mantiene a una temperatura constante de  $T_s$ . Se sabe que la temperatura media del fluido  $T_m$  aumenta en la dirección del flujo

<sup>22</sup>CENGEL, Yunus. "Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill

como resultado de la transferencia de calor. El balance de energía sobre un volumen diferencial de control es:

$$mc_p dT_m = h(T_s - T_m) dA_s \quad (34)$$

Es decir, el aumento en la energía del fluido (representado por el aumento en su temperatura media por  $dT_m$ ) es igual al calor transferido por convección hacia este último desde la superficie del tubo. Dado que el área superficial diferencial es de  $dA_s = p dx$ , donde  $p$  es el perímetro del tubo, y que  $dT_m = -d(T_s - T_m)$ , puesto que  $T_s$  es constante, la relaciona antes dada se puede reacomodar como

$$\frac{d(T_s - T_m)}{T_s - T_m} = -\frac{hp}{mc_p} dx \quad (35)$$

Al integrar  $x = 0$  (adimensión del tubo donde  $T_m = T_i$ ), hasta  $x = L$  (salida de del tubo donde  $T_m = T_e$ ) da

$$\ln\left(\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i}\right) = -\frac{hA_s}{mc_p} \quad (36)$$

Donde  $A_s = pl$  es el área superficial del tubo y  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio constate. Al tomar la exponencial de ambos miembros y despejar  $T_e$  se obtiene la siguiente relación, la cual resulta muy útil para la determinación de la temperatura media del fluido en la salida del tubo:

$$T_e = T_s - (T_s - T_i) \exp(-hA_s/mC_p) \quad (37)$$

2.1.4.7 Diferencia media logarítmica de temperatura. La diferencia media logarítmica de la temperatura,  $\Delta T_m$ , se obtiene al seguir la presentación exacta de la diferencia de temperatura de temperatura promedio entre el fluido y la superficie, refleja el decaimiento exponencial de la diferencia de temperatura local. Cuando  $\Delta T_e$  difiere de  $\Delta T_i$  en no más de 40%, el error al usar la diferencia media aritmética de temperatura es menor a 1%. Pero el error se incrementa hasta niveles indeseables cuando  $\Delta T_e$  difiere de  $\Delta T_i$  en cantidades mayores. Por lo tanto, siempre se debe usar la diferencia media logarítmica de temperatura cuando se determine la transferencia de calor por convección en un tubo cuya superficie se mantenga a una temperatura constante  $\Delta T_s$ <sup>23</sup>.

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_i - T_e}{\ln[(T_s - T_e) / (T_s - T_i)]} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln\left(\frac{\Delta T_e}{\Delta T_i}\right)} \quad (38)$$

#### 2.1.4.8 Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a un turbulento depende de la configuración geométrica de la superficie, de la aspereza superficial, de la velocidad del flujo, de la temperatura de la superficie y del tipo del fluido, entre otras cosas. Se determina el número de Reynolds como:

$$Re = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VD_c}{\mu} \quad (39)$$

Dónde:

$V$  = Es la velocidad corriente superior (equivalente a la velocidad de la corriente libre para una placa plana).

$D_c$  = Diámetro característica de la configuración geométrica.

<sup>23</sup> CENGEL, Yunus. " Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido.

$\mu$  = Viscosidad del petróleo.

A números de Reynolds grandes, las fuerzas de inercia, que son proporcionales a la densidad y a la velocidad del fluido, son grandes en relación con las fuerzas viscosas y, como consecuencia, éstas últimas no pueden impedir las fluctuaciones aleatorias y rápidas del fluido. Sin embargo, a números de Reynolds pequeños o moderados, las fuerzas viscosas son suficientemente grandes como para suprimir estas fluctuaciones y mantener “alineado” el fluido. Por lo tanto, el primer caso es el flujo turbulento y en el segundo laminar.

2.1.4.9 Número de Reynolds en la transferencia de calor. Para un fluido determinado, el número de Nusselt depende principalmente de las condiciones del flujo que pueden caracterizarse por el número de Reynolds (Re), en flujo de conductos para Reynolds y Nusselt la longitud característica es el diámetro hidráulico por lo cual:

$$Re = \frac{VD_{HP}}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\rho\pi D_i \gamma} \quad (40)$$

Dónde:

$\dot{m}$  = Rapidez de flujo, en  $\frac{lb}{hr}$

$\rho$  = Densidad del fluido, en  $\frac{lb_m}{ft^3}$

$D_i$  = Diámetro interno de la tubería, en  $ft$

$\gamma$  = Esfuerzo de corte, en  $\frac{ft^2}{seg}$

En ductos largos, donde los efectos de la entrada no son importantes Reynolds se determina:

**Tabla 3.** Tipos de flujo.

Re < 2100	flujo laminar
2100 > Re < 10000	transición de laminar a turbulento, y al flujo en este régimen se le llama transición
Re > 10000	flujo completamente turbulento

2.1.4.10 Número de Prandtl. La mejor manera de describir el espesor relativo de las capas límites de velocidad y térmica es por medio del parámetro número de Prandtl adimensional, definido como:

$$\text{Pr} = \frac{\text{difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{difusividad molecular de calor}} = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (41)$$

Los números de Prandtl de los fluidos van desde menos de 0.01 para los metales líquidos, hasta 100000 para los aceites pesados. El calor se difunde con mucha rapidez en los metales líquidos ( $\text{Pr} < 1$ ) y con mucha lentitud en los aceites ( $\text{Pr} > 1$ ) en relación con la cantidad de movimiento. Como consecuencia, la capa límite térmica es mucho más gruesa para los metales líquidos y mucho más delgada para los aceites, en relación con la capa límite de velocidad. Los metales líquidos son una clase especial de fluidos con números de Prandtl muy bajo. El número de Prandtl tan bajo se debe a la alta conductividad térmica de estos fluidos, dado que el calor específico y la viscosidad de los metales son muy comparables a otros fluidos comunes.

2.1.4.11 Número de Nusselt. Mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción. Se determina:

$$N_u = \frac{hL}{k_f} = \frac{\text{Transferencia de calor por convección}}{\text{Transferencia de calor por conducción}} \quad (42)$$

$L$  = Longitud característica

$k_f$  = Conductividad térmica del fluido

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor

2.1.4.12 Convección forzada dentro de tubos y ductos. Para el diseño de estos sistemas, se evalúa el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) para los fluidos que fluyen dentro de los conductos.

$$q_c = h_c A (T_{superficie} - T_{flujo}) \quad (43)$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor “ $h$ ” se puede calcular por medio del número de Nusselt ( $Nu$ ), el cual se puede calcular a partir de ecuaciones empíricas, basadas en resultados experimentales que arrojan como resultado la siguiente ecuación:

$$Nu = \Phi(Re)\Psi(Pr) \quad (44)$$

Donde los símbolos  $\Phi$  y  $\Psi$ , representan funciones de los números de Reynolds ( $Re$ ) y Prandtl ( $Pr$ ), respectivamente.

2.1.4.13 Velocidad promedio. La velocidad de un fluido en un tubo cambia desde cero en la superficie, en virtud de la condición de no deslizamiento, hasta un máximo en el centro del propio tubo. Por lo tanto, resulta conveniente trabajar con una velocidad promedio o media,  $v_{prom}$ , la cual permanece constante para el flujo incompresible cuando el área de la sección transversal del tubo es constante. El valor de la velocidad media  $v_{prom}$ , en un tubo se determina a partir del requisito de que se debe satisfacer el principio de la conservación de la masa es decir:

$$\dot{m} = \rho v_{prom} A_c = \int_{A_c} \rho v(r) dA_c \quad (45)$$

Dónde:

$\dot{m}$  = Es la tasa de masa

$\rho$  = Densidad

$A_c$  = Área de la sección transversal

$\mu(r)$  = Perfil de la velocidad

La velocidad promedio para el flujo incompresible en un tubo circular de radio R se puede expresar como:

$$v_{prom} = \frac{\int_{A_c} \rho \mu(r) dA_c}{\rho A_c} = \frac{\int_0^R \rho \mu(r) 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R \mu(r) dr \quad (46)$$

Por lo tanto, cuando se conoce la tasa o el perfil de velocidad, se puede determinar con facilidad la velocidad promedio.

2.1.4.14 Temperatura promedio. Cuando un fluido se calienta o se enfría conforme fluye por un tubo, su temperatura en cualquier sección transversa cambia de  $T_s$  en la superficie de la pared hasta algún máxima (o mínimo, en el caso de calentamiento) en el centro del tubo. En el desplazamiento de fluidos, resulta conveniente trabajar con una temperatura promedio o media,  $T_m$ , la cual permanece constante en la sección transversal. A diferencia de la velocidad media, la temperatura media  $T_m$  cambia en la dirección del flujo, siempre que el fluido se caliente o se enfríe. El valor de la temperatura media  $T_m$  se determina con base en el requisito de que se debe satisfacer el principio de conservación de la energía. Es decir, la energía transportada por el fluido a través de una sección transversal en el flujo real debe ser igual a la energía que se transportaría a través de la misma sección transversal si el fluido estuviera a una temperatura constante  $T_m$ . Esto se puede expresar matemáticamente como:

$$E_{fluido} = \dot{m} c_p T_m = \int_m c_p T(r) \delta m = \int_{A_c} \rho c_p T(r) u V dA_c \quad (47)$$

En donde:

$c_p$  = Calor específico del fluido

$\dot{m}c_p T_m$  = En cualquier sección transversal a lo largo del tubo, representa el flujo de energía con el fluido en esa sección transversal.

Por lo tanto la temperatura media del fluido, con densidad y calor específico constante, que fluye en un tubo circular de radio R, se puede expresar como:

$$T_m = \frac{\int_m c_p T(r) \delta m}{m c_p} = \frac{\int_0^R c_p T(r) \rho \mu(r) 2\pi r dr}{\rho V_{prom} (\pi R^2) c_p} = \frac{2}{\rho V_{prom} R^2} \int_0^R T(r) u(r) r dr \quad (48)$$

Nótese que la temperatura media  $T_m$  de un fluido cambia durante el calentamiento o el enfriamiento. Asimismo, las propiedades del fluido en el flujo interno suelen evaluarse a la temperatura del fluido promediada entre entrada y salida, la cual es el promedio aritmético de las temperaturas medias en la admisión y la salida; es decir:

$$T_{prom} = \frac{(T_i + T_e)}{2} \quad (49)$$

#### 2.1.4.15 Convección en flujo laminar y turbulento

##### **Flujo laminar y turbulento en tubos**

El flujo de fluidos sigue líneas de corriente y, como consecuencia, es laminar a velocidades bajas, pero se vuelve turbulento conforme se incrementa la velocidad más allá de un valor crítico. La transición de flujo laminar a turbulento no ocurre de manera repentina: más bien, se presenta sobre algún intervalo de velocidad, donde el flujo fluctúa entre laminar y turbulento antes de volverse por completo turbulento. La mayor parte de los flujos en tubos que se encuentran en la práctica son turbulentos. El flujo laminar se encuentra cuando los fluidos son intensamente viscosos, como los aceites, fluyen en tubos de diámetro pequeño o pasos angostos.

## Flujo laminar

En el flujo laminar completamente desarrollado, cada una de las partículas de fluido se mueve a una velocidad axial constante a lo largo de una línea corriente y el perfil de velocidades,  $u(r)$ , permanece inalterado en la dirección de flujo. No se tiene movimiento en la dirección radial y, por lo tanto, la componente de la velocidad en la dirección perpendicular al flujo es cero en todas las partes. No se tiene aceleración, puesto que el flujo es estacionario y completamente desarrollado.

Se considera un elemento diferencial de volumen con forma de anillo, de radio  $r$ , espesor  $dr$  y longitud  $dx$ , orientado en forma coaxial con el tubo. En el elemento de volumen sólo intervienen los efectos de presión y los efectos viscosos, de donde las fuerzas de presión y cortantes deben equilibrarse entre sí. La fuerza de presión que actúa sobre una superficie plana sumergida es el producto de la presión en el centroide de la superficie y el área de ésta. Las fuerzas viscosas y de presión se equilibran entre sí realizando un balance de fuerzas sobre el elemento de volumen en la dirección del flujo y dividiendo entre  $2\pi r dr dx$  y acomodando:

$$r \frac{P_{s+dx} - P_s}{dx} + \frac{(r\tau)_{x+dr} - (r\tau)_r}{dr} = 0 \quad (50)$$

Al tomar el límite cuando  $dr, dx \longrightarrow 0$  da como resultado

$$r \frac{dP}{dx} + \frac{d(r\tau)}{dr} = 0 \quad (51)$$

Si  $\tau = -\mu(du/dr)$  y se toma  $\mu = \text{constante}$  se obtiene:

$$\frac{\mu}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dP}{dx} \quad (52)$$

Se observa que la parte izquierda de la ecuación está en función de  $r$  y la parte derecha lo es de  $x$ . Se puede concluir que  $\frac{dP}{dx} = \text{constante}$  lo cual se verifica al escribir un balance de fuerzas sobre un elemento de volumen de radio  $R$  y de longitud  $dx$  (una rebanada del tubo), lo cual da

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R} \quad (53)$$

Aquí,  $\tau_w$  es constante, puesto que la viscosidad y el perfil de velocidad son constantes en la región completamente desarrollada. Por lo tanto,  $\frac{dP}{dx} = \text{constante}$ .

Al integrar la ecuación y ordenarla se obtiene

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left( \frac{dP}{dx} \right) r^2 + c_1 \ln r + c_2 \quad (54)$$

Se obtiene el perfil de velocidades  $u(r)$  mediante la aplicación de las condiciones de frontera  $\partial u / \partial r = 0$  en  $r = 0$  (debido a la simetría con respecto a la línea central) y  $u = 0$  en  $r = R$  (la condición de no deslizamiento en la superficie del tubo). Se obtiene

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \left( \frac{dP}{dx} \right) \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (55)$$

Por lo tanto, el perfil de velocidades en el flujo laminar completamente desarrollado en un tubo es parabólico con un máximo en la línea central y mínimo en la superficie del tubo. Asimismo, la velocidad  $u$  es positiva para cualquier  $r$  y, como consecuencia, el gradiente de presión axial  $dP/dx$  debe ser negativo (es decir, la presión debe decrecer en la dirección del flujo debido a los efectos viscosos). Con respecto a la ecuación hallada y al sustituirla en  $dT_m/dx = dT_s/dx$  y realizando la integración se obtiene:

$$V_{prom} = \frac{2}{R^2} \int_0^R \mathbf{u}(r) dr = -\frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx}\right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) r dr = -\frac{R^2}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx}\right) \quad (56)$$

Si se combinan las dos últimas ecuaciones, se redefine el perfil de velocidad como:

$$\mathbf{u}(r) = 2V_{prom} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (57)$$

Lo anterior es una forma conveniente para el perfil de velocidades, ya que se puede determinar  $V_{prom}$  con facilidad a parte de la información de la tasa de flujo. Se tiene la velocidad máxima en la línea central y se determina a partir de esta última ecuación hallada mediante la sustitución  $r = 0$ ,

$$\mathbf{u}_{max} = 2V_{prom} \quad (58)$$

Por lo tanto, la velocidad promedio en el flujo laminar completamente desarrollado en un tubo es un medio de la velocidad máxima.

#### 2.1.4.16 Caída de presión

Está directamente relacionada con las necesidades de potencia del ventilador o la bomba con el fin de mantener el flujo.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (59)$$

Para flujo laminar:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu LV_{prom}}{R^2} = \frac{32\mu LV_{prom}}{D^2} \quad (60)$$

Una caída de presión debida a efectos viscosos representa una pérdida irreversible de presión y se le conoce como la pérdida de presión ( $\Delta P_L$ ). La anterior ecuación representa la pérdida de presión  $\Delta P_L$  cuando un fluido de viscosidad  $\mu$  fluye por un tubo de diámetro constante  $D$  y longitud  $L$ , a la velocidad promedio  $V_{prom}$ .

Para un tubo circular laminar se tiene que:

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{prom}} = \frac{64}{Re} \quad (61)$$

Dónde:

$f$  = Factor de fricción para el flujo laminar completamente desarrollado para un tubo circular

La ecuación 61 muestra que en el flujo laminar, el factor de fricción es función sólo del número de Reynolds y es independiente de la aspereza de la superficie del tubo

2.1.4.17 Pérdida de carga. Representa la altura adicional a la que se necesita elevarse el fluido por medio de una bomba para vencer las pérdidas por fricción en el tubo, es causada por la viscosidad y está relacionada de manera directa con el esfuerzo cortante en la pared se representa como:

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{v_{prom}^2}{2g} \quad (62)$$

Dónde:

$h_L$  = Pérdida de carga

Cuando ya se determina la pérdida de presión (o pérdida de carga), se determina la potencia requerida de bombero para vencer la pérdida de presión a partir de:

$$W_{bomba,L} = U \Delta P_L = U \rho g h_L = m g h_L \quad (63)$$

Dónde:

$U$  = Tasa volumétrico.

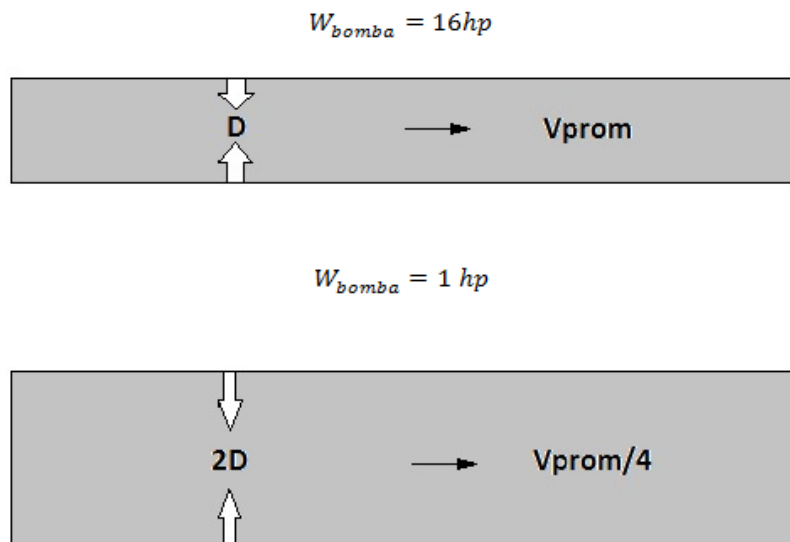
$\dot{m}$  = Tasa de la masa.

La tasa volumétrico para el flujo laminar a través de un tubo horizontal de diámetro  $D$  y de longitud es:

$$U = \frac{\Delta P \pi D^4}{128 \mu L} \quad (64)$$

Con la anterior ecuación para una tasa especificada, la caída de presión y, por ende, la potencia requerida de bombeo, son proporcionales a la longitud del tubo y la viscosidad del fluido, pero inversamente proporcionales a la cuarta potencia del radio del tubo

**Figura 9.** Necesidad de potencia de bombeo para un sistema de tubos con flujo laminar



Fuente: Modificado de Yunus A. Cengel. "Transferencia de calor". Mc Graw-Hill

Página 480

En la figura anterior se puede observar la necesidad de potencia de bombeo para un sistema de tuberías se puede reducir en un factor de 16 al duplicar el diámetro del tubo. Por supuesto, deben sopesarse los beneficios de la reducción en los costos de la energía en contraste con el costo de mayor construcción, debido al uso de tubo con diámetro más grande.

2.1.4.18 Perfil de temperatura Si se considera el flujo laminar estacionario de un fluido en un tubo circular de radio R. las propiedades del fluido  $\rho, k$  y  $c_p$  son constantes y el trabajo realizado por las fuerzas viscosas es despreciable. El fluido fluye a lo largo del eje  $x$

Con velocidad  $u$ . El flujo está completamente desarrollado, de modo que  $u$  es independiente de  $x$ , de donde  $u = u(r)$ . Al advertir que la energía se transfiere por la masa en la dirección  $x$  y por conducción en la dirección  $r$ , el balance de la energía de flujo estacionario para un elemento con forma de capa cilíndrica, de espesor  $dr$  y longitud  $dx$ , se expresa como

$$\dot{m}c_p T_x - \dot{m}c_p T_{x+dx} + Q_r - Q_{r+dr} = 0 \quad (65)$$

Donde  $m = \rho u A_c = \rho u (2\pi r dr)$ . Al sustituir y dividir entre  $2\pi r dr dx$  ordenando la ecuación da como resultado:

$$\rho c_p u \frac{T_{x+dx} - T_x}{dx} = \frac{1}{2\pi r dx} \frac{Q_{r+dr} - Q_r}{dr} \quad (66)$$

O bien,

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{2\rho c_p \pi r dx} \frac{\partial Q}{\partial r} \quad (67)$$

A partir de la ley de Fourier de la conducción de calor en la dirección radial

$$\frac{\partial Q}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( -2\pi k dx \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -2\pi k dx \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (68)$$

Si se sustituye y utiliza  $\alpha = k/\rho c_p$  se obtiene:

$$\mathbf{u} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (69)$$

Lo cual expresa que la razón de la transferencia neta de energía al volumen de control por el flujo de masa es igual a la razón neta de la conducción de calor en la dirección radial

2.1.4.19 Convección libre. Sucede cuando la transferencia de calor es debida a diferencias de densidades de los gradientes de temperaturas, sin ayuda de un agente externo.

La forma de transferencia es esencialmente similar a la de convección forzada con la diferencia, que la convección libre los coeficientes de transferencia de calor son menores, debido a que es menor la intensidad del movimiento de mezclado. Este fenómeno es el responsable de la perdida de calor en una tubería que conduce fluido caliente.

La velocidad de un fluido en una corriente de convección libre es generalmente baja, pero en la vecindad de la superficie de transferencia de calor es similar a la de la convección forzada.

Para situaciones prácticas en los cálculos generalmente se utilizan la ecuación de newton.

$$dq = h_c dA(T_s - T_m) \quad (70)$$

En la ecuación anterior  $h_c$  no es uniforme sobre la superficie donde ocurre el fenómeno de transferencia; además, es importante tener en cuenta que la evaluación del coeficiente de transferencia de calor para la convección libre, es un problema bastante complejo.

### 2.1.5 Selección de la temperatura de referencia del fluido

El valor numérico de “h”, depende de cómo se escoja la temperatura de referencia del fluido, se debe tener en cuenta que la temperatura del fluido no es uniforme, ya que varía a lo largo de la dirección del flujo de masa y en la dirección del flujo de calor. Medir la temperatura de referencia no es un proceso sencillo, además, no es una medida de la variación de la energía interna de todo el fluido que está fluyendo dentro del oleoducto, por lo tanto, es muy común utilizar la ecuación (49) la temperatura promedio de la masa principal  $T_{prom}$ , como la temperatura de referencia del fluido, esta temperatura permite hacer el balance de calor porque en el estado estable, la diferencia de temperatura promedio de la masa principal entre dos secciones del conducto, es una medida directa de la rapidez de transferencia de calor es decir

$$\dot{q} = \dot{m}c_p\Delta T_b \quad (71)$$

Dónde:

$\dot{q}$  = Tasa de la transferencia de calor hacia el fluido en  $\frac{BTU}{hr}$

$\dot{m}$  = Tasa de flujo en  $\frac{lb_m}{hr}$

$c_p$  = Calor específico a presión constante, en  $\frac{Btu}{lb_m \text{ } ^\circ F}$

$\Delta T_b$  = Diferencia de la temperatura promedio de la masa principal entre las dos secciones transversales en cuestión

## 2.2 CONCEPTOS ELECTRICOS GENERALES

### 2.2.1 Carga eléctrica

La carga eléctrica es una propiedad intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante atracciones y repulsiones que determinan las interacciones electromagnéticas entre ellas. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos, siendo a su vez, generadora de ellos. La interacción entre carga y campo eléctrico origina una de las cuatro interacciones fundamentales: la interacción electromagnética. Desde el punto de vista del modelo estándar la carga eléctrica es una medida de la capacidad de la partícula para intercambiar fotones.

Una de las principales características de la carga eléctrica es que se conserva, en cualquier proceso físico, la carga total de un sistema aislado se conserva. Es decir, la suma algebraica de cargas positivas y negativas presente en cierto instante no varía.  $Q_i = Q_f$

La carga eléctrica es de naturaleza discreta, fenómeno demostrado experimentalmente por Robert Millikan. Por razones históricas, a los electrones se les asignó carga negativa:  $-1$ , también expresada  $-e$ . Los protones tienen carga positiva:  $+1$  o  $+e$ . A los quarks se les asigna carga fraccionaria:  $\pm 1/3$  o  $\pm 2/3$ , aunque no se han podido observar libres en la naturaleza.

La unidad de carga eléctrica se denomina culombio (símbolo  $C$ ). Se define como la cantidad de carga que pasa por la sección transversal de un conductor eléctrico en un segundo, cuando la corriente eléctrica es de un amperio, y se corresponde con la carga de  $6,241\ 509 \times 10^{18}$  electrones aproximadamente.

### 2.2.2 Voltaje

Voltaje eléctrico también conocido como tensión eléctrica, diferencia de potencial eléctrico o tensión eléctrica (denotado  $dV$  y medido en voltios o julios por coulomb) es la diferencia de potencial entre dos puntos o la diferencia de potencial de energía eléctrica por la unidad de carga eléctrica entre dos puntos.

También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. Se puede medir con un voltímetro.

El voltaje es independiente del camino recorrido por la carga y depende exclusivamente del potencial eléctrico de los puntos en el campo eléctrico.

Si dos puntos que tienen una diferencia de potencial se unen mediante un conductor, se producirá un flujo de electrones. Parte de la carga que crea el punto de mayor potencial se trasladará a través del conductor al punto de menor potencial y, en ausencia de una fuente externa (generador), esta corriente cesará cuando ambos puntos igualen su potencial eléctrico (ley de Henry). Este traslado de cargas es lo que se conoce como corriente eléctrica.

Cuando se habla sobre una diferencia de potencial en un sólo punto, o potencial, se refiere a la diferencia de potencial entre este punto y algún otro donde el potencial se defina como cero.

Diferencia de potencial

$$dv = \frac{\text{julios}}{\text{columbio}} = \text{voltio} \quad (72)$$

### 2.2.3 Corriente eléctrica

La corriente o intensidad eléctrica es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe al movimiento de los electrones en el interior del

material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en  $C/s$  (culombios sobre segundo), unidad que se denomina amperio. Una corriente eléctrica, puesto que se trata de un movimiento de cargas, produce un campo magnético, un fenómeno que puede aprovecharse en el electroimán.

El instrumento usado para medir la intensidad de la corriente eléctrica es el galvanómetro que, calibrado en amperios, se llama amperímetro, colocado en serie con el conductor cuya intensidad se desea medir.

Una corriente de electricidad existe en un lugar cuando una carga neta se transporta desde ese lugar a otro en dicha región. Supongamos que la carga se mueve a través de un alambre. Si la carga  $q$  se transporta a través de una sección transversal dada del alambre, en un tiempo  $t$ , entonces la intensidad de corriente  $I$ , a través del alambre es:

$$I = \frac{q}{t} \quad (73)$$

Aquí  $q$  está dada en culombios,  $t$  en segundos,  $I$  en amperios. Por lo cual, la equivalencia es:

$$1A = \frac{1C}{1s} \quad (74)$$

Una característica de los electrones libres es que, incluso sin aplicarles un campo eléctrico desde afuera, se mueven a través del objeto de forma aleatoria debido a la energía calórica. En el caso de que no hayan aplicado ningún campo eléctrico, cumplen con la regla de que la media de estos movimientos aleatorios dentro del objeto es igual a cero. Esto es: dado un plano irreal trazado a través del objeto, si sumamos las cargas (electrones) que atraviesan dicho plano en un sentido, y sustraemos las cargas que lo recorren en sentido inverso, estas cantidades se anulan.

#### 2.2.4 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica de un objeto es una medida de su oposición al paso de corriente. Descubierta por George Ohm en 1827, la resistencia eléctrica tiene un parecido conceptual a la fricción en la física mecánica. La unidad de la resistencia en el Sistema Internacional de Unidades es el ohmio ( $\Omega$ ). Para su medición en la práctica existen diversos métodos, entre los que se encuentra el uso de un ohmímetro. Además, su cantidad recíproca es la conductancia, medida en Siemens.

La resistencia de cualquier objeto depende únicamente de su geometría y de su resistividad, por geometría se entiende a la longitud y el área del objeto mientras que la resistividad es un parámetro que depende del material del objeto y de la temperatura a la cual se encuentra sometido. Esto significa que, dada una temperatura y un material, la resistencia es un valor que se mantendrá constante. Además, de acuerdo con la ley de Ohm la resistencia de un material puede definirse como la razón entre la caída de tensión y la corriente en dicha resistencia, así:

$$R = \frac{v}{I} \quad (75)$$

Donde  $R$  es la resistencia en  $\Omega$  ohmios,  $v$  es la diferencia de potencial en voltios,  $I$  es la intensidad de corriente en amperios.

Según sea la magnitud de esta medida, los materiales se pueden clasificar en conductores, aislantes y semiconductor. Existen además ciertos materiales en los que, en determinadas condiciones de temperatura, aparece un fenómeno denominado superconductividad, en el que el valor de la resistencia es prácticamente nulo<sup>24</sup>.

---

<sup>24</sup> PADILLA, Juan Pablo. SUAREZ, Edgar Alberto. "Tratamiento eléctrico experimental para el transporte de crudos pesados en oleoductos". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 1997.

### **2.2.5 Resistencias eléctricas en la industria petrolera**

En la industria petrolera es más frecuente el calentamiento indirecto por resistencias eléctricas. Dichas resistencias pueden ser:

- Barras, varillas, alambres o pletinas, dispuestos en las paredes de la cámara de calentamiento, transmitiendo calor por radiación.
- Paquetes de resistencias de los mismos materiales que transmiten el calor por convección al aire o gases.
- Los mismos materiales, dispuestos en el interior de los tubos radiantes, cuando la atmósfera interior de la cámara sea perjudicial para una vida razonable de las resistencias expuestas directamente.
- Resistencias blindadas (también conocidas como sumergibles), dispuestas en el interior de las fundas metálicas de pequeño diámetro con un material cerámico de llenado de las fundas metálicas. Estas son típicas para el calentamiento de líquido en baños, tanques de temple, pre calentadores de combustión, etc. que en el caso de calentamiento de gases pueden ir provistos, de aletas para aumenta la superficie de intercambio de calor<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> GUERRERO Adriana, VACA, Luis. "Mejoramiento (upgrading) de crudos pesados y extra - pesados por inyección de vapor sobrecalentado y catalizadores en oleoductos (Tuberías)". Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2007.

### 3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

La simulación de un oleoducto conceptual de transporte de crudo pesado se puede definir como la elaboración y operación de un modelo físico o matemático que permitirá representar diversos escenarios, características y propiedades de un oleoducto transportador de crudo pesado, con el propósito de evaluar el comportamiento de este durante un determinado esquema de operación de transporte, conjuntamente permite analizar la interacción de las variables involucradas en el proceso de estudio.

La simulación se ha constituido en una herramienta fundamental para el estudio de los diferentes fenómenos que se presentan tanto en el yacimiento como en las facilidades de superficie, permitiendo así buscar la manera de optimizar algún proceso en la industria petrolera y disminuir los costos operativos de este<sup>26</sup>.

En este trabajo se utiliza la simulación numérica para estudiar y evaluar el comportamiento de los diferentes parámetros y variables, operacionales de un oleoducto transportador de crudo pesado sometido a un calentamiento eléctrico resistivo, como: presión, tasa de flujo, longitud, diámetro del oleoducto, coeficiente global de transferencia de calor. De esta forma determinar cuáles son las mejores condiciones operacionales para aumentar la eficiencia de transporte de petróleo pesado en el oleoducto con el menor consumo de energía posible.

---

<sup>26</sup> YATTE, Fabián Camilo. VILLAMIZAR, Ingrith Johana “aplicación de pozos horizontales en procesos de inyección de agua mediante simulación numérica”. Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2008.

### **3.1 CONSTRUCCIÓN MODELO SIMULACIÓN**

La elaboración de un modelo de simulación en este caso un oleoducto trasportador de crudo pesado necesitara varias etapas entras las cuales esta: selección de datos de operación de un oleoducto, longitud y diámetro del mismo, propiedades térmicas del fluido y tubería, todo esto con el fin de representar un oleoducto conceptual donde se podrá evaluar la viabilidad de aplicación de un calentamiento eléctrico resistivo.

#### **3.1.1 Selección de software de simulación**

Con el fin de evaluar la aplicación de la técnica de calentamiento eléctrico resistivo de un oleoducto de crudo pesado es necesario elegir un programa o software de simulación que permita ver y reproducir los diferentes fenómenos físicos de trasferencia de calor que se presentan en el proceso, primero se reproducirá un modelo base donde se busca ver el comportamiento del flujo de petróleo en la tubería sin calentamiento eléctrico resistivo, se miró la tasa, presión y diámetro de que se requiere para poder trasportar el petróleo pesado en una determinada distancia, luego se analizó cual es el efecto en los parámetros anteriormente mencionados al someter la tubería a un calentamiento eléctrico resistivo y el impacto que tiene si se recubre la tubería con un aislamiento térmico, posteriormente se hizo un análisis de sensibilidad para buscar las mejores parámetros operacionales del oleoducto.

Para cumplir y realizar todos los estudios del modelo conceptual en el proceso de la transferencia de calor en el oleoducto trasportador de crudo pesado sometido a calentamiento eléctrico resistivo se escogió el simulador PIPESIM ® 2012.1 (Production system analysis software) de Schlumberger.

Este simulador permite simular transporte de hidrocarburos y transferencia de calor en tuberías, condiciones de operación de pozos, facilidades de superficie,

hacer análisis nodales etc. Para nuestro caso el simulador permite trabajar con la geometría y propiedades del oleoducto, también deja ajustar las propiedades del crudo pesado como: API, conductividad térmica, capacidad calorífica, viscosidad y muestra en graficas el comportamiento del variables que intervienen en el proceso, lo cual es una gran ventaja para poder hacer el estudio.

### 3.1.2 Dimensiones del modelo de simulación

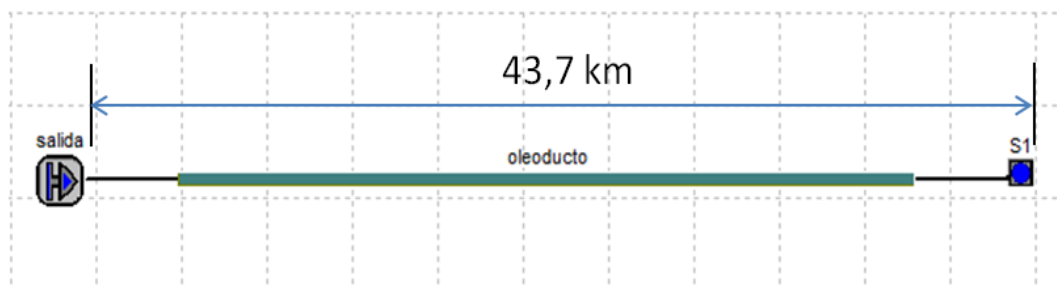
Las dimensiones del modelo de simulación que representa un oleoducto conceptual, cuyas dimensiones se establecen en la tabla 4, estas dimensiones fueron tomadas para la construcción del modelo para nuestra simulación.

Este modelo conceptual, representa un oleoducto convencional que se usa normalmente para el de transporte de crudo pesado, en la siguiente tabla y figura se observa las características y representación del oleoducto.

Tabla 4. Características de oleoducto.

Característica	Descripción
Diámetro	20 in
Longitud	43,7 km
Espesor	0,500 in
Conductividad térmica	$35 \frac{BTU}{hr-^{\circ}F-ft^2}$
Rugosidad	0,001 in
Elevación	0

Figura 10. Representación modelo del oleoducto.



Fuente: PIPE-SIM SLB.

Las condiciones operativas del oleoducto se muestran a continuación.

**Tabla 5.** Condiciones operativas el oleoducto.

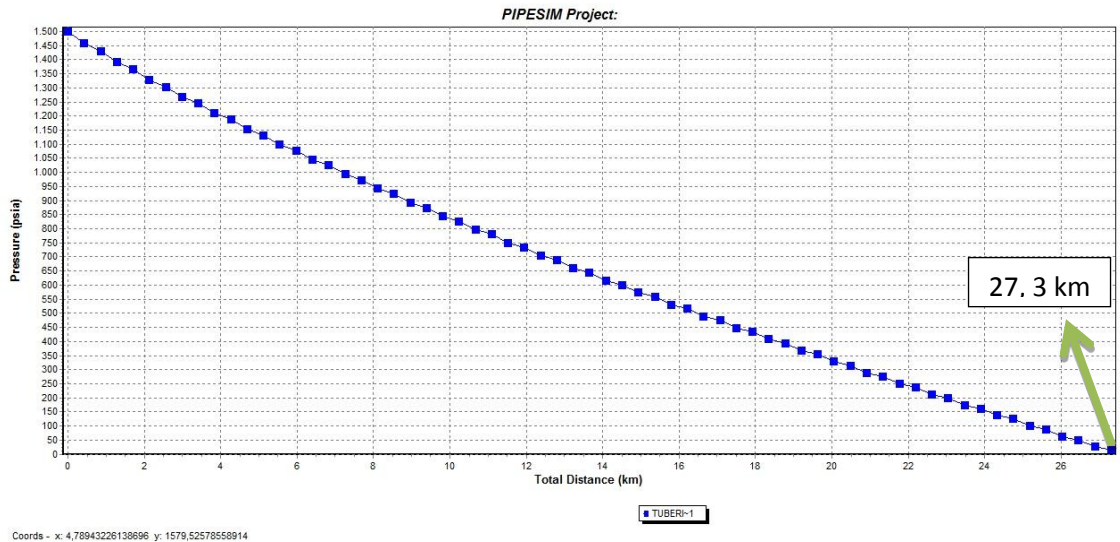
<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
<i>Presión de operación</i>	1500 psi
<i>Tasa de flujo</i>	150.000 STBD
<i>°API</i>	12
<i>Temperatura ambiente</i>	80 °F

### **3.2 COMPORTAMIENTO DE FLUJO DEL OLEODUCTO SIN CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.**

Con las características del fluido, oleoducto y las condiciones operativas de este se hizo una corrida en PIPESIM SLB, para obtener una representación del comportamiento y capacidad de transporte que tiene el oleoducto sin estar sometido a algún calentamiento, la tubería está totalmente desnuda en el aire, presenta un coeficiente global de transferencia de calor igual a  $20 \frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ .

En la siguiente figura se observa la caída de presión del oleoducto en función de la distancia.

**Figura 11.** Caída de presión de la tubería.

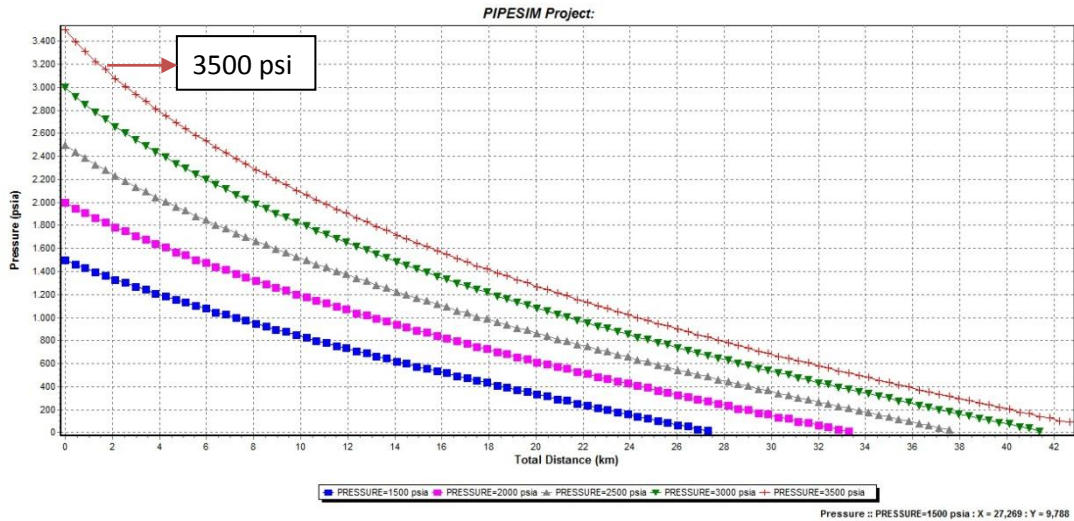


Fuente: PIPESIM SLB.

Debido a la alta viscosidad que tiene el crudo a temperatura ambiente que ronda los 2000 cP, las pérdidas por fricción es muy elevada imposibilitando que el crudo llegue a su destino final quedando casi a la mitad del recorrido.

Sin utilizar un método de transporte de crudo convencional como por ejemplo calentamiento o dilución, se tendría que disminuir la tasa de flujo de petróleo o aumentar a presión de operación o el diámetro del oleoducto para poder transportar el petróleo hasta su destino final. En la siguientes figuras (12,13,14) se observa un análisis de sensibilidad tasa de flujo, presión de operación y diámetro de la tubería.

**Figura 12.** Sensibilidad de la presión de operación.

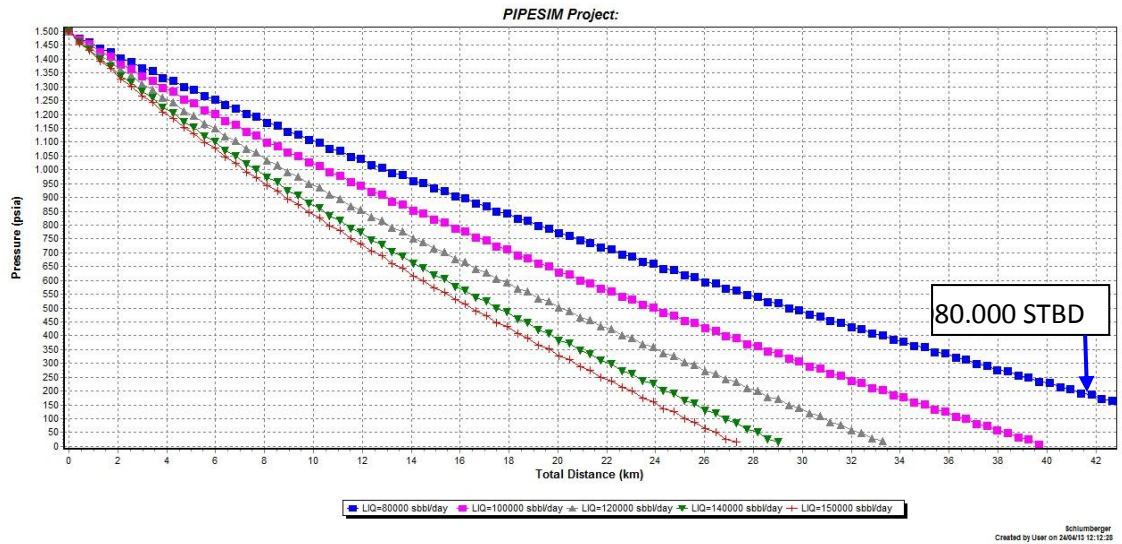


Fuente: PIPESIM SLB.

Como se observa en la figura anterior para que la tasa de flujo de 150.000 barriles diarios recorra la distancia del oleoducto y llegue a su destino final debe aumentar a más del doble la presión de operación de las bombas en la estación de despacho, pero si mantiene la misma presión 1500 psi y el diámetro de la tubería en 20” la tasa máxima que se puede transportar por el oleoducto es de 80000 STBD, duplicando el tiempo de transporte que maneja el oleoducto normalmente (ver figura 13), otra opción para poder transportar el petróleo por el oleoducto es aumentando el diámetro de la tubería, a casi 24 pulgadas (ver figura 14).

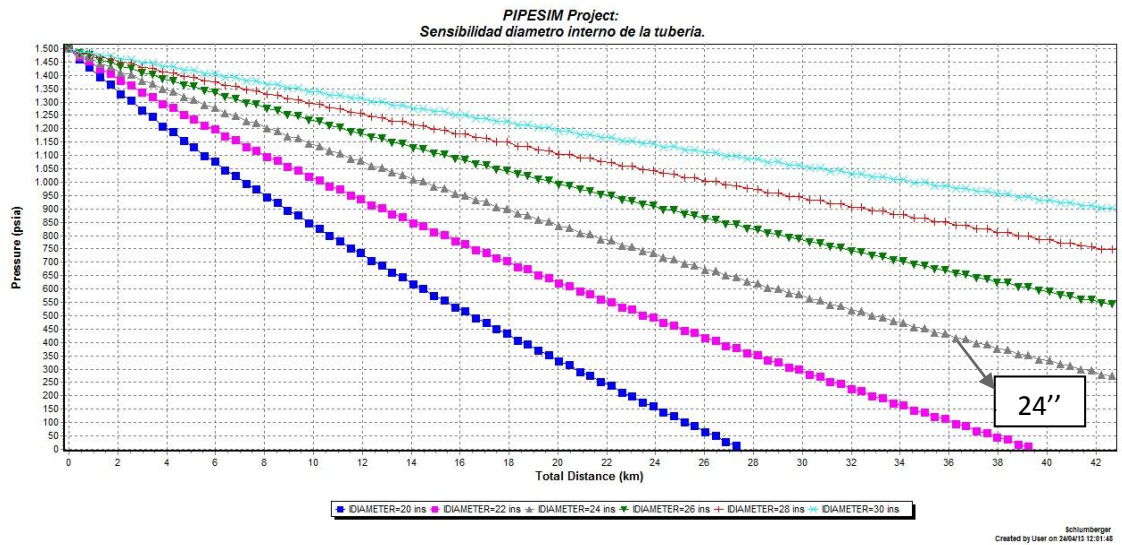
Otra alternativa para poder transportar el crudo es por medio de carro-tanques que son capaces de transportar hasta 250 barriles cada uno, pero si el campo tiene producciones altas se tendría que disponer de una gran cantidad de vehículos para poder transportar el crudo. Debido a todas estas dificultades se emplean métodos no convencionales para el transporte de crudo pesado, y este trabajo tiene la finalidad de evaluar el método de calentamiento eléctrico resistivo y la viabilidad de su aplicación en algún campo de crudo pesado.

Figura 13. Sensibilidad de la tasa de flujo de crudo.



Fuente: PIPESIM SLB.

Figura 14. Sensibilidad del diámetro interno de la tubería.



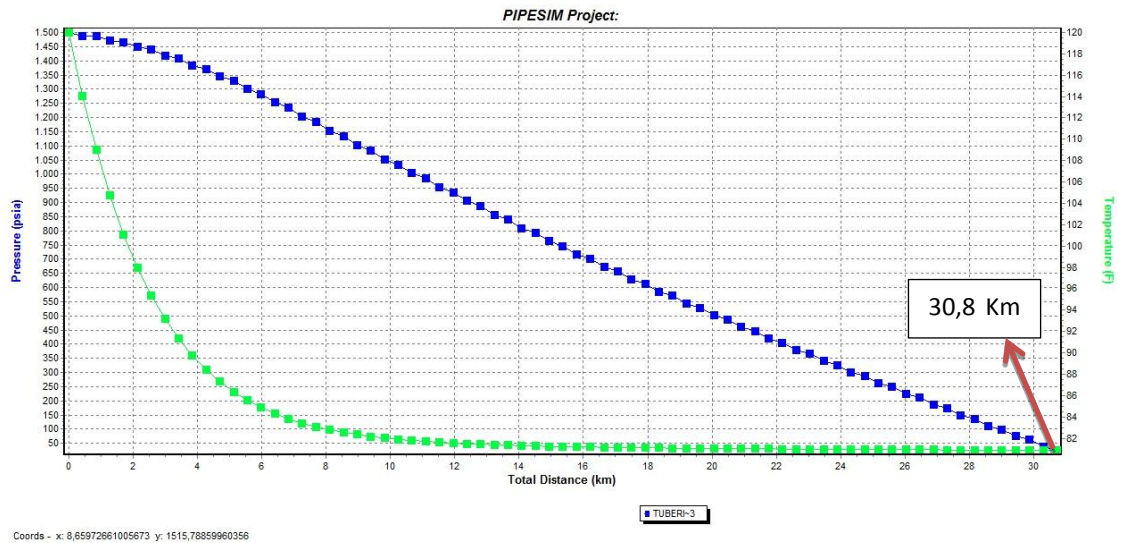
Fuente: PIPESIM SLB.

### 3.3 COMPORTAMIENTO DE FLUJO DEL OLEODUCTO CON CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO.

Como se pudo observar en la sección anterior el petróleo que es desplazado por el oleoducto no llega a su destino final o no hace todo el recorrido, debido a su pronunciada caída de presión, en esta sección el crudo va a ser sometido a un calentamiento eléctrico resistivo a una tasa de calor de  $37369728 \frac{BTU}{hr}$  calculada en el anexo A, calor suficiente para elevar la temperatura del petróleo hasta los 120 °F, con este calentamiento el principal efecto que tiene o sufre el petróleo es la reducción de su viscosidad logrando con esto una mayor movilidad en el oleoducto haciendo más fácil su desplazamiento.

En la figura 15 se puede observar la distancia que logra desplazarse el petróleo con un calentamiento eléctrico resistivo previo, la condición de la tubería es desnuda o descubierto en el medio ambiente y con el coeficiente global de transferencia de calor iguala  $20 \frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ .

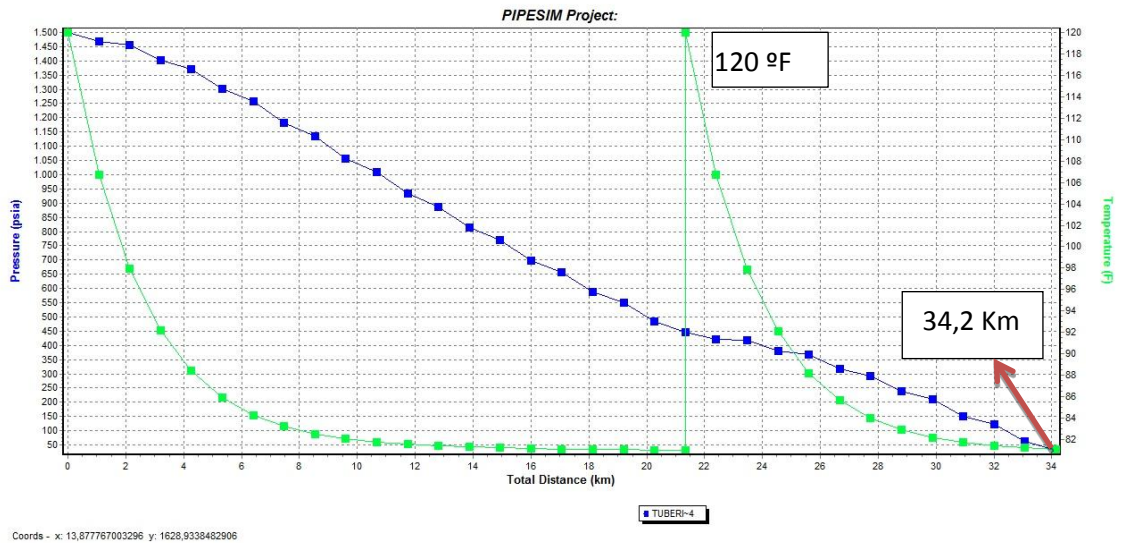
**Figura 15.** Comportamiento de la presión y temperatura del petróleo en una tubería desnuda.



Fuente: PIPESIM SLB.

En la figura anterior se observa la temperatura del petróleo y la caída de presión del oleoducto a lo largo de este, la distancia que alcanza a recorrer el petróleo con un calentamiento eléctrico resistivo es de 30,8 km, si se compara con el caso base donde no se calentó el petróleo previamente para su desplazamiento, donde alcanzo a recorrer 27,3 Km, la distancia de más que recorre el petróleo no es muy significativa, se podría hacer otra zona de calentamiento eléctrico resistivo a la mitad del recorrido del oleoducto para que vuelva a aumentar la temperatura del petróleo para que pueda llegar hasta el centro de acopio, en la figura 16, se puede ver los resultados de la implementación de una segunda zona de calentamiento eléctrico resistivo.

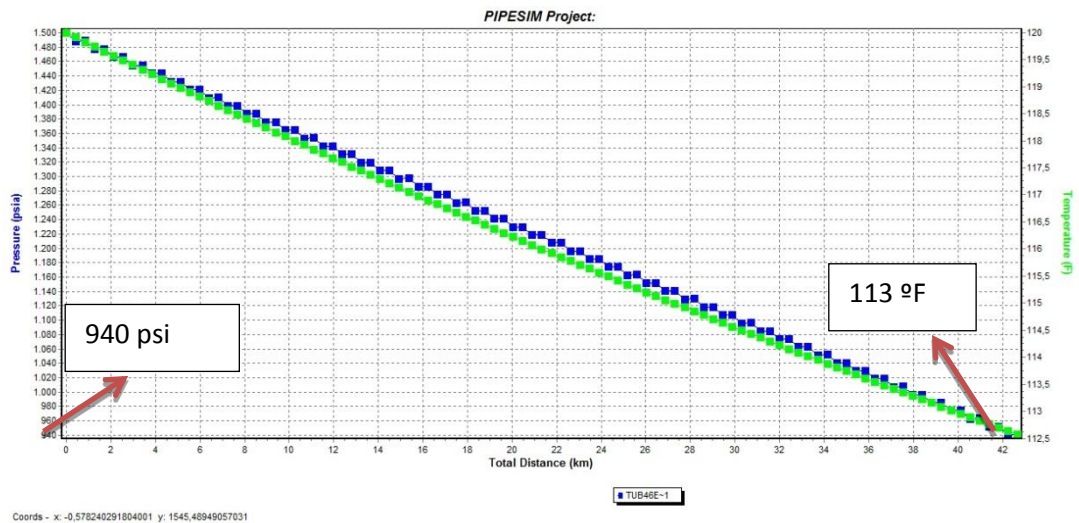
**Figura 16.** Comportamiento de la presión y temperatura del petróleo con una segunda zona de calentamiento.



Fuente: PIPESIM SLB.

Como se puede observar en la figura 16, el petróleo no alcanza a recorrer la distancia total del recorrido aun después de implementarse una segunda zona de calentamiento eléctrico resistivo, porque la temperatura del fluido cae muy rápidamente en distancia muy corta hasta alcanzar la temperatura ambiente, esto se debe a que la tubería por donde se está desplazando el petróleo esta desnuda o está expuesta al medio ambiente generando así una rápida disipación de calor, debido a esta rápida caída de la temperatura la viscosidad del petróleo aumenta, lo que provoca una resistencia mayor de flujo del crudo por medio del oleoducto, para prevenir las perdida de calor se debe recubrir la tubería con un aislante térmico, este va actuar como una resistencia al paso de calor hacia el medio ambiente, manteniendo la temperatura del fluido y logrando así que la viscosidad del crudo no aumente, en la figura 17, se puede observar la distancia que recorre el petróleo en una tubería aislada térmicamente.

**Figura 17.** Comportamiento de la presión y temperatura del petróleo en una tubería aislada térmicamente.



Fuente: PIPESIM SLB.

Si la tubería se recubre con un aislante térmico que presenta un coeficiente global de transferencia de calor igual a  $0,2 \frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F}$ , la temperatura del petróleo no va a caer rápidamente, causando benéficamente que el fluido llegue a su destino de acopio o almacenamiento con una muy buena presión alrededor de 940 psi y la temperatura este 113 °F, con este aislante térmico se ahorra la implementación de una segunda zona de calentamiento que además de ser doblemente costosa no da los resultados requeridos para poder transportar el crudo, con el aislante se utiliza una sola zona de calentamiento del crudo y hasta se puede reducir la presión de las bombas de despacho lo que también se genera un ahorro de potencia.

### 3.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN UN CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

En esta sección se hizo un análisis de sensibilidad de las variables involucradas en el proceso de calentamiento eléctrico resistivo, para esta sensibilidad se tomó

como caso base el modelo de la sección 3.3, la tubería aislada térmicamente, este tipo de aislamiento ayudara a evitar la disipación del calor hacia el medio ambiente, y no reduce la capacidad de transporte del crudo porque la temperatura del petróleo no alcanza la temperatura del ambiente y la viscosidad no aumentara por lo que no que generaría una mayor restricción de flujo de petróleo. Este análisis se hizo para encontrar hasta qué punto una variable es óptima en el modelo del oleoducto para hallar las mejores condiciones operativas de este.

Las variables involucradas son:

- Coeficiente global de transferencia de calor( tuberías desnuda, tuberías aisladas térmicamente)
- Temperatura del fluido
- Presión de funcionamiento del oleoducto
- Diámetro del oleoducto
- Tasa de flujo a través del oleoducto.

#### **3.4.1 Análisis de sensibilidad de coeficiente global de transferencia de calor y temperatura.**

La primera variable es el coeficiente global de la transferencia de calor como se vio en la sección anteriores 3.2 y 3.3 un mayor coeficiente de transferencia de calor genera mayor pérdidas de calor a través de la tubería causando que la temperatura del fluido rápidamente se vuelva a establecer a la del ambiente, es por esto, que para la aplicación de este método calentamiento eléctrico resistivo o cualquier otro método donde se requiera calentar el petróleo, se debe aislar o recubrir la tubería en busca de prevenir o evitar la pérdidas de calor, si no se hace esto se estaría haciendo un proceso totalmente ineficiente que lo único que producirá es perdidas de dinero. En la figura 18 se puede observar como es el comportamiento de la presión y temperatura en las tuberías desnuda, aislada y recubierta. Una tubería recubierta, se puede decir que es una tubería que está

enterrada o que tenga algún recubrimiento especial que usualmente se usan para prevenir corrosión o desgaste en la tubería.

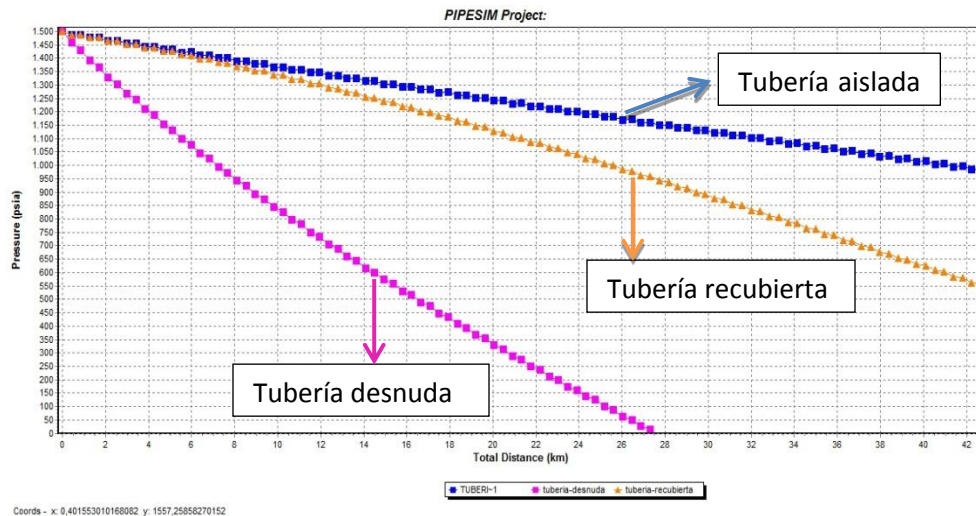
La siguiente tabla muestra los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor para cada tubería.

**Tabla 6.** Coeficientes globales de transferencia d calor.

Tipos de tubería	Coeficiente global de transferencia $\left[ \frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F} \right]$
Tubería aislada	0,2
Tubería recubierta	2
Tubería desnuda	20

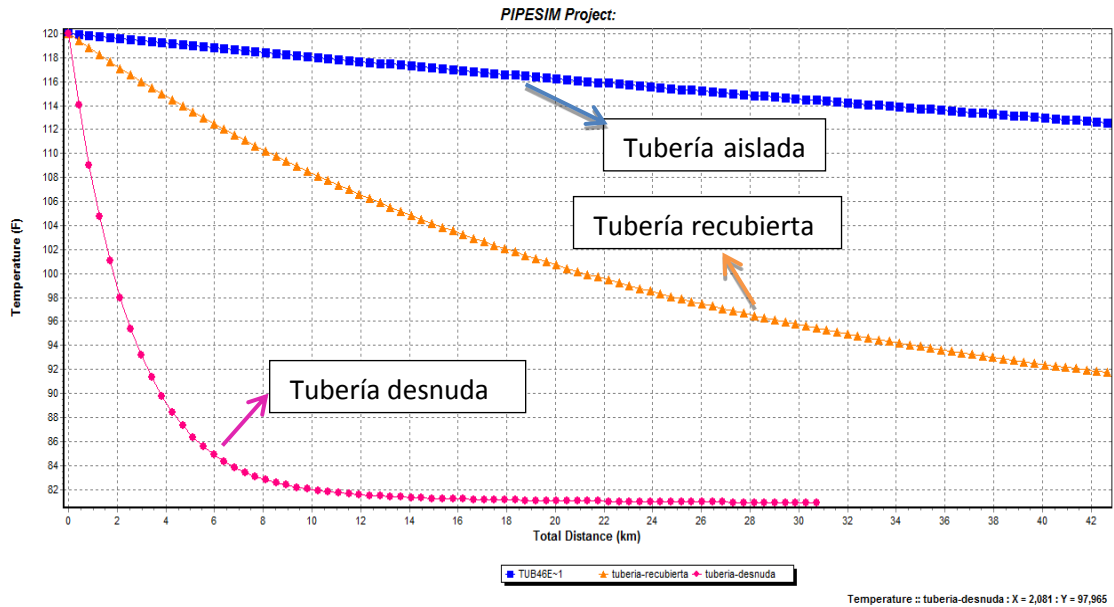
Fuente: PIPESIM SLB.

**Figura 18.** Variación de la presión a lo largo de la tubería.



Fuente: PIPESIM SLB.

**Figura 19.** Variación de la temperatura a lo largo de la tubería.



Fuente: PIPESIM SLB.

En las figuras (18, 19) se puede observar como ya se había mencionado antes, si la tubería está aislada térmicamente o recubierta la caída de presión y temperatura no van ser tan rápida, haciendo que el flujo dentro del tubo sea mucho más fácil para el crudo.

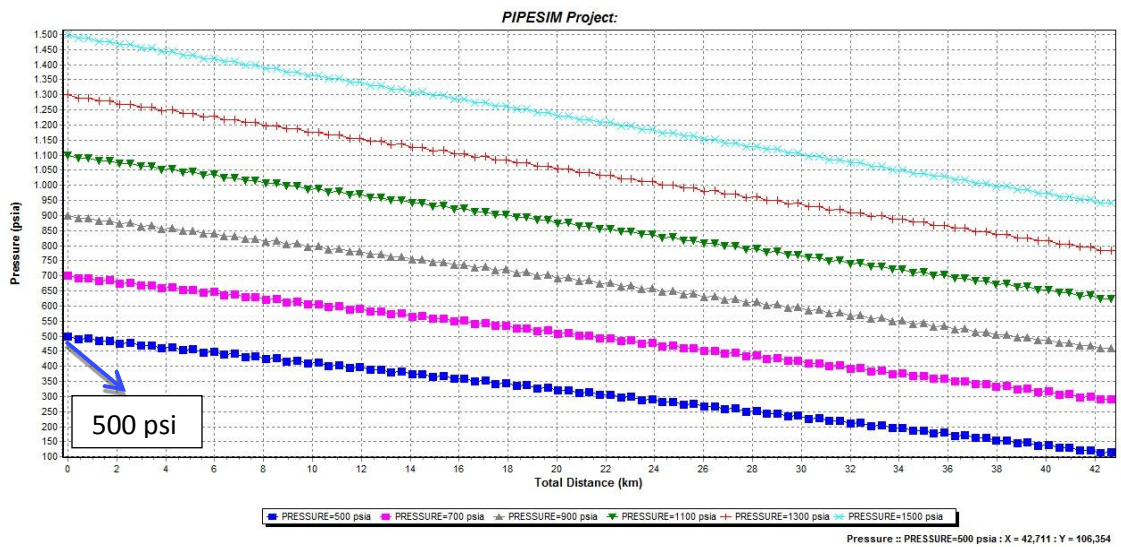
### 3.4.2 Sensibilidad de la presión de operación.

La presión de operación o de descarga del oleoducto es de 1500 psi, esta presión es más que suficiente para transportar los 150.000 STBD, calentados hasta una temperatura de 120 °F, a través del oleoducto que está aislado térmicamente y llevarlos hasta el centro de acopio o recolección del petróleo, como se vio en la figura 17, la presión de llegada es de 940 psi aproximadamente, lo que dice es que está llegando con una muy buena presión y se podría reducir la presión de operación para ahorrar energía en la potencia de las bombas, en las siguientes figuras se puede observar cual es la mínima presión a la cual puede funcionar el oleoducto, la tabla 7 muestra los valores de la sensibilización de la presión de operación del oleoducto.

**Tabla 7.** Valores de la presión de operación del oleoducto en la sensibilización.

Presión de operación	Psi
Base	1500
Abajo 1	1300
Abajo 2	1100
Abajo 3	900
Abajo 4	700
Abajo 5	500

**Figura 20.** Sensibilidad de la presión de operación.



Fuente: PIPESIM SLB.

Como se muestra en la figura 20, se puede observar que la mínima presión de operación del oleoducto es de 500 psi, con esta presión se puede transportar los 150.000 STBD sin ningún problema siempre y cuando el petróleo sea calentado hasta los 120 °F y la tubería esté aislada térmicamente. Si se implementa el calentamiento eléctrico resistivo reduciría hasta un 60 % aproximadamente, en la presión de operación de las bombas en las estaciones de despacho del crudo, siendo un gran beneficio ya se estaría ahorrando energía en el funcionamiento de estas.

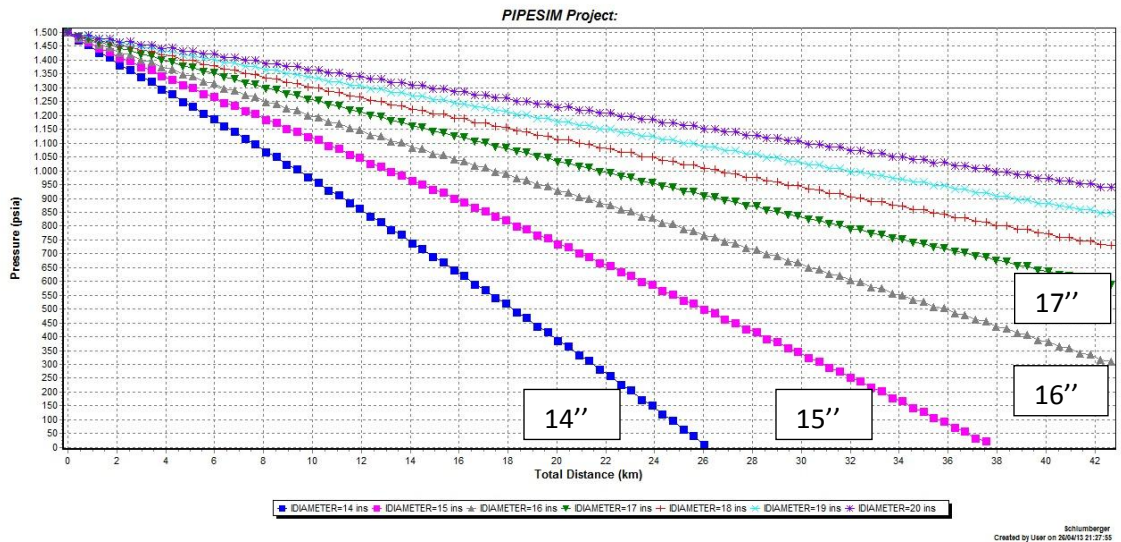
### 3.4.3 Sensibilidad diámetro del oleoducto

El diámetro del oleoducto en el caso base es de 20'' (pulgadas), utilizando este diámetro de tubería el oleoducto puede transportar la tasa de petróleo hasta su destino final. En la siguiente tabla se muestra los valores de diámetros del oleoducto sensibilizados.

**Tabla 8.** Valores de diámetros del oleoducto.

Presión de operación	Pulgadas
Base	20
Abajo 1	19
Abajo 2	18
Abajo 3	17
Abajo 4	16
Abajo 5	15
Abajo 6	14

**Figura 21.** Sensibilidad del diámetro del oleoducto.



Fuente: PIPESIM SLB.

La figura 21 muestra que el diámetro mínimo que se puede utilizar para el transporte de la tasa de petróleo que es de 150.000 STBD a una presión de 1500

psi es de 16” (pulgadas), este diámetro se puede implementar, claro está como en los casos anteriores si el crudo es calentado y la tubería está aislada térmicamente.

Esta sensibilidad sería muy importante para tener en cuenta, cuando se está diseñando el oleoducto para luego realizar su construcción, ya que indicaría el diámetro mínimo que se podría utilizar en el trayecto de este.

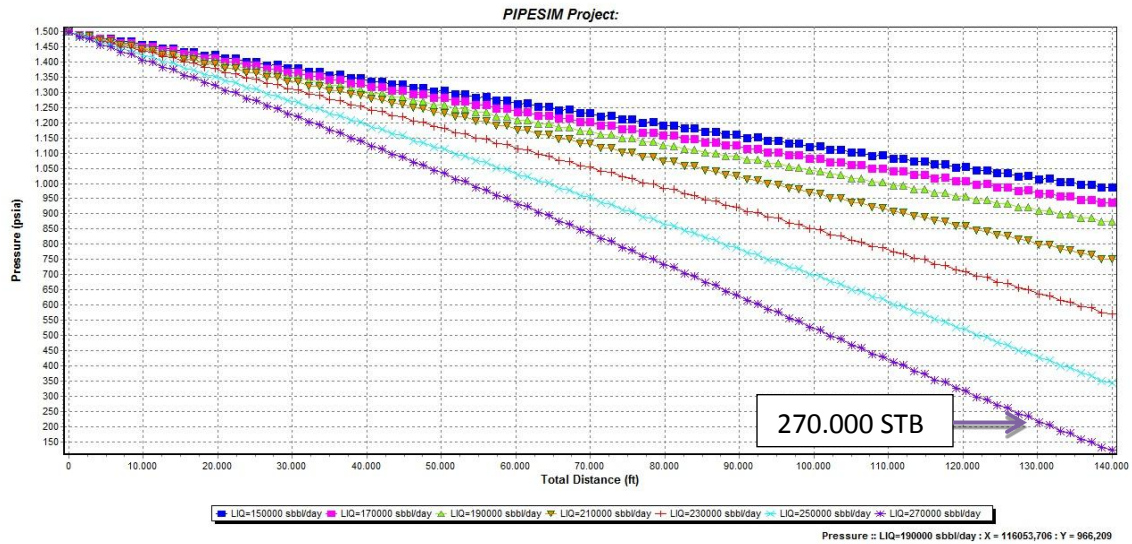
#### 3.4.4 Sensibilidad tasa de flujo del oleoducto

La tasa transportada por el oleoducto diariamente es de 150.000 barriles en un oleoducto de 20” (pulgadas) a una presión de descarga de las bombas de 1500 psi, esta tasa se transporta fácilmente por el oleoducto ya que primero se calienta por medio del tratamiento eléctrico resistivo, como el oleoducto maneja cómodamente esta tasa de flujo se podría incrementar a una tasa mayor, con el fin de aumentar la capacidad de flujo del oleoducto, pero si se aumenta el caudal de petróleo para transportar, se tendría que suministrar una tasa mayor de calor por medio de las resistencias para poder calentar el crudo, lo que significaría un aumento en los costos en el consumo de energía eléctrica, lo que supondría que el proceso sería in práctico debido al consumo de energético para poder realizar el proceso de calentamiento. En la siguiente tabla se muestra los valores de las tasas de petróleo que va a transportar el oleoducto, siendo previamente calentados hasta 120 °F para su desplazamiento.

**Tabla 9.** Valores de diámetros del oleoducto.

Tasas de petróleo	STBD
Base	150.000
Arriba 1	170.000
Arriba 2	190.000
Arriba 3	210.000
Arriba 4	230.000
Arriba 5	250.000
Arriba 6	270.000

**Figura 22.** Sensibilidad de tasas de petróleo.



Fuente: PIPESIM SLB.

La figura anterior muestra el aumento de tasa de petróleo que puede transportar el oleoducto, siendo 270.000 la máxima tasa posible, que se puede transportar a través del oleoducto con las condiciones operacionales iniciales. Pero calentar esta cantidad de petróleo se necesitaría una mayor longitud de calentamiento de la tubería y una gran cantidad de energía eléctrica para este proceso, casi imposibilitando el uso del calentamiento eléctrico resistivo debido a la disponibilidad de la energía eléctrica.

Lo anterior muestra que sería viable la ejecución de este proceso de calentamiento del crudo para su transporte, como se observó en la sensibilización se puede observar que tiene más ventajas que desventajas, pero este proceso no solo no se limita netamente al transporte de crudo pesado también se podría aplicar para el calentamiento de crudo parafinico, el petróleo se calienta para evitar la cristalización y precipitación de las parafinas componente más valioso de este tipo de crudo.

## CONCLUSIONES

El incremento de la demanda energética mundial y la declinación de los crudos convencionales, hace necesaria la explotación y producción de hidrocarburos pesados. El principal problema de los crudos pesados radica en su alta viscosidad, por lo cual se presenta una mayor resistencia al flujo en tuberías; los nuevos métodos de transporte en oleoductos buscan disminuir la viscosidad del hidrocarburo para aumentar la capacidad de flujo del mismo y así obtener un transporte de crudo óptimo y rentable.

Calentamiento eléctrico resistivo ha mostrado ser un método viable para la aplicación del transporte de crudo pesado ya que el calentamiento petróleo es uniforme y por lo tanto la reducción de la viscosidad también va a ser uniforme, con lo que se facilita el transporte de petróleo a través del oleoducto.

Se obtuvo una distancia de calentamiento de CENGEL, Yunus. "Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill 3100 ft, longitud alta comparada con otros métodos de transporte pero que justifica su aplicación al presentarse una drástica reducción de la viscosidad del crudo y un aumento significativo en la movilidad del hidrocarburo en el oleoducto.

Para la aplicación de este método de calentamiento del petróleo pesado se hace necesario aislar térmicamente el oleoducto ya que las pérdidas de calor harían ineficiente el transporte del crudo y generaría un aumento de costos de operación.

El método de calentamiento eléctrico resistivo no se limita solamente al transporte de crudo pesado, también se puede utilizar para calentar y transportar crudos parafinicos con el fin de evitar la cristalización y precipitación de los parafinas en el oleoducto componente máspreciado de este tipo de crudo.

Con la aplicación del este método de calentamiento eléctrico se previene la floculación y precipitación de asfáltenos del petróleo a lo largo de la tubería, siendo la caída de presión el principal factor de precipitación.

La energía requerida por las resistencias para el calentamiento del petróleo es un factor determinante para la aplicación de este método ya que este se restringe a la disponibilidad y capacidad de las redes eléctricas e influye considerablemente en el análisis económico para una posible aplicación de esta técnica de transporte.

Los altos precios de los diluyentes de crudo pesado hace atractivo el estudio y aplicación de nuevos métodos de transporte de crudo pesado.

Este método puede ser más factible en regiones cálidas debido a que requerimiento de energía para calentar el petróleo se reduce y se puede evitar el uso de aislamiento térmico reduciendo la inversión inicial y los costos de operación del método de calentamiento eléctrico resistivo.

Cuando un crudo pesado es sometido a calentamiento se hace necesario calcular el perfil de temperatura a lo largo de la línea de transporte para localizar las estaciones intermedias para el recalentamiento del petróleo, esto se hace cuando el petróleo deber recorrer grandes distancias.

Con el uso de este método de calentamiento se evita problemas o daños en las bombas en la estación de bombeo.

## RECOMENDACIONES

- 1- Un análisis económico del método de calentamiento eléctrico resistivo, permite tener un conocimiento sobre los costos para la aplicación de éste técnica, comparar su viabilidad frente a otro método de transporte de crudo pesado y su aplicación en un determinado campo.
- 2- Utilizar un 10% más de la energía utilizada para calentar el crudo ya que en el proceso se puede presentan pérdidas e irreversibilidades.
- 3- Utilizar una tubería de acero tipo austenítico, en la zona de transferencia de calor del oleoducto (zona calentamiento), ya que este tipo de acero es resistente si es expuesto a elevadas temperaturas.
- 4- En la longitud del oleoducto utilizada para el calentamiento del petróleo se recomienda reducir hasta un diámetro mínimo, para aumentar el número de Reynolds del crudo, ya que a mayor número de Reynolds la transferencia de calor se realizará rápidamente y reduciría la zona o longitud para la transferencia de calor.
- 5- En la zona de calentamiento en el oleoducto la posición de las resistencias no necesariamente tiene que ser uniforme, se pueden separar a una determinada distancia ya que las resistencias emiten suficiente energía para calentar la tubería a la temperatura deseada.
- 6- Se debe utilizar un sistema de control de temperatura de las resistencias, se puede utilizar un sistema control ON/OFF, que consta de un pirómetro con sensor, también se puede utilizar un termostato.

- 7- Se debe recubrir las resistencias con un techo o un recubrimiento para prevenir la humedad de las resistencias, porque siendo un proceso eléctrico la humedad haría corto y dañaría el sistema.
- 8- No utilizar las resistencias a su máxima temperatura de funcionamiento ya que reduce su vida útil de funcionamiento o se pueden dañar.
- 9- Se puede utilizar un sistema de dos resistencias para el calentamiento, como la ubicación de la resistencias no es homogénea a lo largo del tubo se puede instalar otra resistencia en el espacio vacío, cuando una resistencia lleve un buen funcionamiento trabajando se apaga y se prende la otra, se aumentaría el costo de la inversión inicial pero se alargaría la vida la resistencias.
- 10- Para la implementación de este método a gran escala se recomienda realizar primero un modelo piloto para evaluar el comportamiento del proceso si es expuesto a diferentes ambientes.

## BIBLIOGRAFÍA

ALBOUDWAREJ, Hussein, FELIX, Joao. "La importancia del petróleo pesado". Oilfield Review. Otoño de 2006

ARCE, Gloria, HERNANDEZ, Luis. "Estudio y Análisis de las Principales Técnicas Utilizadas para el Transporte de Crudo Pesado por Oleoducto". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 1985.

BANZER, Carlos. "Correlaciones Numéricas P.V.T". Universidad de Zulia, Instituto de Investigaciones Petroleras, Fundación Laboratorio de Servicios Técnicos Petroleros. Maracaibo, Enero de 1996.

BENNISON, Trevor. "Prediction of heavy oil viscosity". Presented at the IBC Heavy Oil Field Development Conference, London, 2-4 December 1998

CENGEL, Yunus. "Transferencia de calor y masa". Editorial Mc-Graw Hill, 2007.

CUBIDES, Laura. PEÑA, Paula. "Sensibilidad de las variables operacionales en el transporte de crudos pesados". Tesis de pregrado de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.

DOMÍNGUEZ, J.C.v "Transporte de crudo pesado a través de oleoducto, Evaluación de diferentes tecnologías". Ingeniería Química No.465 (2008).

DONALD, R. Pitts. "Teoría y Problemas de Transferencia de Calor". Editorial McGraw Hill, Santa Fe de Bogotá, Colombia 1980

FiberGlass en Campo Rubiales – Pacific Rubiales Energy. “Aislamiento térmicos en el principal yacimiento de crudo pesado”. Octubre de 2010.

GOMEZ, Luis. “Recuperación mejorada de hidrocarburos inyección cíclica y continua de vapor”. Publicación Universidad Industrial de Santander, 1989.

GUERRERO Adriana, VACA Luis. “Mejoramiento (upgrading) de crudos pesados y extra - pesados por inyección de vapor sobrecalentado y catalizadores en oleoductos (Tuberías)”. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2007.

KERN, Donald. “Procesos de transferencia de calor”. Editorial McGraw Hill, México D.C, México 1982.

MILLS, Anthony. “Transferencia de Calor”. McGraw Hill, 1997

M.S. Hossain, C.Sarica, H. Q. Zhang “Assesment and Development of Heavy-Oil Viscosity Correlations”. Society of Petroleum Engineers, 2005.

OÑATE, J. RODRIGUEZ, R. “Evaluación de las alternativas de transporte de crudo pesado por tuberías: caso aplicado al campo rubiales”. Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.

PADILLA, Juan Pablo. SUAREZ, Edgar Alberto. “Tratamiento eléctrico experimental para el transporte de crudos pesados en oleoductos”. Tesis de pregrado de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1997.

TROUVAY and CAUVIN, Piping Equipment, Norma API 5L, Tubos de conducción, 2001.

VALENCIA, H. "Transferencia de Calor". Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1988.

WELTY, James. "Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería", Editorial Limusa, S.A Grupo Noriega Editores, Mexico D.F 1996

YATTE, Fabián. Camilo, VILLAMIZAR, Ingrith Johana. "Aplicación de pozos horizontales en procesos de inyección de agua mediante simulación numérica". Tesis de pregrado de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2008.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A CÁLCULOS TEÓRICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN OLEODUCTO SOMETIDO A UN CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO**

Los cálculos teóricos que se realizaron en éste trabajo nos sirven como base para comenzar la simulación numérica, se hará un balance de energía en la tubería y la resistencia para determinar el espaciamiento y la energía necesaria que debe suministrar la resistencia en el oleoducto para elevar la temperatura del petróleo pesado que fluye a través de este.

Los cálculos se van a dividir en dos partes en la primera se hará el balance de energía en el oleoducto y se calculara la energía y la longitud de la resistencia envuelta homogéneamente a lo largo del tubo, necesaria para elevar la temperatura deseada en el interior, luego se calculará la energía disipada por la resistencia en el medio ambiente, se determinará la pérdida de energía a lo largo de la tubería desnuda y recubierta con un aislante térmico, y una suposición que se hace es que en la operación y aplicación de la técnica está en estado estacionario, también se calcularan las pérdidas de calor a lo largo de la tubería.

Los datos iniciales para realizar los cálculos en este capítulo se presentan en el capítulo 3.1.2 en las tablas (4,5), a continuación se muestra las características del fluido que atraviesa el oleoducto en este caso el petróleo pesado.

**Tabla 10.** Descripción de las características del petróleo pesado.

Característica	Descripción
<i>Tasa de flujo</i>	150.000 STBD
<i>API</i>	12
<i>Densidad del petróleo</i>	339,73 Lb/Bbl
<i>Flujo másico</i>	589,80 Lb/s ↔ 2123280 Lb/hr
<i>Velocidad promedio</i>	4,47 ft/s
<i>Capacidad calorífica</i>	0,440 BTU/lb-°F
<i>Conductividad térmica</i>	0,06735 BTU/ft-°F-hr
<i>Temperatura ambiente</i>	80 °F
<i>Temperatura salida crudo</i>	120 °F
<i>Temperatura promedio</i>	100 °F

Algunas de las propiedades del crudo se calcularon por medio de correlaciones y otras vienen de forma predeterminada en el simulador, para el cálculo de estas propiedades se debe utilizar la temperatura media aritmética lo que es lo mismo que la temperatura promedio del fluido.

Temperatura promedio.

$$T_{prom} = \frac{T_2 + T_1}{2}$$

$$T_{prom} = \frac{120 + 80}{2}$$

$$T_{prom} = 100 \text{ } ^\circ F$$

$T_2$  = Temperatura a la que se desea calentar el petróleo.

$T_1$  = Temperatura ambiente.

**calor específico<sup>27</sup>.**

$$C_o = \frac{(0,388+0,0045T)}{\sqrt{G.E}} \tag{76}$$

T= Temperatura promedio °F.

G.E= Gravedad específica del petróleo.

<sup>27</sup> GOMEZ, Luis. "RECUPERACION MEJORADA DE HIDROCARBUROS INYECCION CICLICA Y CONTINUA DE VAPOR". Publicación Universidad Industrial de Santander. 1989.

### Conductividad térmica<sup>28</sup>.

$$K_h = \frac{0,0677[1-0,0003(T-32)]}{\sqrt{G.E}} \quad (77)$$

T= Temperatura promedio en °F.

G.E= Gravedad específica del petróleo.

### Densidad corregida a la temperatura promedio<sup>29</sup>.

$$\rho_o = \frac{\rho_o @ T \text{ amb}}{\sqrt{G.E}}$$

### Viscosidad del petróleo

La viscosidad del petróleo se calculó con la correlación de Egbugah-Jack.

$$\mu_o = 10^{10(2,06492-0,0179API-0,70226\log(T))} - 1$$

Donde

$\mu_o$  = Viscosidad del petróleo en cP.

API= gravedad API del petroleo.

T = Temperatura en °F.

## 1. BALANCE DE ENERGÍA

### 1.1 Balance de energía en el oleoducto.

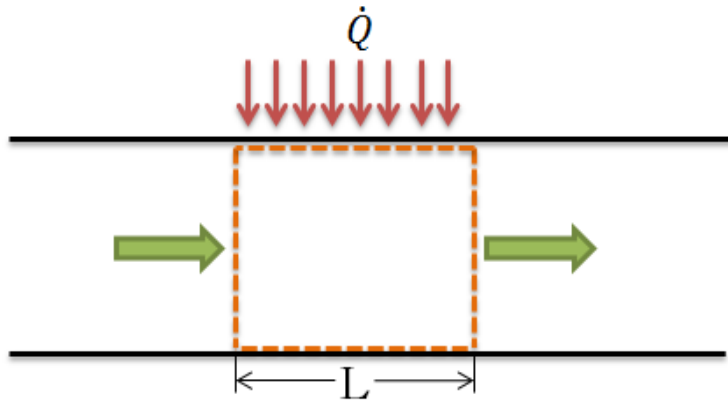
El balance en el oleoducto es el siguiente

---

<sup>28</sup> GOMEZ, Luis. "RECUPERACION MEJORADA DE HIDROCARBUROS INYECCION CICLICA Y CONTINUA DE VAPOR". Publicación Universidad Industrial de Santander. 1989.

<sup>29</sup> GOMEZ, Luis. "RECUPERACION MEJORADA DE HIDROCARBUROS INYECCION CICLICA Y CONTINUA DE VAPOR". Publicación Universidad Industrial de Santander. 1989.

**Figura 23.** Balance de energía en tubo.



Fuente: Los autores.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

Donde

$\dot{Q}$  = Es el calor suministrado por la resistencia BTU/hr.

$\dot{m}$  = Flujo másico de petróleo pesado Lb/hr.

$c_p$  = Capacidad calorífica del petróleo  $\frac{BTU}{lb-^{\circ}F}$

$T_2$  = Temperatura a la que se desea calentar el petróleo  $^{\circ}F$ .

$T_1$  = Temperatura ambiente  $^{\circ}F$ .

$$\dot{Q} = 2123280 \frac{lb}{hr} \times 0,44 \frac{BTU}{lb-^{\circ}F} \times (120 - 80)^{\circ}F$$

$$\dot{Q} = 37369728 \frac{BTU}{hr} \rightarrow 10945,593 \text{ kwatts}$$

Calor necesario para elevar la temperatura del crudo hasta los 120  $^{\circ}F$ .

## 1.2 Cálculo del número de Reynolds.

Con el número de Reynolds podemos identificar el tipo de flujo que se presenta dentro de la tubería.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi D}$$

$\dot{m}$  = Flujo másico Lb/s.

$\mu$  = Viscosidad Lb/ft-s.

D= diámetro tubería en ft.

$$Re = \frac{4 \left( 589,8 \frac{lb}{sg} \right)}{\pi x \left( 0,4136 \frac{lb}{ft - sg} \right) x \left( \frac{20}{12} \right) ft}$$

$$Re = 1089,4$$

Dentro de la tubería se presenta régimen de flujo laminar  $Re < 2300$ .

### 1.3 Cálculo del número de Prandtl.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$
$$Pr = \frac{0,4136 \frac{lb}{ft - sg} x 0,44 \frac{BTU}{lb - ^\circ F}}{0,06735 \frac{BTU}{ft - ^\circ F - hr}}$$

$$Pr = 9722,33$$

### 1.4 Calculo de longitudes de entrada hidrodinámica y termodinámica

#### Longitud de entrada hidrodinámica

Para el cálculo de las longitudes de entrada se utiliza la siguiente correlación

$$L_H = 0,005 Re D$$

$$L_H = 0,05 (1089,4) (20 \text{ in})$$

$$L_H = 1089,4 \text{ in} \leftrightarrow 90,8 \text{ ft}$$

El fluido necesita 90,8 ft, aproximadamente para alcanzar el desarrollo hidrodinámico en la tubería, y tener completamente parabólicos los perfiles de velocidad del fluido.

#### Longitudes de entrada termodinámica

$$L_T = 0,005 Re Pr D$$

$$L_T = 0,05 (1089,4) (9722,33) (20 \text{ in})$$

$$L_T = 10591506,3 \text{ in} \leftrightarrow 882625,5 \text{ ft}$$

El fluido necesita 882625,5 *ft* aproximadamente para alcanzar el desarrollo térmico, esto supera la longitud del oleoducto, de modo que a lo largo de la tubería el fluido va a estar en desarrollo térmico y este tipo de comportamiento es típico de fluidos con alto número de Prantl.

Para que un fluido se encuentre en la región completamente desarrollada debe estar completamente desarrollado hidráulicamente como térmicamente por eso se concluye que el fluido está en desarrollo y se utilizará la correlación de Hausen para calcular el número de Nusselt y posteriormente el coeficiente de transferencia de calor interno.

### 1.5 Cálculos del número de Nusselt coeficiente de convección interna.

Como se mencionó antes el fluido dentro del oleoducto no se encuentra completamente desarrollado y también presenta un régimen de flujo laminar se utiliza la correlación de Hausen para poder determinarlo.

El número de nusselt se define como:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k}$$

Donde

$\bar{h}$  = Coeficiente de transferencia de calor interno promedio  $\frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F}$

$k$  = Conductividad térmica BTU/ft-hr- $^{\circ}F$

$D$  =Diámetro en ft.

Y la correlación Hausen<sup>30</sup> viene dada por

$$\overline{Nu} = Nu_D + \frac{k_1[(D/x)RePr]}{1 + k_2[(D/x)RePr]^n}$$

<sup>30</sup> DONALD, Pitts. "TEORÍA Y PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR"

$Nu_D$  = Es el coeficiente de local de transferencia de calor cuando el flujo está desarrollado que es iguala a 4,36 y  $\overline{Nu}$  representa el coeficiente promedio en el intervalos  $0 < x < L$  , siendo  $L$  , la distancia necesaria para la transferencia de calor en el proceso, los valores de  $k_1$  ,  $k_2$  y  $n$  se toman según las condiciones de entrada hidrodinámica y térmicamente, en la siguiente tabla se puede observar los valores de las constantes.

**Tabla 11.** Constantes de la correlación de Hausen.

Condición de la pared	Velocidad de entrada	$Nu_D$	$k_1$	$k_2$	$n$
$\dot{Q}$ constante	Desarrollada	4,36	0,023	0,0012	1
$\dot{Q}$ constante	No desarrollada	4,36	0,036	0,0011	1

Fuente : Transferencia de calor Pitts.

Como el fluido se desarrolla hidrodinamicamente a una distancia de 90,8 ft se toman los valores de  $\dot{Q}$  contante y velocidad de entrada desarrollada.

Reemplazando todos los valores tenemos

$$k = 0,06735 \frac{BTU}{ft - hr - ^\circ F}$$

$$D = \left(\frac{20}{12}\right) ft \leftrightarrow 1,7 ft$$

$$Re = 1089,4$$

$$Pr = 9722,33$$

Obtenemos

$$\frac{\bar{h}(1,7 ft)}{0,06735 \frac{BTU}{ft - hr - ^\circ F}} = 4,36 + \frac{0,023[(1,7ft/x)(1089,4)(9722,33)]}{1 + 0,0012[(1,7ft/L)(1089,4)(9722,33)]}$$

$$25,241 h \frac{BTU}{ft^2 - hr - ^\circ F} = 4,36 + \frac{\frac{414127,89}{L}}{1 + \frac{21606,67}{L}}$$

$$\bar{h} = \frac{1}{25,241} \left( 4,36 + \frac{\frac{414127,89}{L}}{1 + \frac{21606,67}{L}} \right) \left[ \frac{BTU}{ft^2 - hr - ^\circ F} \right]$$

Despejando  $\bar{h}$  queda en función de  $L$  que es la longitud necesaria de la tubería para la transferencia de calor para calentar el petróleo a 120 °F.

Para determinar la distancia necesaria para la transferencia de calor es necesario hacer un balance de energía donde involucre el coeficiente de convección interna y así poder satisfacer la ecuación anterior y calcular la distancia de necesaria para que se dé la transferencia de calor.

Se hace un balance de energía en el fluido.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) = \bar{h}\pi DL(T_{sup} - T_{prom})$$

Donde

$T_{sup}$  = Temperatura superficial de la tubería.

$T_{prom}$  = Temperatura promedio del fluido.

Como el medio de calentamiento es por medio de una resistencia eléctrica, la temperatura de la superficie de la tubería va a ser igual a la temperatura de funcionamiento de la resistencia, una resistencia puede alcanzar temperaturas iguales a 1650 °F pero este tipo de resistencia es muy costosa y su funcionamiento es muy limitado por las altas temperaturas que maneja.

La temperatura de superficie que se utilizó para desarrollar el ejercicio es 1300 °F.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) = \bar{h}\pi DL(T_{sup} - T_{prom})$$

$$\dot{Q} = 2123280 \frac{lb}{hr} \times 0,44 \frac{BTU}{^\circ F - lb} \times (120 - 80)^\circ F = \bar{h}\pi L(1,7)ft(1300 - 100)^\circ F$$

$$\bar{h} = \frac{2123280 \frac{lb}{hr} \times 0,44 \frac{BTU}{^\circ F - lb} \times (120 - 80)^\circ F}{\pi(1,7)ft(1300 - 100)^\circ F \times L}$$

$$\bar{h} = \frac{5830,96}{L} \frac{BTU}{hr - ft - ^\circ F}$$

Como la diferencias de temperaturas entre la pared de la tubería y temperatura promedio del fluidos es notoriamente grande se debe aplicar un factor de corrección donde se involucra el efecto de temperatura que incide sobre la viscosidad del fluido, este factor va multiplicar la el lado derecho de la ecuación de Hausen.

$$\left( \frac{\mu_{prom}}{\mu_{sup}} \right)^{0,14} = \left( \frac{0,4136 \frac{lb}{ft - sg}}{0,001269 \frac{lb}{ft - sg}} \right)^{0,14}$$

$$\left( \frac{\mu_{prom}}{\mu_{sup}} \right)^{0,14} = 2,248$$

Donde

$\mu_{prom}$  = Viscosidad a temperatura promedio del fluido.

$\mu_{sup}$  = Viscosidad a temperatura de superficie de la tubería.

Reemplazando las ecuaciones y el factor de corrección queda.

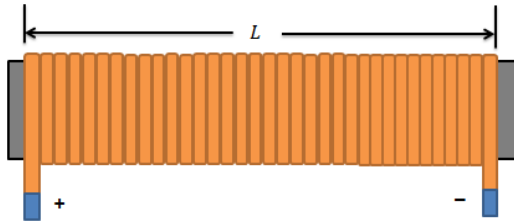
$$\frac{5830,96}{L} = \frac{1}{25,241} \left( 4,36 + \frac{\frac{414127,89}{L}}{1 + \frac{21606,67}{L}} \right) (2,248)$$

Despejando  $L$  queda

$$L = 3100 \text{ ft}$$

Esta es la longitud necesaria para la transferencia de calor en la tubería para elevar la temperatura del crudo a 120 °F, en la figura 24 se puede observar se observa la tubería envuelta con la resistencia para realizar el proceso de calentamiento.

**Figura 24.** Representación del oleoducto envuelto con la resistencia eléctrica.



Fuente: los autores.

Reemplazando la longitud en la ecuación se obtiene el coeficiente de convección interna promedio.

$$\bar{h} = \frac{1}{25,241} \left( 4,36 + \frac{414127,89}{3100} \right) (2,248) \left[ \frac{BTU}{ft^2 - hr - ^\circ F} \right]$$

$$\bar{h} = 1,715 \frac{BTU}{ft^2 - hr - ^\circ F}$$

El valor tan pequeño de este coeficiente de convección se debe a que el régimen de flujo dentro de la tubería es laminar y la transferencia de calor es más lenta comparada con un régimen de flujo turbulento.

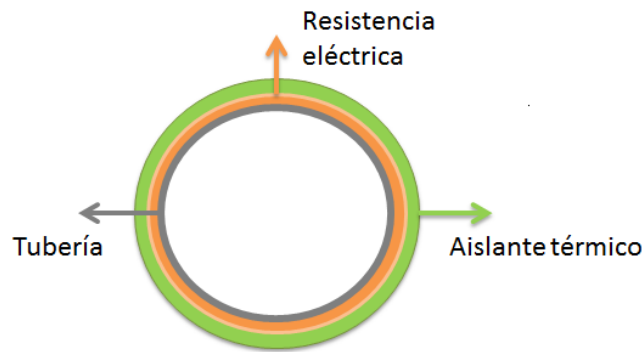
### 1.6 Cálculo espesor del aislante

En esta sección se calcula el espesor del aislante térmico que se utiliza para envolver la resistencia eléctrica a lo largo de la sección de la transferencia de calor, el objetivo del aislante térmico es evitar pérdidas de energía que se disipan en el medio ambiente, también se hace el recubrimiento para cumplir normas de seguridad. El aislante térmico utilizado y que soporta adecuadamente las altas temperaturas es la manta de cerámica, soporta temperaturas hasta 2000 °F y es recomendada debido a la alta temperatura que se somete la tubería para realizar el proceso.

**Tabla 12. Características de la resistencia y aislante.**

Temperatura superficial resistencia	1300 °F
Temperatura del ambiente	80 °F
Conductividad térmica de aislante	0,02889 $\frac{BTU}{hr-^{\circ}F-ft^2}$
Espesor del aislante	1 in
Longitud tubería transf. Calor	3100 ft

**Figura 25.** Representación de la tubería recubierta con resistencia y aislante térmico.



Fuente: Los autores.

A continuación se muestra un procedimiento para determinar el espesor y la temperatura superficie del aislante térmico<sup>31</sup>. El aislante utilizado es fibra de cerámica, este aislante térmico es indicado para recubrir la resistencia ya que soporta temperaturas hasta 2000 °F, es muy utilizado para aislar hornos y calderas en cualquier proceso industrial.

Procedimiento para el cálculo del espesor del aislante.

1. Suponer una temperatura en la superficie del aislante.
2. Calcular la temperatura promedio.

$$T_{prom} = \frac{T_{amb} + T_{sup}}{2}$$

<sup>31</sup> GUERRERO Adriana, VACA Luis. "Mejoramiento (upgrading) de crudos pesados y extra - pesados por inyección de vapor sobrecalentado y catalizadores en oleoductos (Tuberías)". Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2007

3. Calcular las propiedades del aire a la temperatura promedio (viscosidad, conductividad térmica, número de prandtl).

4. Calcular el gradiente de densidad.

$$B = \frac{1}{T_{prom}} \quad (78)$$

5. Se calcula el número de Grashof y el número de Rayleigh.

$$Gr = \frac{g \cdot B \cdot (T_{sup} - T_{amb}) D^3}{\nu^2} \quad (79)$$

$$Ra_D = Gr Pr$$

A partir del número de  $Ra_D$  se calcula el número de nusselt.

$$\overline{Nu}_D = 0,36 + \frac{0,51 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}; 10^{-6} < Ra_D \leq 10^9 \quad (80)$$

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,6 + 0,387 \left[ \frac{Ra_D}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{16/9}} \right]^{1/6} \right\}^2 Ra_D \geq 10^9 \quad (81)$$

6. Se calcula el coeficiente de convección externa.

$$\overline{Nu}_D = \frac{h_o \cdot D}{k} \rightarrow h_o = \frac{\overline{Nu}_D k}{D}$$

7. Calculo de la energía disipada.

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l (T_{sup} - T_{res})}{\ln\left(\frac{D_{ais}}{D_{res}}\right)}$$

8. Calculo temperatura superficie.

$$\dot{Q} = h_o \pi D_{aisl} x L (T_{sup} - T_{amb})$$

$$T_{sup} = \frac{\dot{Q}}{h \pi L D_{aisl}} + T_{amb}$$

9. Con el valor de  $T_{sup}$  calculando en el paso se repiten los paso 2-8 hasta que la diferencia entre los valores de  $T_{sup}$  sea relativamente pequeña. A continuación se muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 12.** Resultados cálculos del espesor aislante.

Espesor aislante (in)	$h_o \left[ \frac{BTU}{ft^2 - hr - ^\circ F} \right]$	Q (BTU/hr)	Temperatura $^\circ F$
1	1,065	15433957,7	143,68
2	1,063	7882204,42	111,245
3	1,069	5363476,84	100,469
4	1,059	4103070,35	95,1
5	1,057	3346039,13	91,88
6	1,055	2840730,9	89,7

Si se sigue aumentando el espesor del aislante, este va a llegar a su espesor crítico donde la disipación de calor tiende a ser constante.

La energía teórica necesaria que debe emitir la resistencia a lo largo de la tubería para calentar el petróleo hasta es la suma de las tasas de calor que se suministra al fluido y la que se disipa en el aire, es igual a

$$\dot{Q}_{resistencia} = 37369728 \frac{BTU}{hr} + 2840730,9 \frac{BTU}{hr}$$

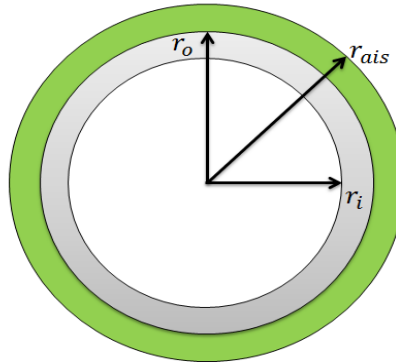
$$\dot{Q}_{resistencia} = 40210458,9 \frac{BTU}{hr} \rightarrow 11777,643 \text{ kwatts}$$

## 2. Pérdida de calor a lo largo de la tubería.

Como el crudo es calentado y debido a la diferencia de temperatura entre el fluido y la temperatura ambiente, se genera una pérdida de calor a lo largo de la tubería, enfriándose el fluido hasta llegar a la temperatura del medio ambiente. Cuando se transporta un fluido caliente siempre se quiere evitar las pérdidas de energía para ello se recurre a un aislante térmico, cuyo objetivo es evitar el flujo de calor del fluido hacia el medio ambiente. Para poder calcular las pérdidas de calor a lo largo de la tubería es necesario determinar el coeficiente global de transferencia de calor que es la suma de los diferentes mecanismos de transferencia de calor que se presenta en la tubería.

## 2.1 El coeficiente global de transferencia de calor

**Figura 26.** Figura vista transversal del oleoducto.



Fuente: Los autores.

El coeficiente global de transferencia agrupa los coeficientes de convección interno o externo, la conductividad térmica de la tubería y la resistencia térmica del aislante, si la tubería tiene un aislante térmico.

A continuación se calcula el coeficiente global de transferencia de calor  $U$

Considerando la figura 26, el cual representa la sección transversal de la tubería. Donde  $r_i$  (ft) es el radio interno de la tubería en (ft),  $r_o$  es el radio externo tubería (ft) y  $r_{ais}$  es el radio del aislante térmico en (ft).

La transferencia de calor del fluido en movimiento a la pared interna de la tubería se da por convección forzada.

$$\dot{Q}_1 = 2\pi h i (T_f - T_{ri})$$

La transferencia entre la pared interna y a la pared externa de la tubería se da por conducción.

$$\dot{Q}_2 = \frac{2\pi k_t (T_{ri} - T_{ro})}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$

La transferencia entre la pared externa de la tubería y a la pared externa del aislantes se da por conducción.

$$\dot{Q}_3 = \frac{2\pi k_{ais} (T_{ro} - T_{ais})}{\ln\left(\frac{r_{ais}}{r_o}\right)}$$

la transferencia de la superficie externa del aislante térmico, si la tubería está aislada; o desde la superficie externa de la tubería si la tubería esta desnuda al medio ambiente, se da por convección natural.

$$\dot{Q}_4 = 2\pi r_{ais} h_o (T_{ais} - T_{amb})$$

Dónde:

$T_f$  = Temperatura del fluido.

$h_i$  = Coeficiente promedio de transferencia interno.

$h_o$  = Coeficiente de transferencia externo.

$k_t$  = Conductividad térmica del acero.

$k_{ais}$  = Conductividad térmica del aislante.

Si se considera una transferencia de calor bajo las condiciones de flujo de calor continuo se tiene que el calor transferido es igual en todos lados e igualando todas la ecuaciones anteriores se tiene que.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 = \dot{Q}_4 = AU(T_f - T_{amb}) \quad (82)$$

Además que

$$(T_f - T_{amb}) = (T_f - T_{ri}) + (T_{ri} - T_{ro}) + (T_{ro} - T_{ais}) + (T_{ais} - T_{amb}) \quad (83)$$

Reemplazando las ecuaciones para las respectivas diferencias de temperatura, resulta.

$$(T_{ais} - T_{amb}) = \frac{\dot{Q}}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ais}}{r_o}\right)}{k_{ais}} + \frac{1}{r_o h_o} \right] \quad (84)$$

Si se toma el área exterior del aislante térmico nos resulta.

$$U = \frac{\frac{\dot{Q}}{A}}{(T_f - T_{amb})} = \frac{\frac{\dot{Q}}{2\pi r_{ais} L}}{\frac{\dot{Q}}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_t} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ais}}{r_o}\right)}{k_{ais}} + \frac{1}{r_o h_o} \right]} \quad (85)$$

$$U = \left[ \frac{r_{ais}}{r_i h_i} + \frac{r_{ais} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_t} + \frac{r_{ais} \ln\left(\frac{r_{ais}}{r_o}\right)}{k_{ais}} + \frac{r_{ais}}{r_o h_o} \right]^{-1} \left[ \frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F} \right] \quad (86)$$

Por ultimo nos da la siguiente ecuación general para la transferencia de calor evaluada en la superficie exterior del aislante térmico.

$$\dot{Q} = 2\pi r_{ais} U (T_f - T_{amb}) L \quad \left[ \frac{BTU}{hr} \right]$$

Esta ecuación se aplica cuando la tubería está recubierta con un aislante térmico, cuando la tubería se encuentra desnuda hay que modificar la ecuación (86) y evaluarla en la superficie exterior de la tubería.

$$U = \frac{\frac{\dot{Q}}{A}}{(T_f - T_{amb})} = \frac{\frac{\dot{Q}}{2\pi r_o L}}{\frac{\dot{Q}}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_t} + \frac{1}{r_o h_o} \right]}$$

$$U_{r_o} = \left[ \frac{r_o}{r_i h_i} + \frac{r_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_t} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \left[ \frac{BTU}{hr-ft^2-^{\circ}F} \right]$$

$$\dot{Q} = 2\pi r_o U_{r_o} (T_f - T_{amb}) L \quad \left[ \frac{BTU}{hr} \right]$$

## Coeficientes globales de transferencia de calor

Para realizar la simulación de la transferencia de calor a lo largo de tubería en el simulador PIPESIM se tomaron valores de  $U$  que ya vienen predeterminados en el simulador, estos valores del coeficiente global de transferencia de calor están en un rango aceptable según el medio o el ambiente donde se están evaluando.

**Tabla 13.** Coeficientes globales de transferencia de calor.

Tipos de ambiente de la tubería	$\frac{BTU}{hr - ft^2 - ^\circ F}$
Tubería desnuda en el aire	20
Tuberías recubierta	1
Tubería aislada	0,4

Estos valores fueron utilizados realizar las diferentes corridas y así poder evaluar las pérdidas de calor a lo largo de la tubería una vez aplicado el método de calentamiento eléctrico resistivo, las pérdidas de calor se pueden observar en las figuras del capítulo 3 donde se puede observar el comportamiento de la temperatura respecto a la distancia.

## ANEXO B. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO

