

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO HIDRODINÁMICO DE  
OLEODUCTO DE CRUDOS PESADOS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN  
SISTEMAS DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y DERIVADOS**

**Ing. OTTO FERNANDO BALSECA SAMPEDRO**  
**ottobalsecaec@hotmail.com**

**DIRECTOR: Ing. JOHNNY ZAMBRANO, Dr.**  
**johnny.zambrano@epn.edu.ec**

**Quito, NOVIEMBRE 2016**

## DECLARACIÓN

Yo, Otto Fernando Balseca Sampedro; declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Ing. Otto Fernando Balseca Sampedro

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Otto Fernando Balseca Sampedro, bajo mi supervisión.

---

**Dr. JOHNNY ZAMBRANO**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTO**

Un agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional, especialmente a quienes conforman la Facultad de Ingeniería Mecánica, por abrirme las puertas de su institución y permitirme continuar con mi formación profesional para aportar con mis conocimientos a las nuevas generaciones como docente que soy. Un agradecimiento especial a todos mis familiares, esposa, profesores y amigos que pusieron su grano de arena para ayudarme a culminar mi meta propuesta.

**Otto Fernando Balseca Sampedro**

## DEDICATORIA

A mis queridos padres Othón Balseca y Emma Sampedro, a mi adorada esposa Catalina Verdugo, a mi hermano Eduardo, mi hermana Verónica y mis tres sobrinos y demás familiares, quiénes con su amor, comprensión y paciencia han sido mi soporte y apoyo durante cada etapa de mi vida. Sin duda no hubiese alcanzado este logro sin la ayuda de ustedes.

Una dedicatoria especial a mi adorada esposa Catalina por ser mi soporte y consuelo en todos los momentos difíciles de mi vida, Dios le pague por su entrega total.

**Otto Fernando Balseca Sampedro**

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
CONTENIDO.....	v
CONTENIDO DE FIGURAS.....	xi
CONTENIDO DE TABLAS .....	xiv
PRESENTACIÓN .....	xvi
CAPÍTULO 1. PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS DEL PETRÓLEO .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS HIDROCARBUROS PESADOS.....	1
1.2.1 DENSIDAD .....	2
1.2.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA .....	2
1.2.3 GRADO API.....	2
1.2.4 VISCOSIDAD DINÁMICA .....	3
1.2.5 VISCOSIDAD CINEMÁTICA .....	4
1.2.6 PRESIÓN DE VAPOR.....	4
1.2.7 PUNTO DE FLUIDEZ .....	4
1.3 CARACTERIZACIÓN DE HIDROCARBUROS PESADOS .....	5
1.3.1 CLASIFICACIÓN QUÍMICA DE LOS HIDROCARBUROS .....	5
1.3.1.1 Hidrocarburos aromáticos .....	6
1.3.1.2 Hidrocarburos alifáticos.....	6
1.3.1.3 Hidrocarburos saturados .....	7
1.3.1.4 Hidrocarburos insaturados .....	7

1.3.2	FACTOR DE CARACTERIZACIÓN KUOP O FACTOR DE WATSON KW.....	7
1.4	PROPIEDADES TÉRMICAS DE HIDROCARBUROS PESADOS .....	8
1.4.1	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (Kh).....	8
1.4.2	CALOR ESPECÍFICO (Cp).....	8
1.4.3	NÚMERO DE PRANDTL .....	9
1.4.4	NÚMERO DE NUSSELT .....	9
1.4.5	CAPA LÍMITE TÉRMICA (Lt).....	9
1.4.6	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (h).....	10
1.5	MEZCLA DE HIDROCARBUROS .....	10
1.5.1	LEYES DE MEZCLAS .....	10
1.5.2	VISCOSIDAD DE MEZCLAS LÍQUIDAS .....	11
CAPÍTULO 2. FLUJO EN ESTADO ESTABLE EN TUBERÍAS .....		12
2.1	INTRODUCCIÓN .....	12
2.2	PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA MASA .....	12
2.3	PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.....	16
2.4	FRICCIÓN Y PÉRDIDAS MENORES .....	19
2.4.1	NÚMERO DE REYNOLDS .....	19
2.4.2	FÓRMULA DE DARCY, ECUACIÓN GENERAL DEL FLUJO DE FLUIDOS .....	19
2.4.3	FACTOR DE FRICCIÓN.....	20
2.4.4	ECUACIÓN DE COLEBROOK .....	20
2.4.5	PÉRDIDAS MENORES ( <i>h<sub>s</sub></i> ) .....	21
CAPÍTULO 3. MODELO DIFERENCIAL .....		22
3.1	INTRODUCCIÓN .....	22

3.2	DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES DE LA ENERGÍA E HIDRODINÁMICA.....	22
3.2.1	ECUACIÓN DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE UN OLEODUCTO.....	22
3.2.2	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA EL PERFÍL DE TEMPERATURAS .....	24
3.2.3	COEFICIENTE GLOBAL DE CALOR.....	25
3.2.4	PERFIL PIEZOMÉTRICO DEL OLEODUCTO .....	27
3.2.5	CÁLCULO DE LA ALTURA PIEZOMÉTRICA.....	28
3.2.5.1	Cálculo del factor de fricción .....	29
3.2.5.2	Cálculo de la densidad.....	29
3.2.5.3	Cálculo de la velocidad .....	30
3.2.5.4	Cálculo de la viscosidad.....	30
3.2.5.5	Número de Reynolds .....	31
3.2.6	CÁLCULO DEL PERFIL DE PRESIONES .....	31
3.3	CONSIDERACIONES PARA LA INTEGRACIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES.....	31
3.3.1	CONSIDERACIONES PARA LA ECUACION DE LA ENERGÍA .....	31
3.3.2	CONSIDERACIONES PARA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	31
3.3.3	CONSIDERACIONES PARA LA ECUACION DE LA TEMPERATURA.....	33
3.4	INTEGRACIÓN DE LAS ECUACIONES.....	33
CAPÍTULO 4. MODELO DEL OLEODUCTO .....		35
4.1	INTRODUCCIÓN .....	35
4.2	DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA MODELAR OLEODUCTOS DE CRUDOS PESADOS .....	35
4.2.1	SUBROUTINAS DE PROGRAMACIÓN.....	35

4.2.2	CALOR ESPECÍFICO ( $C_p$ ).....	36
4.2.3	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA ( $K_h$ ).....	37
4.2.4	DENSIDAD DEL FLUIDO ( $R_o$ ).....	37
4.2.5	FACTOR DE FRICCIÓN ( $f$ ).....	37
4.2.6	COEFICIENTE DE CONVECCIÓN ( $h$ ).....	37
4.2.7	COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	37
4.2.8	VISCOSIDAD DINÁMICA.....	38
4.3	PERFILES TÉRMICOS.....	38
4.4	PERFIL HIDRODINÁMICO.....	38
4.4.1	PERFIL TOPOGRÁFICO.....	39
4.5	REDES DE OLEODUCTOS.....	39
4.6	ESTACIONES DE BOMBEO.....	40
4.7	ESTACIONES DE CALENTAMIENTO DE CRUDO.....	40
CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN.....		42
5.1	INTRODUCCIÓN.....	42
5.1.1	DATOS DE INGRESO.....	42
5.1.2	CÁLCULO DE PROPIEDADES.....	44
5.1.3	TRAZADO DE PERFILES.....	44
5.2	DESARROLLO DE ESCENARIOS.....	45
5.2.1	ESCENARIO 1.....	45
5.2.2	ESCENARIO 2.....	47
5.2.3	ESCENARIO 3.....	49
5.2.4	ESCENARIO 4.....	51
5.2.5	ESCENARIO 5.....	53
5.2.6	ESCENARIO 6.....	56
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		59
6.1	INTRODUCCIÓN.....	59

6.2	LIMITACIONES Y ALCANCES .....	59
6.2.1	ALCANCES .....	59
6.2.2	LIMITACIONES .....	60
6.3	CODIFICACIÓN DEL SISTEMA .....	60
6.4	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	81
6.4.1	CÁLCULO DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 1.....	81
6.4.1.1	Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 1 .....	87
6.4.2	CÁLCULOS DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 2.....	89
6.4.2.1	Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 2 .....	97
6.4.3	CÁLCULOS DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 3.....	100
6.4.3.1	Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 3 .....	106
6.4.4	CÁLCULOS DE PROPEIDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 4....	109
6.4.4.1	Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 4 .....	116
6.4.5	CÁLCULOS DEL FLUIDO ESCENARIO 5 .....	119
6.4.5.1	Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 5 .....	126
6.4.6	CÁLCULOS DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 6.....	128
6.4.6.1	Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 6 .....	134
CAPÍTULO 7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	138
7.1	CONCLUSIONES.....	138
7.2	RECOMENDACIONES .....	140
ANEXOS	.....	142
ANEXO 1.	Desarrollo de algoritmos.....	143

ANEXO 2. Perfil Topográfico OCP.....	152
ANEXO 3. Bombas OCP.....	153
ANEXO 4. Perfil de temperaturas oleoducto crudos pesados.....	154
ANEXO 5. Perfil de presiones oleoducto crudos pesados .....	155

## CONTENIDO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Clasificación de los hidrocarburos .....	6
<b>Figura 1.2</b> Anillo de Benceno ( $C_6 H_6$ ). .....	6
<b>Figura 2.1</b> Segmento de tubería. ....	14
<b>Figura 2.2</b> Análisis en función de un volumen de control. ....	17
<b>Figura 3.1</b> Análisis térmico para un segmento $\Delta X$ de una tubería. ....	22
<b>Figura 3.2</b> Circuito térmico de una tubería enterrada. ....	26
<b>Figura 3.3</b> Representación del circuito térmico en una tubería.....	27
<b>Figura 3.4</b> Representación de un tramo de tubería .....	29
<b>Figura 6.1</b> Calor específico.....	81
<b>Figura 6.2</b> Conductividad Térmica .....	82
<b>Figura 6.3</b> Número de Nusselt.....	82
<b>Figura 6.4</b> Densidad del crudo.....	83
<b>Figura 6.5</b> Número de Reynolds.....	84
<b>Figura 6.6</b> Coeficiente Global de transferencia de calor ( $U_x$ ) .....	84
<b>Figura 6.7</b> Viscosidad dinámica.....	85
<b>Figura 6.8</b> Factor de fricción.....	86
<b>Figura 6.9</b> Coeficiente de convección.....	86
<b>Figura 6.10</b> Perfil de temperaturas .....	87
<b>Figura 6.11</b> Perfil topográfico.....	88
<b>Figura 6.12</b> Perfil de presiones.....	88
<b>Figura 6.13</b> Curva del Sistema-Bomba.....	89
<b>Figura 6.14</b> Calor específico.....	90
<b>Figura 6.15</b> Conductividad Térmica .....	90
<b>Figura 6.16</b> Número de Nusselt.....	91
<b>Figura 6.17</b> Densidad del crudo.....	92
<b>Figura 6.18</b> Número de Reynolds.....	93
<b>Figura 6.19</b> Coeficiente Global de Transferencia de calor.....	94
<b>Figura 6.20</b> Viscosidad dinámica.....	95
<b>Figura 6.21</b> Factor de fricción .....	95
<b>Figura 6.22</b> Coeficiente de convección.....	96
<b>Figura 6.23</b> Perfil de temperaturas .....	97

<b>Figura 6.24</b>	Perfil topográfico.....	98
<b>Figura 6.25</b>	Perfil de presiones.....	98
<b>Figura 6.26</b>	Curva del Sistema-Bomba.....	99
<b>Figura 6.27</b>	Calor específico.....	100
<b>Figura 6.28</b>	Conductividad Térmica.....	101
<b>Figura 6.29</b>	Número de Nusselt.....	101
<b>Figura 6.30</b>	Densidad del crudo.....	102
<b>Figura 6.31</b>	Número de Reynolds.....	103
<b>Figura 6.32</b>	Coefficiente Global de Transferencia de calor.....	103
<b>Figura 6.33</b>	Viscosidad dinámica.....	104
<b>Figura 6.34</b>	Factor de fricción.....	105
<b>Figura 6.35</b>	Coefficiente de convección.....	105
<b>Figura 6.36</b>	Perfil de temperaturas.....	106
<b>Figura 6.37</b>	Perfil topográfico.....	107
<b>Figura 6.38</b>	Perfil de presiones.....	107
<b>Figura 6.39</b>	Curva del Sistema-Bomba.....	108
<b>Figura 6.40</b>	Calor específico.....	109
<b>Figura 6.41</b>	Conductividad Térmica.....	110
<b>Figura 6.42</b>	Número de Nusselt.....	110
<b>Figura 6.43</b>	Densidad del crudo.....	111
<b>Figura 6.44</b>	Número de Reynolds.....	112
<b>Figura 6.45</b>	Coefficiente Global de Transferencia de calor.....	113
<b>Figura 6.46</b>	Viscosidad dinámica.....	114
<b>Figura 6.47</b>	Factor de fricción.....	114
<b>Figura 6.48</b>	Coefficiente de convección.....	115
<b>Figura 6.49</b>	Perfil de temperatura.....	116
<b>Figura 6.50</b>	Perfil topográfico.....	117
<b>Figura 6.51</b>	Perfil de presiones.....	117
<b>Figura 6.52</b>	Curva del Sistema-Bomba.....	118
<b>Figura 6.53</b>	Calor específico.....	119
<b>Figura 6.54</b>	Conductividad Térmica.....	120
<b>Figura 6.55</b>	Número de Nusselt.....	120
<b>Figura 6.56</b>	Densidad del crudo.....	121

<b>Figura 6.57</b> Número de Reynolds.....	122
<b>Figura 6.58</b> Coeficiente Global de Transferencia de calor.....	123
<b>Figura 6.59</b> Viscosidad dinámica.....	124
<b>Figura 6.60</b> Factor de fricción.....	124
<b>Figura 6.61</b> Coeficiente de convección.....	125
<b>Figura 6.62</b> Perfil de temperatura.....	126
<b>Figura 6.63</b> Perfil topográfico.....	127
<b>Figura 6.64</b> Perfil de presiones.....	127
<b>Figura 6.65</b> Curva del Sistema-Bomba.....	128
<b>Figura 6.66</b> Calor específico.....	129
<b>Figura 6.67</b> Conductividad Térmica.....	129
<b>Figura 6.68</b> Número de Nusselt.....	130
<b>Figura 6.69</b> Densidad del crudo.....	131
<b>Figura 6.70</b> Número de Reynolds.....	131
<b>Figura 6.71</b> Coeficiente Global de Transferencia de calor.....	132
<b>Figura 6.72</b> Viscosidad dinámica.....	133
<b>Figura 6.73</b> Factor de fricción.....	133
<b>Figura 6.74</b> Coeficiente de convección.....	134
<b>Figura 6.75</b> Perfil de temperatura.....	135
<b>Figura 6.76</b> Perfil topográfico.....	136
<b>Figura 6.77</b> Perfil de presiones.....	136
<b>Figura 6.78</b> Curva del Sistema-Bomba.....	137

## CONTENIDO DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Clasificación del petróleo según su grado API.....	2
<b>Tabla 4.1</b> Subrutinas de programación .....	36
<b>Tabla 5.1</b> Datos de ingreso de la tubería .....	42
<b>Tabla 5.2</b> Datos de ingreso del fluido.....	42
<b>Tabla 5.3</b> Datos del sistema de bombeo.....	43
<b>Tabla 5.4</b> Perfil Topográfico OCP escenario 1.....	45
<b>Tabla 5.5</b> Datos de ingreso de la tubería .....	46
<b>Tabla 5.6</b> Datos de ingreso del fluido.....	46
<b>Tabla 5.7</b> Datos del sistema de bombeo.....	47
<b>Tabla 5.8</b> Perfil Topográfico OCP escenario 2.....	47
<b>Tabla 5.9</b> Datos de ingreso de la tubería .....	48
<b>Tabla 5.10</b> Datos de ingreso del fluido.....	48
<b>Tabla 5.11</b> Datos del sistema de bombeo.....	49
<b>Tabla 5.12</b> Perfil Topográfico OCP escenario 3.....	49
<b>Tabla 5.13</b> Datos de ingreso de la tubería .....	50
<b>Tabla 5.14</b> Datos de ingreso del fluido.....	50
<b>Tabla 5.15</b> Datos del sistema de bombeo.....	51
<b>Tabla 5.16</b> Perfil Topográfico OCP escenario 4.....	51
<b>Tabla 5.17</b> Datos de ingreso de la tubería .....	52
<b>Tabla 5.18</b> Datos de ingreso del fluido.....	52
<b>Tabla 5.19</b> Datos del sistema de bombeo.....	53
<b>Tabla 5.20</b> Perfil Topográfico OCP escenario 5.....	53
<b>Tabla 5.21</b> Datos de ingreso de la tubería .....	55
<b>Tabla 5.22</b> Datos de ingreso del fluido.....	55
<b>Tabla 5.23</b> Datos del sistema de bombeo.....	56
<b>Tabla 5.24</b> Perfil Topográfico OCP escenario 6.....	56
<b>Tabla 5.25</b> Datos de ingreso de la tubería .....	57
<b>Tabla 5.26</b> Datos de ingreso del fluido.....	57
<b>Tabla 5.27</b> Datos del sistema de bombeo.....	58
<b>Tabla 6.1</b> Codificación del sistema. ....	61

## RESUMEN

Debido al constante avance tecnológico en la extracción del petróleo como una fuente de energía de un país, las empresas se han visto en la necesidad de mejorar y optimizar estos procesos para obtener un producto de mejor calidad.

Este proceso ha traído consecuencias negativas al ambiente como resultado de un carente análisis hidrodinámico en el diseño de oleoductos. Por tal virtud se propone el desarrollo de una simulación del proceso de transporte de crudo pesado con el fin de minimizar impactos ambientales y aplicarlos en el campo práctico. Esta investigación tuvo como finalidad desarrollar una metodología viable para el diseño hidrodinámico de oleoductos de crudos pesados en estado estacionario, el mismo que fue elaborado como una herramienta que permita simular el comportamiento de las propiedades físico-térmicas de un hidrocarburo pesado en función de la variación de su temperatura. La investigación se basó en el análisis del principio de conservación de masa y del principio de conservación de la energía, desarrollándose una ecuación diferencial para el perfil de temperaturas. Una vez establecido el perfil de temperaturas se procedió a desarrollar subrutinas que calculen cada una de las variables, para tal efecto se utilizó el software MatLab que permitió mostrar datos, representar funciones y comunicarse con otros programas informáticos similares. En conclusión, este proyecto ha cumplido con todos los objetivos propuestos, donde se ha podido determinar la variación de las propiedades físico-térmicas de un hidrocarburo de crudos pesados cuando varía la temperatura, interpretando el fenómeno de transporte en estado estacionario.

## PRESENTACIÓN

En este trabajo se desarrolla una metodología para el diseño hidrodinámico de oleoductos de crudos pesados, cuyo análisis se centró en el comportamiento de las variables cuando aumento o disminuye la temperatura del fluido.

En el Capítulo Uno se detallan las propiedades físico-químicas de los hidrocarburos pesados como la viscosidad, densidad, calor específico, punto de fluidez, presión de vapor entre otras. De igual forma se caracterizó el fluido en función de su composición y enlace químico. De esta manera se pudo conocer el tipo de fluido que se va a analizar durante el desarrollo del proyecto.

En el Capítulo Dos se realizó el análisis del flujo en estado estable en tuberías, basado en dos principios fundamentales, el principio de la conservación de la masa y energía; lo cual permitió tener una aproximación del verdadero comportamiento del fluido cuando se analiza en estado transitorio. Esto facilitó la solución y el análisis hidrodinámico del crudo pesado al hacer ciertas consideraciones útiles para cumplir el objetivo propuesto.

En el Capítulo Tres se determinaron las ecuaciones diferenciales de la energía e hidrodinámicas que intervienen en el análisis del fluido en estado estable, las cuales, mediante el planteamiento de ciertas consideraciones, permitieron ejemplificar el comportamiento de las variables de un crudo pesado.

En el Capítulo Cuatro se desarrollaron diferentes algoritmos para cada una de las variables, las cuales permitieron modelar un crudo pesado cuando es transportado dentro de un ducto de diámetro, espesor y longitud conocida. Estos algoritmos permitieron evaluar perfiles térmicos, perfiles hidrodinámicos, caudales recomendados de bombeo y la ubicación de las estaciones de calentamiento en función de los resultados obtenidos.

En el Capítulo Cinco se establecieron seis tramos (escenarios) en los cuales se aplicaron los códigos de programación desarrollados en el capítulo cuatro y a su vez demostrar la variación de las propiedades de un crudo pesado cuando varía la temperatura del fluido, espesor de tubería, longitud de tubería y cuando cambia el perfil topográfico. Estos seis tramos analizados corresponden a la red de oleoductos del OCP (Oleoducto de Crudos Pesados).

En el Capítulo Seis se presentan los resultados obtenidos del comportamiento de las variables para los seis escenarios propuestos mediante el software MatLab. Estos resultados mostraron la total dependencia de las propiedades del fluido de análisis con la temperatura.

Finalmente, en el Capítulo Siete se enumeran las conclusiones y recomendaciones generadas durante todo el desarrollo del proyecto, verificándose de esta forma el cumplimiento de los objetivos propuestos, y se establece una línea base para futuras investigaciones relacionadas al fenómeno de transporte de crudos pesados.

# **CAPÍTULO 1. PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS DEL PETRÓLEO**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

El petróleo es compuesto de hidrocarburos constituidos por átomos de carbono e hidrógeno en mayor cantidad y de otros compuestos (azufre, oxígeno, nitrógeno y de algunos metales) en un porcentaje menor.

Los hidrocarburos son gaseosos, líquidos, semisólidos y sólidos, aparecen en sitios de la superficie terrestre, o gaseosos y líquidos en las formaciones geológicas en el subsuelo. La consistencia varía de un líquido poco viscoso (gasolina) hasta un líquido altamente viscoso como el alquitrán.

El petróleo es el resultado de un proceso físico-químico de someter a alta temperatura y presión grandes cantidades de materia orgánica que posteriormente se convierten en aceite (crudo) y gas natural ocupando los espacios de las rocas porosas como areniscas y calizas.

Los principales compuestos de hidrocarburos son la parafina, los aromáticos y los naftenos. Los compuestos aromáticos tienen una mayor proporción de carbono-hidrógeno (C/H) que los otros dos, es decir, cuanto más es la proporción de (C/H) más pesado es el crudo.

Las propiedades físico-químicas de los hidrocarburos no sólo dependen de la cantidad de átomos de carbono e hidrógeno en la molécula, también depende de la naturaleza de los enlaces químicos entre ellos.

## **1.2 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS HIDROCARBUROS PESADOS**

Los hidrocarburos pesados tienen características y propiedades acordes a su composición y enlaces que lo constituyen, las cuales determinan la naturaleza de los mismos.

Las propiedades físicas de un hidrocarburo más representativas se detallan a continuación.

### 1.2.1 DENSIDAD

La densidad de un hidrocarburo se la define como su masa por una unidad de volumen evaluado a una determinada presión y temperatura (masa/volumen). La densidad generalmente se expresa en kilogramos por cada metro cúbico. Es una de las propiedades más importantes de los hidrocarburos, porque su valor afecta sustancialmente los cálculos de su volumen.

### 1.2.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA

Se la conoce también como densidad relativa y relaciona la densidad de una sustancia en comparación con la del agua y es un valor adimensional. La gravedad específica y los grados API por las abreviaturas en inglés de (American Petroleum Institute), manifiestan la relación correspondiente entre el peso específico y de fluidez de los hidrocarburos con respecto al agua mediante la siguiente expresión matemática.

$$SG = \frac{141,5}{131,5 + \text{°API}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$SG$ : Gravedad específica, adimensional

$\text{°API}$ : Grado API, adimensional

### 1.2.3 GRADO API

Es una escala utilizada para medir la gravedad específica de los hidrocarburos y la relación con la gravedad específica se la define mediante la siguiente expresión:

$$\text{°API} = \frac{141,5}{SG} - 131,5 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$SG$ : Gravedad específica evaluada a 60°F, adimensional

El grado API sirve para identificar a un hidrocarburo desde un condensado a extra pesado como se muestra en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1** Clasificación del petróleo según su grado API

CRUDO	°API
Condensados	> 42 °API
Liviano	32 - 42 °API
Mediano	22 - 32 °API
Pesado	10 - 22 °API
Extra pesado	< 10 °API

**Fuente:** Fundamentos para el diseño de oleoductos; IPL Technology & Consulting, Services Inc., 1995.

Gottfried (1965) expresó la densidad del petróleo en función de la temperatura mediante la siguiente relación:

$$\rho_o = \frac{\rho_{asc}}{1 + \frac{T - 68}{1885}} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

T: Temperatura del petróleo, °F

$\rho_o$ : Densidad del petróleo,  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\rho_{asc}$ : Densidad del petróleo a condiciones normales,  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$$\rho_{asc} = \rho_{agua} * SG \quad (Ec. 4)$$

Donde:

$\rho_{agua}$  = densidad del agua (1 000 Kg/m<sup>3</sup>) a condiciones normales (14,7 Psia = 1 atm; 60°F = 15°C)

#### 1.2.4 VISCOSIDAD DINÁMICA

La viscosidad dinámica es una propiedad fundamental durante las actividades de transporte y refinación de los hidrocarburos ya que nos indica la resistencia que

opone el crudo a fluir. Se la puede determinar mediante varios métodos de cálculo, como la ecuación de Andrade donde se plantea una relación lineal entre la viscosidad y la temperatura:

$$\mu = ae^{b/T} \quad (\text{Ec.5})$$

ó

$$\ln \mu = \ln a + \frac{b}{T} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

$\mu$ : viscosidad dinámica, centipoises

T: temperatura absoluta, °R ó °K

a y b: constantes en función de la escala de temperatura analizada

### 1.2.5 VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Se la define como la relación entre la viscosidad absoluta de una sustancia y su gravedad específica, ambas evaluadas a la misma temperatura.

### 1.2.6 PRESIÓN DE VAPOR

Presión a la cual un líquido se evapora por influjo de que su presión interna es mayor que la presión del medio que lo rodea. Cuando el líquido se encuentra confinado, como en el caso de un oleoducto, las moléculas de vapor contenidas en él ejercen una presión parcial denominada presión de vapor. Es importante controlar éste parámetro cuando se manejan sustancias como los hidrocarburos; durante su transporte se los debe mantener en estado para reducir riesgos de integridad en un oleoducto.

### 1.2.7 PUNTO DE FLUIDEZ

Es la temperatura más baja a la cual un fluido sigue comportándose como un líquido vertible. Varios hidrocarburos pueden ser transportados a temperaturas menores de su punto de fluidez, pero representa un mayor consumo energético mayor para moverlo de un punto a otro; ésta propiedad es un factor importante cuando se realiza el análisis del transporte de un hidrocarburo.

### **1.3 CARACTERIZACIÓN DE HIDROCARBUROS PESADOS**

El petróleo tiene numerosas aplicaciones en la industria debido a la variedad en sus enlaces y diferentes compuestos que lo conforman. Algunos crudos se valoran por sus fracciones ligeras usadas como carburantes, otros como aceites lubricantes y otros son excelentes bases como fórmula para asfaltos.

#### **1.3.1 CLASIFICACIÓN QUÍMICA DE LOS HIDROCARBUROS**

La clasificación química del petróleo permite distinguir entre diferentes aceites de una base de parafina o de una base de asfalteno. La presencia de parafinas es reflejada en la naturaleza del parafínico y de sus fracciones constituyentes. Considerando que un elevado contenido corresponde a un asfáltico con las propiedades de las fracciones nafténicos. Esto podría conducir a la idea errónea que el petróleo de base parafínica está constituido principalmente de parafinas y que una base de petróleo asfáltico se compone principalmente de hidrocarburos cíclicos (o nafténicos).

En la figura 1.1 se visualiza una clasificación de los hidrocarburos basados en su estructura química.



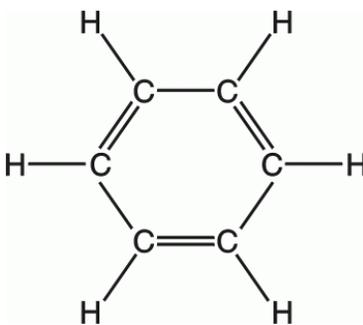
**Figura 1.1** Clasificación de los hidrocarburos

**Fuente:** <http://cuadrocomparativo.org>

### 1.3.1.1 Hidrocarburos aromáticos

Los hidrocarburos aromáticos presentan propiedades especiales asociadas con el núcleo o anillo del benceno, integrado por seis grupos de carbono-hidrógeno unidos a cada uno de los vértices de un hexágono.

El benceno es un hidrocarburo aromático de fórmula molecular  $C_6 H_6$ . En el anillo de benceno cada átomo de carbono ocupa cada vértice de un hexágono regular como se muestra en la figura 1.2.



**Figura 1.2** Anillo de Benceno ( $C_6 H_6$ ).

**Fuente:** Mohamed, 2010

### 1.3.1.2 Hidrocarburos alifáticos

Los hidrocarburos alifáticos son compuestos orgánicos conformados básicamente por enlaces de átomos de carbono e hidrógeno cuyo carácter no es aromático; es

decir, su estructura no es la del anillo de benceno. Los hidrocarburos alifáticos se clasifican en dos grandes grupos, saturados e insaturados.

### 1.3.1.3 Hidrocarburos saturados

Los hidrocarburos saturados son compuestos orgánicos que se encuentran formados exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno; se obtienen por procesos de destilación fraccionada formando grandes cadenas de enlaces. Los hidrocarburos saturados más conocidos son los denominados alcanos; pueden formar cadenas lineales simples (alcanos normales) o cadenas ramificadas (isoalcanos).

### 1.3.1.4 Hidrocarburos insaturados

Compuesto de carbono-hidrógeno en el cual al menos un átomo de carbono está unido a otros cuatro átomos exclusivamente por un enlace simple.

Estos hidrocarburos se clasifican en dos grandes grupos, los llamados alquenos y alquinos.

Las estructuras de los compuestos alquenos presentan enlaces covalentes dobles que unen dos átomos de carbono entre sí.

Los compuestos alquinos presentan entre su estructura molecular, enlaces covalentes triples.

## 1.3.2 FACTOR DE CARACTERIZACIÓN KUOP O FACTOR DE WATSON KW

El factor de caracterización Kuop parte de la premisa que, la densidad de los hidrocarburos está ligada a la relación carbono-hidrógeno y que su punto de ebullición está relacionado con el número de átomos de carbono.

El factor de caracterización Kuop para los hidrocarburos puros que depende únicamente del punto de ebullición y de su densidad, se determina como:

$$K_{UOP} = \frac{(T/1,8)^{1/3}}{S} \quad (Ec. 7)$$

Donde:

T: Temperatura de ebullición, [°C]

S: Densidad relativa estándar, adimensional

El factor Kuop de los hidrocarburos puros es:

- 13 para parafinas.

- 12 para hidrocarburos en los que el peso relativo de las cadenas y de los anillos son equivalentes.
- 11 para naftenos puros.
- 10 para aromáticos puros.

## 1.4 PROPIEDADES TÉRMICAS DE HIDROCARBUROS PESADOS

### 1.4.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA ( $K_h$ )

Propiedad de los fluidos que cuantifica el calor transferido por unidad de área transversal y por unidad de temperatura, bajo condiciones de estado estacionario y en ausencia de cualquier movimiento de fluido o partículas.

La conductividad térmica de líquidos orgánicos varía entre 0,05 y 0,2 BTU/h-pie-°F y suele disminuir con el aumento de la temperatura.

(Cragoe,1993) desarrolló una ecuación que permite calcular la conductividad térmica de líquidos en función a su temperatura:

$$K_h = \frac{0,0677[1 - 0,0003(T - 32)]}{\sqrt{SG}} \quad (Ec. 8)$$

Donde:

$K_h$ : Conductividad térmica,  $\left[ \frac{BTU}{h \cdot pie \cdot ^\circ F} \right]$

T: Temperatura, [°F]

SG: Gravedad específica del petróleo, adimensional

### 1.4.2 CALOR ESPECÍFICO ( $C_p$ )

Es la cantidad de calor requerido para elevar un grado de temperatura una unidad de masa de una sustancia específica.

(Gambill,1957) plantea una ecuación que permite cuantificar el calor específico de un líquido en función de su temperatura:

$$C_p = \frac{0,388 + 0,00045 T}{\sqrt{SG}} \quad (Ec. 9)$$

Donde:

$C_p$ : Calor específico,  $\left[ \frac{BTU}{libra \cdot ^\circ F} \right]$

SG: Gravedad específica del petróleo, adimensional

T: Temperatura, [°F]

### 1.4.3 NÚMERO DE PRANDTL

Es la relación del componente cortante de la difusividad para el momento lineal y la difusividad de calor, y correlaciona físicamente el espesor relativo de la capa hidrodinámica con el de la capa límite térmica.

El número de Prandtl está definido por la ecuación:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K_h} \quad (Ec.10)$$

Donde:

$\mu$ : viscosidad dinámica, centipoises

$C_p$ : calor específico,  $\left[ \frac{BTU}{libra \cdot ^\circ F} \right]$

$K_h$ : conductividad térmica,  $\left[ \frac{BTU}{h \cdot pie \cdot ^\circ F} \right]$

### 1.4.4 NÚMERO DE NUSSELT

Representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa (Çengel, 2007).

Edwards y otros (1979) plantearon una ecuación del número promedio de Nusselt para una región de entrada laminar expresada por:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,065(D/L)Re * Pr}{1 + 0,04[(D/L)Re * Pr]^{2/3}} \quad (Ec. 11)$$

Donde:

D: Diámetro interior de la tubería, [m]

L: Longitud de la tubería, [m]

Re: Número de Reynolds, adimensional

Pr: Número de Prandtl, adimensional.

### 1.4.5 CAPA LÍMITE TÉRMICA ( $L_t$ )

Es la capa que se forma cuando un fluido a una temperatura específica fluye sobre una superficie que se encuentra a una temperatura diferente.

$$L_{t \text{ laminar}} \approx 0,05 * Re * Pr * D \quad (Ec. 12)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds, adimensional

Pr: Número de Prandtl, adimensional

D: Diámetro interior de la tubería, [m]

#### 1.4.6 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (h)

Se define como la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura (Çengel, 2007).

$$h = \frac{Nu * K_h}{D} \quad (Ec. 13)$$

Donde:

h: coeficiente de transferencia de calor por convección,  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

Nu: Número de Nusselt, adimensional

Kh: Conductividad térmica,  $\left[ \frac{BTU}{h \cdot pie \cdot ^\circ F} \right]$

D: Diámetro de la tubería, [m]

### 1.5 MEZCLA DE HIDROCARBUROS

Normalmente los crudos no se utilizan puros, la optimización en la producción exige su mezcla previa antes de su procesamiento.

Las reglas de mezclas son las que determinan las características de un crudo.

#### 1.5.1 LEYES DE MEZCLAS

El resultado de la mezcla de varios componentes es gobernado por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$C_1 p_1 + C_2 p_2 + \dots + C_n p_n = C_p$$

$$C_1 + C_2 + \dots + C_n = C$$

De donde,  $C_{(i)}$  representa la fracción en masa (o volumen) de cada uno de los componentes de la mezcla y  $p_{(i)}$  es la propiedad considerada de cada componente.

Estas ecuaciones son funciones lineales, por lo tanto, las propiedades deben permitir su adición lineal. Cuando esto no ocurre, se deben emplear funciones no lineales o bien utilizar determinados índices de mezcla representativos de la propiedad a calcular que permitan ser adicionados linealmente.

Los índices de mezcla son expresiones empíricas calculadas a partir del tratamiento de cientos de datos y que pueden no ser únicos para una misma propiedad dependiendo de los autores o laboratorios que los hayan desarrollado. Al mismo tiempo, la precisión de los resultados obtenidos en su aplicación puede depender del tipo de componentes de mezcla.

En ocasiones se dan distintos índices en función del tipo de componentes de la mezcla. En cualquier caso, es necesario emplear índices homogéneos para cada uno de los componentes.

Son aditivas en peso o en volumen todas aquellas características medidas en unidades de masa o de volumen como densidad, azufre, contenido en metales, composición hidrocarbonada (aromáticos, olefinas, naftenos, parafinas), curva TBP, etc.

### 1.5.2 VISCOSIDAD DE MEZCLAS LÍQUIDAS

Se han propuesto varios métodos para el cálculo de la viscosidad de una mezcla en estado líquido. El método más empleado es el propuesto por (Cragoe, 1993) que consiste en la combinación de las licuicidades respectivas de los líquidos a mezclar definida como:

$$Li = \frac{2\,995,73}{\ln \mu + 7,6009} \quad (\text{Ec. 14})$$

La mezcla de dos líquidos, según la ecuación de la licuicidad, se expresa como:

$$Lim = f_1 Li1 + (1 - f_1) \cdot Li2 \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

*Li1* y *Li2*: Licuicidades de los 2 líquidos

## CAPÍTULO 2. FLUJO EN ESTADO ESTABLE EN TUBERÍAS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Se denomina estado estable a aquel sistema en el cual sus características se mantienen constantes con el transcurrir del tiempo. Al analizar el estado estable de un fluido se obtiene una aproximación aceptable en comparación con su verdadero comportamiento, lo cual facilita la solución y análisis hidrodinámico al hacer ciertas consideraciones útiles para cumplir el objetivo propuesto.

Para el desarrollo de este proyecto se considera como estado estable a aquellas variables cuya influencia no se ven afectadas por el tiempo y ellas son: temperatura, viscosidad, densidad, gravedad específica, velocidad del crudo, flujo volumétrico, entre las principales.

### 2.2 PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA MASA

También conocido como la ley de la conservación de la materia, la cual manifiesta que en toda interacción química la masa siempre permanece constante; en otras palabras, la masa que se consume en una reacción es igual a la masa obtenida como producto Lavoisier (1785).

Se dispone de un volumen fijo e indeformable de un fluido cuando se denotará como ( $\forall$ ), denominado volumen de control V.C. con un límite de superficie definido denominado superficie de control S.C.

Para que se cumpla este principio, el intercambio de masa evaluado por unidad de tiempo dentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad de masa que atraviesa el volumen de control más la velocidad a la que ésta gana o pierde masa debido a fuentes y sumideros.

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (\text{Ec. 16})$$

La masa dentro de volumen de control se la puede definir como:

$$M = \int_{\forall c} C \, d\forall \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

C: (x,y,z) conocido como campo de concentración.

M: Masa dentro del volumen de control.

El flujo neto de masa que atraviesa el volumen de control se define como:

$$\int_{SC} C \bar{V} \bar{n} dA \quad (Ec. 18)$$

Donde:

$\bar{V} = (\mu, v, w)$ : Vector velocidad

$\bar{n}$  : Normal al segmento de área dA

El flujo neto saliente del volumen de control debido a la difusión está definido mediante la ley de Fick, la cual manifiesta que la densidad de la corriente de una partícula atraviesa en una unidad de tiempo un área unitaria perpendicular, expresada como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} C dV = - \int_{SC} C \bar{V} \bar{n} dA + \int_{SC} Dn \frac{\partial C}{\partial n} dA \pm S \quad (Ec. 19)$$

Donde:

$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} C dV$ : Velocidad de cambio de la masa.

$-\int_{SC} C \bar{V} \bar{n} dA$ : Flujo entrante en el volumen de control.

$\int_{SC} Dn \frac{\partial C}{\partial n} dA$ : Flujo difusivo entrante en el volumen de control.

$\pm S$ : Fuente o sumidero.

Aquí la masa dentro del sistema permanece constante en todo el tiempo. En base a la ecuación general de conservación en función de un volumen de control se tiene:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV + \int_{SC} \eta \rho v \cdot dA \quad (Ec. 20)$$

Sea  $N = m$  y  $n = 1$ ; donde  $m$  es la masa y  $n$  es la unidad de masa, se tiene:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho v \cdot dA \quad (Ec. 21)$$

La ecuación de conservación de la masa establece que la tasa temporal de cambio de la masa en el volumen de control más la tasa neta a la cual la masa sale del volumen de control a través de su superficie es igual a cero (Streeter, 2005).

Si  $\rho = cte$ , entonces:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} dV + \int_{SC} v \cdot dA \quad (Ec. 22)$$

Si el volumen es fijo:

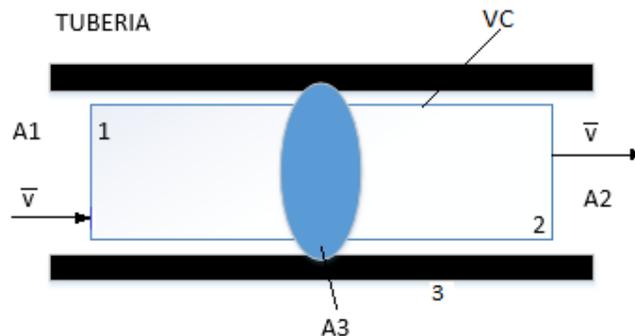
$$0 = \frac{\partial v}{\partial t} + \int_{SC} v \cdot dA \quad (Ec. 23)$$

$$0 = \frac{\partial v}{\partial t} + \int_{SC} v \cdot dA \quad =0 \quad (Ec. 24)$$

Finalmente:

$$\int_{SC} v \cdot dA = 0 ; \text{Producto punto} \quad (Ec. 25)$$

La figura 2.1 muestra un segmento de tubería en donde el contorno de análisis se lo denomina como Volumen de Control. El área A1 y el área A2 son las áreas perpendiculares al flujo y las condiciones de velocidad en el punto 1 y 2 son las mismas siempre y cuando el diámetro de la tubería se mantenga constante para el sistema de control especificado.



**Figura 2.1** Segmento de tubería.

**Fuente:** Balseca, 2016

En el área A3 la integral es = 0 porque se trata de un producto punto entre la velocidad y el área.

Entonces:

$$-\int_{SC} v1. dA + \int_{SC} v2. dA + \int_{SC} v3. dA = 0 \quad (Ec. 26)$$

Por tanto:

$$-v1A1 + v2A2 = 0 \quad (Ec. 27)$$

$$v1A1 = v2A2 \quad (Ec. 28)$$

Se debe tener en cuenta que densidad es constante y el volumen de control es invariable durante todo el análisis.

Recordando que:

$$Q = vA \quad (Ec. 29)$$

Donde:

Q: Caudal,  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

V: Velocidad del fluido,  $\left[\frac{m}{s}\right]$

A: Área perpendicular al flujo,  $[m^2]$

Al decir que las áreas en el punto 1 y 2 son iguales se concluye que el caudal de ingreso es igual al caudal de salida.

$$Q1 = Q2 \quad (Ec. 30)$$

Si se desea trabajar con cualquier flujo compresible, se tiene que:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho v. dA \quad (Ec. 31)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho v dA \quad (Ec. 32)$$

Por tanto, la ecuación queda reducida a la integral:

$$\int_{SC} \rho v. dA = 0 \quad (Ec. 33)$$

Resolviendo se tiene:

$$-\rho1v1A1 + \rho2v2A2 = 0 \quad (Ec. 34)$$

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

$$m_1 = m_2$$

Se debe tener en cuenta que en estado estable los flujos másicos se conservan.

### 2.3 PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

El principio de la conservación de la energía se establece como:

$$\dot{Q} - \dot{w} = \frac{dE}{dt} \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

$\dot{Q}$  = Flujo de calor

$\dot{w}$  = Flujo de trabajo

$E$  = Energía dependiente de la masa

Aplicando la propiedad extensiva:

$$N = E; n = e \therefore dE = edm$$

Entonces:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \oint_{VC} n \rho dv + \oint_{SC} n \rho \bar{v} \cdot d\bar{A} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \oint_{VC} e \rho dv + \oint_{SC} e \rho \bar{v} \cdot d\bar{A} = \dot{Q} - \dot{w} \quad (\text{Ec. 37})$$

Si se analiza la suma de todas las energías implícitas en el análisis se tiene:

$$e = e_{interna} + e_{cinética} + e_{potencial} + e_{otras} \quad (\text{Ec. 38})$$

Para éste caso  $e_{otras} \approx 0$

$$e = e_{interna} + e_{cinética} + e_{potencial} \quad (\text{Ec. 39})$$

Sustituyendo el valor de cada energía:

$$e = u + \frac{1}{2} v^2 + gz \quad (\text{Ec. 40})$$

Recordando que  $z =$  altura.

Analizando el flujo de trabajo:

$w \approx$  trabajo en ejes  $\rightarrow$  turbomaquinarias.

$w \approx$  trabajo debido a la presión  $\rightarrow$  cambio en la entalpía.

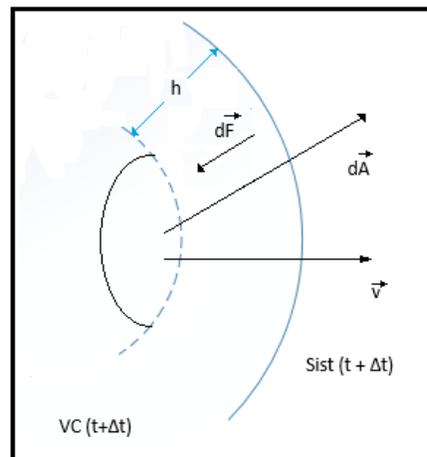
$w \approx$  trabajo viscoso  $\rightarrow$  pérdidas.

Por lo tanto:

$$\dot{W} = \dot{W}_{ejes} + \dot{W}_{presión} + \dot{W}_{viscoso} \quad (Ec. 41)$$

Si se combina el  $\dot{w}$  presión con  $\mu$ , es mucho fácil trabajar con la entalpía.

En la figura 2.2 se muestra el análisis del volumen de control aplicado a un fluido en movimiento cuando se considera un sistema de control fijo.



**Figura 2.2** Análisis en función de un volumen de control.

**Fuente:** Ubidia, 2000

Se sabe que:

$$d\bar{F} = p d\bar{A} \quad (Ec. 42)$$

$$dwp = d\bar{F}h = p d\bar{A} \cdot v \cdot \cos\alpha \Delta t \quad (Ec. 43)$$

Además, considerando que:

$v \cdot \cos(\alpha)$ ; Es la componente velocidad en la misma dirección de área.

$v \cdot \cos(\alpha) \Delta t$ ; Movimiento rectilíneo.

Entonces:

$$dwp = p\bar{v} \cdot d\bar{A}\Delta t \quad (Ec. 44)$$

$$Wp = \oint_{SC} p\bar{v} \cdot d\bar{A}\Delta t \quad (Ec. 45)$$

$$\dot{W}p = \frac{Wp}{\Delta t} = \oint_{SC} p\bar{v} \cdot d\bar{A} \quad (Ec. 46)$$

Donde:

$\dot{W}_p$  = Flujo de trabajo

Entonces:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eje} - \dot{W}_{pérdidas} = \frac{\partial}{\partial t} \oint_{VC} \rho p d\bar{v} + \oint_{SC} \rho p \bar{v} \cdot d\bar{A} + \oint_{SC} p \bar{v} \cdot d\bar{A} \quad (Ec. 47)$$

Desarrollando la expresión se tiene:

$$\begin{aligned} \oint_{SC} \rho p \bar{v} \cdot d\bar{A} + \oint_{SC} p \bar{v} d\bar{A} &= \oint_{SC} \left( u + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho \bar{v} \cdot d\bar{A} + \oint_{SC} p \bar{v} \cdot d\bar{A} \quad (Ec. 48) \\ &= \oint_{SC} \left( u + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho \bar{v} \cdot d\bar{A} \end{aligned}$$

Si:  $h = u + \frac{p}{\rho}$  = entalpia; entonces:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eje} = \frac{\partial}{\partial t} \oint_{VC} \rho p d\bar{v} + \oint_{SC} \left( h + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho \bar{v} \cdot d\bar{A} + \dot{W}_{pérdidas} \quad (Ec. 49)$$

Considerando un análisis en estado estable, se determina que:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{VC} \rho p d\bar{v} = 0; \text{ si se va a trabajar en estado estable}$$

Finalmente se determina que:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eje} = \oint_{SC} \left( h + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) \rho \bar{v} \cdot d\bar{A} + \dot{W}_{pérdidas} \quad (Ec. 50)$$

## 2.4 FRICCIÓN Y PÉRDIDAS MENORES

### 2.4.1 NÚMERO DE REYNOLDS

El régimen de flujo en tuberías básicamente se lo determina por dos estados (laminar o turbulento), que depende del diámetro de la tubería, densidad, viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. Es un valor numérico adimensional resultante de la combinación de estas 4 variables.

Puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de la deformación ocasionados por la viscosidad (Crane, 1977) cuya expresión es:

$$Re = \frac{Dv\rho}{u} \quad (\text{Ec. 51})$$

Donde:

Re: Número de Reynolds, adimensional

D: Diámetro interno de la tubería, m

v: Velocidad del fluido,  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$\rho$ : Densidad del fluido,  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

u: Viscosidad dinámica del fluido,  $\left[\frac{Kg}{m*s}\right]$

Se considera flujo laminar el valor de Número de Reynolds menor a 2 000 y para flujo turbulento superior a 4 000. El flujo entre estos dos valores se lo considera como un flujo en transición (zona crítica).

### 2.4.2 FÓRMULA DE DARCY, ECUACIÓN GENERAL DEL FLUJO DE FLUIDOS

A la pérdida de presión en el sentido de flujo debido al rozamiento de las partículas del fluido en la tubería y entre sí, se la conoce como la fórmula de Darcy:

$$h_p = \frac{fLv^2}{D2g} \quad (\text{Ec. 52})$$

Donde:

$h_p$ : Pérdida primarias, [m]

f: Factor de fricción, adimensional

L: Longitud de la tubería, [m]

v: Velocidad del fluido,  $\left[\frac{m}{s}\right]$

D: Diámetro interno de la tubería, [m]

g: Fuerza gravitacional= 9,8 m/s<sup>2</sup>

Si:

$$\Delta P = h_L \rho g$$

Entonces:

$$\Delta P = \frac{\rho f L v^2}{2D} \quad (\text{Ec. 53})$$

La ecuación es válida tanto para flujo laminar como para turbulento dentro de una tubería. La pérdida de presión se aplica a tubería de diámetro constante por la que pasa un fluido con una viscosidad prácticamente constante.

#### 2.4.3 FACTOR DE FRICCIÓN

Para condición de flujo laminar el factor de fricción es función solo del número de Reynolds, mientras que para flujo turbulento depende además del tipo de la pared de la tubería (rugosidad relativa  $\varepsilon/D$ ).

El factor de fricción en la zona crítica se lo determina mediante la fórmula:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,8 \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) = Fi \quad (\text{Ec. 54})$$

#### 2.4.4 ECUACIÓN DE COLEBROOK

El factor de fricción para un flujo turbulento está dado por la ecuación de White-Colebrook, definida como:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 4 \log \left[ \left( \frac{k}{3,7d} \right) + \frac{1,25}{Re} * \sqrt{\frac{1}{f}} \right] \quad (\text{Ec. 55})$$

#### 2.4.5 PÉRDIDAS MENORES ( $h_s$ )

Es la pérdida de energía que relaciona la velocidad del fluido conforme pasa por una expansión o contracción de la sección de flujo; es decir, por una válvula u otro accesorio. Por lo general esta pérdida de energía se expresa en términos de un coeficiente de resistencia K como se muestra en la ecuación siguiente:

$$h_s = K \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (\text{Ec. 56})$$

Donde:

K: coeficiente de resistencia, adimensional

v: velocidad promedio del fluido, (m/s).

g: Fuerza gravitacional= 9,8 m/s<sup>2</sup>

## CAPÍTULO 3. MODELO DIFERENCIAL

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Para obtener el modelo hidrodinámico de un oleoducto, se realiza un análisis en base a las ecuaciones diferenciales utilizadas en el transporte de fluidos a través de ductos. Este análisis permitirá establecer las condiciones de operación óptimas y las consideraciones a tomar en cuenta para evaluar cómo influyen las propiedades físicas del crudo en relación a las variables a medir (temperatura, caudal, velocidad entre otras) y poder así establecer los parámetros adecuados para el diseño del tramo de un oleoducto.

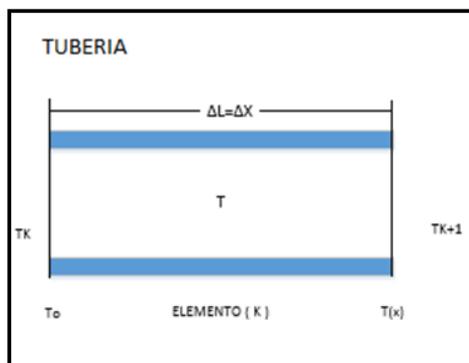
### 3.2 DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES DE LA ENERGÍA E HIDRODINÁMICA

En el capítulo anterior se evaluaron las ecuaciones de energía y conservación de la masa dentro de un volumen de control fijo en estado estacionario.

A continuación, se detallan las ecuaciones diferenciales para un fluido en el análisis de la variación de sus propiedades en la sección transversal de un ducto cilíndrico.

#### 3.2.1 ECUACIÓN DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE UN OLEODUCTO

En la figura 3.1 se muestra un tramo de sección de un ducto cilíndrico denominado ( $\Delta X$ ) y en donde las temperaturas en el tramo inicial son diferentes del tramo final.



**Figura 3.1** Análisis térmico para un segmento  $\Delta X$  de una tubería.

**Fuente:** Ubidia, 2000

Partiendo de la ecuación de la energía establecida anteriormente:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{ejes} = \iint_A (h_0 + g * z) \rho * \bar{v} d\bar{A} + \dot{W}_{perdido} \quad (Ec. 57)$$

En donde se definió que el trabajo de ejes es despreciado y que el nivel de referencia de análisis se encuentra a una misma altura, la ecuación queda reducida como:

$$\dot{Q} = \iint_A (h_0) \rho * \bar{v} d\bar{A} + \dot{W}_{perdido} \quad (Ec. 58)$$

De la expresión planteada, se analizan cada uno de sus términos:

$$\dot{Q} = -U * \pi * D * \Delta x * (T - T_{\infty}) \quad (Ec. 59)$$

$$\iint_A (h_0) \rho * \bar{v} d\bar{A} = (h_0(x + \Delta x) - h_0(x)) * \dot{m} \quad (Ec. 60)$$

$$\dot{W}_{perdido} = f * \frac{\Delta x}{D} * \frac{v^2}{2g} * \dot{m} \quad (Ec. 61)$$

Donde:

U: Coeficiente global de transferencia de calor,  $\left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

D: Diámetro interno de la tubería, [m]

$\Delta x$ : Diferencial de longitud de tubería, [m]

T: Temperatura inicial del fluido, [ $^\circ C$ ]

$T_{\infty}$ : Temperatura del medio externo, [ $^\circ C$ ]

$h_0$ : Entalpía inicial del fluido, [Kcal]

$\dot{m}$ : Flujo másico del fluido, [kg /s]

f: Factor de fricción, adimensional

v: Velocidad del fluido, [m/s]

Consideraciones adicionales:

- $\frac{\partial h_0}{\partial T} = C_p$
- $T_{(x+\Delta x)} = T(x) + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x$
- $h_0(x + \Delta x) - h_0(x) = C_p * \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x$

Todas las pérdidas que se generan en el tramo diferencial ( $\Delta x$ ) se convierten en fuente interna de calor.

Reemplazando todas las consideraciones planteadas anteriormente y reduciendo a la mínima expresión, la ecuación diferencial de la energía nos queda planteada así:

$$\frac{dT}{dx} + \frac{U * \pi * D * T}{C_p * \rho * Q} = \frac{1}{C_p} * \frac{f}{D^5} * \frac{8 * Q^2}{g * \pi^2} \quad (Ec. 62)$$

Por facilidades de cálculo se simplifica la ecuación a la siguiente expresión:

$$\frac{dT}{dx} + A T = C \quad (Ec. 63)$$

Sabiendo que:

- $A = \frac{U * \pi * D}{C_p * \rho * Q}$
- $C = \frac{1}{C_p} * \frac{f}{D^5} * \frac{8 * Q^2}{g * \pi^2}$

### 3.2.2 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA EL PERFÍL DE TEMPERATURAS

Para la solución de esta ecuación diferencial, es necesario hacer las siguientes consideraciones:

- La ecuación diferencial no es de carácter lineal.
- Las propiedades del crudo cambian con la temperatura.
- El coeficiente global de temperatura (U) es muy dependiente de la temperatura.
- Se considera la temperatura externa ambiental constante para todo el tramo de análisis.
- La temperatura que se utiliza para el cálculo de las propiedades físicas del fluido se lo hace a temperatura promedio, es decir:  $T_{prom} = \frac{T_{inicial} + T_{final}}{2}$
- Debido a la consideración que el tramo  $\Delta x$  es muy corto, se podría considerar que el coeficiente global de transferencia de calor (U) se mantiene constante

para este tramo. Resultando que (U) y las propiedades físicas del fluido son altamente dependientes de la temperatura.

Bajo estas consideraciones, el método utilizado para la solución de la ecuación diferencial del perfil de temperaturas es la transformada de Laplace, dando como resultado:

$$T_{(s)} = \frac{C}{A} \frac{1}{s} + \left( \frac{1}{s+A} \right) \left[ T_o - \frac{C}{A} \right] \quad (\text{Ec. 64})$$

A la ecuación (64) aplicando la anti-transformada de Laplace se tiene:

$$T(x) = \frac{C}{A} + \left( T_o - \frac{C}{A} \right) e^{-Ax} \quad (\text{Ec. 65})$$

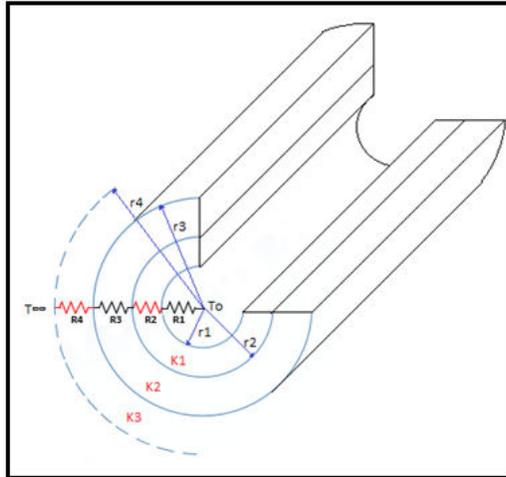
$$T_{(K+1)} = \frac{C_K}{A_K} + \left( T(k) - \frac{C_K}{A_K} \right) e^{-A_k \Delta L_k} \quad (\text{Ec. 66})$$

Se debe evaluar la temperatura promedio del fluido tanto para las propiedades físicas del crudo y del coeficiente global de transferencia de calor en condiciones (k) y (k+1).

$$\bar{T} = \frac{T(K+1) + T(K)}{2} \quad (\text{Ec. 67})$$

### 3.2.3 COEFICIENTE GLOBAL DE CALOR

En la figura 3.2, se muestra el circuito térmico del sistema comprendido entre la tubería y el medio externo, en donde se detallan tres valores de conductividad térmica, K1, K2, K3; siendo, conductividad térmica del acero, aislante y tierra, respectivamente.



**Figura 3.2** Circuito térmico de una tubería enterrada.

**Fuente:** Çengel, 2007

Por tal razón, aparecen cuatro resistencias térmicas dentro del circuito global de transferencia de calor

Los valores de las resistencias térmicas implícitas en el sistema de análisis son:

- Resistencia de calor de convección

$$R1 = \frac{1}{h1A1} = \frac{1}{h12\pi r1L} \quad (Ec. 68)$$

- Resistencia de calor de conducción, K1 = conductividad del acero.

$$R2 = \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2\pi K1L} \quad (Ec. 69)$$

- Resistencia de calor de conducción, K2 = conductividad del aislante.

$$R3 = \frac{\ln\left(\frac{r3}{r2}\right)}{2\pi K2L} \quad (Ec. 70)$$

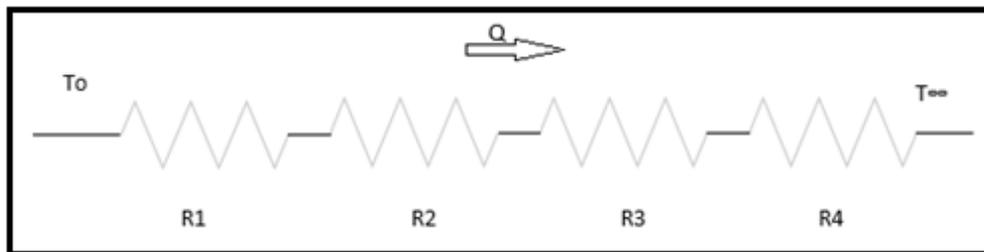
- Resistencia de calor de conducción, K3 = conductividad de la tierra.

$$R4 = \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2\pi K3L} \quad (Ec. 71)$$

De lo expuesto, dependerá si se considera que la tubería está recubierta por aislante durante todo su tramo, caso contrario se omitiría la resistencia  $R_3$  en el cálculo térmico.

El circuito térmico estará definido por un sistema en donde sus resistencias se encuentran en serie, por tal razón se suman sus equivalencias (ver figura 3.3):

$$\Sigma R_{TERMICAS} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (Ec. 72)$$



**Figura 3.3** Representación del circuito térmico en una tubería.

**Fuente:** Çengel, 2007

Además, el coeficiente global de transferencia de calor está definido por:

$$U_{TOTAL} = \frac{1}{A \cdot \Sigma R_{TOTAL}} \quad (Ec. 73)$$

Por lo tanto, el calor que fluye a través del sistema está dado por:

$$\dot{Q} = U_{TOTAL} A (T - T_{\infty}) \quad (Ec. 74)$$

### 3.2.4 PERFIL PIEZOMÉTRICO DEL OLEODUCTO

El factor de fricción se encuentra definido por los valores de número de Reynolds

( $Re$ ) y rugosidad relativa  $\left(\frac{\varepsilon}{D}, \frac{D}{\varepsilon}\right)$ :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,8 \ln \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (Ec. 75)$$

Recordando:

- $\gamma = \frac{u}{\rho}$

Dónde:

$\gamma$ : Viscosidad cinemática

$\mu$ : Viscosidad dinámica

$\rho$ : Densidad del fluido

Entonces el Número de Reynolds se puede expresar como:

$$Re = \frac{\rho VD}{u} = \frac{VD}{\gamma} \quad (Ec. 76)$$

Para construir el perfil piezométrico de un oleoducto de crudo pesado primero se determina el perfil de temperaturas a partir de la ecuación de un elemento finito dado por:

$$T_{k+1} = \frac{C_k}{A_k} + \left[ T_{(k)} - \frac{C_k}{A_k} \right] e^{-A_k \Delta L_k} \quad (Ec. 77)$$

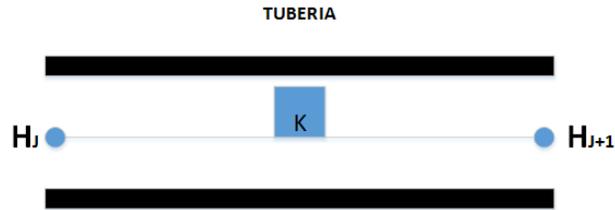
Por lo tanto, la ecuación del perfil piezométrico empleando la ecuación de la energía es:

$$H_1 = H_{K+1} + \sum k f_K \frac{L_K V k^2}{D_K 2g} \quad (Ec. 78)$$

$$H_{K+1} = H_1 - \sum k f_K \frac{L_K V k^2}{D_K 2g} \quad (Ec. 79)$$

### 3.2.5 CÁLCULO DE LA ALTURA PIEZOMÉTRICA

La figura 3.4 muestra un tramo diferencial de tubería que las propiedades del fluido deben partir de valores específicos de viscosidad cinemática a una determinada temperatura. Por tal razón, de la Ecuación de Andrade, para el cálculo de la viscosidad cinemática del tramo inicial se necesitan dos valores puntuales.



**Figura 3.4** Representación de un tramo de tubería

**Fuente:** Balseca, 2016

Propiedades del fluido:

- $\mu_1 = 300$  Cp;  $T_1 = 30^\circ\text{C}$
- $\mu_2 = 120$  Cp;  $T_2 = 60^\circ\text{C}$

### 3.2.5.1 Cálculo del factor de fricción

Ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0,8 \ln \left( \frac{\left( \frac{\epsilon}{D} \right)}{3,7} \right) + \frac{2,51}{\left( Re * f^{\frac{1}{2}} \right)} \quad (\text{Ec. 80})$$

### 3.2.5.2 Cálculo de la densidad

La densidad de un crudo pesado se calcula de la siguiente manera:

$$SG = \frac{141,5}{API + 131,5} \quad (\text{Ec. 81})$$

Si: API = 14

$$\rho_{asc} = 1\,000 * SG$$

$$\rho_{o1} = \rho_{asc} * \frac{1}{1 + \frac{T1^{\circ}\text{F} - 68}{1\,885}}$$

$$\rho_{o2} = \rho_{asc} * \frac{1}{1 + \frac{T2^{\circ}\text{F} - 68}{1\,885}}$$

Donde:

$$\rho_o = \frac{\rho_{o1} + \rho_{o2}}{2}$$

### 3.2.5.3 Cálculo de la velocidad

La velocidad del crudo pesado se calcula así:

$$V = \frac{Q}{\pi \frac{D^2}{4}}$$

Donde:

$$D = D_e - 2 \text{ espesores}$$

### 3.2.5.4 Cálculo de la viscosidad

Para el cálculo de la viscosidad se emplea la ecuación de Andrade

$$\ln \mu = \ln a + \frac{b}{T}$$

Si se conoce:

$$\mu_1 = 300 \text{ Cp.}$$

$$T_1 = 30^\circ\text{C.}$$

$$\mu_2 = 120 \text{ Cp.}$$

$$T_2 = 60^\circ\text{C.}$$

$$\mu(x) = ?$$

T = Temperatura tramo 1

Método de solución para encontrar las variables a y b:

$$\ln \mu_1 = \ln a + \frac{b}{T_{abs1}}$$

$$\ln \mu_2 = \ln a + \frac{b}{T_{abs2}}$$

Despejando  $\ln(a)$  se tiene:

$$\ln a = \ln(\mu_2) - \frac{b}{(T_{abs2})^2}$$

Reemplazando:

$$b = \frac{\left(\ln \frac{\mu_1}{\mu_2}\right) (T_{abs1} T_{abs2})}{T_{abs2} - T_{abs1}}$$

Por lo tanto:

$$\mu(x) = \frac{\mu(x)}{100} * 0,1 \left[ \frac{N \cdot S}{m^2} \right]$$

### 3.2.5.5 Número de Reynolds

El cálculo del número de Reynolds se lo expresa de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Por lo tanto, la altura piezométrica es:

$$H_{j+1} = H_j + f_K \frac{\Delta L_K V^2}{D_i 2g}$$

### 3.2.6 CÁLCULO DEL PERFIL DE PRESIONES

El perfil de presiones queda definido así:

$$H_{\text{piezometrico}} - Z_{\text{topográfico}} = \frac{P}{\rho g}$$

Donde:

$$\frac{P}{\rho g} = H_j - f_k \frac{\Delta L_k V^2}{D_i 2g} - Z_j$$

## 3.3 CONSIDERACIONES PARA LA INTEGRACIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES

Para seleccionar las ecuaciones a ser usadas en el análisis hidrodinámico de un crudo pesado se deben tomar las siguientes consideraciones:

### 3.3.1 CONSIDERACIONES PARA LA ECUACION DE LA ENERGÍA

- Si se tiene  $\dot{W}_{\text{ejes}} = 0$
- Se considera un mismo nivel de referencia g.z = 0
- Todas las pérdidas que se generan en el tramo diferencial ( $\Delta x$ ) se convierten en una fuente interna de calor.

### 3.3.2 CONSIDERACIONES PARA EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

*Convección de calor en superficies interiores*

1. Para flujo laminar ( $Re < 10\,000$ )
  - a. Capa límite térmica =  $0,05 Re Pr D$
  - b.  $Nu = 3,66$

$$h = \frac{Nu * K_f}{D_h} \quad (Ec. 82)$$

Donde:

h: Coeficiente de convección de calor,  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot C}\right]$

Nu: Número de Nusselt, adimensional

Kf: Conductividad térmica del fluido,  $\left[\frac{W}{m \cdot C}\right]$

Dh: Diámetro hidráulico, [m]

$$D_h = \frac{4 * Area}{Perímetro} \quad (Ec. 83)$$

Si se considera como una tubería rugosa:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re * Pr)}{1,07 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \left(\frac{u_b}{u_s}\right)^n \quad (Ec. 84)$$

Siendo:

$$T_f = T_{superficie} + \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$n = 0,11 \text{ para } T_s > T_b$$

$$n = 0,25 \text{ para } T_s < T_b$$

$$n = 0 \text{ para flujo constante o gases}$$

2.- Para  $Re > 10\,000$

$$Nu = \frac{h_{conv} D_{int}}{K_{crudo}} = 0,023 Re^{0.8} Pr^n \quad (Ec. 85)$$

Donde:

$$n = 0,4 \text{ calentamiento del fluido}$$

$$n = 0,3 \text{ enfriamiento del fluido}$$

$$Pr = \frac{U_{crudo} C_{p_{crudo}}}{K_{crudo}} \quad (Ec. 86)$$

$$Re = \frac{\tau_{crudo} V_{crudo} D_{crudo}}{U_{crudo}} \quad (Ec. 87)$$

Estas correlaciones se cumplen cuando el número de Prandtl en el rango:

$$0,7 < Pr < 100$$

### 3.3.3 CONSIDERACIONES PARA LA ECUACION DE LA TEMPERATURA

1. La ecuación diferencial es no lineal
2. Las propiedades del crudo cambian con la temperatura
3. El coeficiente global de transferencia de calor (U) depende de la temperatura.
4. Asumir la temperatura externa del ambiente  $T_{\infty} = cte$  en el tramo de análisis.
5. La temperatura que se utiliza para el cálculo de (U) y propiedades físicas es la ubicada en la mitad del tramo.
6. Debido a que el tramo es corto, el coeficiente global U y propiedades físicas del crudo se consideran como constantes.
7. El método a utilizar es el de la Transformada de Laplace, donde las condiciones iniciales son diferentes de cero.

$$\frac{dT}{dx} + AT = C \quad (Ec. 88)$$

### 3.4 INTEGRACIÓN DE LAS ECUACIONES

Se obtiene la ecuación de la temperatura en relación a las consideraciones detalladas con anterioridad.

Únicamente se considera a la temperatura como la variable de mayor influencia en el diseño del oleoducto; una mínima variación de ésta, afecta directamente a las propiedades del fluido.

La integración de las ecuaciones se basa en el análisis demostrado en Apuntes de clase del MsC. Lenin Ubidia. Por lo tanto, se tiene que:

$$\frac{dT}{dx} + AT = C$$

Donde

$$T = T(x=0)$$

$$S T(s) - T_0 + AT(s) = \frac{C}{s} \quad (Ec. 89)$$

$$(ST(s) + AT(s)) = \frac{C}{s} + T_o \quad (\text{Ec. 90})$$

Sacando factor común T(s):

$$\begin{aligned} T(s)(s + A) &= \frac{C}{s} + T_o \\ T(s) &= \frac{C}{s(s + A)} + \frac{T_o}{s + A} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 91})$$

Descomponiendo en fracciones parciales:

$$\frac{C}{s(s + A)} = \frac{a}{s} + \frac{b}{s + A} = \frac{a(s + A) + bs}{s(s + A)}$$

$$\frac{C}{s(s + A)} = \frac{a(s + A) + bs}{s(s + A)}$$

$$C = a(s + A) + b(s)$$

$$\text{Si: } S = -A \text{ entonces: } C = a(o) + b(-A) \rightarrow b = -\frac{C}{A}$$

$$\text{Si: } S = 0 \text{ entonces: } C = a(A) + 0 \rightarrow a = \frac{C}{A}$$

Por lo tanto:

$$\frac{C}{s(s + A)} = \frac{a}{s} + \frac{b}{s + A} = \frac{C}{A} \frac{1}{s} + \frac{-C}{A} \frac{1}{s + A}$$

$$T(s) = \frac{C}{A} \frac{1}{s} + \frac{-C}{A} \frac{1}{s + A} + \frac{T_o}{s + A} \quad (\text{Ec. 92})$$

Sacando factor común (s+A)

$$T(s) = \frac{C}{A} \frac{1}{s} + \frac{1}{s + A} \left[ T_o - \frac{C}{A} \right] \quad (\text{Ec. 93})$$

Aplicando la anti transformada de Laplace, se obtiene la ecuación de la temperatura:

$$T(x) = \frac{C}{A} + \left( T_o - \frac{C}{A} \right) e^{-Ax} \quad (\text{Ec. 94})$$

Donde:

$$A = \frac{U\pi D}{C_p \tau Q} \quad C = \frac{1}{C_p} \frac{f}{D^5} \frac{Q^2 \delta}{\pi^2} \quad T = T_o - T_\infty$$

## **CAPÍTULO 4. MODELO DEL OLEODUCTO**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

El sistema de transporte de un hidrocarburo representa un elemento medular para la distribución de energía de un país cuando a cadena de valores se refiere, ya que de su integridad depende el éxito del proceso energético.

El oleoducto representa un medio de transporte y distribución práctico si es operado de manera eficiente, ya que garantiza un permanente abastecimiento de éste componente en los diferentes procesos industriales.

De esta manera, dentro del contexto general de modelo de oleoducto, se relacionan un sin número de parámetros que deben ser considerados si se desea tener una aproximación real del comportamiento de un crudo pesado en movimiento.

### **4.2 DESARROLLO DE ALGORITMOS PARA MODELAR OLEODUCTOS DE CRUDOS PESADOS**

Para el desarrollo de algoritmos para modelación de oleoductos de crudos pesados, es necesario hacer ciertas consideraciones puntuales que garantizarán la debida fiabilidad de los resultados esperados en la simulación de un perfil hidrodinámico de un hidrocarburo pesado. Entre las consideraciones a tomar en cuenta en el desarrollo de algoritmos, está el planteamiento de ecuaciones en estado estable, las cuales representan una buena aproximación del comportamiento real del fluido cuando es transportado a través de un ducto. Para alcanzar el objetivo planteado, MatLab (Abreviatura de Matrix Laboratory, software matemático desarrollado por MathWorks) es la herramienta seleccionada que permitirá modelar el comportamiento de las propiedades físicas, térmicas e hidrodinámicas de un crudo pesado. Este paquete informático, ofrece un entorno de desarrollo informático bajo un lenguaje propio de programación, que permitirá mostrar datos, representar funciones y comunicarse con otros programas informáticos similares para una mejor interpretación de los resultados.

#### **4.2.1 SUBRUTINAS DE PROGRAMACIÓN**

El modelo del oleoducto de este proyecto se desarrolló en el software MatLab y tiene la capacidad de analizar la variación de las propiedades de un crudo pesado

en estado estable, mediante la aplicación de ecuaciones de continuidad, energía, balance de masas, ecuaciones de movimiento y conceptos básicos de transferencia de calor aplicadas a circuitos térmicos en tuberías.

Para el desarrollo de los algoritmos de programación de crudos pesados se construyeron subrutinas independientes para cada variable que interviene en el diseño hidrodinámico, con el propósito de tener identificado el parámetro al momento de ensamblar la codificación total.

En la subrutina principal se llama el nombre de la función que almacena el cálculo de la variable y mediante un proceso iterativo se genera la modelación integral del fenómeno de análisis.

Dentro del marco de subrutinas de programación que contiene éste lenguaje de programación, los parámetros que se calculan se detallan la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Subrutinas de programación

Nombre de Subrutina	Variable que calcula	Unidad
CalEsp.m	Calor Específico	[J/Kg °C]
Conductividad.m	Conductividad térmica del fluido	[W/m °C]
Densidad.m	Densidad del fluido	[Kg/m <sup>3</sup> ]
FactFricc.m	Factor de fricción	Adimensional
HconvIntTub1.m	Coefficiente de convección	[W/ m <sup>2</sup> °C]
UtubEnterrada.m	Coefficiente global de transferencia de calor	[W/ m <sup>2</sup> °C]
Viscosidad.m	Viscosidad Dinámica	[Kg /m s]

**Fuente:** Balseca, 2016

#### 4.2.2 CALOR ESPECÍFICO (Cp)

La subrutina calcula el calor específico de un crudo pesado en función de su grado API y la temperatura a la que se encuentra en un tramo diferencial.

La subrutina se describe en el Anexo 1: **Nombre de la subrutina:** CalEsp.m.

#### 4.2.3 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA ( $K_h$ )

La subrutina permite calcular la conductividad térmica de un crudo pesado mediante la Ecuación planteada por (Cragoe, 1993) en función de su gravedad específica y temperatura en el tramo de análisis. La subrutina se describe en el Anexo 1:

**Nombre de la subrutina:** Conductividad.m.

#### 4.2.4 DENSIDAD DEL FLUIDO ( $R_o$ )

La densidad de un crudo pesado se determina en función de la gravedad específica, temperatura y grado API del fluido. Su codificación se especifica en el Anexo 1:

**Nombre de la subrutina:** Densidad.m.

#### 4.2.5 FACTOR DE FRICCIÓN ( $f$ )

La ecuación de Colebrook permite cuantificar el valor del factor de fricción en las paredes de una tubería mediante la expresión que relaciona su rugosidad relativa y el Número de Reynolds con el método de Newton Raphson; proceso iterativo que aproxima la solución de una función tipo  $f(x) = 0$ . La subrutina para este cálculo se detalla en el Anexo 1: **Nombre de la subrutina:** FactFricc.m.

#### 4.2.6 COEFICIENTE DE CONVECCIÓN ( $h$ )

El coeficiente de convección ( $h$ ) es un parámetro importante de cálculo que está relacionado con el tipo de flujo (laminar, transición o turbulento) que presenta un crudo pesado al momento de su transporte. Para el cálculo del coeficiente convectivo se determinó la capa límite térmica y en función de este valor, se procede a calcular el número de Nusselt particular. Los coeficiente de exponenciales de ( $n$ ) depende si existe un enfriamiento o calentamiento del fluido el cual se detalla en el Anexo 1: **Nombre de la subrutina:** HconvIntTub1.m.

#### 4.2.7 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Representa la cuantificación calórica que entrega el fluido al momento de ser transportado por un ducto circular. Su cuantificación está dada en función del espesor de pared de tubería y del espesor que proporciona la tierra cuando se entierra un oleoducto. Se han definido valores de conductividad térmica para el acero como para la tierra de 60 y 2,3 [W/m °C], respectivamente.

El código de programación se detalla en el Anexo 1: **Nombre de la subrutina:** UtubEnterrada.m.

#### 4.2.8 VISCOSIDAD DINÁMICA

La ecuación de Andrade es la que nos permite cuantificar el valor de la viscosidad del fluido para una variación diferencial de longitud en el tramo de análisis; por tanto, la viscosidad dinámica de un crudo pesado está calculada en función de dos viscosidades conocidas a diferentes temperaturas.

La codificación se muestra en el Anexo 1: **Nombre de la subrutina:** Viscosidad.m.

#### 4.3 PERFILES TÉRMICOS

El análisis del perfil térmico de un crudo pesado está definido directamente en función de la variación de temperatura al cuál se encuentra sometido el fluido; es decir, depende de la interacción con el medio externo.

Para el desarrollo del perfil de temperaturas se tomaron las siguientes consideraciones:

- La temperatura del ambiente externo es constante para todo el tramo de tubería.
- Al considerarse como una tubería enterrada todo el tramo del oleoducto, se establece que existe una resistencia por conducción de la tierra igual a tres veces el radio externo de la tubería. De esta manera se garantiza que el efecto de la temperatura exterior no es tan relevante como si se tratara de una tubería aérea.
- Las propiedades del crudo cambian notablemente con la variación de la temperatura a lo largo de su longitud.
- La temperatura que se utiliza para el cálculo de las propiedades del fluido se lo hace a temperatura promedio, es decir:  $T_{prom} = \frac{T_{inicial} + T_{final}}{2}$
- La ecuación (65) en el capítulo 2 es la empleada para el cálculo del perfil de temperaturas, y su codificación se detalla en el Anexo 1.

#### 4.4 PERFIL HIDRODINÁMICO

La solución de problemas relacionados con el transporte de crudos pesados necesita de una representación espacial del sistema y el entendimiento del fenómeno hidráulico en ductos cerrados. Al respecto, el perfil hidrodinámico permite representar el comportamiento de las propiedades físicas de un fluido cuando es

sometido a cambios térmicos, de presión y de sección cuando es trasladado de un punto hacia otro.

El modelo de un perfil hidrodinámico de un crudo pesado es un instrumento que permite obtener resultados cuantitativos del comportamiento de sus variables implícitas en él. La utilización de modelos numéricos que facilitan la predicción de flujos hidrodinámicos de fluidos viscosos provee información sobre la variación del caudal a lo largo de un tramo establecido, presiones y sobrepresiones en la tubería, tipo de régimen de flujo y lo más importante, la variación de propiedades físicas por influjo de disminución o incremento de la temperatura (Murillo, J. Brufau, P. 2008). Las líneas de códigos detalladas en el Anexo 1 nos muestran cómo se construye el perfil de presiones de un oleoducto en función de las variables de cálculo.

#### **4.4.1 PERFIL TOPOGRÁFICO**

La generación de un perfil topográfico está basado en los datos de alturas y longitudes de todo el tramo del oleoducto; con estos datos se alimenta la codificación detallada en el Anexo 1 la misma que fue tomada de la base de datos de OCP.

### **4.5 REDES DE OLEODUCTOS**

Las redes de oleoductos constituyen el transporte de larga distancia más seguro para el petróleo y sus derivados.

Para ello, las tuberías que las conforman deben de cumplir con normas internacionales de seguridad, fiabilidad y eficiencia con el fin de prevenir desgaste frente a la corrosión, variaciones climáticas, u otro tipo de afectación; los que pueden provocar daños en la tubería ocasionando fugas o derrames de crudo con consecuencias graves al ambiente y por lo tanto pérdidas económicas.

En nuestro país este sistema es utilizado para llevar el crudo desde los diferentes campos de exploración hacia diferentes estaciones de almacenamiento y bombeo.

Para el desarrollo de este proyecto no se considerará el análisis de redes de oleoductos, ya que el modelo hidrodinámico está desarrollado en función de una sola tubería con espesores variables para cada etapa de análisis.

#### 4.6 ESTACIONES DE BOMBEO

El desarrollo de la codificación de las estaciones de bombeo inicia con el modelo matemático que gobierna la curva característica de una bomba:

$$Hb = aQb^2 + b\left(\frac{N}{No}\right)Qb + c\left(\frac{N}{No}\right)^2 \quad (Ec. 95)$$

Donde:

Hb= Altura de la bomba; [m]

Qb= Caudal de la bomba;  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

N= Número de revoluciones indicada por el fabricante; [r. p. m]

No= Número de revoluciones a la que trabaja la bomba; [r. p. m]

a,b,c=Coeficientes de la ecuación de la bomba; adimensional

Sobre la base de la teoría explícita en (Stepanoff, 1957) propone una modificación en la ecuación general de la bomba aproximándolo a una linealización que permita poder trabajar de mejor manera en la construcción de la curva del sistema del bombeo. La ecuación se plantea a continuación:

$$Hb = a\left(\frac{N}{No}\right) + b\left(\frac{N}{No}\right)Q^2 \quad (Ec. 96)$$

Donde:

Hb= Altura de la bomba; [m]

Qb= Caudal de la bomba;  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

N= Número de revoluciones a la que gira el modelo; [r. p. m]

No= Número de revoluciones a la que trabaja la bomba; [r. p. m]

a,b=Coeficientes de la ecuación de la bomba; adimensional

A partir de la ecuación de la bomba planteada por (Stepanoff, 1957) se genera la codificación de la curva de la bomba y la curva del sistema la misma que se detalla en el Anexo 1:

#### 4.7 ESTACIONES DE CALENTAMIENTO DE CRUDO

Los crudos pesados presentan viscosidades altas, por lo que su transporte es a través de oleoductos lo cual implica la demanda de mayores recursos.

Para ello es necesario aplicar métodos técnicos para su transporte como: calentamiento, inyección a vapor, combustión in situ, etc.

El proceso de calentamiento al crudo se realiza a través de intercambiadores de calor (hornos), donde se mantiene significativamente una temperatura elevada y así se reduce el grado de viscosidad.

Luego el crudo ingresa a las unidades de bombeo, las que le dan la energía necesaria para que el fluido sea desplazado hasta la siguiente estación.

Para el desarrollo puntual de estaciones de calentamiento de crudo pesado de este trabajo, se consideró un incremento de temperatura de (30°C) cuando el fluido haya disminuido hasta los 30°C. El programa lo efectúa de manera automática y es en la coordenada de longitud donde debe situarse la estación de calentamiento para mejorar la viscosidad del crudo pesado.

## CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN

### 5.1 INTRODUCCIÓN

MatLab es la herramienta de simulación que actualmente se emplea debido a su versatilidad de aplicaciones en la solución de ecuaciones mediante procesos iterativos. El uso de esta herramienta informática ha permitido estimar con un alto grado de exactitud el comportamiento de las variables que intervienen en el modelo hidrodinámico de un oleoducto de crudos pesados.

Se realiza la simulación del cambio de las propiedades de un crudo pesado con un grado fluctuante entre (10 y 22 °API) por efecto del cambio de temperatura al momento de ser transportado por un tramo determinado.

A continuación se detalla la secuencia de cálculo que ejecuta la programación en MatLab.

#### 5.1.1 DATOS DE INGRESO

Para el diseño hidrodinámico de oleoductos de crudos pesados se requiere conocer los datos iniciales de la tubería, del fluido y del sistema de bombeo básicamente, para el empezar el cálculo de las variables que intervienen en el fenómeno de transporte; ver Tablas 5.1, 5.2 y 5.3

**Tabla 5.1** Datos de ingreso de la tubería

PARÁMETRO	UNIDAD
Radio interno de tubería	[m]
Radio externo de tubería	[m]
Longitud del tramo	[m]
Rugosidad relativa	adimensional
Conductividad térmica del acero	[W/m °C]
Conductividad térmica de la tierra	[W/m °C]
Radio de enterrado de tubería	[m]

**Fuente:** Balseca, 2016

**Tabla 5.2** Datos de ingreso del fluido

PARÁMETRO	UNIDAD
Temperatura de inicio del fluido	[°C]
Temperatura del ambiente externo	[°C]
° API Crudo	[°API]
Viscosidad dinámica 1 del fluido	[Cp]
Viscosidad dinámica 2 del fluido	[Cp]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1	[°C]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2	[°C]

**Fuente:** Balseca, 2016

**Tabla 5.3** Datos del sistema de bombeo

PARÁMETRO	UNIDAD
Datos de alturas de la bomba (catálogo)	[m]
Datos de caudales de la bomba (catálogo)	[m <sup>3</sup> /s]
Número de revoluciones de la bomba (catálogo)	[r.p.m]
Número de revoluciones a la que se desea trabaje la bomba	[r.p.m]

**Fuente:** Balseca, 2016

El perfil topográfico a simular puede ser ingresado de dos maneras:

1. De forma manual, cuando se desea evaluar un perfil topográfico cuyos datos no están compilados.
2. Un perfil topográfico cuando se cuenta con una base de datos que contenga esta información. Para éste caso se deberá generar un vínculo directo para

la extracción de la información. De preferencia los datos deben estar en Microsoft Excel y su forma de vincular se explica en el siguiente ejemplo: Si la base de datos reposa en un archivo con extensión .xls la línea de código es:

```
Variable=xlsread('NOMBRE DEL ARCHIVO');
VariableH=ZVariable(1,:);
VariableV=ZVariable(2,:);;
```

### 5.1.2 CÁLCULO DE PROPIEDADES

Ingresados los datos iniciales que requiere el programa, éste procede a calcular automáticamente las propiedades del crudo pesado por cada metro de longitud en función de la variación de la temperatura, como:

- Calor específico (Cp).
- Coeficiente de convección de calor (hx).
- Conductividad térmica del fluido (Kfx).
- Viscosidad dinámica del fluido (Visx).
- Factor de fricción (fx).
- Número de Reynold (Rex).
- Coeficiente global de transferencia de calor (Ux).
- Densidad del fluido (Rox).

### 5.1.3 TRAZADO DE PERFILES

Perfil topográfico:

Como se establece en el capítulo 4, literal (4.4.1), el trazado del perfil topográfico corresponde al trazado de los puntos ingresados por el usuario de forma manual o mediante una base de datos existente (archivo.xls), el cual se lo esquematiza en función del tramo de análisis.

Perfil de temperaturas:

El programa automáticamente grafica la variación de la temperatura en función de la longitud de tubería. La ecuación que grafica el perfil de temperaturas es la Ecuación (66) descrita en el capítulo 3, literal (3.2.2).

## 5.2 DESARROLLO DE ESCENARIOS

Con el propósito de aplicar los códigos de programación desarrollados en MatLab para determinar la metodología del diseño hidrodinámico de un oleoducto de crudos pesados, se procedió probar este trabajo en una red de oleoductos conocida en nuestro país, OCP (Oleoducto de Crudos Pesados). Para tal efecto se dividió la extensión total del oleoducto, configurando seis escenarios relacionados con la longitud y altura del trazado.

### 5.2.1 ESCENARIO 1

Para la construcción del perfil topográfico del escenario 1, se tomaron los datos aproximados de las coordenadas pertenecientes a OCP.

Los datos para caracterizar el escenario 1 se presentan en las tablas 5.4 a 5.7.

**Tabla 5.4** Perfil Topográfico OCP escenario 1

Longitud (m)	Altitud (m)
0	310
5 000	310
10 000	350
15 000	360
20 000	365
25 000	370
30 000	374
35 000	375
40 000	500
45 000	750
47 000	813
50 000	480
55 000	505
60 000	624
65 000	375
66 770	1 010

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos de la tubería:

**Tabla 5.5** Datos de ingreso de la tubería

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radio interno de tubería	0,396875	[m]
Radio externo de tubería	0,406527	[m]
Longitud del tramo	66 770	[m]
Rugosidad relativa	0,00001	adimensional
Conductividad térmica del acero	65	[W/m °C]
Conductividad térmica de la tierra	2,8	[W/m °C]
Radio de enterrado de tubería	1,219581	[m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del fluido:

**Tabla 5.6** Datos de ingreso del fluido

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de inicio del fluido	60	[°C]
Temperatura del ambiente externo	15	[°C]
° API Crudo	14	[°API]
Viscosidad dinámica 1 del fluido	1 700	[Cp]
Viscosidad dinámica 2 del fluido	180	[Cp]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1	15,5	[°C]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2	93,3	[°C]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del sistema de bombeo:

**Tabla 5.7** Datos del sistema de bombeo

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Datos de alturas de la bomba (catálogo)	[1200; 1200; 1100; 1080; 800]	[m]
Datos de caudales de la bomba (catálogo)	[0; 0,0277; 0,083; 0,111; 0,222]	[m <sup>3</sup> /s]
Número de revoluciones de la bomba (catálogo)	3 600	[r.p.m]
Número de revoluciones a la que se desea trabaje la bomba	3 600	[r.p.m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

### 5.2.2 ESCENARIO 2

Los datos para caracterizar el escenario 2 se presentan en las tablas 5.8 a 5.11.

Perfil topográfico:

**Tabla 5.8** Perfil Topográfico OCP escenario 2

Longitud (m)	Altitud (m)
70 000	1 125
75 000	1 375
80 000	1 438
85 000	1 625
90 000	1 530
95 000	1 250
100 000	1 360
105 000	1 360
110 000	1 312
115 000	1 850

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos de la tubería:

**Tabla 5.9** Datos de ingreso de la tubería

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radio interno de tubería	0,422275	[m]
Radio externo de tubería	0,431927	[m]
Longitud del tramo	79 345	[m]
Rugosidad relativa	0,00001	adimensional
Conductividad térmica del acero	65	[W/m °C]
Conductividad térmica de la tierra	2,8	[W/m °C]
Radio de enterrado de tubería	1,295781	[m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del fluido:

**Tabla 5.10** Datos de ingreso del fluido

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de inicio del fluido	45,9248	[°C]
Temperatura del ambiente externo	15	[°C]
° API Crudo	18	[°API]
Viscosidad dinámica 1 del fluido	1 700	[Cp]
Viscosidad dinámica 2 del fluido	180	[Cp]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1	15,5	[°C]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2	93,3	[°C]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del sistema de bombeo:

**Tabla 5.11** Datos del sistema de bombeo

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Datos de alturas de la bomba (catálogo)	[1200; 1200; 1100; 1080; 800]	[m]
Datos de caudales de la bomba (catálogo)	[0; 0,0277; 0,083; 0,111; 0,222]	[m <sup>3</sup> /s]
Número de revoluciones de la bomba (catálogo)	3 600	[r.p.m]
Número de revoluciones a la que se desea trabaje la bomba	3 600	[r.p.m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

### 5.2.3 ESCENARIO 3

Los datos para caracterizar el escenario 3 se presentan en las tablas 5.12 a 5.15.

**Tabla 5.12** Perfil Topográfico OCP escenario 3

Longitud (m)	Altitud (m)
120 000	1 750
123 000	1 980
125 000	1 625
130 000	1 510
135 000	1 875
140 000	1 688
141 200	1 813
145 000	1 813
150 000	1 830
155 000	2 063
158 750	2 875

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos de la tubería:

**Tabla 5.13** Datos de ingreso de la tubería

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radio interno de tubería	0,422275	[m]
Radio externo de tubería	0,431927	[m]
Longitud del tramo	38 232	[m]
Rugosidad relativa	0,00001	adimensional
Conductividad térmica del acero	65	[W/m °C]
Conductividad térmica de la tierra	2,3	[W/m °C]
Radio de enterrado de tubería	1,295781	[m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del fluido:

**Tabla 5.14** Datos de ingreso del fluido

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de inicio del fluido	21,8	[°C]
Temperatura del ambiente externo	15	[°C]
° API Crudo	18	[°API]
Viscosidad dinámica 1 del fluido	1 700	[Cp]
Viscosidad dinámica 2 del fluido	180	[Cp]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1	15,5	[°C]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2	93,3	[°C]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del sistema de bombeo:

**Tabla 5.15** Datos del sistema de bombeo

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Datos de alturas de la bomba (catálogo)	[1 200; 1 200; 1 100; 1080; 800]	[m]
Datos de caudales de la bomba (catálogo)	[0; 0,0277; 0,083; 0,111; 0,222]	[m <sup>3</sup> /s]
Número de revoluciones de la bomba (catálogo)	3 600	[r.p.m]
Número de revoluciones a la que se desea trabaje la bomba	3 600	[r.p.m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

#### 5.2.4 ESCENARIO 4

Los datos para caracterizar el escenario 4 se presentan en las tablas 5.16 a 5.19.

Perfil topográfico:

**Tabla 5.16** Perfil Topográfico OCP escenario 4

Longitud (m)	Altitud (m)
160 000	2 438
165 000	2 250
170 000	2 625
175 000	2 498
180 000	2 688
183 800	2 870
185 000	2 875

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos de la tubería:

**Tabla 5.17** Datos de ingreso de la tubería

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radio interno de tubería	0,388874	[m]
Radio externo de tubería	0,4064	[m]
Longitud del tramo	250 000	[m]
Rugosidad relativa	0.00001	adimensional
Conductividad térmica del acero	65	[W/m °C]
Conductividad térmica de la tierra	2,3	[W/m °C]
Radio de enterrado de tubería	1,2192	[m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del fluido:

**Tabla 5.18** Datos de ingreso del fluido

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de inicio del fluido	19,1398	[°C]
Temperatura del ambiente externo	15	[°C]
° API Crudo	18	[°API]
Viscosidad dinámica 1 del fluido	1 700	[Cp]
Viscosidad dinámica 2 del fluido	180	[Cp]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1	15,5	[°C]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2	93,3	[°C]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del sistema de bombeo:

**Tabla 5.19** Datos del sistema de bombeo

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Datos de alturas de la bomba (catálogo)	[1200; 1200; 1100; 1080; 800]	[m]
Datos de caudales de la bomba (catálogo)	[0; 0,0277; 0,083; 0,111; 0,222]	[m <sup>3</sup> /s]
Revoluciones de la bomba (catálogo)	3 600	[r.p.m]
Revoluciones a la que se desea trabaje la bomba	3 600	[r.p.m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

### 5.2.5 ESCENARIO 5

Los datos para caracterizar el escenario 5 se presentan en las tablas 5.20 a 5.23.

Perfil topográfico:

**Tabla 5.20** Perfil Topográfico OCP escenario 5

Longitud (m)	Altitud (m)
190 000	3 375
195 000	3 750
200 000	4 010
205 000	3 750
210 000	3 375
212 000	3 625
214 000	3 250
215 000	3 374
220 000	3 125
225 000	2 505
230 000	2 380
235 000	2 125

237 000	2 372
238 700	1 980
240 000	2 250
245 000	2 750
250 000	2 380
254 000	3 400
255 000	3 250
260 000	3 313
265 000	2 488
270 000	3 125
271 300	2 980
273 300	2 125
275 000	2 688
280 000	2 438
285 000	2 250
290 000	1 875
295 000	1 625
300 000	1 375
305 000	1 250
310 000	1 125
315 000	938
320 000	875
322 400	813
325 000	750
330 000	630
335 000	600

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos de la tubería:

**Tabla 5.21** Datos de ingreso de la tubería

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radio interno de tubería	0,287274	[m]
Radio externo de tubería	0,304700	[m]
Longitud del tramo	145 000	[m]
Rugosidad relativa	0.00001	adimensional
Conductividad térmica del acero	65	[W/m °C]
Conductividad térmica de la tierra	2,3	[W/m °C]
Radio de enterrado de tubería	0,9141	[m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del fluido:

**Tabla 5.22** Datos de ingreso del fluido

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de inicio del fluido	16,391	[°C]
Temperatura del ambiente externo	15	[°C]
° API Crudo	18	[°API]
Viscosidad dinámica 1 del fluido	1 700	[Cp]
Viscosidad dinámica 2 del fluido	180	[Cp]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1	15,5	[°C]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2	93,3	[°C]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del sistema de bombeo:

**Tabla 5.23** Datos del sistema de bombeo

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Datos de alturas de la bomba (catálogo)	[1200; 1200; 1100; 1080; 800]	[m]
Datos de caudales de la bomba (catálogo)	[0; 0,0277; 0,083; 0,111; 0,222]	[m <sup>3</sup> /s]
Número de revoluciones de la bomba (catálogo)	3 600	[r.p.m]
Número de revoluciones a la que se desea trabaje la bomba	3 600	[r.p.m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

### 5.2.6 ESCENARIO 6

Los datos para caracterizar el escenario 6 se presentan en las tablas 5.24 a 5.27.

Perfil topográfico:

**Tabla 5.24** Perfil Topográfico OCP escenario 6

Longitud (m)	Altitud (m)	Longitud (m)	Altitud (m)	Longitud (m)	Altitud (m)
340 000	500	410 000	189	461 000	120
345 000	375	415 000	375	463 000	313
350 000	370	420 000	250	465 000	125
355 000	128	425 000	125	466 000	313
360 000	250	430 000	249	467 000	120
365 000	250	435 000	40	470 000	188
370 000	125	440 000	125	472 000	2
375 000	123	445 000	123	475 000	130
380 000	120	449 000	313	477 500	250
385 000	125	450 000	250	461 000	120
390 000	127	453 000	145	463 000	313
395 000	125	455 000	5	465 000	125
400 000	80	458 000	125	466 000	313
405 000	125	460 000	313		

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos de la tubería:

**Tabla 5.25** Datos de ingreso de la tubería

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Radio interno de tubería	0,447675	[m]
Radio externo de tubería	0,457327	[m]
Longitud del tramo	137 500	[m]
Rugosidad relativa	0.00001	Adimensional
Conductividad térmica del acero	65	[W/m °C]
Conductividad térmica de la tierra	2,3	[W/m °C]
Radio de enterrado de tubería	1,37196	[m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del fluido:

**Tabla 5.26** Datos de ingreso del fluido

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de inicio del fluido	15,85	[°C]
Temperatura del ambiente externo	15	[°C]
° API Crudo	18	[°API]
Viscosidad dinámica 1 del fluido	1 700	[Cp]
Viscosidad dinámica 2 del fluido	180	[Cp]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1	15,5	[°C]
Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2	93,3	[°C]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

Datos del sistema de bombeo:

**Tabla 5.27** Datos del sistema de bombeo

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Datos de alturas de la bomba (catálogo)	[1 200; 1 200; 1100; 1 080; 800]	[m]
Datos de caudales de la bomba (catálogo)	[0; 0,0277; 0,083; 0,111; 0,222]	[m <sup>3</sup> /s]
Número de revoluciones de la bomba (catálogo)	3 600	[r.p.m]
Número de revoluciones a la que se desea trabaje la bomba	3 600	[r.p.m]

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados OCP, 2003

## **CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

Para el desarrollo del trabajo, se planteó el análisis hidrodinámico de un hidrocarburo pesado a través del sistema de oleoductos de crudos OCP del país.

Por la red del oleoducto se transporta la producción de crudos pesados desde los campos ubicados en la región oriental del Ecuador hasta el Terminal Marítimo de OCP, ubicado en el perfil costanero de la provincia de Esmeraldas.

El sistema del oleoducto está integrado por una tubería aproximada de 500 Km de longitud, la cual contempla cuatro estaciones de bombeo y tres estaciones reductoras, ubicadas estratégicamente a lo largo de su perfil topográfico.

El análisis de resultados del modelo hidrodinámico empleando el software MatLab, consiste en tener una aproximación del comportamiento de las propiedades del fluido ante el cambio térmico durante su transporte a través de la longitud total del oleoducto.

Para tal efecto se ha dividido OCP en seis tramos (escenarios) diferentes como se los mencionó en el capítulo 5, literales 5.2.1; 5.2.2; 5.2.3; 5.2.4; 5.2.5; 5.2.6, donde se establece el perfil topográfico, características de tubería, datos del fluido y características del sistema de bombeo.

### **6.2 LIMITACIONES Y ALCANCES**

El diseño hidrodinámico planteado para un crudo pesado presenta los siguientes alcances y limitaciones:

#### **6.2.1 ALCANCES**

- Determinar las características físico-químicas de los crudos pesados.
- Establecer los modelos a utilizarse mediante planteamiento de ecuaciones diferenciales.
- Procesar los sistemas de ecuaciones diferenciales para determinar su método de integración.
- Desarrollar el modelo integral hidrodinámico-energético de un oleoducto de crudo pesado.
- Simular el comportamiento de las variables de un crudo pesado.

### **6.2.2 LIMITACIONES**

- No se evalúan mezclas de hidrocarburos pesados mediante la ecuación de la licuicidad; se considerará un solo tipo °API para todo el tramo de tubería.
- Se considerará un flujo másico de fluido constante durante todo su análisis (Sistema Cerrado) en un volumen de control fijo.
- No se evalúan redes de oleoductos; se considera un solo ducto de espesor variable.
- Las estaciones de bombeo se ubican en función a la pérdida de energía de presión evaluada para cada tramo (escenario) planteado.
- Se considera que el oleoducto se encuentra enterrado a una profundidad equivalente a tres veces su radio exterior para cada tramo de simulación.
- Al no disponer de información sobre las estaciones reductoras, se ha procedido a reducir por simple apreciación los valores de presiones en los tramos 4, 5 y 6.
- Las estaciones de calentamiento se ubican cuando el fluido ha alcanzado una temperatura de 30°C, este valor ha sido una consideración personal para las estaciones de calentamiento.

### **6.3 CODIFICACIÓN DEL SISTEMA**

Los resultados del diseño hidrodinámico de crudos pesados en base de la modelación de OCP tendrá la siguiente codificación de exposición de deducciones numéricas y gráficas que ejemplifiquen el comportamiento de las propiedades del crudo pesado en análisis, ver Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Codificación del sistema

ESCENA RIO	COTA TOPOGRÁFICA	DATOS DE TUBERÍA	DATOS DEL FLUIDO	DATOS SISTEMA DE BOMBEO	CÁLCULOS DEL FLUIDO	GRÁFICAS
1	Desde: Hasta:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Radio interno de tubería (<math>r_1</math>).</li> <li>Radio externo de tubería (<math>r_2</math>).</li> <li>Longitud del tramo (<math>L_{tub}</math>).</li> <li>Rugosidad relativa (<math>RugRel</math>).</li> <li>Conductividad térmica del acero (<math>K_{tub}</math>).</li> <li>Conductividad térmica de la tierra (<math>K_{tierra}</math>).</li> <li>Radio de enterrado de tubería (<math>r_2</math>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura de inicio del fluido (<math>T_{inicio}</math>).</li> <li>Temperatura del ambiente externo (<math>T_{inf}</math>).</li> <li>° API Crudo (API).</li> <li>Viscosidad dinámica 1 (<math>\mu_{1}</math>).</li> <li>Viscosidad dinámica 2 (<math>\mu_{2}</math>).</li> <li>Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1 (<math>T_1</math>).</li> <li>Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2 (<math>T_2</math>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alturas de la bomba (catálogo) (Hbomba).</li> <li>Caudales de la bomba (catálogo) (Qbomba).</li> <li>Número de revoluciones de la bomba (catálogo) (NRB).</li> <li>Número de revoluciones de trabajo de la bomba (NBO).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calor específico (Cpx).</li> <li>Conductividad térmica fluido (<math>K_{fx}</math>).</li> <li>Número de Nusselt (Nux).</li> <li>Densidad (ROx).</li> <li>Número de Reynolds (Rex).</li> <li>Coefficiente Global (Ux).</li> <li>Viscosidad dinámica (<math>\nu_{ix}</math>).</li> <li>Factor de fricción (fx).</li> <li>Coefficiente de convección (hx).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perfil de temperatura (<math>L_{tub}</math> vs <math>T_x</math>).</li> <li>Perfil Topográfico (<math>L_{tub}</math> vs <math>PTZ_x</math>).</li> <li>Perfil de presiones (<math>L_{tub}</math> vs <math>H_{px}</math>).</li> <li>Curva del sistema (Q vs Hsistema).</li> <li>Curva de la bomba (Q vs Hbomb).</li> </ul>

2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radio interno de tubería (r1).</li> <li>• Radio externo de tubería (r2).</li> <li>• Longitud del tramo (L<sub>tub</sub>).</li> <li>• Rugosidad relativa (RugRel).</li> <li>• Conductividad térmica del acero (K<sub>tub</sub>).</li> <li>• Conductividad térmica de la tierra (K<sub>tierra</sub>).</li> <li>• Radio de enterrado de tubería (r3).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de inicio del fluido (T<sub>inicio</sub>).</li> <li>• Temperatura del ambiente externo (T<sub>inf</sub>).</li> <li>• ° API Crudo (API).</li> <li>• Viscosidad dinámica 1 (Miu1).</li> <li>• Viscosidad dinámica 2 (Miu2).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1 (T1).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2 (T2).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A Alturas de la bomba (catálogo) (H<sub>bomba</sub>).</li> <li>• Caudales de la bomba (catálogo) (Q<sub>bomba</sub>).</li> <li>• Número de revoluciones de la bomba (catálogo) (NRB).</li> <li>• Número de revoluciones de trabajo de la bomba (NBO).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor específico (C<sub>px</sub>).</li> <li>• Conductividad térmica fluido (K<sub>fx</sub>).</li> <li>• Número de Nusselt (Nux).</li> <li>• Densidad (ROx).</li> <li>• Número de Reynolds (Rex).</li> <li>• Coeficiente Global (Ux).</li> <li>• Viscosidad dinámica (Visx).</li> <li>• Factor de fricción (fx).</li> <li>• Coeficiente de convección (hx).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura (L<sub>tubx</sub> vs T<sub>x</sub>).</li> <li>• Perfil Topográfico (L<sub>tubx</sub> vs PTZ<sub>x</sub>).</li> <li>• Perfil de presiones (L<sub>tubx</sub> vs H<sub>px</sub>).</li> <li>• Curva del sistema (Q vs H<sub>sistema</sub>).</li> <li>• Curva de la bomba (Q vs H<sub>bomba</sub>).</li> </ul>
---	--	---	---	--	--

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radio interno de tubería (r1).</li> <li>• Radio externo de tubería (r2).</li> <li>• Longitud del tramo (Ltub).</li> <li>• Rugosidad relativa (RugRel).</li> <li>• Conductividad térmica del acero (Ktub).</li> <li>• Conductividad térmica de la tierra (Ktierra).</li> <li>• Radio de enterrado de tubería (r3).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de inicio del fluido (Tinicio).</li> <li>• Temperatura del ambiente externo (Tinf).</li> <li>• ° API Crudo (API).</li> <li>• Viscosidad dinámica 1 (Miu1).</li> <li>• Viscosidad dinámica 2 (Miu2).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1 (T1).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2 (T2).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alturas de la bomba (catálogo) (Hbomba).</li> <li>• Caudales de la bomba (catálogo) (Qbomba).</li> <li>• Número de revoluciones de la bomba (catálogo) (NRB).</li> <li>• Número de revoluciones de trabajo de la bomba (NBO).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor específico (Cpx).</li> <li>• Conductividad térmica fluido (Kfx).</li> <li>• Número de Nusselt (Nux).</li> <li>• Densidad (ROX).</li> <li>• Número de Reynolds (Rex).</li> <li>• Coeficiente Global (Ux).</li> <li>• Viscosidad dinámica (Visx).</li> <li>• Factor de fricción (fx).</li> <li>• Coeficiente de convección (hx).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura (Ltub vs Tx).</li> <li>• Perfil Topográfico (Ltub vs PTZx)</li> <li>• Perfil de presiones (Ltub vs Hpx)</li> <li>• Curva del sistema (Q vs Hsistema)</li> <li>• Curva de la bomba (Q vs Hbomba).</li> </ul>
3	Desde: Hasta:					

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radio interno de tubería (r1).</li> <li>• Radio externo de tubería (r2).</li> <li>• Longitud del tramo (Ltub).</li> <li>• Rugosidad relativa (RugRel).</li> <li>• Conductividad térmica del acero (Ktub).</li> <li>• Conductividad térmica de la tierra (Ktierra).</li> <li>• Radio de enterrado de tubería (r3).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de inicio del fluido (Tinicio).</li> <li>• Temperatura del ambiente externo (Tinf).</li> <li>• ° API Crudo (API).</li> <li>• Viscosidad dinámica 1 (Miu1).</li> <li>• Viscosidad dinámica 2 (Miu2).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1 (T1).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2 (T2).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alturas de la bomba (catálogo (Hbomba)).</li> <li>• Caudales de la bomba (catálogo (Qbomba)).</li> <li>• Número de revoluciones de la bomba (catálogo (NRB)).</li> <li>• Número de revoluciones de trabajo de la bomba (NBO).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor específico (Cpx).</li> <li>• Conductividad térmica fluido (Kfx).</li> <li>• Número de Nusselt (Nux).</li> <li>• Densidad (ROx).</li> <li>• Número de Reynolds (Rex).</li> <li>• Coeficiente Global (Ux).</li> <li>• Viscosidad dinámica (Visx).</li> <li>• Factor de fricción (fx).</li> <li>• Coeficiente de convección (hx).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura (Ltubx vs Tx).</li> <li>• Perfil Topográfico (Ltubx vs PTZx).</li> <li>• Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx).</li> <li>• Curva del sistema (Q vs Hsistema).</li> <li>• Curva de la bomba (Q vs Hbomba).</li> </ul>
4	Desde:					
	Hasta:					

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radio interno de tubería (r1).</li> <li>• Radio externo de tubería (r2).</li> <li>• Longitud del tramo (Ltub).</li> <li>• Rugosidad relativa (RugRel).</li> <li>• Conductividad térmica del acero (Ktub).</li> <li>• Conductividad térmica de la tierra (Ktierra).</li> <li>• Radio de enterrado de tubería (r3).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de inicio del fluido (Tinicio).</li> <li>• Temperatura del ambiente externo (Tinf).</li> <li>• ° API Crudo (API).</li> <li>• Viscosidad dinámica 1 (Miu1).</li> <li>• Viscosidad dinámica 2 (Miu2).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1 (T1).</li> <li>• Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2 (T2).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alturas de la bomba (catálogo (Hbomba)).</li> <li>• Caudales de la bomba (catálogo (Qbomba)).</li> <li>• Número de revoluciones de la bomba (catálogo (NRB)).</li> <li>• Número de revoluciones de trabajo de la bomba (NBO).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor específico (Cpx).</li> <li>• Conductividad térmica fluido (Kfx).</li> <li>• Número de Nusselt (Nux).</li> <li>• Densidad (ROX).</li> <li>• Número de Reynolds (Rex).</li> <li>• Coeficiente Global (Ux).</li> <li>• Viscosidad dinámica (Visx).</li> <li>• Factor de fricción (fx).</li> <li>• Coeficiente de convección (hx).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil de temperatura (Ltubx vs Tx).</li> <li>• Perfil Topográfico (Ltubx vs PTZx).</li> <li>• Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx).</li> <li>• Curva del sistema (Q vs Hsistema).</li> <li>• Curva de la bomba (Q vs Hbomba).</li> </ul>
5	Desde: Hasta:					

6		<ul style="list-style-type: none"> <li>Radio interno de tubería (r1).</li> <li>Radio externo de tubería (r2).</li> <li>Longitud del tramo (Ltub).</li> <li>Rugosidad relativa (RugRel).</li> <li>Conductividad térmica del acero (Ktub).</li> <li>Conductividad térmica de la tierra (Ktierra).</li> <li>Radio de enterrado de tubería (r3).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura de inicio del fluido (Tinicio).</li> <li>Temperatura del ambiente externo (Tinf).</li> <li>° API Crudo (API).</li> <li>Viscosidad dinámica 1 (Miu1).</li> <li>Viscosidad dinámica 2 (Miu2).</li> <li>Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 1 (T1).</li> <li>Temperatura del fluido a viscosidad dinámica 2 (T2).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alturas de la bomba (catálogo) (Hbomba).</li> <li>Caudales de la bomba (catálogo) (Qbomba).</li> <li>Número de revoluciones de la bomba (catálogo) (NRB).</li> <li>Número de revoluciones de trabajo de la bomba (NBO).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calor específico (Cpx).</li> <li>Conductividad térmica fluido (Kfx).</li> <li>Número de Nusselt (Nux).</li> <li>Densidad (ROX).</li> <li>Número de Reynolds (Rex).</li> <li>Coefficiente Global (Ux).</li> <li>Viscosidad dinámica (Visx).</li> <li>Factor de fricción (fx).</li> <li>Coefficiente de convección (hx).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perfil de temperatura (Ltubx vs Tx).</li> <li>Perfil Topográfico (Ltubx vs PTZx).</li> <li>Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx).</li> <li>Curva del sistema (Q vs Hsistema).</li> <li>Curva de la bomba (Q vs Hbomba).</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Desde:</li> <li>Hasta:</li> </ul>				

## 6.4 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

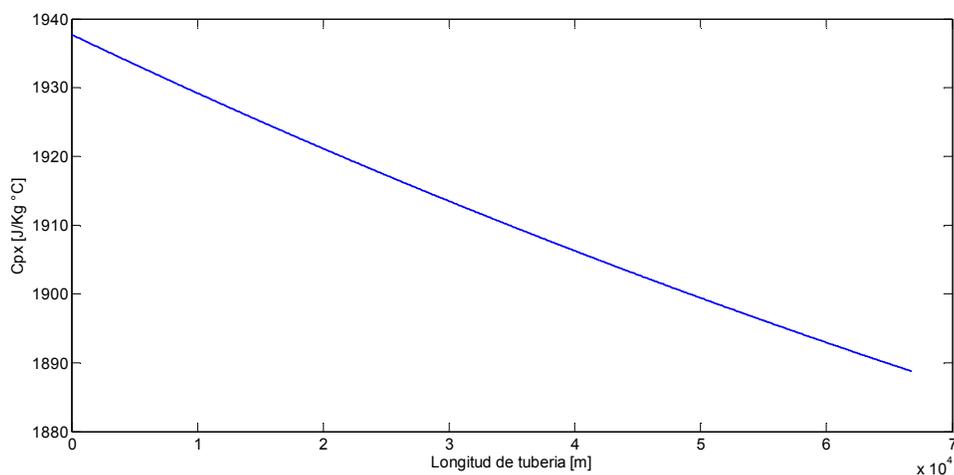
Las propiedades del crudo pesado transportado por el OCP y sus respectivas gráficas, son calculadas para cada uno de los seis tramos (escenarios) planteado en este trabajo.

### 6.4.1 CÁLCULO DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 1

Se representan los diferentes valores de las propiedades del fluido por cada metro de longitud de tubería. Se tienen los siguientes resultados:

- Calor específico ( $C_{px}$ ):

El calor específico se calcula mediante la fórmula (9) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.1:



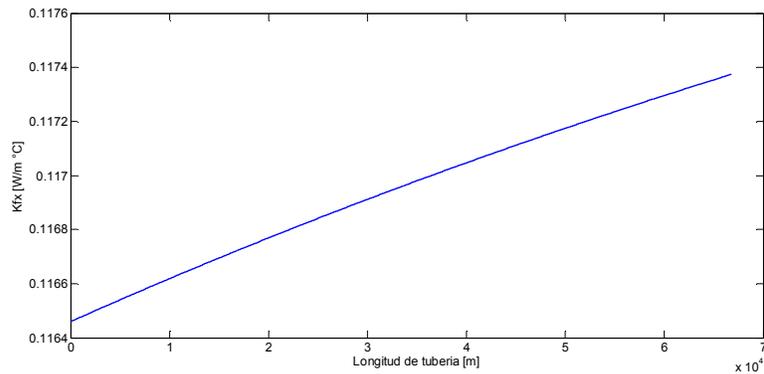
**Figura 6.1** Calor específico

**Fuente:** Balseca, 2016

Al considerar el calor específico de un crudo pesado como una relación directa a la temperatura, se evidencia la disminución de esta propiedad cuando disminuye el gradiente a temperatura a lo largo del tramo de análisis. Por tanto, la gráfica mostrada en la figura 6.1 evidencia el cambio en el calor específico de una relación casi lineal ya que no se considera perturbaciones por efectos de transitorios ya que es un análisis en estado estable.

- Conductividad térmica fluido ( $K_{fx}$ ):

La conductividad térmica del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (8) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.2.



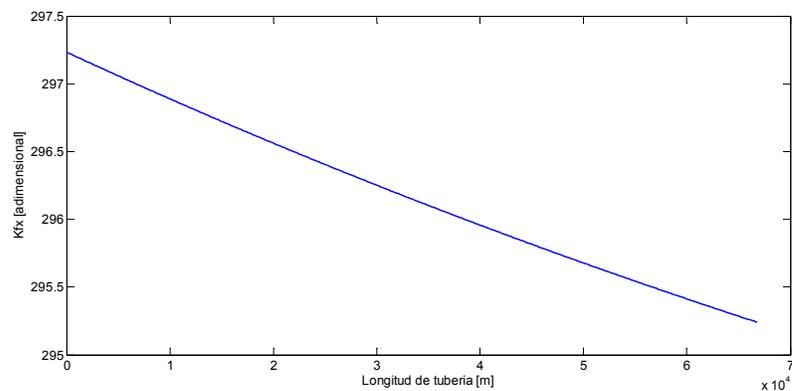
**Figura 6.2** Conductividad Térmica

**Fuente:** Balseca, 2016

La conductividad térmica es una propiedad muy sensible a la variación térmica, su relación es inversamente proporcional a la temperatura, por ello, cuando disminuye la temperatura, el valor de la conductividad aumenta a medida que se desplaza por la longitud de tramo de análisis. La gráfica resultante se asemeja a lineal ya que no se consideran las perturbaciones provocadas por efectos de fricción y transientes.

- *Número de Nusselt (Nux).*

El Número de Nusselt del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (11) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.3.



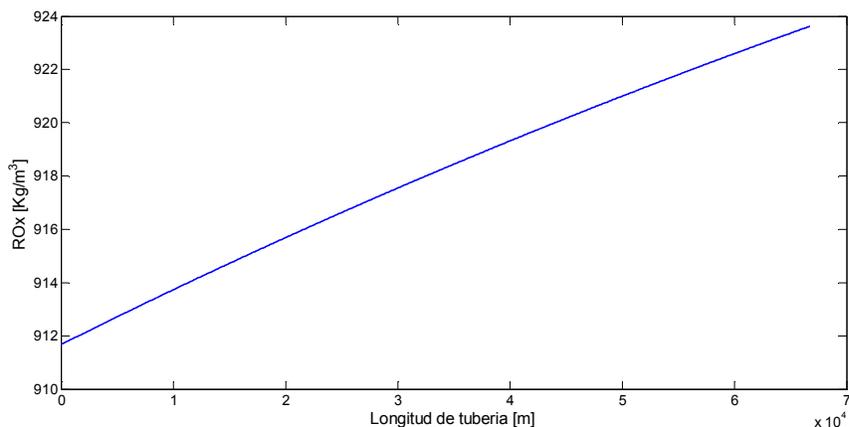
**Figura 6.3** Número de Nusselt

**Fuente:** Balseca, 2016

En la figura 6.3 se percibe una leve disminución en el valor del Número de Nusselt debido a su relación directa con dos parámetros adimensionales como son Reynolds y Prandtl. Estos parámetros provocan un cambio en su valor a medida que se desplaza por el tramo de tubería.

- Densidad (Rox):

La densidad del crudo pesado se calcula mediante las fórmulas (3 y 4) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.4.



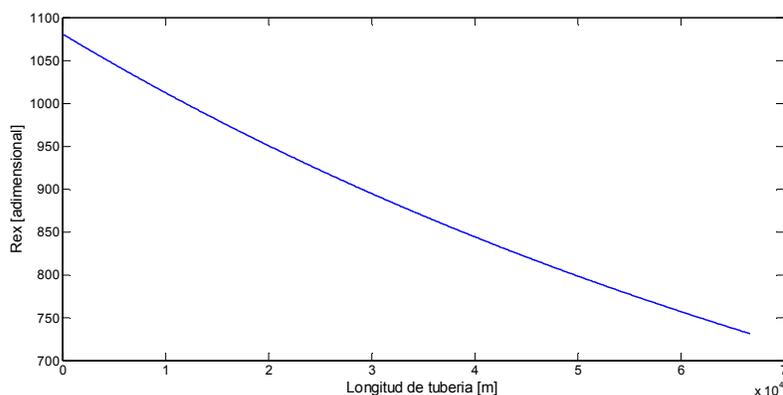
**Figura 6.4** Densidad del crudo

**Fuente:** Balseca, 2016

La densidad es una relación inversamente proporcional a la temperatura, por lo que es el parámetro de mayor importancia a controlar el momento de transportar un fluido a través de un ducto. Para el ejemplo mostrado en la figura 6.4 se aprecia un incremento en esta propiedad a medida que la temperatura disminuye. Su relación es casi lineal sin considerar perturbaciones por efectos de fricción y transientes presentes en el transporte de fluidos. El monitoreo de ésta propiedad permite identificar la instalación de estaciones de calentamiento para reducir pérdidas por efectos de fricción y tener un mejor control en el bombeo del crudo pesado.

- Número de Reynolds (Rex):

El Número de Reynolds se calcula mediante la fórmula (51) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.5.



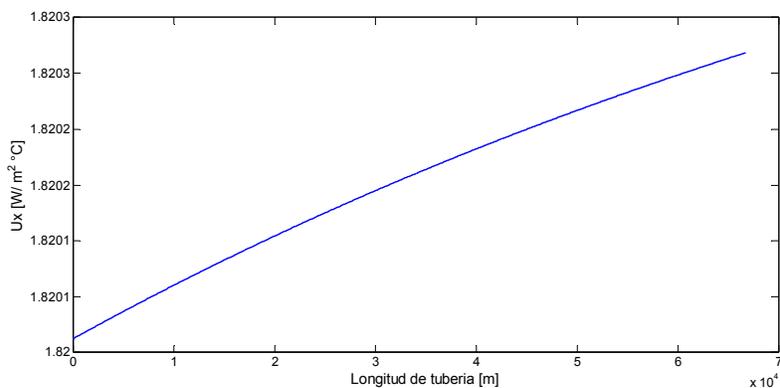
**Figura 6.5** Número de Reynolds

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.5 muestra el cambio del parámetro adimensional del Número de Reynolds el cual guarda un estrecho vínculo con la velocidad del transporte, densidad, área transversal y viscosidad dinámica del crudo pesado. Al considerar que las propiedades antes mencionadas se ven afectadas por el cambio térmico, se obtiene como resultado la disminución de éste parámetro. De igual forma no se consideran efectos de perturbación por acción de la fricción y transientes en el transporte del crudo pesado.

- Coeficiente Global (U<sub>x</sub>):

El Coeficiente Global de transferencia de calor (U<sub>x</sub>) relaciona las resistencias térmicas que están presentes en el circuito térmico y se calcula mediante la fórmula (73) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.6.



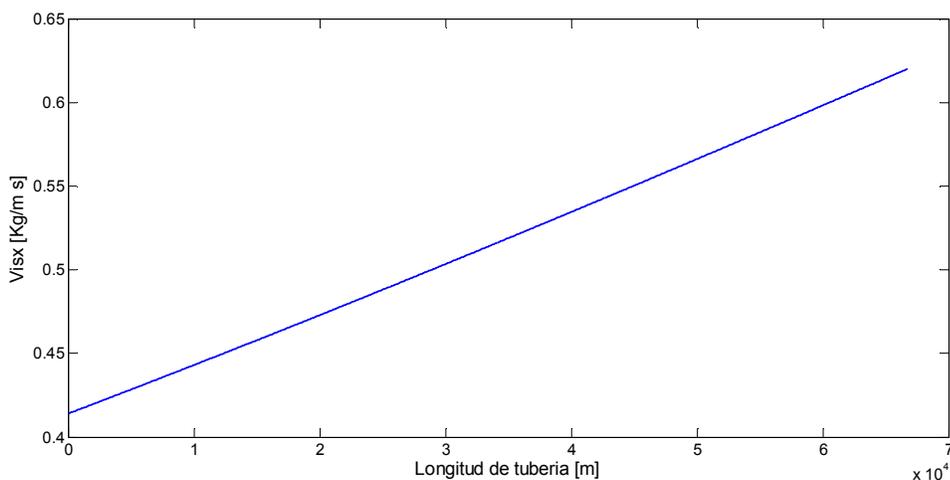
**Figura 6.6** Coeficiente Global de transferencia de calor (U<sub>x</sub>)

**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente global de transferencia de calor relaciona las resistencias térmicas por convección y conducción a través del espesor de pared, así como del suelo, en función del área externa implícitas en el sistema de análisis. Al considerar el fenómeno de conducción, guarda un estrecho vínculo con el coeficiente convectivo y con la temperatura del fluido. En el caso de la conducción de calor, el coeficiente de conductividad térmica es muy sensible al cambio térmico; por tanto, se tiene un ligero aumento del Coeficiente global de transferencia cuando la temperatura disminuye a lo largo de la longitud de tubería de estudio.

- Viscosidad dinámica ( $Vis_x$ ):

La viscosidad dinámica se calcula mediante la fórmula (6) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.7.



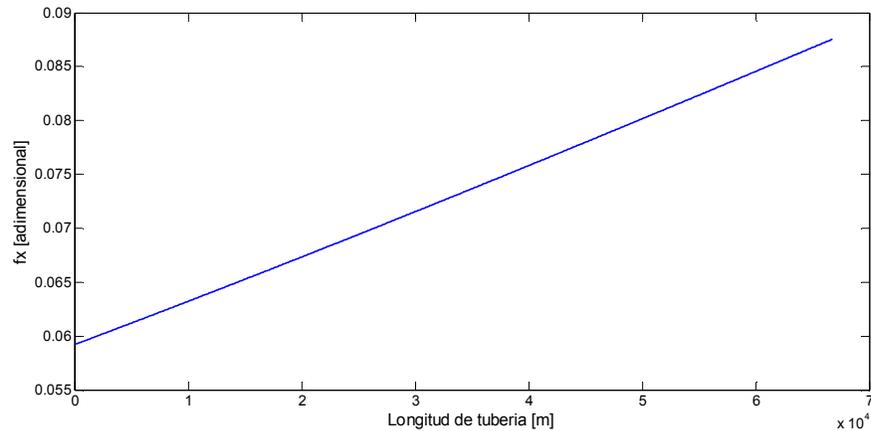
**Figura 6.7** Viscosidad dinámica

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.7 muestra la relación inversa entre la viscosidad dinámica de un crudo pesado y su temperatura. Esta propiedad se caracteriza por una alta sensibilidad térmica, por tal razón, el monitoreo permanente de éste parámetro será de gran utilidad al momento de minimizar pérdidas por fricción hidrodinámica el momento de su transporte. Esto permitirá situar estratégicamente estaciones de calentamiento a lo largo de la longitud del oleoducto.

- Factor de fricción ( $f_x$ ):

El factor de fricción se calcula mediante la fórmula (54) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.8.



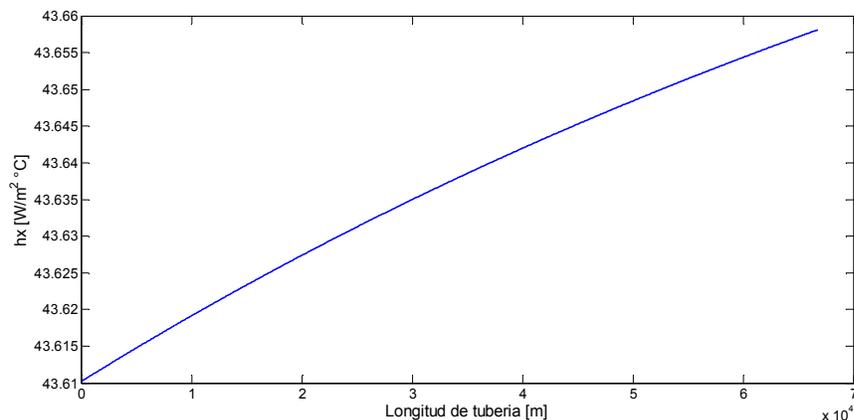
**Figura 6.8** Factor de fricción

**Fuente:** Balseca, 2016

Es una propiedad adimensional que cuantifica la pérdida de energía hidráulica de un fluido en función de la rugosidad relativa y el Número de Reynolds. Su variación se evidencia cuando el fluido pierde temperatura incrementando su valor numérico. La gráfica no considera perturbaciones generadas por transientes implícitos en el transporte del crudo pesado.

- Coeficiente de convección (hx):

El coeficiente de convección del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (13) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.9.



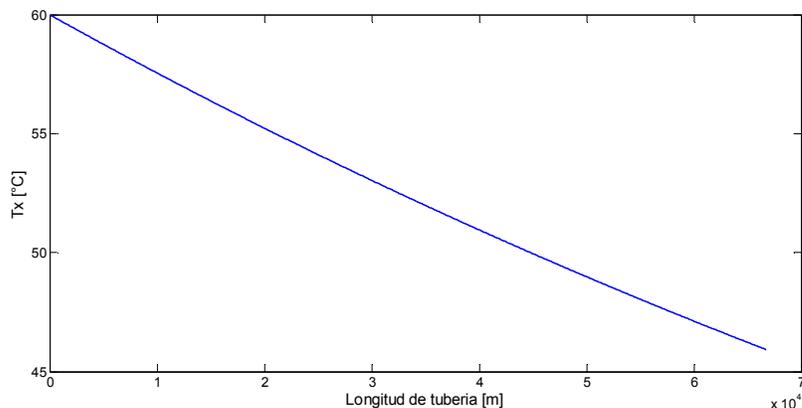
**Figura 6.9** Coeficiente de convección

**Fuente:** Balseca, 2016

### 6.4.1.1 Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 1

- Perfil de temperatura (Ltubx vs Tx):

El perfil de temperaturas del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (66) ingresadas en el código de programación respectivo y su gráfica resultante se visualiza en la figura 6.10.



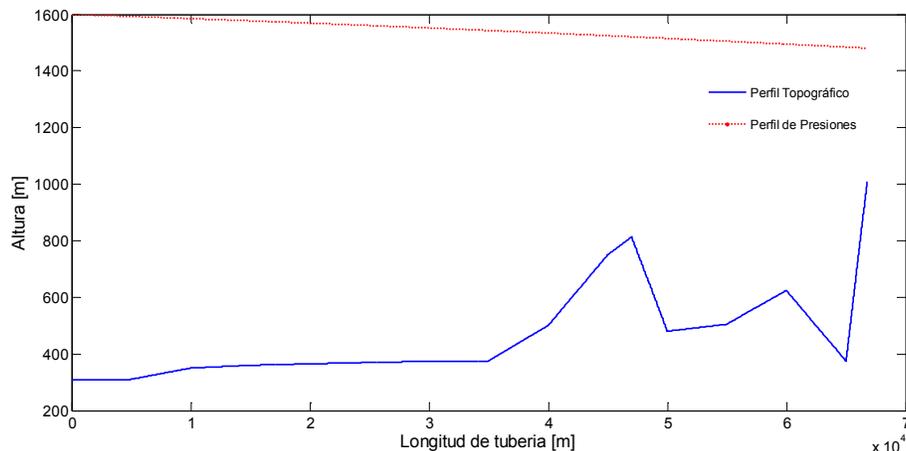
**Figura 6.10** Perfil de temperaturas

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.10 muestra explícitamente la pérdida de energía térmica de un crudo pesado por efectos de transferencia calórica con el medio externo. Al enunciar que las propiedades de éste fluido guardan una relación estrecha con el gradiente térmico, es de fundamental importancia controlar éste parámetro. En la codificación de programación se controla que la temperatura del crudo pesado no disminuya de los 30°C, ya que para valor menores a éste, los valor de viscosidad y densidad se tornan críticos y dificultan el transporte del hidrocarburo; por tal razón, al marcar este valor numérico de temperatura, automáticamente se eleva sus condiciones iniciales de bombeo (60°C) y por ende que en esta coordenada de longitud se recomienda situar una estación de calentamiento para mejorar todas las propiedades del hidrocarburo.

- Perfil Topográfico (Ltubx vs PTZx):

El perfil topográfico que atraviesa el oleoducto de crudo pesado se construye a partir de los datos de coordenadas que se disponga para su construcción. Para la modelación del OCP, se alimentó al sistema con las coordenadas particulares de cada tramo (escenario), y su grafica se visualiza en la Figura 6.11.



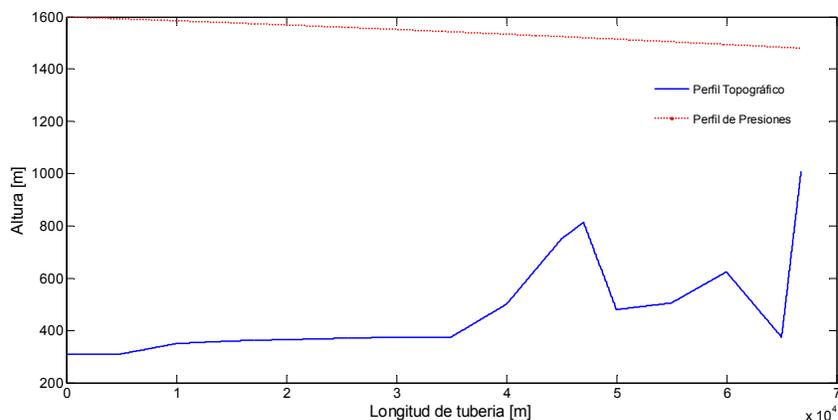
**Figura 6.11** Perfil topográfico

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.11 muestra la variación en el perfil topográfico del escenario 1 OCP. Se muestra la energía potencial a vencer por el sistema de bombeo y permite identificar las coordenadas críticas por donde atraviesa el oleoducto. El trazado del perfil topográfico fue tomado de la planimetría adjunta en el Anexo 2.

- Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx):

El perfil de presiones del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (79) ingresadas en el código de programación respectivo y su gráfica se visualiza en la figura 6.12.



**Figura 6.12** Perfil de presiones

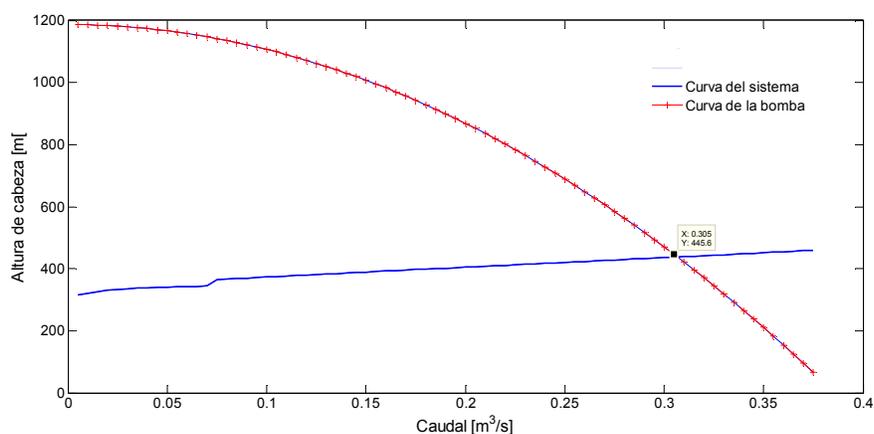
**Fuente:** Balseca, 2016

El perfil de presiones cuantifica la cantidad de energía hidráulica presente en el hidrocarburo, ésta es la energía disponible por el sistema para vencer efectos de fricción y energía potencial presente en el traslado de una estación a otra. Este

valor debe ser controlado de tal manera que no exceda el límite de resistencia mecánica que otorga el material del oleoducto. En este estudio no se consideró el análisis estructural del acero, lo cual se sugiere considerar en futuras investigaciones de temáticas similares.

- Curva del sistema (Q vs Hsistema) y Curva de la bomba (Q vs Hbomba):

Para los resultados obtenidos de la curva del sistema- bomba en el capítulo 4 literal 4.6, se mencionó el método de cálculo del sistema de bombeo, basado en la fórmula (95) y las líneas de programación descritas. En la Figura 6.13 se visualiza la curva del sistema de bombeo.



**Figura 6.13** Curva del Sistema-Bomba

**Fuente:** Balseca, 2016

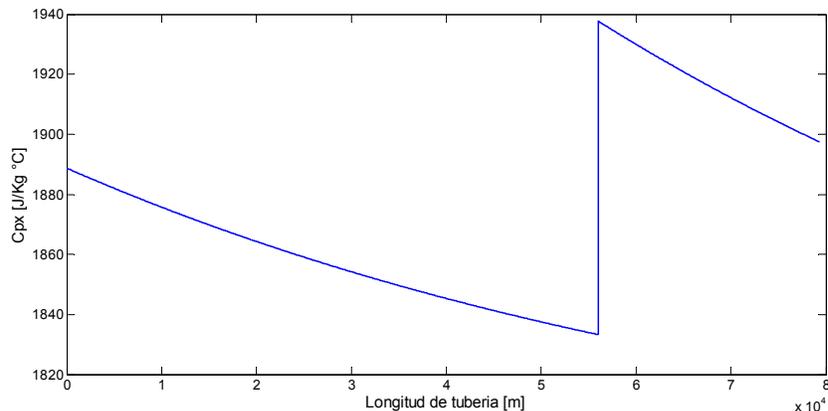
La figura 6.13 muestra el comportamiento de la curva del sistema y la curva del sistema de bombeo. Como se aprecia en la gráfica, el punto de intersección entre las dos curvas, representa el punto de operación ideal de la bomba; en este caso, el caudal recomendado es de 0,306 m³/s.

#### 6.4.2 CÁLCULOS DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 2

Se representan los diferentes valores de las propiedades del fluido por cada metro de longitud de tubería. Se tienen los siguientes resultados:

- Calor específico (C<sub>px</sub>):

El calor específico es calculado mediante la fórmula (9) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la Figura 6.14.



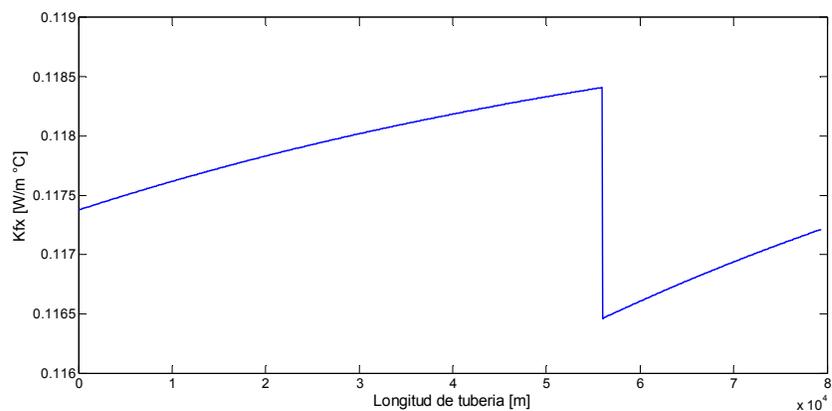
**Figura 6.14** Calor específico

**Fuente:** Balseca, 2016

Al considerar el calor específico de un crudo pesado como una relación directa a la temperatura, se evidencia la disminución de esta propiedad cuando decrece el gradiente de temperatura a lo largo del tramo de análisis. Por tanto, la gráfica mostrada en la figura 6.14 evidencia el cambio en el calor específico de una relación casi lineal ya que no se considera perturbaciones por efectos de transitorios ya que es un análisis en estado estable. El salto brusco en la magnitud del calor específico está determinado por el incremento de la temperatura del hidrocarburo a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de las propiedades con la temperatura.

- Conductividad térmica fluido (Kfx):

La conductividad térmica del crudo pesado es calculada mediante la fórmula (8) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se evidencia en la Figura 6.15.



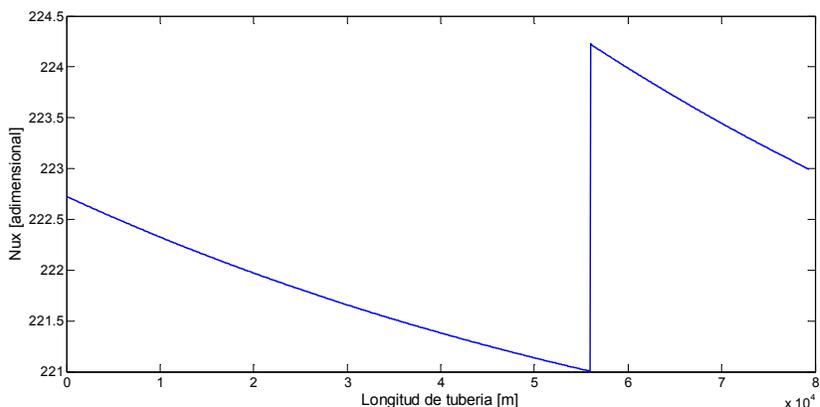
**Figura 6.15** Conductividad Térmica

**Fuente:** Balseca, 2016

La conductividad térmica es una propiedad muy sensible a la variación térmica, su relación es inversamente proporcional a la temperatura, por ello, cuando disminuye la temperatura, el valor de la conductividad aumenta a medida que se desplaza por la longitud de tramo de análisis. La gráfica resultante se asemeja a lineal ya que no se consideran las perturbaciones provocadas por efectos de fricción y transientes. El incremento en la magnitud de la conductividad térmica está determinado por el incremento de la temperatura del hidrocarburo a  $60^{\circ}\text{C}$ , de ésta manera se ratifica la relación inversa de la propiedad con la temperatura.

- Número de Nusselt (Nux):

El Número de Nusselt del crudo pesado es calculada mediante la fórmula (11) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se evidencia en la Figura 6.16.



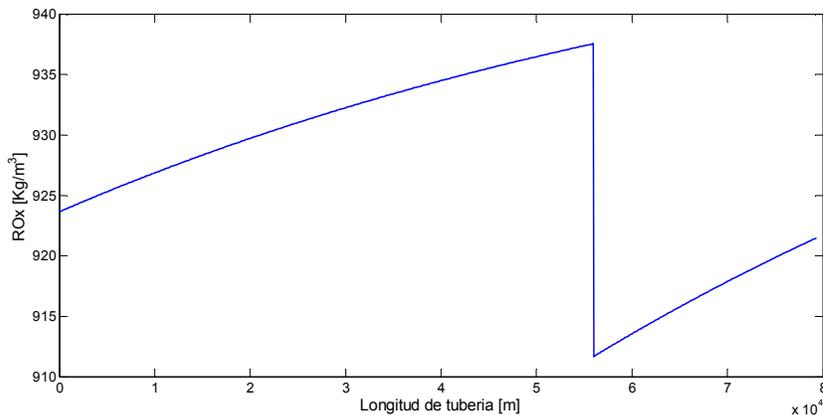
**Figura 6.16** Número de Nusselt

**Fuente:** Balseca, 2016

En la figura 6.16 se percibe una leve disminución en el valor del Número de Nusselt debido a su relación directa con dos parámetros adimensionales como son Reynolds y Prandtl. Estos parámetros provocan un cambio en su valor a medida que se desplaza por el tramo de tubería. El aumento repentino en el Número de Nusselt se debe al incremento de la temperatura a  $60^{\circ}\text{C}$ , de ésta manera se ratifica la relación directa de las propiedades con la temperatura.

- Densidad (ROx):

La densidad del crudo pesado es calculada mediante las fórmulas (3 y 4) ingresadas en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se evidencia en la Figura 6.17.



**Figura 6.17** Densidad del crudo

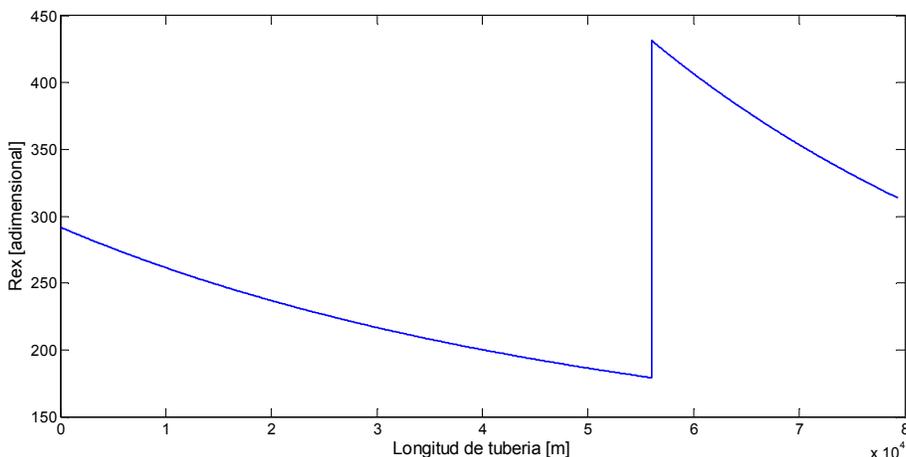
**Fuente:** Balseca, 2016

La densidad es una relación inversamente proporcional a la temperatura, por lo que es el parámetro de mayor importancia a controlar el momento de transportar un fluido a través de un ducto. Para el ejemplo mostrado en la figura 6.17 se aprecia un incremento en esta propiedad a medida que la temperatura disminuye. Su relación es casi lineal sin considerar perturbaciones por efectos de fricción y transientes presentes en el transporte de fluidos. El monitoreo de ésta propiedad permite identificar la instalación de estaciones de calentamiento para reducir pérdidas por efectos de fricción y tener un mejor control en el bombeo del crudo pesado.

El aumento notable en la densidad del crudo pesado se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

- Número de Reynolds (Rex):

El Número de Reynolds es calculado mediante la fórmula (51) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se evidencia en la Figura 6.18.



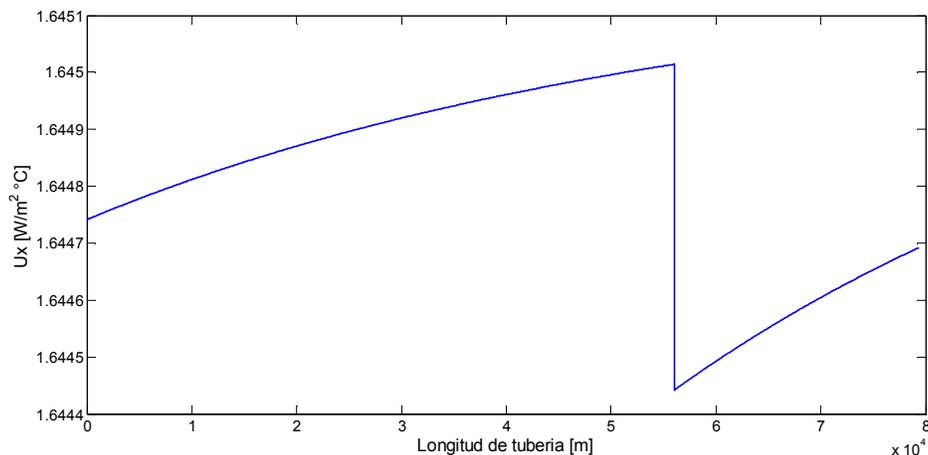
**Figura 6.18** Número de Reynolds

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.18 muestra el cambio del parámetro adimensional del Número de Reynolds el cual guarda un estrecho vínculo con la velocidad del transporte, densidad, área transversal y viscosidad dinámica del crudo pesado. Al considerar que las propiedades antes mencionadas se ven afectadas por el cambio térmico, se obtiene como resultado la disminución de éste parámetro. De igual forma no se consideran efectos de perturbación por acción de la fricción y transientes en el transporte del crudo pesado. El aumento notable en el Número de Reynolds se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Coeficiente Global ( $U_x$ ):

El Coeficiente Global de transferencia de calor ( $U_x$ ) relaciona las resistencias térmicas que están presentes en el circuito térmico y es calculado mediante la fórmula (73) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se evidencia en la Figura 6.19.



**Figura 6.19** Coeficiente Global de Transferencia de calor

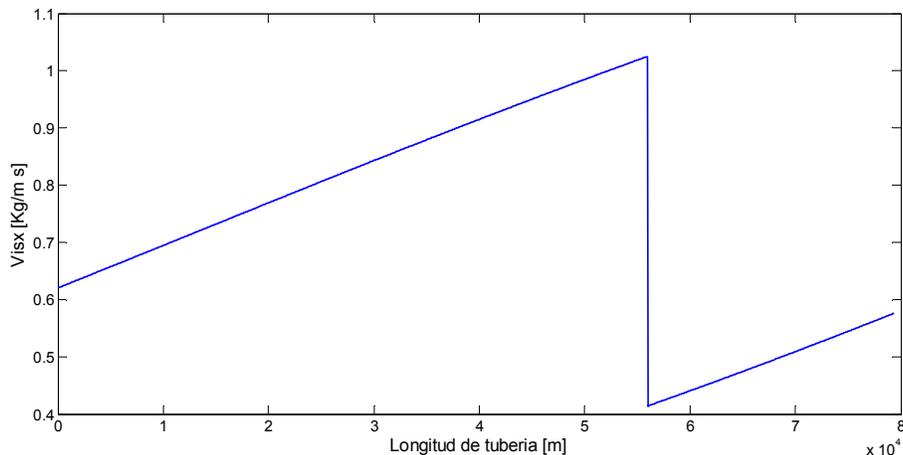
**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente global de transferencia de calor relaciona las resistencias térmicas por convección y conducción a través del espesor de pared, así como del suelo, en función del área externa implícitas en el sistema de análisis. Al considerar el fenómeno de conducción, guarda un estrecho vínculo con el coeficiente convectivo y con la temperatura del fluido. En el caso de la conducción de calor, el coeficiente de conductividad térmica es muy sensible al cambio térmico; por tanto, se tiene un ligero aumento del Coeficiente global de transferencia cuando la temperatura disminuye a lo largo de la longitud de tubería de estudio.

En la Figura 6.19 se puede apreciar el aumento notable en el Coeficiente Global de Transferencia de Calor debido al incremento de la temperatura del fluido a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Viscosidad dinámica (Visx):

La viscosidad dinámica es calculada mediante la fórmula (6) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se evidencia en la Figura 6.20.



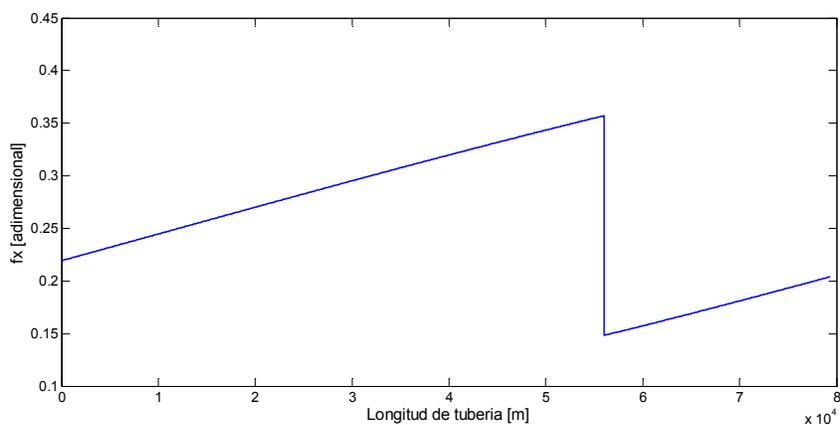
**Figura 6.20** Viscosidad dinámica

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.20 muestra la relación inversa entre la viscosidad dinámica de un crudo pesado y su temperatura. Esta propiedad se caracteriza por una alta sensibilidad térmica, por tal razón, el monitoreo permanente de éste parámetro será de gran utilidad al momento de minimizar pérdidas por fricción hidrodinámica el momento de su transporte. Esto permitirá situar estratégicamente estaciones de calentamiento a lo largo de la longitud del oleoducto. La disminución drástica en la Viscosidad Dinámica del crudo se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Factor de fricción (fx):

El factor de fricción se calcula mediante la fórmula (54) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se evidencia en la Figura 6.21.



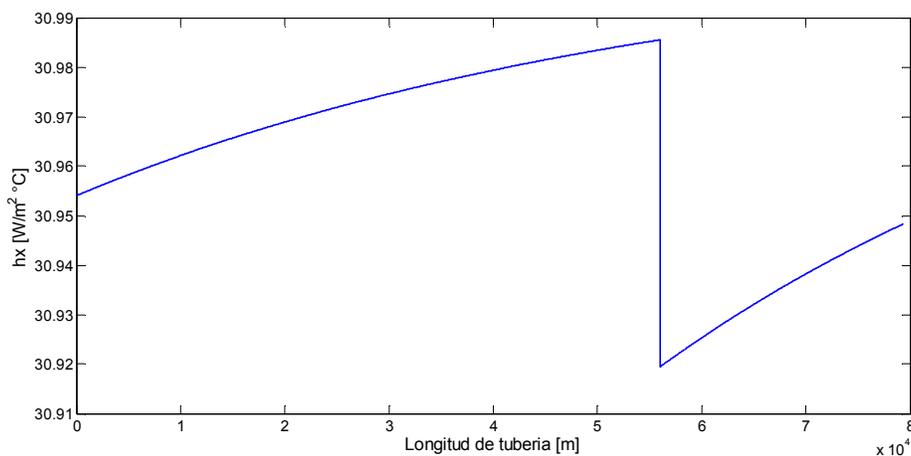
**Figura 6.21** Factor de fricción

**Fuente:** Balseca, 2016

Es una propiedad adimensional que cuantifica la pérdida de energía hidráulica de un fluido en función de la rugosidad relativa y el Número de Reynolds. Su variación se evidencia cuando el fluido pierde temperatura incrementando su valor numérico. La gráfica no considera perturbaciones generadas por transientes implícitos en el transporte del crudo pesado. En la Figura 6.21 se puede apreciar una disminución abrupta en el Factor de Fricción del hidrocarburo debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Coeficiente de convección ( $h_x$ ):

El coeficiente de convección del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (13) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.22.



**Figura 6.22** Coeficiente de convección

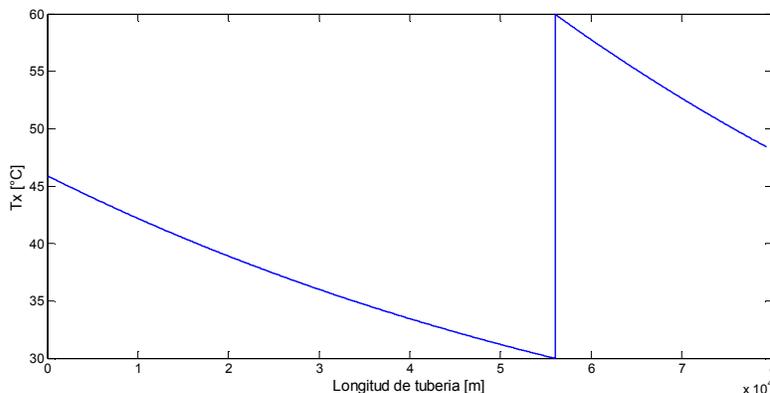
**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente convectivo de un hidrocarburo guarda relación inversa a su temperatura, ya que está en función de la conductividad térmica y del Número de Nusselt. En la Figura 6.22 se aprecia la disminución repentina del Coeficiente de Convección debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

### 6.4.2.1 Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 2

- Perfil de temperatura ( $L_{tubx}$  vs  $T_x$ ):

El perfil de temperaturas del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (66) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.23.



**Figura 6.23** Perfil de temperaturas

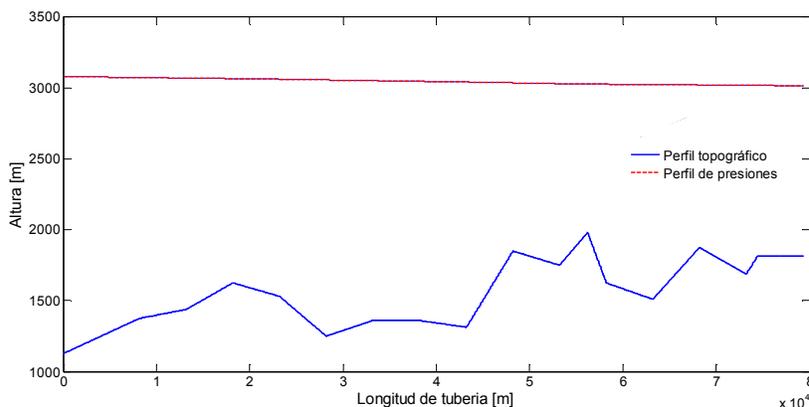
**Fuente:** Balseca, 2016

La figura muestra explícitamente la pérdida de energía térmica de un crudo pesado por efectos de transferencia calórica con el medio externo. Al enunciar que las propiedades de éste fluido guardan una relación estrecha con el gradiente térmico, es de fundamental importancia controlar éste parámetro. En la codificación de programación se controla que la temperatura del crudo pesado no disminuya de los 30°C, ya que para valor menores a éste, los valor de viscosidad y densidad se tornan críticos y dificultan el transporte del hidrocarburo; por tal razón, al marcar este valor numérico de temperatura, automáticamente se eleva sus condiciones iniciales de bombeo (60°C) y por ende que en esta coordenada de longitud se recomienda situar una estación de calentamiento para mejorar todas las propiedades del hidrocarburo.

En la Figura 6.23 se aprecia el incremento de temperatura del crudo de 30°C a 60°C, para mejorar las condiciones de operación. De esta manera se establece la colocación de la estación de calentamiento para el tramo dos.

- Perfil Topográfico (Ltubx vs PTZx):

El perfil topográfico que atraviesa el oleoducto de crudo pesado se construye a partir de los datos de coordenadas que se disponga para su construcción. Para la modelación del OCP, se alimentó al sistema con las coordenadas particulares de cada tramo (escenario); su grafica se visualiza en la figura 6.24.



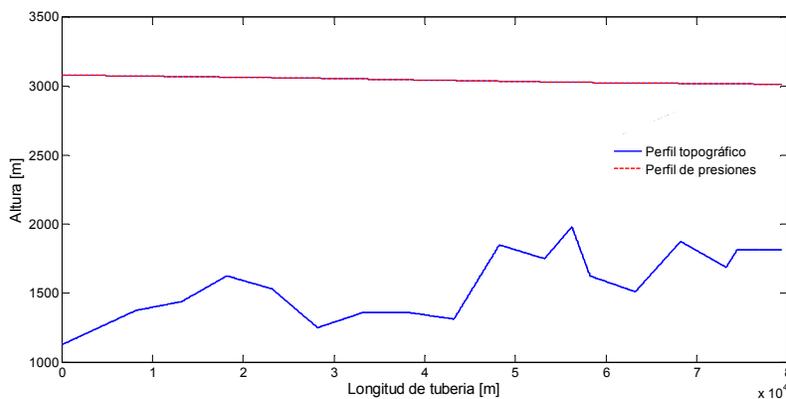
**Figura 6.24** Perfil topográfico

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.24 muestra la variación en el perfil topográfico del escenario 2 OCP. Se muestra la energía potencial a vencer por el sistema de bombeo y permite identificar las coordenadas críticas por donde atraviesa el oleoducto. El trazado del perfil topográfico fue tomado de la planimetría adjunta en el Anexo 2.

- Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx)

El perfil de presiones del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (79) ingresada en el código de programación; la gráfica se visualiza en la figura 6.25.



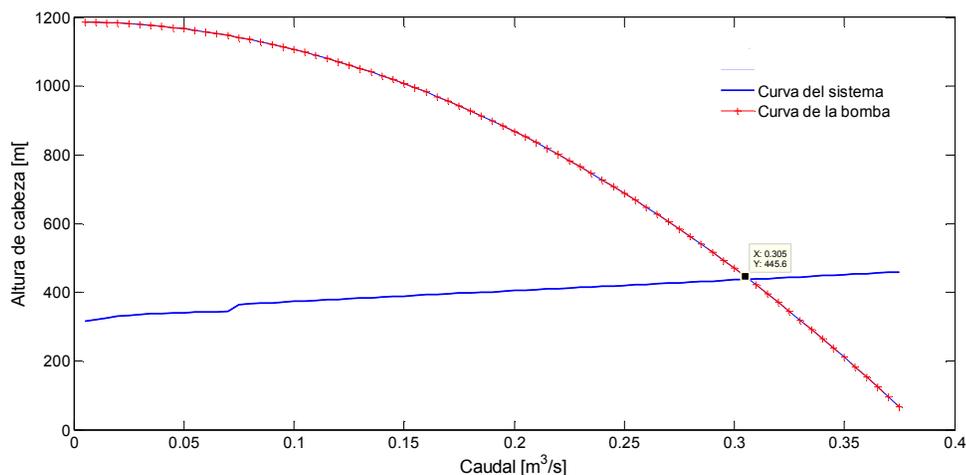
**Figura 6.25** Perfil de presiones

**Fuente:** Balseca, 2016

El perfil de presiones cuantifica la cantidad de energía hidráulica presente en el hidrocarburo, ésta es la energía disponible por el sistema para vencer efectos de fricción y energía potencial presente en el traslado de una estación a otra. Este valor debe ser controlado de tal manera que no exceda el límite de resistencia mecánica que otorga el material del oleoducto. En este estudio no se consideró el análisis estructural del acero, lo cual se sugiere considerar en futuras investigaciones de temáticas similares.

- Curva del sistema (Q vs Hsistema) y Curva de la bomba (Q vs Hbomba):

Para los resultados obtenidos de la curva del sistema- bomba en el capítulo 4 literal 4.6, se detalló el método de cálculo del sistema de bombeo, basado en la fórmula (95) y las líneas de programación descritas, teniendo como resultado el punto de operación de la bomba; ver figura 6.26.



**Figura 6.26** Curva del Sistema-Bomba

**Fuente:** Balseca, 2016

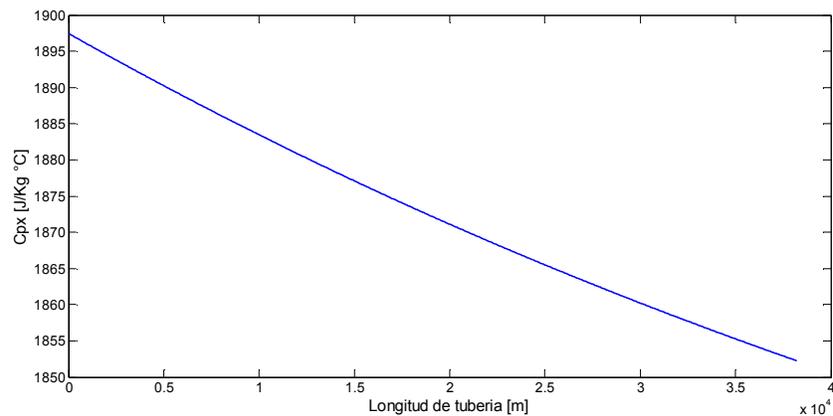
La figura 6.26 muestra el comportamiento de la curva del sistema y la curva del sistema de bombeo. Como se aprecia en la gráfica, el punto de intersección entre las dos curvas, representa el punto de operación ideal de la bomba; en este caso, el caudal recomendado es de 0,306 m³/s.

### 6.4.3 CÁLCULOS DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 3

Se procede a representar los diferentes valores de las propiedades del fluido por cada metro de longitud de tubería, teniendo los siguientes resultados:

- Calor específico (Cpx):

El calor específico es calculado mediante la fórmula (9) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra a continuación:



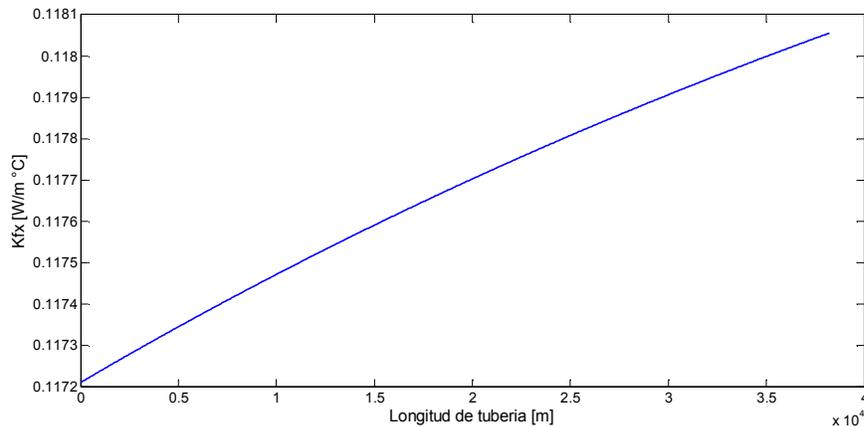
**Figura 6.27** Calor específico

**Fuente:** Balseca, 2016

Al considerar el calor específico de un crudo pesado como una relación directa a la temperatura, se evidencia la disminución de esta propiedad cuando disminuye el gradiente a temperatura a lo largo del tramo de análisis. Por tanto, la gráfica mostrada en la figura 6.27 evidencia el cambio en el calor específico de una relación casi lineal ya que no se considera perturbaciones por efectos de transitorios ya que es un análisis en estado estable.

- Conductividad térmica fluido (Kfx):

La conductividad térmica del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (8) ingresada en el código de programación; la gráfica se visualiza en la figura 6.28.



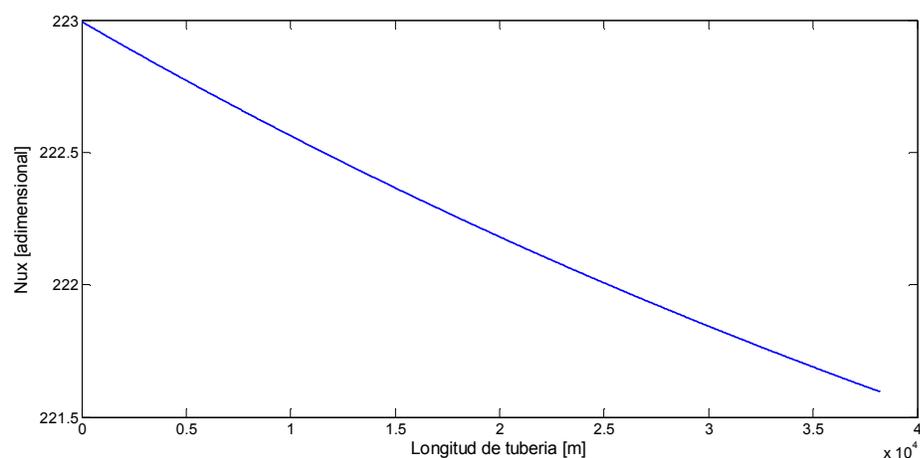
**Figura 6.28** Conductividad Térmica

**Fuente:** Balseca, 2016

La conductividad térmica es una propiedad muy sensible a la variación térmica, su relación es inversamente proporcional a la temperatura, por ello, cuando disminuye la temperatura, el valor de la conductividad aumenta a medida que se desplaza por la longitud de tramo de análisis. La gráfica resultante se asemeja a lineal ya que no se consideran las perturbaciones provocadas por efectos de fricción y transientes.

- Número de Nusselt (Nux):

El Número de Nusselt del crudo pesado se calcula con la fórmula (11) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.29.



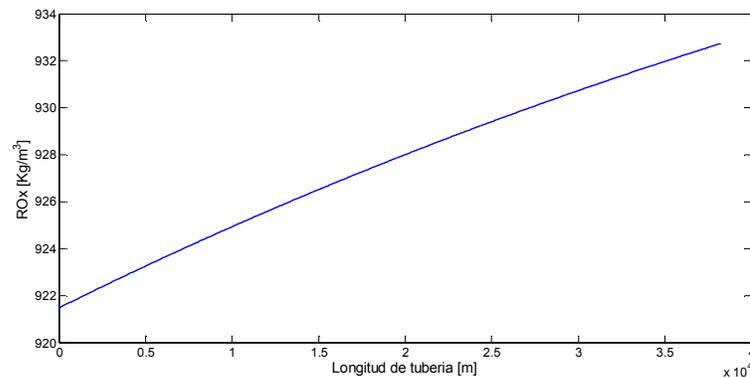
**Figura 6.29** Número de Nusselt

**Fuente:** Balseca, 2016

En la figura 6.29 se percibe una leve disminución en el valor del Número de Nusselt debido a su relación directa con dos parámetros adimensionales como son Reynolds y Prandtl. Estos parámetros provocan un cambio en su valor a medida que se desplaza por el tramo de tubería.

- Densidad (Rox):

La densidad del crudo pesado se calcula con las fórmulas (3 y 4) ingresadas en el código de programación respectivo; la gráfica se visualiza en la figura 6.30.



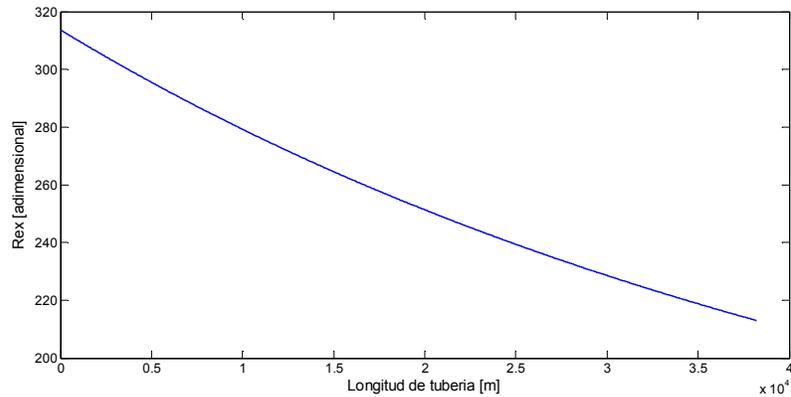
**Figura 6.30** Densidad del crudo

**Fuente:** Balseca, 2016

La densidad es una relación inversamente proporcional a la temperatura, por lo que es el parámetro de mayor importancia a controlar el momento de transportar un fluido a través de un ducto. Para el ejemplo mostrado en la figura 6.30 se aprecia un incremento en esta propiedad a medida que la temperatura disminuye. Su relación es casi lineal sin considerar perturbaciones por efectos de fricción y transientes presentes en el transporte de fluidos. El monitoreo de ésta propiedad permite identificar la instalación de estaciones de calentamiento para reducir pérdidas por efectos de fricción y tener un mejor control en el bombeo del crudo pesado.

- Número de Reynolds (Rex):

El Número de Reynolds se calcula con la fórmula (51) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.31.



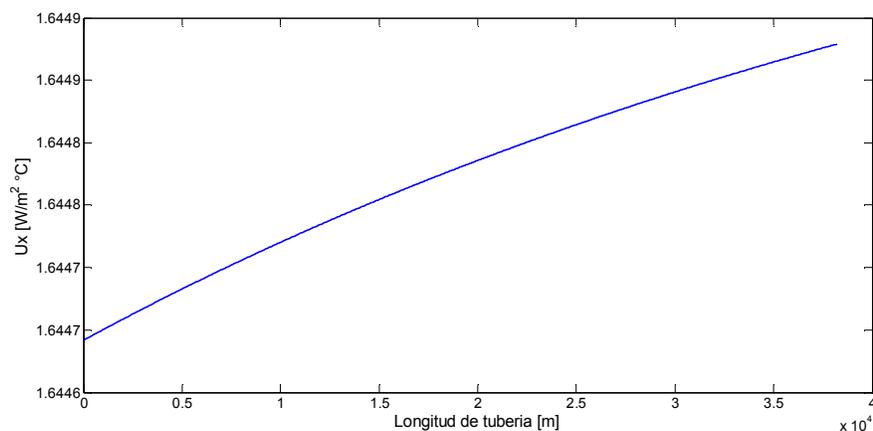
**Figura 6.31** Número de Reynolds

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.31 muestra el cambio del parámetro adimensional del Número de Reynolds el cual guarda un estrecho vínculo con la velocidad del transporte, densidad, área transversal y viscosidad dinámica del crudo pesado. Al considerar que las propiedades antes mencionadas se ven afectadas por el cambio térmico, se obtiene como resultado la disminución de éste parámetro. De igual forma no se consideran efectos de perturbación por acción de la fricción y transientes en el transporte del crudo pesado.

- Coeficiente Global ( $U_x$ ):

El Coeficiente Global de transferencia de calor ( $U_x$ ) relaciona las resistencias térmicas que están presentes en el circuito térmico y es calculado con la fórmula (73) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.32.



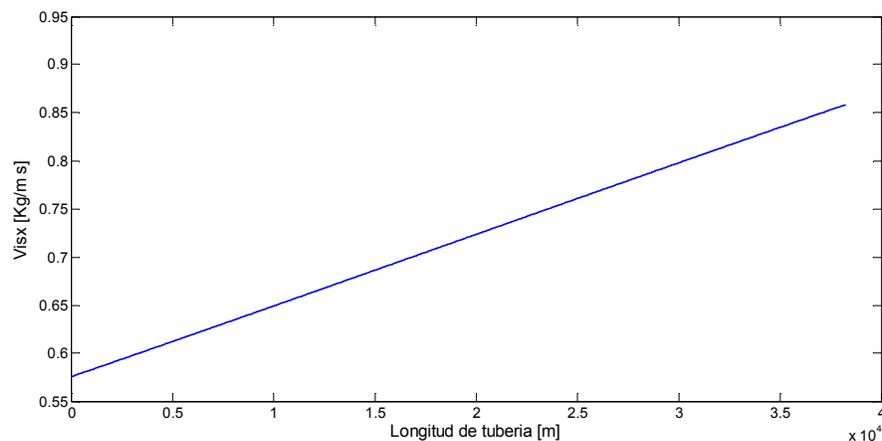
**Figura 6.32** Coeficiente Global de Transferencia de calor

**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente global de transferencia de calor relaciona las resistencias térmicas por convección y conducción a través del espesor de pared, así como del suelo, en función del área externa implícitas en el sistema de análisis. Al considerar el fenómeno de conducción, guarda un estrecho vínculo con el coeficiente convectivo y con la temperatura del fluido. En el caso de la conducción de calor, el coeficiente de conductividad térmica es muy sensible al cambio térmico; por tanto, se tiene un ligero aumento del Coeficiente global de transferencia cuando la temperatura disminuye a lo largo de la longitud de tubería de estudio.

- Viscosidad dinámica ( $Visx$ ):

La viscosidad dinámica se calcula con la fórmula (6) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.33.



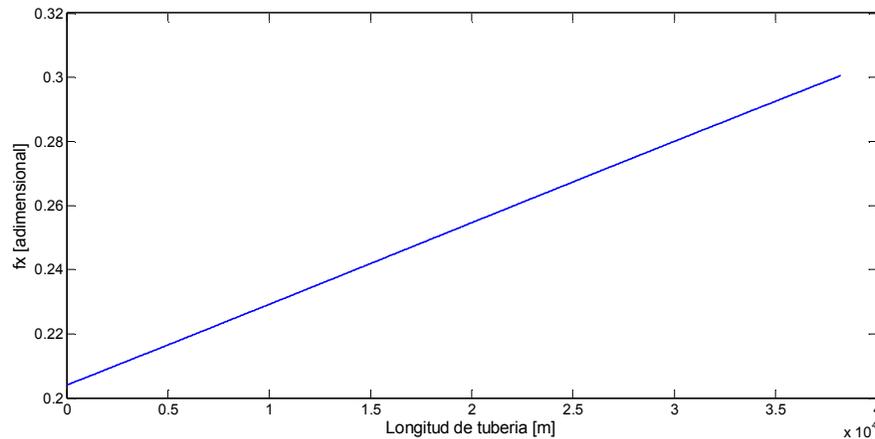
**Figura 6.33** Viscosidad dinámica

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.33 muestra la relación inversa entre la viscosidad dinámica de un crudo pesado y su temperatura. Esta propiedad se caracteriza por una alta sensibilidad térmica, por tal razón, el monitoreo permanente de éste parámetro será de gran utilidad al momento de minimizar pérdidas por fricción hidrodinámica el momento de su transporte. Esto permitirá situar estratégicamente estaciones de calentamiento a lo largo de la longitud del oleoducto.

- Factor de fricción ( $fx$ ):

El factor de fricción se calcula con la fórmula (54) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.34.



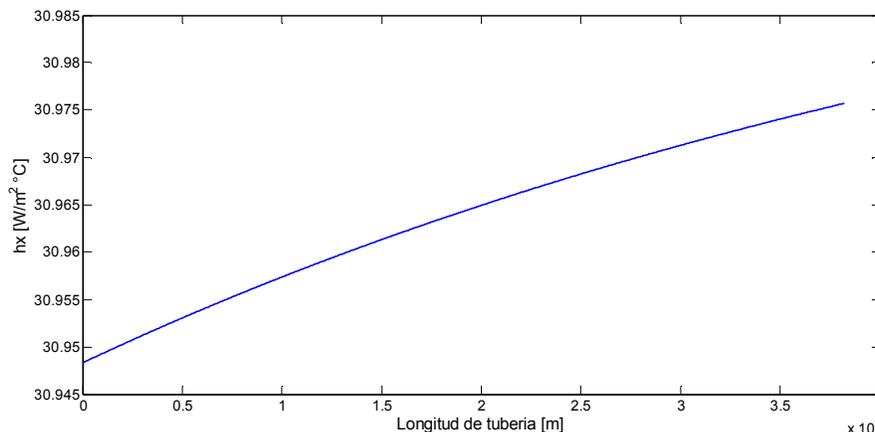
**Figura 6.34** Factor de fricción

**Fuente:** Balseca, 2016

Es una propiedad adimensional que cuantifica la pérdida de energía hidráulica de un fluido en función de la rugosidad relativa y el Número de Reynolds. Su variación se evidencia cuando el fluido pierde temperatura incrementando su valor numérico. La gráfica no considera perturbaciones generadas por transientes implícitos en el transporte del crudo pesado.

- Coeficiente de convección (hx):

El coeficiente de convección se calcula con la fórmula (13) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.35.



**Figura 6.35** Coeficiente de convección

**Fuente:** Balseca, 2016

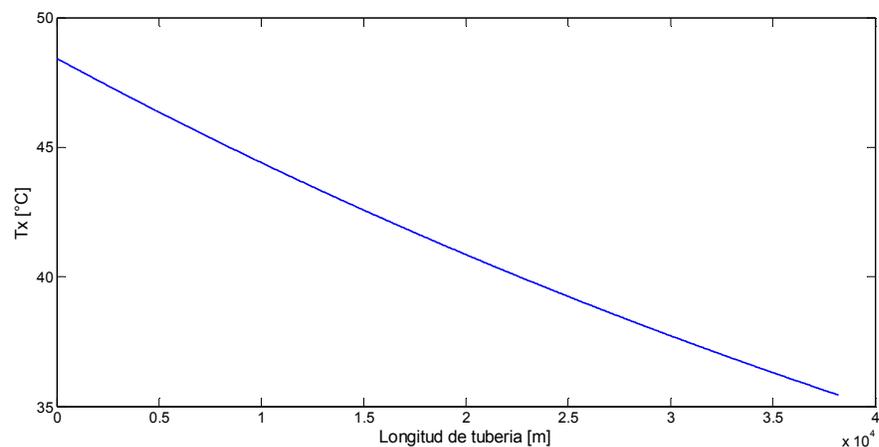
El coeficiente convectivo de un hidrocarburo guarda relación inversa a su temperatura, ya que está en función de la conductividad térmica y del Número de

Nusselt. En la Figura 6.35 se aprecia la disminución repentina del Coeficiente de Convección debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

#### 6.4.3.1 Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 3

- Perfil de temperatura (Ltubx vs Tx):

El perfil de temperaturas del crudo pesado se calcula con la fórmula (66) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.36.



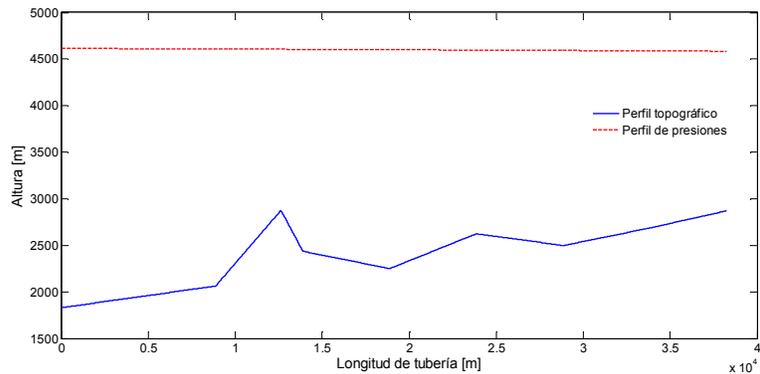
**Figura 6.36** Perfil de temperaturas

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.36 muestra explícitamente la pérdida de energía térmica de un crudo pesado por efectos de transferencia calórica con el medio externo. Al enunciar que las propiedades de éste fluido guardan una relación estrecha con el gradiente térmico, es de fundamental importancia controlar éste parámetro. En la codificación de programación se controla que la temperatura del crudo pesado no disminuya de los 30°C, ya que para valor menores a éste, los valor de viscosidad y densidad se tornan críticos y dificultan el transporte del hidrocarburo; por tal razón, al marcar este valor numérico de temperatura, automáticamente se eleva sus condiciones iniciales de bombeo (60°C) y por ende que en esta coordenada de longitud se recomienda situar una estación de calentamiento para mejorar todas las propiedades del hidrocarburo.

- Perfil Topográfico (Ltubx vs PTZx):

El perfil topográfico que atraviesa el oleoducto de crudo pesado se construye a partir de los datos de coordenadas que se disponga para su construcción. Para la modelación del OCP, se alimentó al sistema con las coordenadas particulares del tramo, y su grafica se visualiza en la figura 6.37.



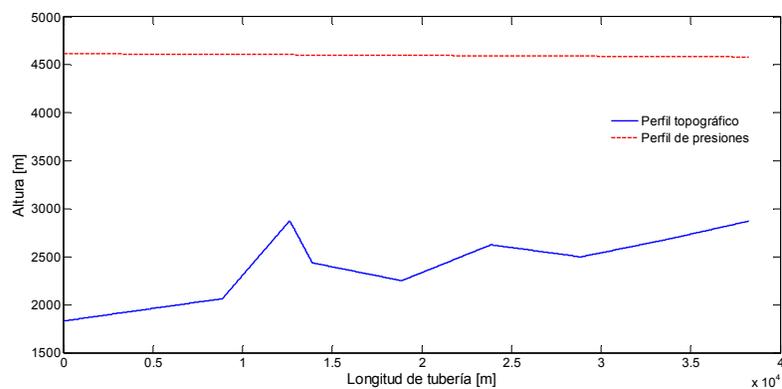
**Figura 6.37** Perfil topográfico

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.37 muestra la variación en el perfil topográfico del escenario 3 de OCP. Se muestra la energía potencial a vencer por el sistema de bombeo y permite identificar las coordenadas críticas por donde atraviesa el oleoducto. El trazado del perfil topográfico fue tomado de la planimetría adjunta en el Anexo 2.

- Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx):

El perfil de presiones del crudo pesado se calcula con la fórmula (79) ingresadas en el código de programación respectivo y su gráfica resultante se visualiza en la figura 6.38.



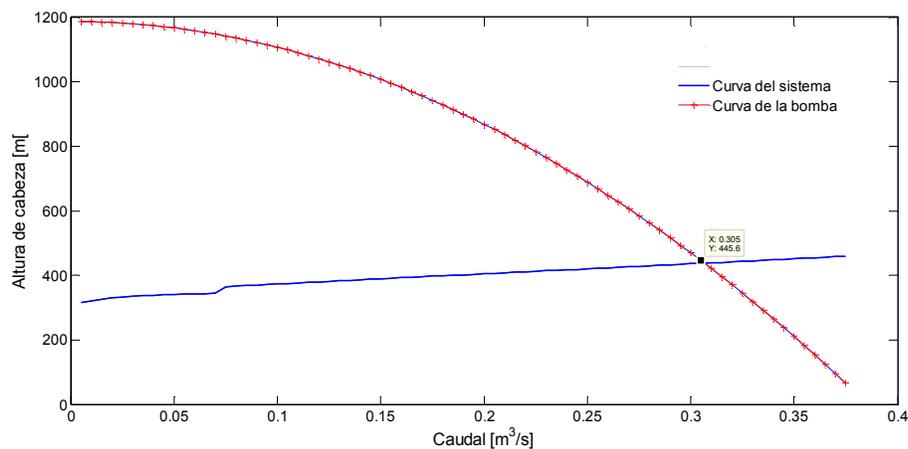
**Figura 6.38** Perfil de presiones

**Fuente:** Balseca, 2016

El perfil de presiones cuantifica la cantidad de energía hidráulica presente en el hidrocarburo, ésta es la energía disponible por el sistema para vencer efectos de fricción y energía potencial presente en el traslado de una estación a otra. Este valor debe ser controlado de tal manera que no exceda el límite de resistencia mecánica que otorga el material del oleoducto. En este estudio no se consideró el análisis estructural del acero, lo cual se sugiere considerar en futuras investigaciones de temáticas similares.

- Curva del sistema (Q vs Hsistema) y Curva de la bomba (Q vs Hbomba):

Para los resultados obtenidos de la curva del sistema- bomba en el capítulo 4 literal 4.6, se mencionó el método de cálculo del sistema de bombeo, basado en la fórmula (95) y las líneas de programación descritas. En la figura 6.39 se visualiza la curva del sistema de bombeo.



**Figura 6.39** Curva del Sistema-Bomba

**Fuente:** Balseca, 2016

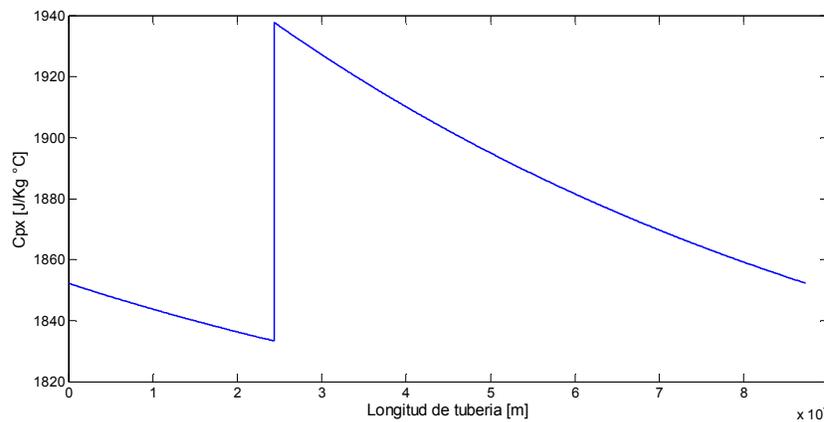
La figura 6.39 muestra el comportamiento de la curva del sistema y la curva del sistema de bombeo. Como se aprecia en la gráfica, el punto de intersección entre las dos curvas, representa el punto de operación ideal de la bomba; en este caso, el caudal recomendado es de 0,306 m<sup>3</sup>/s.

#### 6.4.4 CÁLCULOS DE PROPEIDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 4

Se procede a representar los diferentes valores de las propiedades del fluido por cada metro de longitud de tubería, teniendo los siguientes resultados:

- Calor específico ( $C_{px}$ ):

El calor específico se calcula mediante la fórmula (9) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.40.



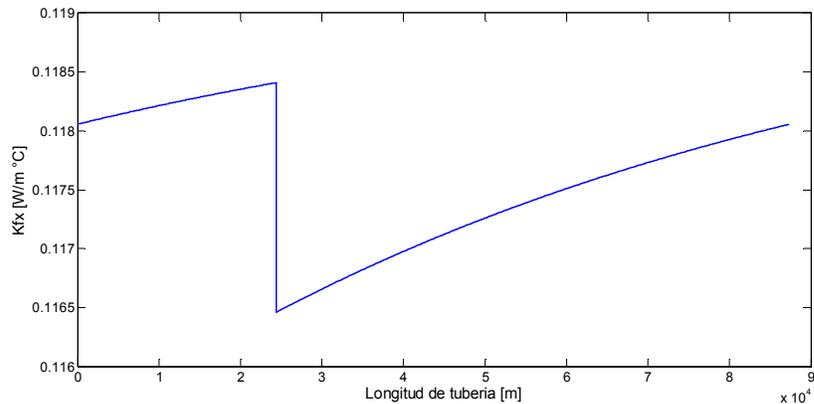
**Figura 6.40** Calor específico

**Fuente:** Balseca, 2016

Al considerar el calor específico de un crudo pesado como una relación directa a la temperatura, se evidencia la disminución de esta propiedad cuando decrece el gradiente de temperatura a lo largo del tramo de análisis. Por tanto, la gráfica mostrada en la figura 6.40 evidencia el cambio en el calor específico de una relación casi lineal ya que no se considera perturbaciones por efectos de transitorios ya que es un análisis en estado estable. El salto brusco en la magnitud del calor específico está determinado por el incremento de la temperatura del hidrocarburo a  $60^\circ\text{C}$ , de ésta manera se ratifica la relación directa de las propiedades con la temperatura.

- Conductividad térmica fluido ( $K_{fx}$ ):

La conductividad térmica del crudo pesado se calcula con la fórmula (8) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.41.



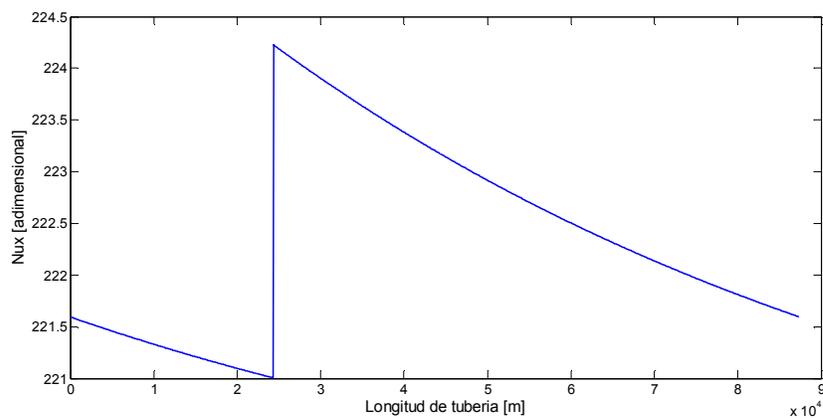
**Figura 6.41** Conductividad Térmica

Fuente: Balseca, 2016

La conductividad térmica es una propiedad muy sensible a la variación térmica, su relación es inversamente proporcional a la temperatura, por ello, cuando disminuye la temperatura, el valor de la conductividad aumenta a medida que se desplaza por la longitud de tramo de análisis. La gráfica resultante se asemeja a lineal ya que no se consideran las perturbaciones provocadas por efectos de fricción y transientes. El incremento en la magnitud de la conductividad térmica está determinado por el incremento de la temperatura del hidrocarburo a  $60^\circ\text{C}$ , de ésta manera se ratifica la relación inversa de la propiedad con la temperatura.

- Número de Nusselt (Nux):

El Número de Nusselt del crudo pesado se calcula con la fórmula (11) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.42.



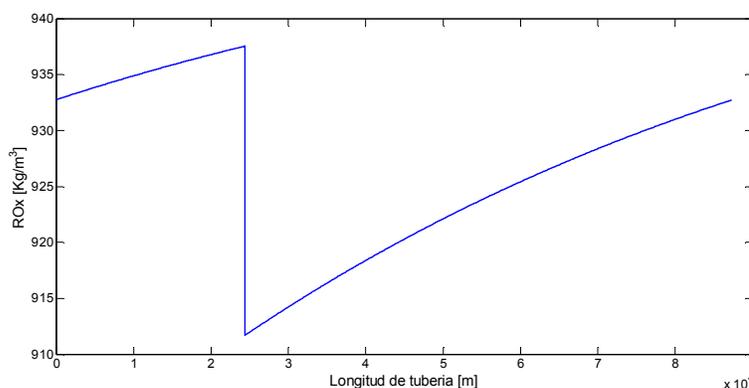
**Figura 6.42** Número de Nusselt

Fuente: Balseca, 2016

En la figura 6.42 se percibe una leve disminución en el valor del Número de Nusselt debido a su relación directa con dos parámetros adimensionales como son Reynolds y Prandtl. Estos parámetros provocan un cambio en su valor a medida que se desplaza por el tramo de tubería. El aumento repentino en el Número de Nusselt se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de las propiedades con la temperatura.

- Densidad (Rox):

La densidad del crudo pesado se calcula con las fórmulas (3 y 4) ingresadas en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.43.



**Figura 6.43** Densidad del crudo

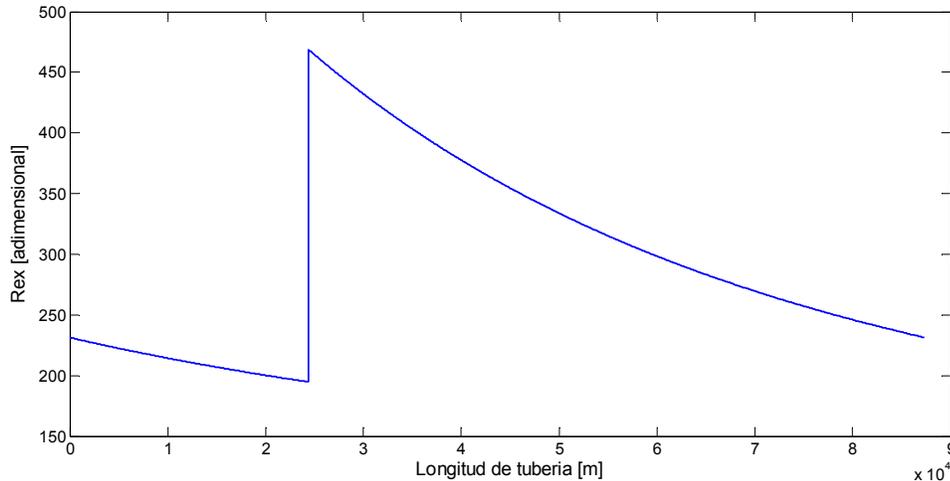
**Fuente:** Balseca, 2016

La densidad es una relación inversamente proporcional a la temperatura, por lo que es el parámetro de mayor importancia a controlar el momento de transportar un fluido a través de un ducto. Para el ejemplo mostrado en la figura 6.43 se aprecia un incremento en esta propiedad a medida que la temperatura disminuye. Su relación es casi lineal sin considerar perturbaciones por efectos de fricción y transientes presentes en el transporte de fluidos. El monitoreo de ésta propiedad permite identificar la instalación de estaciones de calentamiento para reducir pérdidas por efectos de fricción y tener un mejor control en el bombeo del crudo pesado.

El aumento notable en la densidad del crudo pesado se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

- Número de Reynolds (Rex):

El Número de Reynolds se calcula con la fórmula (51) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.44.



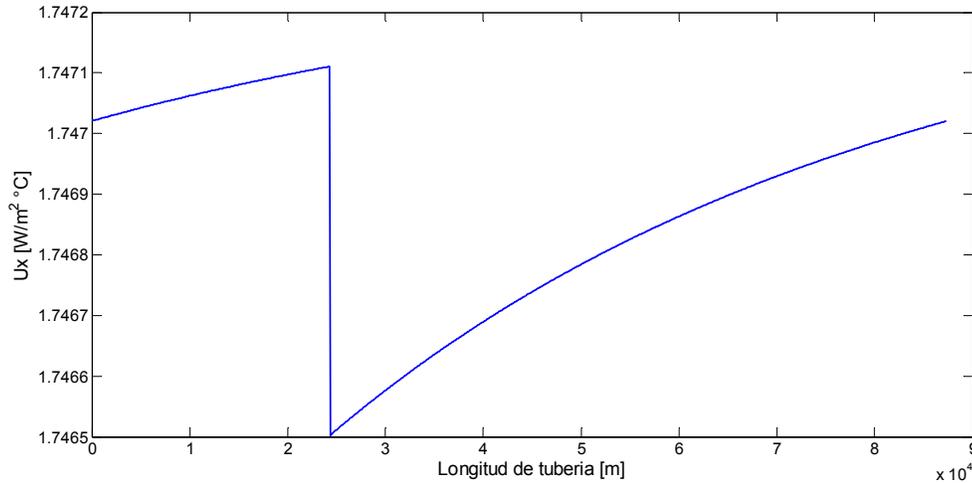
**Figura 6.44** Número de Reynolds

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.44 muestra el cambio del parámetro adimensional del Número de Reynolds el cual guarda un estrecho vínculo con la velocidad del transporte, densidad, área transversal y viscosidad dinámica del crudo pesado. Al considerar que las propiedades antes mencionadas se ven afectadas por el cambio térmico, se obtiene como resultado la disminución de éste parámetro. De igual forma no se consideran efectos de perturbación por acción de la fricción y transientes en el transporte del crudo pesado. El aumento notable en el Número de Reynolds se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Coeficiente Global (Ux):

El Coeficiente Global de transferencia de calor (Ux) relaciona las resistencias térmicas que están presentes en el circuito térmico y es calculado con la fórmula (73) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.45.



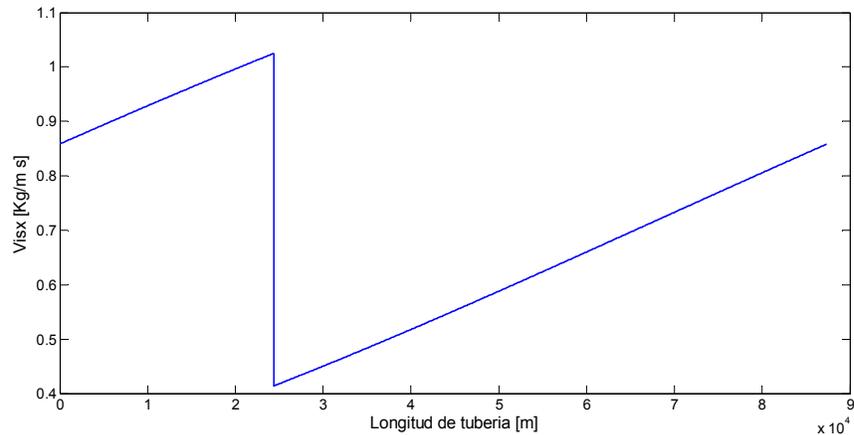
**Figura 6.45** Coeficiente Global de Transferencia de calor

**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente global de transferencia de calor relaciona las resistencias térmicas por convección y conducción a través del espesor de pared, así como del suelo, en función del área externa implícitas en el sistema de análisis. Al considerar el fenómeno de conducción, guarda un estrecho vínculo con el coeficiente convectivo y con la temperatura del fluido. En el caso de la conducción de calor, el coeficiente de conductividad térmica es muy sensible al cambio térmico; por tanto, se tiene un ligero aumento del Coeficiente global de transferencia cuando la temperatura disminuye a lo largo de la longitud de tubería de estudio. En la Figura 6.45 se puede apreciar el aumento notable en el Coeficiente Global de Transferencia de Calor debido al incremento de la temperatura del fluido a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Viscosidad dinámica (Visx):

La viscosidad dinámica es calculada con la fórmula (6) ingresada en el código de programación respectivo; su gráfica resultante se visualiza en la figura 6.46.



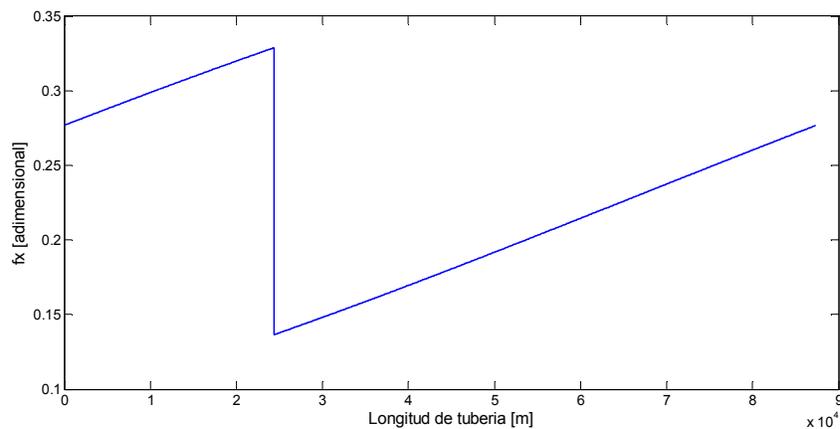
**Figura 6.46** Viscosidad dinámica

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.46 muestra la relación inversa entre la viscosidad dinámica de un crudo pesado y su temperatura. Esta propiedad se caracteriza por una alta sensibilidad térmica, por tal razón, el monitoreo permanente de éste parámetro será de gran utilidad al momento de minimizar pérdidas por fricción hidrodinámica el momento de su transporte. Esto permitirá situar estratégicamente estaciones de calentamiento a lo largo de la longitud del oleoducto. La disminución drástica en la Viscosidad Dinámica del crudo se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Factor de fricción ( $f_x$ ):

El factor de fricción se calcula con la fórmula (54) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.47.



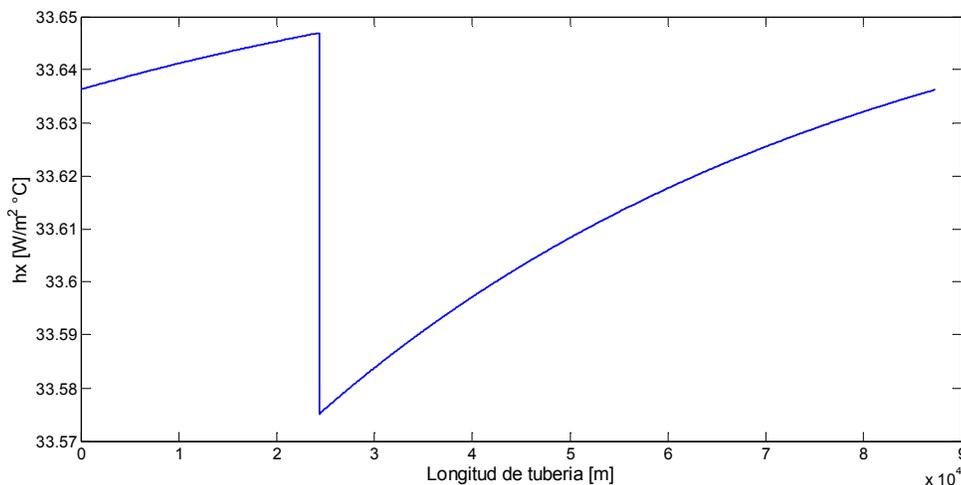
**Figura 6.47** Factor de fricción

**Fuente:** Balseca, 2016

Es una propiedad adimensional que cuantifica la pérdida de energía hidráulica de un fluido en función de la rugosidad relativa y el Número de Reynolds. Su variación se evidencia cuando el fluido pierde temperatura incrementando su valor numérico. La gráfica no considera perturbaciones generadas por transientes implícitos en el transporte del crudo pesado. En la Figura 6.47 se puede apreciar una disminución abrupta en el Factor de Fricción del hidrocarburo debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Coeficiente de convección ( $h_x$ ):

El coeficiente de convección del crudo pesado se calcula con la fórmula (13) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se presenta en la figura 6.48.



**Figura 6.48** Coeficiente de convección

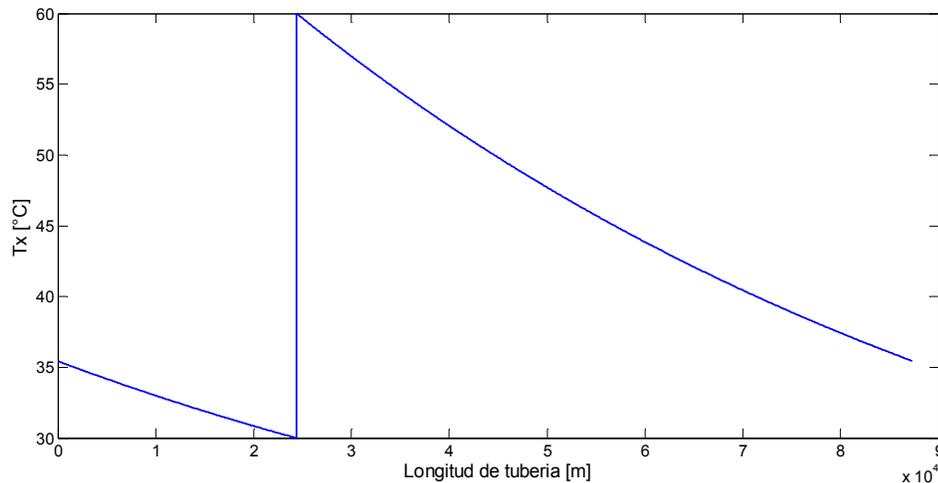
**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente convectivo de un hidrocarburo guarda relación inversa a su temperatura, ya que está en función de la conductividad térmica y del Número de Nusselt. En la Figura 6.48 se aprecia la disminución repentina del Coeficiente de Convección debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

#### 6.4.4.1 Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 4

- Perfil de temperatura ( $L_{tubx}$  vs  $T_x$ ):

El perfil de temperaturas del crudo pesado se calcula con la fórmula (66) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.49.



**Figura 6.49** Perfil de temperatura

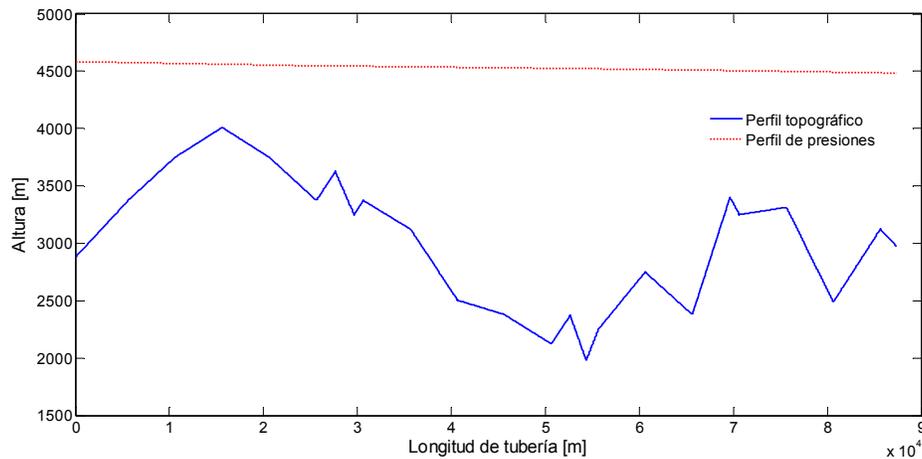
**Fuente:** Balseca, 2016

La figura muestra explícitamente la pérdida de energía térmica de un crudo pesado por efectos de transferencia calórica con el medio externo. Al enunciar que las propiedades de éste fluido guardan una relación estrecha con el gradiente térmico, es de fundamental importancia controlar éste parámetro. En la codificación de programación se controla que la temperatura del crudo pesado no disminuya de los 30°C, ya que para valor menores a éste, los valores de viscosidad y densidad se tornan críticos y dificultan el transporte del hidrocarburo; por tal razón, al marcar este valor numérico de temperatura, automáticamente se eleva sus condiciones iniciales de bombeo (60°C) y por ende que en esta coordenada de longitud se recomienda situar una estación de calentamiento para mejorar todas las propiedades del hidrocarburo.

- Perfil Topográfico ( $L_{tubx}$  vs  $PTZ_x$ ):

El perfil topográfico que atraviesa el oleoducto de crudo pesado se construye a partir de los datos de coordenadas que se disponga para su construcción.

Para la modelación del OCP, se alimentó al sistema con las coordenadas particulares del tramo (escenario), y su grafica se visualiza en la figura 6.50.



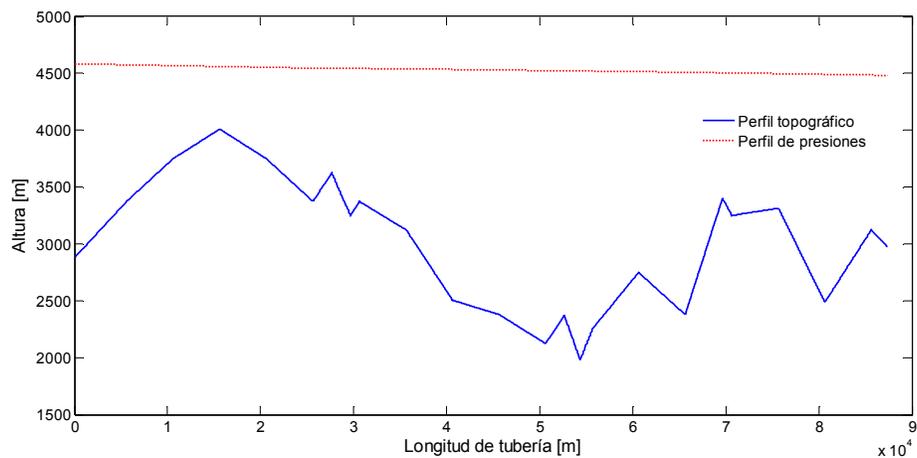
**Figura 6.50** Perfil topográfico

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.50 muestra la variación en el perfil topográfico del escenario 2 OCP. Se muestra la energía potencial a vencer por el sistema de bombeo y permite identificar las coordenadas críticas por donde atraviesa el oleoducto. El trazado del perfil topográfico fue tomado de la planimetría adjunta en el Anexo 2.

- Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx):

El perfil de presiones del crudo pesado se calcula con la fórmula (79) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.51.



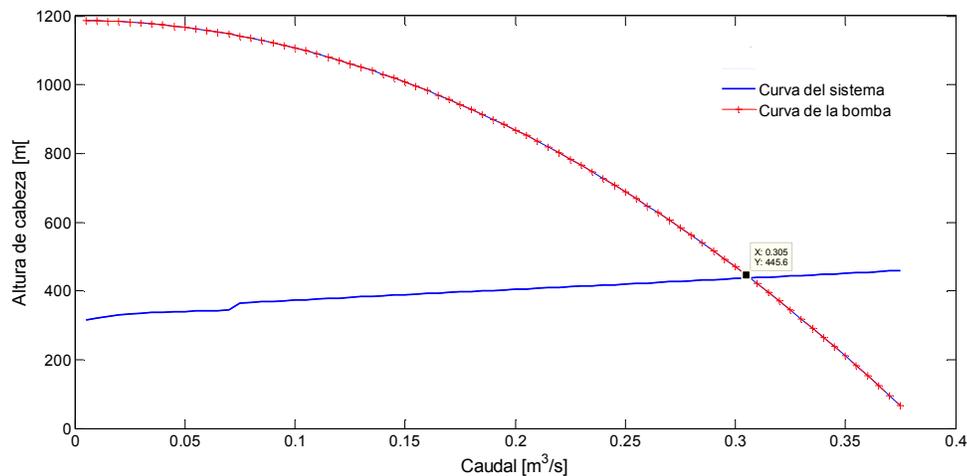
**Figura 6.51** Perfil de presiones

**Fuente:** Balseca, 2016

El perfil de presiones cuantifica la cantidad de energía hidráulica presente en el hidrocarburo, ésta es la energía disponible por el sistema para vencer efectos de fricción y energía potencial presente en el traslado de una estación a otra. Este valor debe ser controlado de tal manera que no exceda el límite de resistencia mecánica que otorga el material del oleoducto. En este estudio no se consideró el análisis estructural del acero, lo cual se sugiere considerar en futuras investigaciones de temáticas similares.

- Curva del sistema (Q vs Hsistema) y Curva de la bomba (Q vs Hbomba):

Para los resultados obtenidos de la curva del sistema- bomba en el capítulo 4 literal 4.6, se mencionó el método de cálculo del sistema de bombeo, basado en la fórmula (95) y las líneas de programación descritas; en la figura 6.25 se muestra la curva del sistema-bomba.



**Figura 6.52** Curva del Sistema-Bomba

**Fuente:** Balseca, 2016

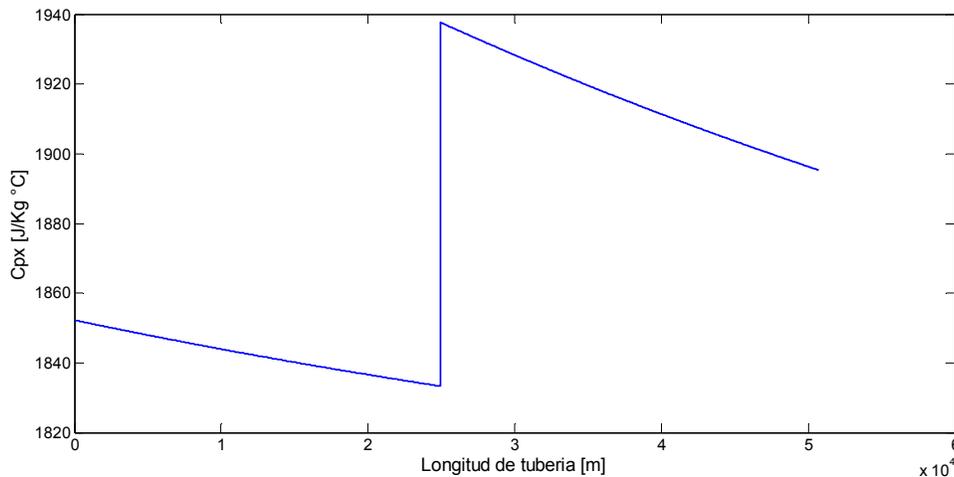
La figura 6.52 muestra el comportamiento de la curva del sistema y la curva del sistema de bombeo. Como se aprecia en la gráfica, el punto de intersección entre las dos curvas, representa el punto de operación ideal de la bomba; en este caso, el caudal recomendado es de 0,306 m³/s.

### 6.4.5 CÁLCULOS DEL FLUIDO ESCENARIO 5

Se procede a representar los diferentes valores de las propiedades del fluido por cada metro de longitud de tubería, teniendo los siguientes resultados:

- Calor específico ( $C_{px}$ ):

El calor específico es calculado mediante la fórmula (9) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.53



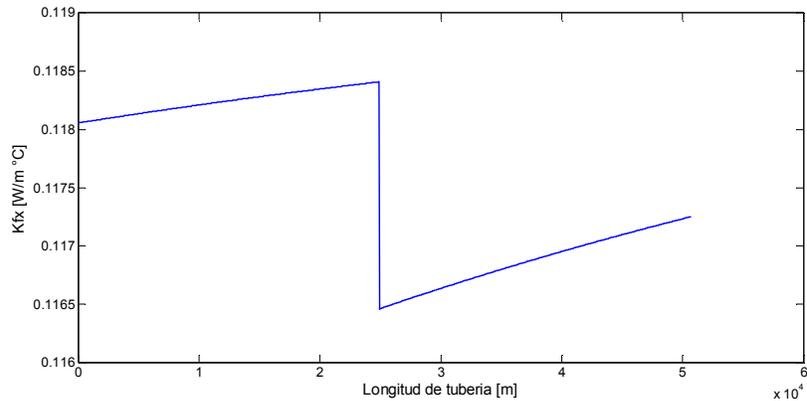
**Figura 6.53** Calor específico

**Fuente:** Balseca, 2016

Al considerar el calor específico de un crudo pesado como una relación directa a la temperatura, se evidencia la disminución de esta propiedad cuando decrece el gradiente de temperatura a lo largo del tramo de análisis. Por tanto, la gráfica mostrada en la figura 6.53 evidencia el cambio en el calor específico de una relación casi lineal ya que no se considera perturbaciones por efectos de transitorios ya que es un análisis en estado estable. El salto brusco en la magnitud del calor específico está determinado por el incremento de la temperatura del hidrocarburo a  $60^{\circ}\text{C}$ , de ésta manera se ratifica la relación directa de las propiedades con la temperatura.

- Conductividad térmica fluido ( $K_{fx}$ ):

La conductividad térmica del crudo pesado se calcula con la fórmula (8) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.54.



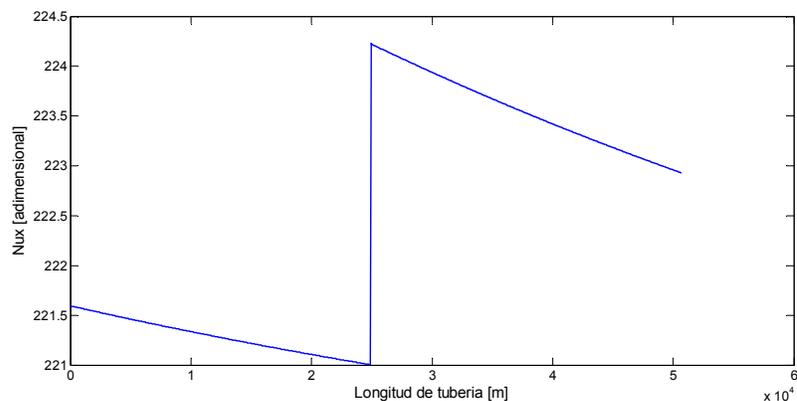
**Figura 6.54** Conductividad Térmica

**Fuente:** Balseca, 2016

La conductividad térmica es una propiedad muy sensible a la variación térmica, su relación es inversamente proporcional a la temperatura, por ello, cuando disminuye la temperatura, el valor de la conductividad aumenta a medida que se desplaza por la longitud de tramo de análisis. La gráfica resultante se asemeja a lineal ya que no se consideran las perturbaciones provocadas por efectos de fricción y transientes. El incremento en la magnitud de la conductividad térmica está determinado por el incremento de la temperatura del hidrocarburo a  $60^\circ\text{C}$ , de ésta manera se ratifica la relación inversa de la propiedad con la temperatura.

- Número de Nusselt (Nux):

El Número de Nusselt del crudo pesado se calcula con la fórmula (11) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.55.



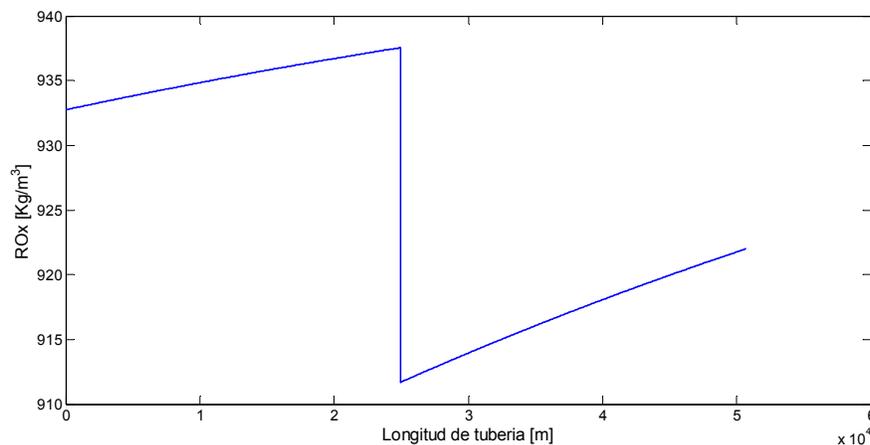
**Figura 6.55** Número de Nusselt

**Fuente:** Balseca, 2016

En la figura 6.55 se percibe una leve disminución en el valor del Número de Nusselt debido a su relación directa con dos parámetros adimensionales como son Reynolds y Prandtl. Estos parámetros provocan un cambio en su valor a medida que se desplaza por el tramo de tubería. El aumento repentino en el Número de Nusselt se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de las propiedades con la temperatura.

- Densidad (Rox):

La densidad del crudo pesado se calcula con las fórmulas (3 y 4) ingresadas en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.56.



**Figura 6.56** Densidad del crudo

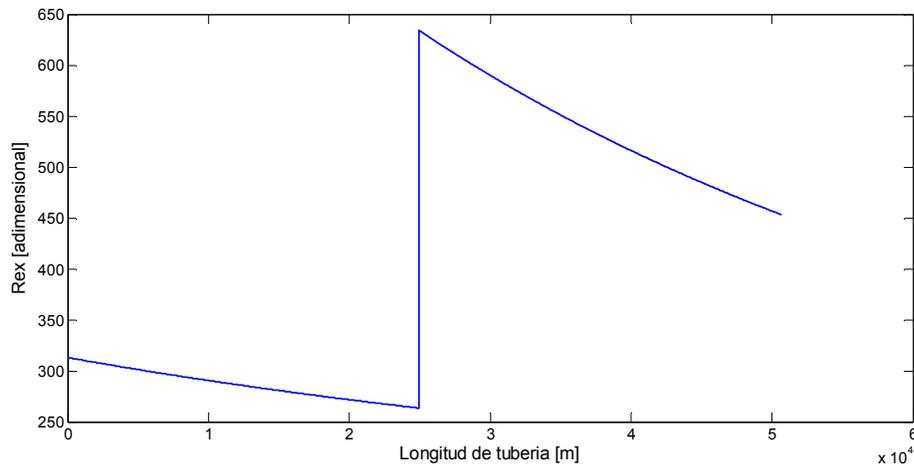
**Fuente:** Balseca, 2016

La densidad es una relación inversamente proporcional a la temperatura, por lo que es el parámetro de mayor importancia a controlar el momento de transportar un fluido a través de un ducto. Para el ejemplo mostrado en la figura 6.56 se aprecia un incremento en esta propiedad a medida que la temperatura disminuye. Su relación es casi lineal sin considerar perturbaciones por efectos de fricción y transientes presentes en el transporte de fluidos. El monitoreo de ésta propiedad permite identificar la instalación de estaciones de calentamiento para reducir pérdidas por efectos de fricción y tener un mejor control en el bombeo del crudo pesado.

El aumento notable en la densidad del crudo pesado se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

- Número de Reynolds (Rex):

El Número de Reynolds se calcula con la fórmula (51) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.57.



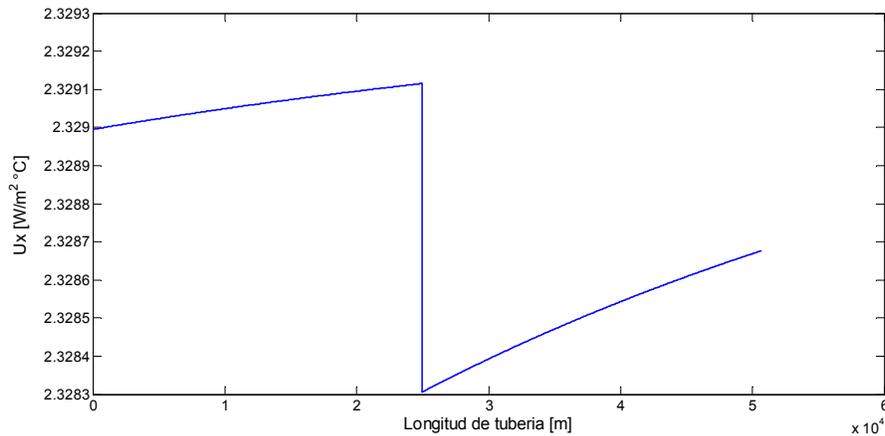
**Figura 6.57** Número de Reynolds

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.57 muestra el cambio del parámetro adimensional del Número de Reynolds el cual guarda un estrecho vínculo con la velocidad del transporte, densidad, área transversal y viscosidad dinámica del crudo pesado. Al considerar que las propiedades antes mencionadas se ven afectadas por el cambio térmico, se obtiene como resultado la disminución de éste parámetro. De igual forma no se consideran efectos de perturbación por acción de la fricción y transientes en el transporte del crudo pesado. El aumento notable en el Número de Reynolds se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Coeficiente Global (Ux):

El Coeficiente Global de transferencia de calor (Ux) relaciona las resistencias térmicas que están presentes en el circuito térmico y se calcula mediante la fórmula (73) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.58.



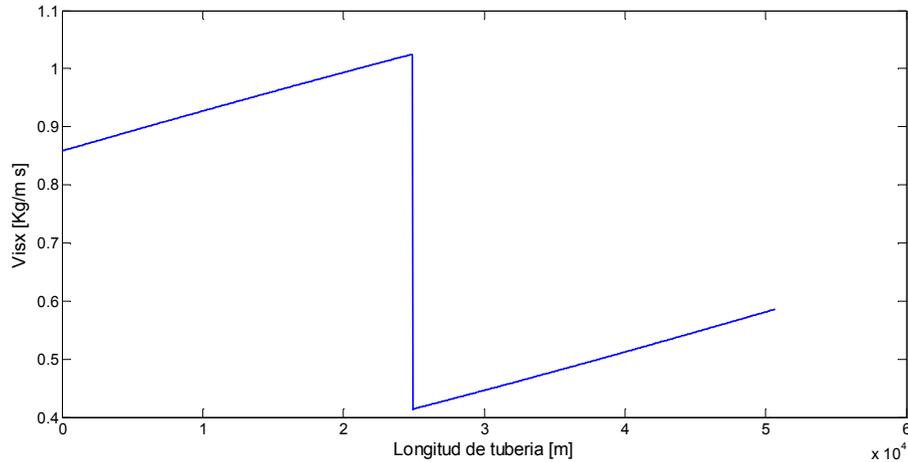
**Figura 6.58** Coeficiente Global de Transferencia de calor

**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente global de transferencia de calor relaciona las resistencias térmicas por convección y conducción a través del espesor de pared, así como del suelo, en función del área externa implícitas en el sistema de análisis. Al considerar el fenómeno de conducción, guarda un estrecho vínculo con el coeficiente convectivo y con la temperatura del fluido. En el caso de la conducción de calor, el coeficiente de conductividad térmica es muy sensible al cambio térmico; por tanto, se tiene un ligero aumento del Coeficiente global de transferencia cuando la temperatura disminuye a lo largo de la longitud de tubería de estudio. En la Figura 6.58 se puede apreciar el aumento notable en el Coeficiente Global de Transferencia de Calor debido al incremento de la temperatura del fluido a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Viscosidad dinámica (Visx):

La viscosidad dinámica se calcula con la fórmula (6) ingresada en el código de programación respectivo y su gráfica resultante se presenta en la figura 6.59.



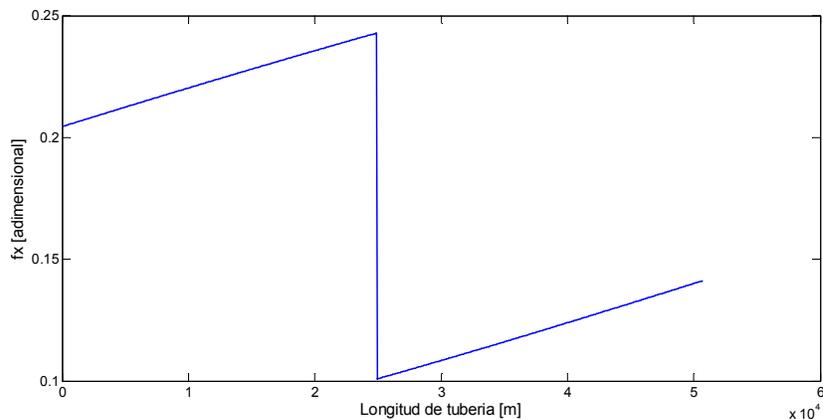
**Figura 6.59** Viscosidad dinámica

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.59 muestra la relación inversa entre la viscosidad dinámica de un crudo pesado y su temperatura. Esta propiedad se caracteriza por una alta sensibilidad térmica, por tal razón, el monitoreo permanente de éste parámetro será de gran utilidad al momento de minimizar pérdidas por fricción hidrodinámica el momento de su transporte. Esto permitirá situar estratégicamente estaciones de calentamiento a lo largo de la longitud del oleoducto. La disminución drástica en la Viscosidad Dinámica del crudo se debe al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Factor de fricción ( $f_x$ ):

El factor de fricción se calcula con la fórmula (54) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.50.



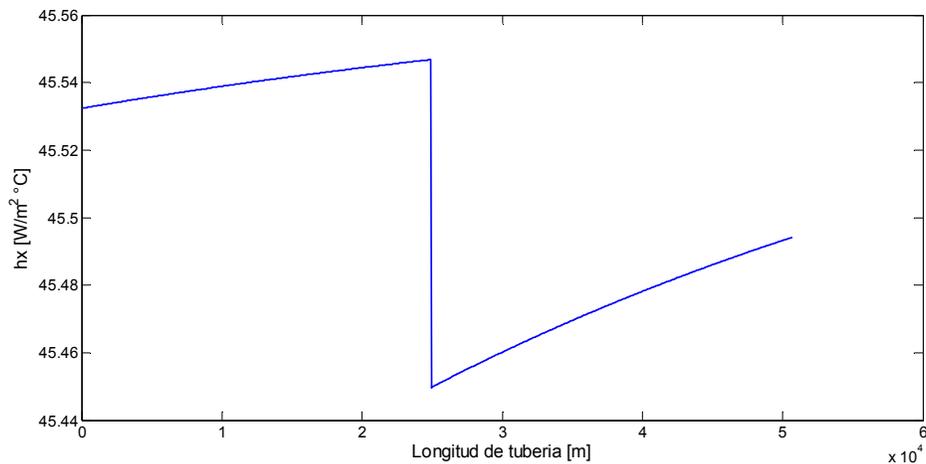
**Figura 6.60** Factor de fricción

**Fuente:** Balseca, 2016

Es una propiedad adimensional que cuantifica la pérdida de energía hidráulica de un fluido en función de la rugosidad relativa y el Número de Reynolds. Su variación se evidencia cuando el fluido pierde temperatura incrementando su valor numérico. La gráfica no considera perturbaciones generadas por transientes implícitos en el transporte del crudo pesado. En la Figura 6.60 se puede apreciar una disminución abrupta en el Factor de Fricción del hidrocarburo debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la relación directa de la propiedad con su temperatura.

- Coeficiente de convección ( $h_x$ ):

El coeficiente de convección del crudo pesado se calcula con la fórmula (13) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.61.



**Figura 6.61** Coeficiente de convección

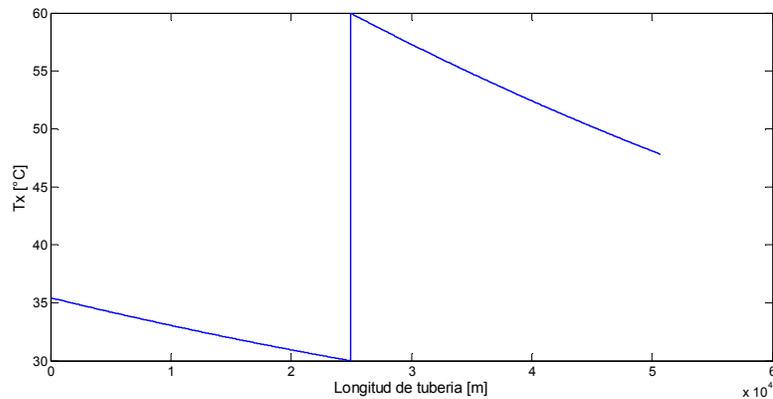
**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente convectivo de un hidrocarburo guarda relación inversa a su temperatura, ya que está en función de la conductividad térmica y del Número de Nusselt. En la Figura 6.61 se aprecia la disminución repentina del Coeficiente de Convección debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

### 6.4.5.1 Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario 5

- Perfil de temperatura ( $L_{tubx}$  vs  $T_x$ ):

El perfil de temperaturas del crudo pesado se calcula con la fórmula (66) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.62.



**Figura 6.62** Perfil de temperatura

**Fuente:** Balseca, 2016

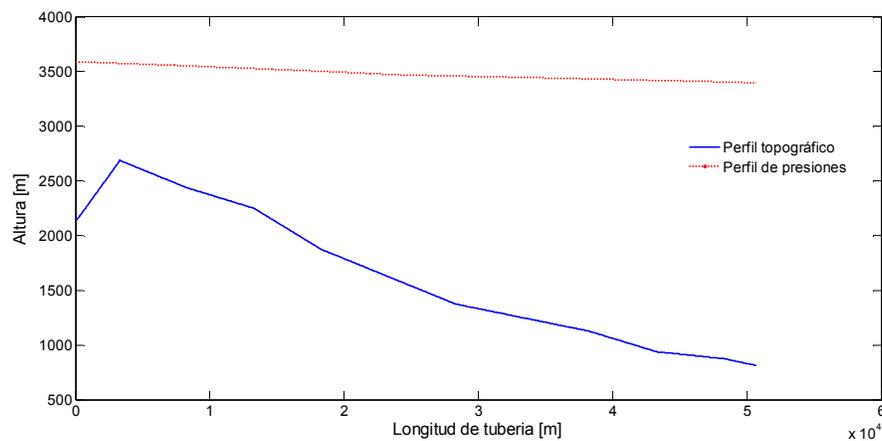
La figura muestra explícitamente la pérdida de energía térmica de un crudo pesado por efectos de transferencia calórica con el medio externo. Al enunciar que las propiedades de éste fluido guardan una relación estrecha con el gradiente térmico, es de fundamental importancia controlar éste parámetro. En la codificación de programación se controla que la temperatura del crudo pesado no disminuya de los 30°C, ya que para valor menores a éste, los valor de viscosidad y densidad se tornan críticos y dificultan el transporte del hidrocarburo; por tal razón, al marcar este valor numérico de temperatura, automáticamente se eleva sus condiciones iniciales de bombeo (60°C) y por ende que en esta coordenada de longitud se recomienda situar una estación de calentamiento para mejorar todas las propiedades del hidrocarburo.

En la Figura 6.62 se aprecia el incremento de temperatura del crudo de 30°C a 60°C, para mejorar las condiciones de operación. De esta manera se establece la colocación de la estación de calentamiento para el tramo dos.

- Perfil Topográfico ( $L_{tubx}$  vs  $PTZx$ ):

El perfil topográfico que atraviesa el oleoducto de crudo pesado se construye a partir de los datos de coordenadas que se disponga para su construcción. Para la

modelación del OCP, se alimentó al sistema con las coordenadas particulares del tramo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.63.



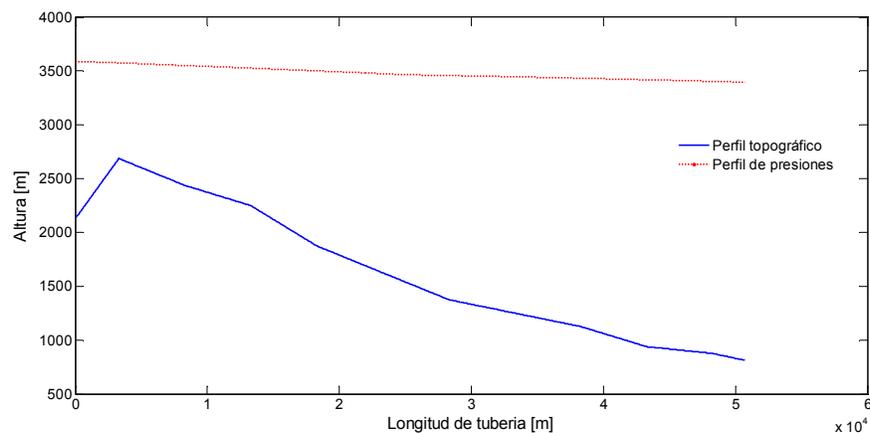
**Figura 6.63** Perfil topográfico

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.63 muestra la variación en el perfil topográfico del escenario 2 OCP. Se muestra la energía potencial a vencer por el sistema de bombeo y permite identificar las coordenadas críticas por donde atraviesa el oleoducto. El trazado del perfil topográfico fue tomado de la planimetría adjunta en el Anexo 2.

- Perfil de presiones ( $L_{tubx}$  vs  $H_{px}$ ):

El perfil de presiones del crudo pesado se calcula con la fórmula (79) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.64.



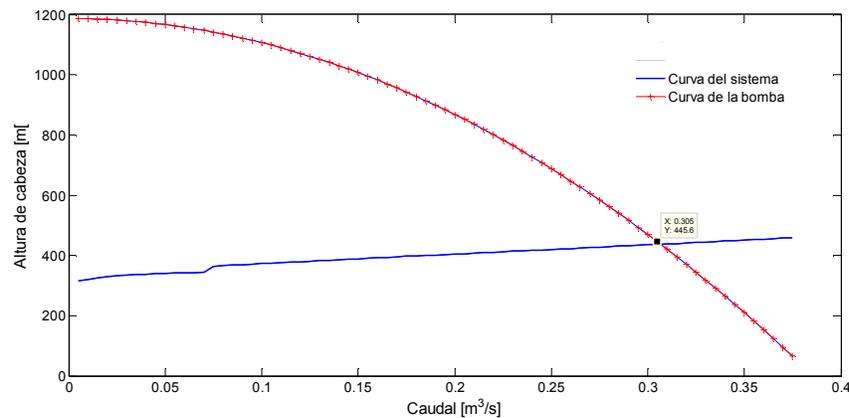
**Figura 6.64** Perfil de presiones

**Fuente:** Balseca, 2016

El perfil de presiones cuantifica la cantidad de energía hidráulica presente en el hidrocarburo, ésta es la energía disponible por el sistema para vencer efectos de fricción y energía potencial presente en el traslado de una estación a otra. Este valor debe ser controlado de tal manera que no exceda el límite de resistencia mecánica que otorga el material del oleoducto. En este estudio no se consideró el análisis estructural del acero, lo cual se sugiere considerar en futuras investigaciones de temáticas similares.

- Curva del sistema (Q vs Hsistema) y Curva de la bomba (Q vs Hbomba):

Para los resultados obtenidos de la curva del sistema- bomba, en el capítulo 4, literal 4.6, se mencionó el método de cálculo del sistema de bombeo, basado en la fórmula (95) y las líneas de programación descritas. En la figura 6.65 se visualiza la curva del sistema-bomba.



**Figura 6.65** Curva del Sistema-Bomba

**Fuente:** Balseca, 2016

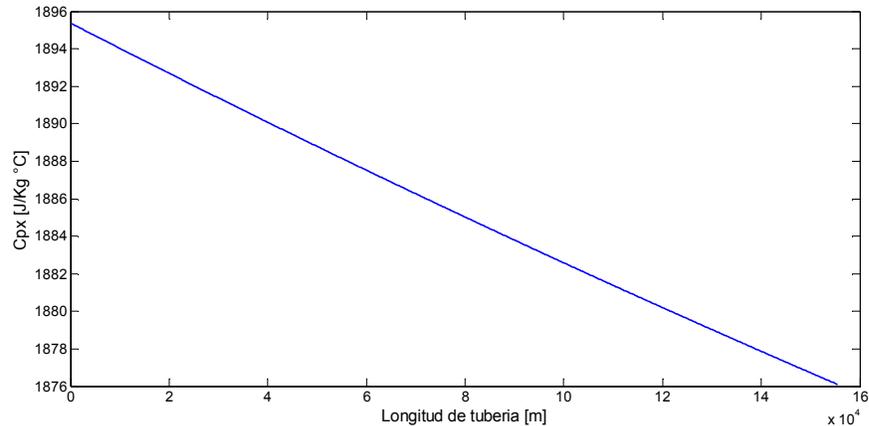
La figura 6.65 muestra el comportamiento de la curva del sistema y la curva del sistema de bombeo. Como se aprecia en la gráfica, el punto de intersección entre las dos curvas, representa el punto de operación ideal de la bomba; en este caso, el caudal recomendado es de 0,306 m<sup>3</sup>/s.

#### 6.4.6 CÁLCULOS DE PROPIEDADES DEL FLUIDO ESCENARIO 6

Se procede a representar los diferentes valores de las propiedades del fluido por cada metro de longitud de tubería, teniendo los siguientes resultados:

- Calor específico (C<sub>px</sub>):

El calor específico es calculado mediante la fórmula (9) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.66.



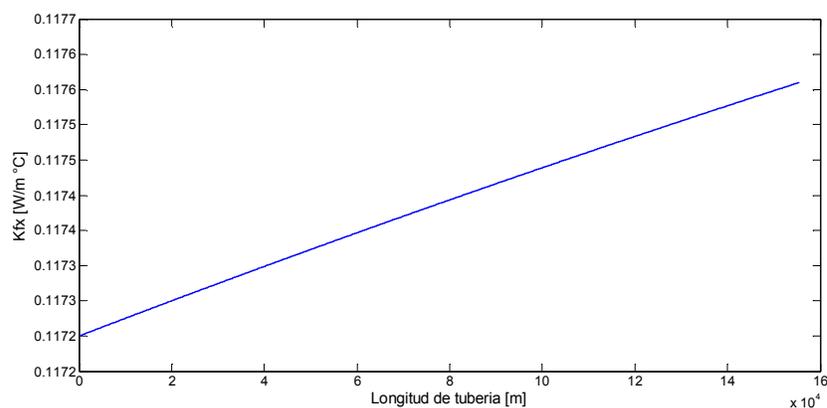
**Figura 6.66** Calor específico

**Fuente:** Balseca, 2016

Al considerar el calor específico de un crudo pesado como una relación directa a la temperatura, se evidencia la disminución de esta propiedad cuando disminuye el gradiente a temperatura a lo largo del tramo de análisis. Por tanto, la gráfica mostrada en la figura 6.66 evidencia el cambio en el calor específico de una relación casi lineal ya que no se considera perturbaciones por efectos de transitorios ya que es un análisis en estado estable.

- Conductividad térmica fluido (Kfx):

La conductividad térmica del crudo pesado se calcula con la fórmula (8) ingresado en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.67.



**Figura 6.67** Conductividad Térmica

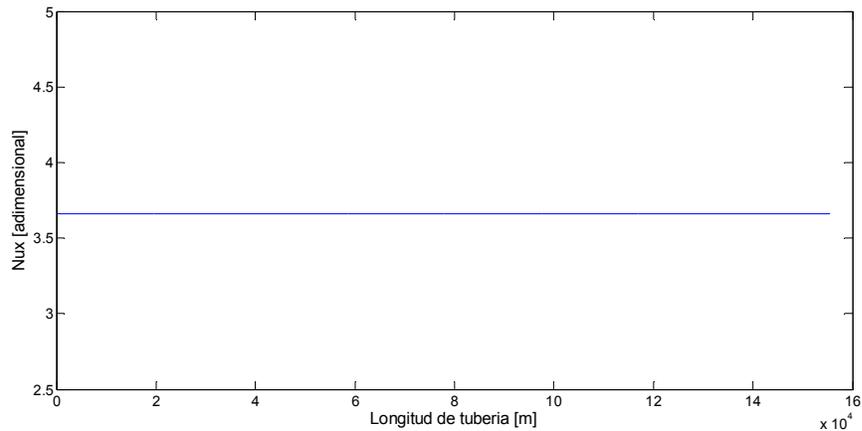
**Fuente:** Balseca, 2016

La conductividad térmica es una propiedad muy sensible a la variación térmica, su relación es inversamente proporcional a la temperatura, por ello, cuando disminuye

la temperatura, el valor de la conductividad aumenta a medida que se desplaza por la longitud de tramo de análisis. La gráfica resultante se asemeja a lineal ya que no se consideran las perturbaciones provocadas por efectos de fricción y transientes.

- Número de Nusselt (Nux):

El Número de Nusselt del crudo pesado se calcula mediante la fórmula (11) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.68.



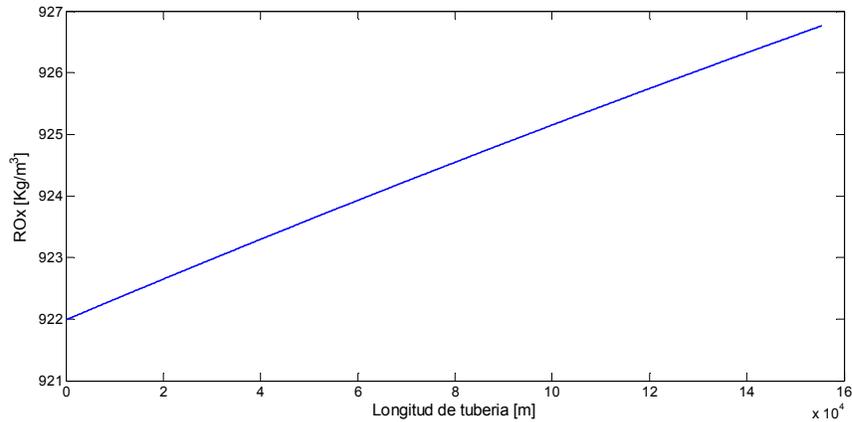
**Figura 6.68** Número de Nusselt

**Fuente:** Balseca, 2016

En la figura 6.68 se percibe una leve disminución en el valor del Número de Nusselt debido a su relación directa con dos parámetros adimensionales como son Reynolds y Prandtl. Estos parámetros provocan un cambio en su valor a medida que se desplaza por el tramo de tubería.

- Densidad (Rox):

La densidad del crudo pesado es calculada mediante las fórmulas (3 y 4) ingresadas en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.69.



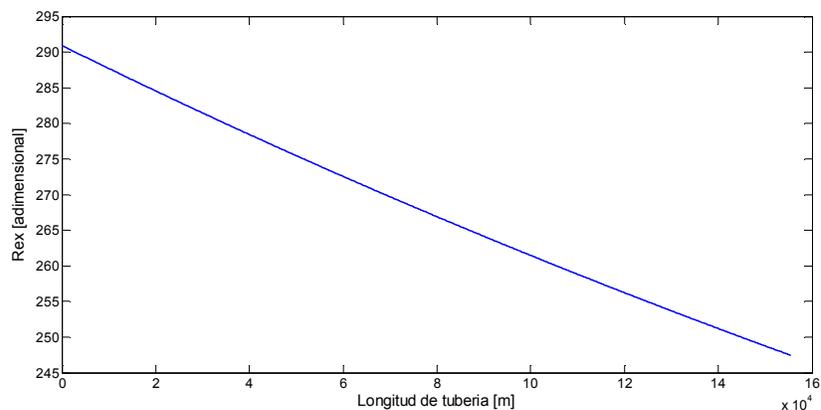
**Figura 6.69** Densidad del crudo

**Fuente:** Balseca, 2016

La densidad es una relación inversamente proporcional a la temperatura, por lo que es el parámetro de mayor importancia a controlar el momento de transportar un fluido a través de un ducto. Para el ejemplo mostrado en la figura 6.69 se aprecia un incremento en esta propiedad a medida que la temperatura disminuye. Su relación es casi lineal sin considerar perturbaciones por efectos de fricción y transientes presentes en el transporte de fluidos. El monitoreo de ésta propiedad permite identificar la instalación de estaciones de calentamiento para reducir pérdidas por efectos de fricción y tener un mejor control en el bombeo del crudo pesado.

- Número de Reynolds (Rex):

El Número de Reynolds se calcula mediante la fórmula (51) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.70.



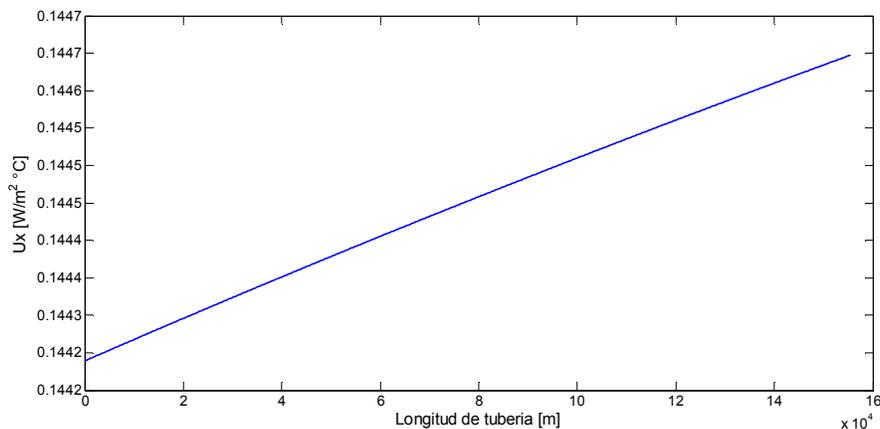
**Figura 6.70** Número de Reynolds

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.70 muestra el cambio del parámetro adimensional del Número de Reynolds el cual guarda un estrecho vínculo con la velocidad del transporte, densidad, área transversal y viscosidad dinámica del crudo pesado. Al considerar que las propiedades antes mencionadas se ven afectadas por el cambio térmico, se obtiene como resultado la disminución de éste parámetro. De igual forma no se consideran efectos de perturbación por acción de la fricción y transientes en el transporte del crudo pesado.

- Coeficiente Global ( $U_x$ ).

El Coeficiente Global de transferencia de calor ( $U_x$ ) relaciona las resistencias térmicas que están presentes en el circuito térmico y se calcula con la fórmula (73) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.71.



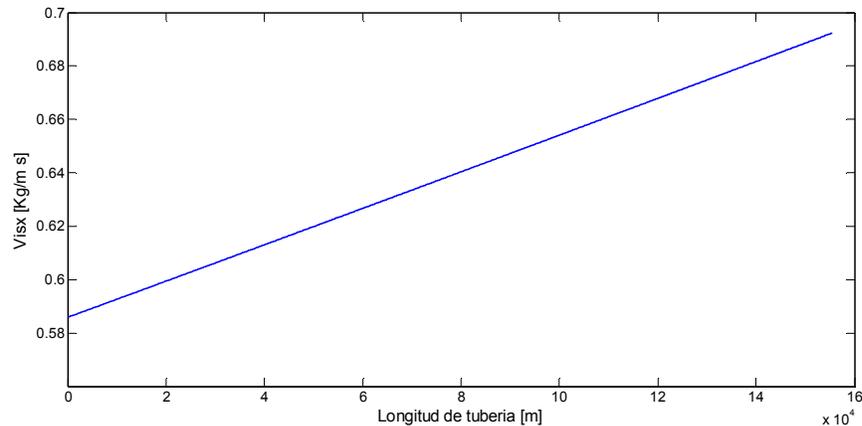
**Figura 6.71** Coeficiente Global de Transferencia de calor

**Fuente:** Balseca, 2016

El coeficiente global de transferencia de calor relaciona las resistencias térmicas por convección y conducción a través del espesor de pared, así como del suelo, en función del área externa implícitas en el sistema de análisis. Al considerar el fenómeno de conducción, guarda un estrecho vínculo con el coeficiente convectivo y con la temperatura del fluido. En el caso de la conducción de calor, el coeficiente de conductividad térmica es muy sensible al cambio térmico; por tanto, se tiene un ligero aumento del Coeficiente global de transferencia cuando la temperatura disminuye a lo largo de la longitud de tubería de estudio.

- Viscosidad dinámica ( $Vis_x$ ):

La viscosidad dinámica se calcula con la fórmula (6) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.72.



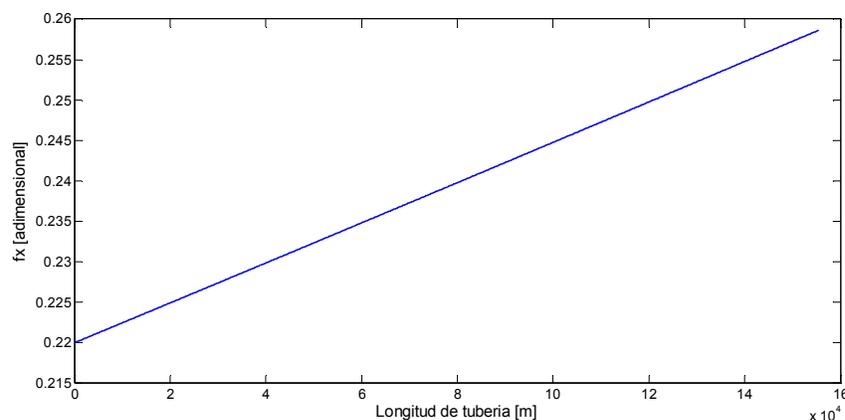
**Figura 6.72** Viscosidad dinámica

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.72 muestra la relación inversa entre la viscosidad dinámica de un crudo pesado y su temperatura. Esta propiedad se caracteriza por una alta sensibilidad térmica, por tal razón, el monitoreo permanente de éste parámetro será de gran utilidad al momento de minimizar pérdidas por fricción hidrodinámica el momento de su transporte. Esto permitirá situar estratégicamente estaciones de calentamiento a lo largo de la longitud del oleoducto.

- Factor de fricción ( $f_x$ ):

El factor de fricción se calcula con la fórmula (54) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.73



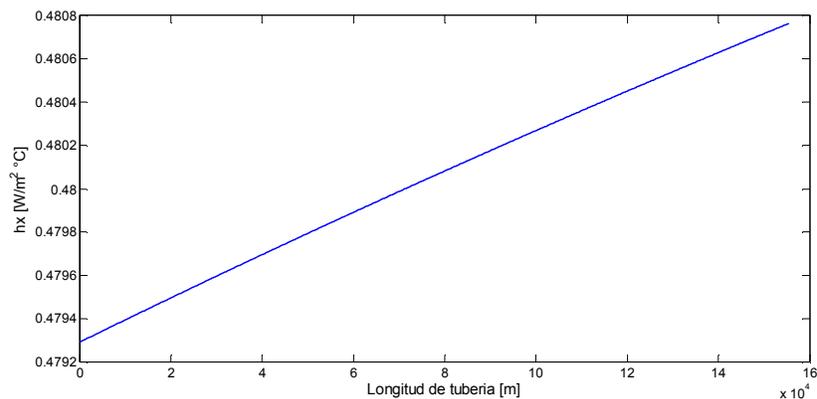
**Figura 6.73** Factor de fricción

**Fuente:** Balseca, 2016

Es una propiedad adimensional que cuantifica la pérdida de energía hidráulica de un fluido en función de la rugosidad relativa y el Número de Reynolds. Su variación se evidencia cuando el fluido pierde temperatura incrementando su valor numérico. La gráfica no considera perturbaciones generadas por transientes implícitos en el transporte del crudo pesado.

- Coeficiente de convección ( $h_x$ ):

El coeficiente de convección del crudo pesado se calcula con la fórmula (13) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.74.



**Figura 6.74** Coeficiente de convección

**Fuente:** Balseca, 2016

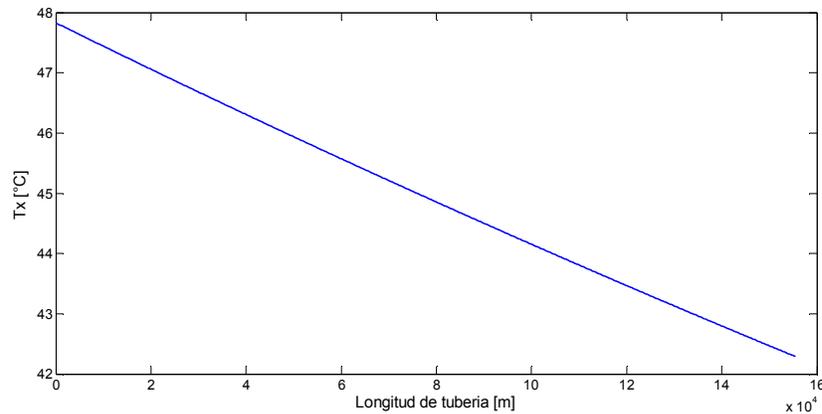
El coeficiente convectivo de un hidrocarburo guarda relación inversa a su temperatura, ya que está en función de la conductividad térmica y del Número de Nusselt. En la Figura 6.74 se aprecia la disminución repentina del Coeficiente de Convección debido al incremento de la temperatura a 60°C, de ésta manera se ratifica la estrecha relación de la propiedad con su temperatura.

#### 6.4.6.1 Gráficas de perfiles térmicos, sistema, piezométricos y topográficos escenario

##### 6

- Perfil de temperatura ( $L_{tubx}$  vs  $T_x$ ):

El perfil de temperaturas del crudo pesado se calcula con la fórmula (66) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se visualiza en la figura 6.75.



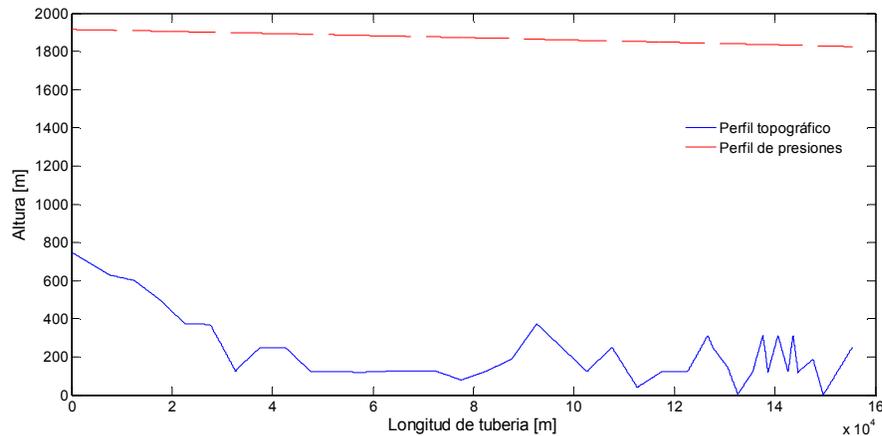
**Figura 6.75** Perfil de temperatura

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.75 muestra explícitamente la pérdida de energía térmica de un crudo pesado por efectos de transferencia calórica con el medio externo. Al enunciar que las propiedades de éste fluido guardan una relación estrecha con el gradiente térmico, es de fundamental importancia controlar éste parámetro. En la codificación de programación se controla que la temperatura del crudo pesado no disminuya de los 30°C, ya que para valor menores a éste, los valor de viscosidad y densidad se tornan críticos y dificultan el transporte del hidrocarburo; por tal razón, al marcar este valor numérico de temperatura, automáticamente se eleva sus condiciones iniciales de bombeo (60°C) y por ende que en esta coordenada de longitud se recomienda situar una estación de calentamiento para mejorar todas las propiedades del hidrocarburo.

- Perfil Topográfico (Ltubx vs PTZx):

El perfil topográfico que atraviesa el oleoducto de crudo pesado se construye a partir de los datos de coordenadas que se disponga para su construcción. Para la modelación del OCP, se alimentó al sistema con las coordenadas particulares del tramo (escenario); su grafica se visualiza en la figura 6.76.



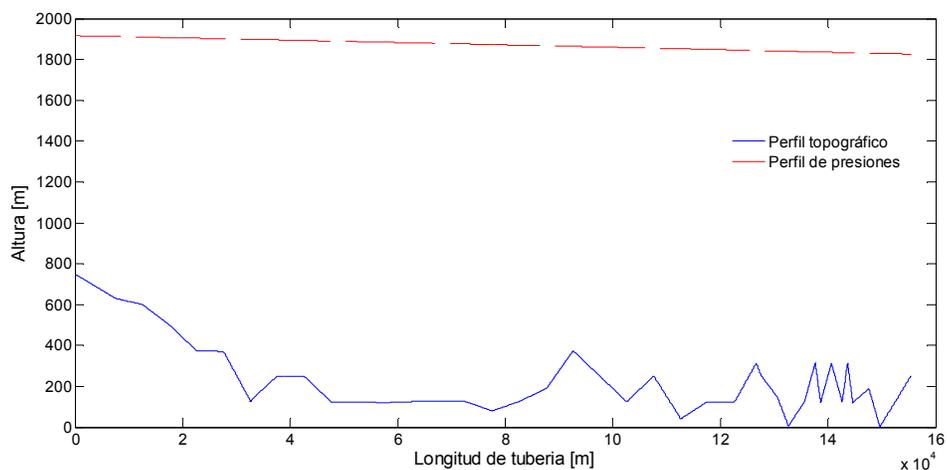
**Figura 6.76** Perfil topográfico

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.76 muestra la variación en el perfil topográfico del escenario 6 OCP. Se muestra la energía potencial a vencer por el sistema de bombeo y permite identificar las coordenadas críticas por donde atraviesa el oleoducto. El trazado del perfil topográfico fue tomado de la planimetría adjunta en el Anexo 2.

- Perfil de presiones (Ltubx vs Hpx):

El perfil de presiones del crudo pesado se calcula con la fórmula (79) ingresada en el código de programación respectivo; la gráfica resultante se muestra en la figura 6.77.



**Figura 6.77** Perfil de presiones

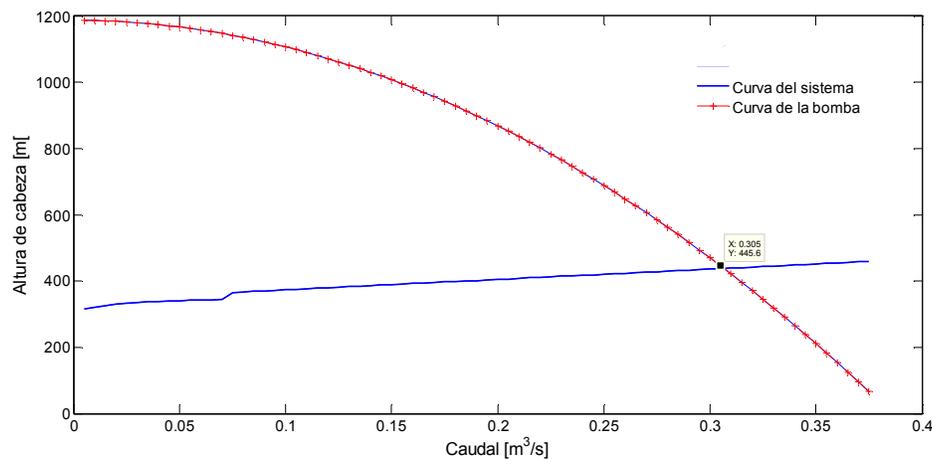
**Fuente:** Balseca, 2016

El perfil de presiones cuantifica la cantidad de energía hidráulica presente en el hidrocarburo, ésta es la energía disponible por el sistema para vencer efectos de

fricción y energía potencial presente en el traslado de una estación a otra. Este valor debe ser controlado de tal manera que no exceda el límite de resistencia mecánica que otorga el material del oleoducto. En este estudio no se consideró el análisis estructural del acero, lo cual se sugiere considerar en futuras investigaciones de temáticas similares.

- Curva del sistema (Q vs Hsistema) y Curva de la bomba (Q vs Hbomba):

Para los resultados obtenidos de la curva del sistema- bomba en el capítulo 4 literal 4.6, se mencionó el método de cálculo del sistema de bombeo, basado en la fórmula (95) y las líneas de programación descritas. En la figura 6.78 se visualiza la curva del sistema-bomba.



**Figura 6.78** Curva del Sistema-Bomba

**Fuente:** Balseca, 2016

La figura 6.78 muestra el comportamiento de la curva del sistema y la curva del sistema de bombeo. Como se aprecia en la gráfica, el punto de intersección entre las dos curvas, representa el punto de operación ideal de la bomba; en este caso, el caudal recomendado es de 0,306 m³/s.

## **CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 CONCLUSIONES**

- El desarrollo del presente trabajo investigativo permitió interpretar el fenómeno de transporte de un crudo pesado en estado estacionario de un perfil de un oleoducto específico y se pudo determinar los cambios en las propiedades cuando la temperatura varía a lo largo del tramo de análisis.
- Las consideraciones establecidas para el desarrollo de las ecuaciones en estado estable representan una aproximación muy cercana al comportamiento del crudo pesado en estado transitorio, por lo cual se puede considerar como una línea base para el estudio del fenómeno de transporte; por tanto, esta investigación puede considerarse como un cálculo preliminar de un modelo hidrodinámico de un crudo pesado.
- Las gráficas resultantes del análisis de propiedades de un crudo pesado tienden a un modelo lineal debido a la relación directa o indirecta con su temperatura y no presentan distorsiones debido a no considerarse los efectos transientes o vibraciones en el oleoducto ocurridos por el movimiento del fluido en cambios de secciones o fenómenos similares.
- Las propiedades de los crudos pesados son altamente dependientes de la temperatura, es por ello que se evidencia cambios sustanciales en sus magnitudes cuando disminuye o aumenta su energía térmica, de igual forma, al analizar la variación de las propiedades en cada metro de longitud, ha permitido captar sus cambios de una manera más perceptible.
- Se evidencia en los resultados obtenidos que el régimen de transporte del hidrocarburo pesado es en estado laminar, no llegando a ser turbulento durante su transporte. Esto representará una ventaja al momento de considerar las pérdidas por fricción en las paredes de la tubería, ya que ellas están estrechamente relacionadas con la velocidad de transporte de un hidrocarburo.
- Al efectuar el análisis del Número de Reynolds en el cual se genera el transporte del crudo pesado se concluye que su régimen es laminar, por lo tanto, el intercambio de energía térmica con el medio externo disminuye por el hecho

que a menor velocidad de transporte, menor es el consumo energético. Este fenómeno es claramente explicado en la convección forzada en superficies interiores.

- El análisis de la viscosidad dinámica permitió identificar la alta sensibilidad de esta propiedad con su temperatura, por ello, el monitoreo permanente de éste parámetro será de gran utilidad al momento de minimizar pérdidas por fricción hidrodinámica el momento de su transporte. Esto permitirá situar estratégicamente estaciones de calentamiento a lo largo de la longitud del oleoducto para evitar el incremento de la magnitud.
- Las gráficas del perfil de presiones de cada escenario nos muestran la cantidad de energía hidráulica que contiene el crudo pesado, esta magnitud deberá vencer la energía potencial presente en el perfil topográfico y los efectos friccionantes en la tubería. Por tal motivo se concluye que el análisis de este parámetro será de mucha utilidad al momento de diseñar la resistencia del material cuando se considere su integridad.
- El análisis del coeficiente global de transferencia de calor relaciona las resistencias térmicas existentes el circuito. Al considerar el oleoducto enterrado una profundidad aproximada de tres veces su radio externo, ha permitido la conservación de su energía térmica, minimizando al máximo la colocación de estaciones de calentamiento durante toda la longitud del oleoducto.
- Al limitar la temperatura mínima alcanzada por el crudo pesado a 30°C, ha permitido controlar que la viscosidad dinámica no disminuya de 0,4 kg/m s, lo cual evitará generar pérdidas excesivas por fricción el momento de su transporte. De esta manera, se han colocado tres estaciones de calentamiento durante todo el tramo del oleoducto, las mismas que se ubican en los tramos (2, 4 y 5) llegando a la estación terminal marítima en Esmeraldas con una temperatura aproximada de 42°C.
- El análisis de la curva generada por el sistema con la curva de bombeo nos ha permitido identificar el caudal recomendado de operación del tramo OCP, éste caudal ideal de operación de las bombas sirvió de base para el cálculo de las propiedades de cada escenario.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Entre las recomendaciones más relevantes de este proyecto se destaca el considerar el estudio del transporte de un crudo pesado en estado transitorio, lo cual garantizará obtener parámetros más cercanos a la realidad ya que se evaluaría como cambian las propiedades con respecto al tiempo y la parametrización de perturbaciones por efectos de transientes presentes en el transporte.
- Es de mucha importancia para el estudio térmico de un fluido el considerar los cambios de temperatura ambiente que están presentes al largo del oleoducto, ya que permitirá percibir cambios mínimos en las propiedades del crudo pesado, sabiendo que para este estudio se consideró como temperatura ambiente constante para el tramo total de oleoducto.
- Se debe considerar la variación de espesor de pared de tubería para cada cambio de sección del tramo total de oleoducto y no un aproximado como se efectuó en este estudio, ello permitirá contrastar con los datos del perfil de presiones para poder determinar la resistencia del material y así evitar sobrepresiones que causen daños estructurales, ambientales que afecten la integridad del sistema.
- Cuando se efectúe estudios sobre perfiles topográficos muy irregulares, se recomienda extraer la mayor cantidad de coordenadas, de tal manera que al trazar el perfil de presiones, éstos valores sean los más exactos posibles y poder cuantificar la pérdida de energía por longitud de tubería.
- Es importante disponer de información detallada del sistema de bombeo y de las válvulas controladoras de presión que se utilizarán en las estaciones reductoras, las que permitirán tener mejores aproximaciones del perfil de presiones cuando se desea conservar la integridad de un oleoducto, y así evitar sobrepresiones en el transporte y prevenir accidentes con consecuencias lamentables.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS

- Fahim, M., Alsahhaf, T., & Elkilani, A. (2010). *Fundamentals of Petroleum Refining*, Oxford: Elsevier Science.
- Çengel, Y. & Ghajar, A. (2007). *Transferencia de calor y masa (3a ed.)*. México D.F: McGraw-Hill Interamericana.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos (6ª ed.)*. México: Pearson.
- Wauquier, J. (2000), *Refino del petróleo*. Díaz de Santos.
- Streeter, V., Wylie, E., & Bedford, K. (1988). *Mecánica de fluidos (8a ed.)*. México D.F: McGraw-Hill Interamericana.
- Crane. (1977), *Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías (15a ed.)*. Revisión técnica: Clemente Reza García. McGraw-Hill.
- Stepanoff, A.J. (1957), *Centrifugal and Axial Flow Pumps. Theory, Design and Application (2a ed.)*. New York: Krieger Publishing Company.
- Karassik, I. (2001). *Pump Handbook (3ª ed.)*. New York: McGraw-Hill.
- Cragoe, CS. (1993). *Changes in the viscosity of liquids with temperature, pressure and composition*; Prod. World Pet Congress.
- Gottfried, B.S. (1965). *Mathematical model of thermal oil recovery in linear systems*. SPE J.
- Gambill, W.R. (1957). *You can predict heat capacities, Chemical Engineering*.
- Murillo, J. P. Brufau, P. García-Navarro, M.A.A. Rodríguez. (2008). *Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D para la determinación de zonas inundables en el T. M. de Fraga (Huesca) Universidad de Zaragoza e INCLAM, S.A.*
- Palacios, F. (2008). *Resolución aproximada de ecuaciones: Método de Newton-Raphson*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Ubidia, L. (2000). *Apuntes de mecánica de fluidos*. (Manuscrito no publicado). Quito, Ecuador.
- Techint (2003). *OCP Oleoducto de Crudos Pesados. Manual de operación del sistema del oleoducto*.
- Curtis, C., Kopper, R., Decoster, E., Guzmán-García, A., Huggins, C., Knauer, L., ... & Waite, M. (2003). *Yacimientos de petróleo pesado*. Oilfield Review, II, 23.
- Alboudwarej, H., Felix, J. J., Taylor, S., Badry, R., Bremner, C., Brough, B., ... & Beshry, M. (2006). *La importancia del petróleo pesado*. Oilfield review, 18, 38-59.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. Desarrollo de algoritmos

### Calor específico:

#### Nombre de la subrutina: CalEsp.m

```

% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DEL CALOR ESPECÍFICO
% Calcula el calor especifico de un crudo
% en función del °API y la Temperatura
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Cp=CalEsp(API,T)
TF=(9/5)*T+32;
GravEsp=141.5/(API+131.5);
Cp1=(0.388+0.00045*TF)/sqrt(GravEsp); % BTU/(Lbm-F)
Cp=Cp1*4180; % Joul/(Kg-K)
end

```

### Conductividad térmica:

#### Nombre de la subrutina: Conductividad.m.

```

% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL CRUDO
% Ecuación de Cragoe para fracciones de petróleo y mezclas de
% hidrocarburos
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function Kh=Conductividad(API,TC)
TF=(9/5)*TC+32;
GravEsp=141.5/(API+131.5);
Kh1=(0.0677*(1-0.0003*(TF-32)))/sqrt(GravEsp);% BTU/(h-ft-F)
Kh=1.7296*Kh1;% [W/m °C]
End

```

### Densidad:

#### Nombre de la subrutina: Densidad.m

```

% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DENSIDAD DEL CRUDO (RO, ROasc)
% Programa que calcula la densidad del crudo en función de la temperatura y
% °API.
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [RO1,GravEsp]=Densidad(API,T1)% TC temp °C

```

```

TF= ((9/5)*T1)+32;
GravEsp=141.5/(API+131.5);
ROasc=1000*GravEsp; % kg/m3
R1=1/(1+(TF-68)/1885);
ROl=ROasc*R1; % Kg/m3
end

```

### Factor de fricción:

**Nombre de la subrutina:** FactFricc.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa para el cálculo del Factor de fricción f según la
% Ecuación de Colebrook la cual detalla lo siguiente:
%  $1/(f^{1/2}) = -0.8 \ln(\text{rugrel}/3.7 + 2.51/(Re \cdot f^{1/2}))$ 
% METODO DE CÁLCULO: Newton Raphson
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function f=FactFricc(rugrel,Re)
fold=0.01;% es el valor inicial de cálculo de f
%R=input('Reynolds=');
%rugrel=input('rugrel=');
nitermax=100;
Deltaf=0.00001;
for J=1:nitermax;
    Num=Fi(fold,rugrel,Re);
    if Num <1E-4;break,end;
    %pause
    fdelt=fold+Deltaf;
    %pause
    %calculo de dFi/df
    Den=(Fi(fdelt,rugrel,Re)-Fi(fold,rugrel,Re))/Deltaf ;
    %pause
    fnew=fold-Num/Den;
    %pause
    fold=fnew;
end
f=fold;
if Re <=2000; f=64/Re; end;

```

### Coefficiente de convección:

**Nombre de la subrutina:** HconvIntTub1.m

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% COEFICIENTE DE CONVECCIÓN h en el interior del tubo
% Calcula el coeficiente de convección interna dentro de tuberías
% Determina si el flujo es laminar - transición Reynolds <= 2000
% ----- LAMINAR -----
% Determina la longitud de desarrollo de la capa limite Térmica
% Ltermica=0.05*Re*Pr*D.
% Si Ltuberia < Ltermica se calcula Nusselt con:
% Nuaverage=3.66+0.065*(D/L)*Re*Pr/[1+0.04*((D/L)*Re*Pr)^(2/3)]
% Si es Turbulento Re > 2000, se calcula Nu según:
% Nu promedio=(h*D)/K=0.023*Re^0.8*Pr^n
% donde: Re=Ro*V*D/Miu, Pr=Miu*Cp/K, n=0.4 para calentamiento, n=0.3 para
% enfriamiento, Pr<100 y Pr>0.7
% -----DATOS DE ENTRADA-----
% Considerar:
% Enfriamiento= 1 (n=0,3) cuando el fluido se enfría.
% Enfriamiento= 0 (n=0,4) cuando el fluido se calienta.
% Las propiedades se calculan a la temperatura media:
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
function [h, Ltermica, Nu, Pr]=HconvIntTub1(Re,D,e,
Miu,Cp,Kf,Ltub,Enfriamiento)
Di=D;
Pr=Miu*Cp/Kf;
Ltermica=0.05*Re*Pr*Di;
if Re <=10000 & Ltermica > Ltub;
    F1=(Di/1)*Re*Pr; %Valor que se repite ecuación Edwards (Cengel)
    Nu=3.66+0.065*F1/(1+0.04*(F1)^(2/3));%Ecuación de Edwards (Cengel)
    h=Nu*Kf/Di; % Watt/(m2 °C)
end
if Enfriamiento==1; n=0.3; end; % Enfriamiento del fluido
if Enfriamiento==0; n=0.4; end; % Calentamiento del fluido
if Re>=10000;
    Nu=0.023*Re^0.8*Pr^n;
    h=Nu*Kf/Di; % Watt/(m2 °C)
end
if Re<10000 & Ltub>Ltermica;
    Nu=3.66; % Ecuación 8.61 Transferencia Cengel (T sup= constante)
    h=Nu*Kf/Di; % Watt/(m2 °C)
end

```

**Coefficiente global de transferencia de calor:****Nombre de la subrutina: UtunEnterrada.m**

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% NOMBRE:UtubEnterrada.m
% Calcula el U, overall heat transfer coefficient
% de una tubería enterrada, para una tubería de longitud
% discreta, obtenida de  $L(i)=L_{total}/n$ , donde n= número de tramos
% en que se divide oleoducto de longitud  $L_{total}$ 
% Considera convección interna con un h para flujo constante de calor en
% el tramo, considera conducción en la parte externa de la tubería
% para lo cual modela como si a un radio  $r_3=P*r_2$ , donde  $P>1$ , se tuviese
% la temperatura  $T_{infinidad}$  exterior se calcula según:
%  $R_{tot}=1/(h*A_i)+\ln(r_2/r_1)/(2*\pi*K_{acero}*L)+\ln(r_3/r_2)/(2*\pi*K_{tierra}*L)$ 
% DATOS GENERALES,  $K_{acero}=60$ ,  $K_{tierra}=2.3$  Watt/(m-C)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function
[Uenterrada,R3,Rtot,Ae,hcona,Nua]=UtubEnterrada(h,r1,r2,L,Kacero,Ktierra,
TAE,Re)
r3=3*r2;
D=2*r2;
Ai=pi*2*r1*1;
Ae=pi*2*r3*1;
R1=1/(h*Ai);
R2=log(r2/r1)/(2*pi*Kacero*1);
if TAE==1 % Enterrada
R3=log(r3/r2)/(2*pi*Ktierra*1);
hcona=1;
Nua=1;
else
Ae=pi*2*r2*1;
Pra=0.7323;
kair=0.02476;
if (Re >= 0.4)&(Re <= 4)
Nua=0.989*(Re^0.33)*(Pra^(1/3));
end
if (Re > 4)&(Re <= 40)
Nua=0.911*(Re^0.385)*(Pra^(1/3));
end
end

```

```

    if (Re > 40) & (Re <= 4000)
        Nua=0.683*(Re^0.466)*(Pra^(1/3));
    end
    if (Re > 4000) & (Re <= 40000)
        Nua=0.193*(Re^0.618)*(Pra^(1/3));
    end
    if (Re > 40000)
        Nua=0.027*(Re^0.805)*(Pra^(1/3));
    end
    hcona=Nua*kair/(D);
    R3=1/(hcona*3.1416*(D));
end
Rtot=R1+R2+R3;
Uenterrada=1/(Rtot*Ae); %Watt/m2 °K
end

```

## Viscosidad dinámica:

### Nombre de la subrutina: Viscosidad.m

```

% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Función para el cálculo de la viscosidad de un crudo
% en función de dos viscosidades a diferentes temperaturas
% se calcula con la fórmula de Andrade  $\mu = a \cdot \exp(b/T)$ , donde
%  $\mu$  en New-s/m2, Temperatura [°K] %Basado Libro Aspectos de Yacimientos
% de Crudos pesados (Pág 29)
% T1,T2, en [°C], Miu1,Miu2 en centipoises
% Resultado obtenido en [New-s/m2] = [Kg/s m]
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
function Viscosidad=Viscosidad(T1,Miu1,T2,Miu2,T)
    Tabs1=T1+273;
    Tabs2=T2+273;
    Tabs=T+273;
    b=(Tabs1*Tabs2/(Tabs2-Tabs1))*log(Miu1/Miu2);
    Ln_a=(Tabs1*log(Miu1)-Tabs2*log(Miu2))/(Tabs1-Tabs2);
    a=exp(Ln_a);
    Viscosidad1=a*exp(b/Tabs); % [centipoises]
    Viscosidad=(Viscosidad1/100)*0.1; % New-s/m2 = [Kg/s m]
end

```

### Perfil de temperaturas:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calculo perfil temperaturas
% Consideraciones:
% Temperatura ambiente constante para todo el tramo de tubería.
% Tubería enterrada en la totalidad de su longitud.
% Cálculo de propiedades del fluido a temperatura promedio de cada tramo.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Hpresion=0;
for i=1:NumTramos;
    Miu(i)=Viscosidad(T1,Miu1,T2,Miu2,T(i));
    Cpoil(i)=CalEsp(API,T(i));
    Ro(i)=Densidad(API,T(i));
    Koil(i)=Conductividad(API,T(i));
    Rey(i)=Ro(i)*V*D/Miu(i);

U(i)=UtubEnterrada(Hconv,r1,r2,DeltaL,Ktub,Ktierra,TAE,Rey(i));
    f(i)=FactFricc(RugRel,Rey(i));
    C(i)=-8*f(i)*Q(jj)^2/(pi^2*D^5*Cpoil(i));
    B(i)=U(i)*pi*D/(Ro(i)*Q(jj)*Cpoil(i));
% Cálculo de temperaturas con ecuación solución analítica para cada
diferencial de tramo
    T(i+1)=(T(i)-Tinf-C(i)/B(i))*exp(-
B(i)*DeltaL)+C(i)/B(i)+Tinf;
    DeltaHPresion(i)=(f(i)*DeltaL/D)*(V^2)/(2*9.81);
    Hpresion=Hpresion+(f(i)*DeltaL/D)*(V^2)/(2*9.81); % en m
end
end

Hsistema(jj)=Hpresion;
end

```

### Perfil hidrodinámico:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Subrutina que permite calcular el perfil de presiones de un oleoducto en
función de las variables físicas.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Inicio cálculos de H convectivo
%
for j=1:NumTramos+1; T(j)=Tinicio; NN(j)=j; end;% Vector Temp Inicial

```

```

%
for jj=1:55; % 100= números puntos del sistema - bomba
    Q(jj)=jj*0.005;
    for control=1:10 % se hacen cuatro iteraciones para cálculo de Tm
        Tm=(T(1)+T(NumTramos+1))/2;
        Mium=Viscosidad(T1,Miu1,T2,Miu2,Tm); % New-s/m2
        Rom=Densidad(API,Tm);
        Cpoilm=CalEsp(API,Tm); % a temperatura Tm
        Koilm=Conductividad(API,Tm); % a temperatura Tm
        V=4*Q(jj)/(pi*D^2);
        Reymedio=Rom*V*D/Mium;
        Prmedio=Mium*Cpoilm/Koilm;
        Ltermica=0.05*Reymedio*Prmedio*D;
        Hconv=HconvIntTub1(Rom,V,r1,Mium,Cpoilm,Koilm,Ltub,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Cálculo perfil de presiones
%
    Hpresion=0;
    for i=1:NumTramos;
        Miu(i)=Viscosidad(T1,Miu1,T2,Miu2,T(i));
        Cpoil(i)=CalEsp(API,T(i));
        Ro(i)=Densidad(API,T(i));
        Koil(i)=Conductividad(API,T(i));
        Rey(i)=Ro(i)*V*D/Miu(i);
        U(i)=UtubEnterrada(Hconv,r1,r2,DeltaL,Ktub,Ktierra,TAE,Rey(i)
        );
        f(i)=FactFricc(RugRel,Rey(i));
        C(i)=-8*f(i)*Q(jj)^2/(pi^2*D^5*Cpoil(i));
        B(i)=U(i)*pi*D/(Ro(i)*Q(jj)*Cpoil(i));
        % Cálculo de temperaturas con ecuación solución analítica para
        % cada diferencial de tramo
        T(i+1)=(T(i)-Tinf-C(i)/B(i))*exp(-
        B(i)*DeltaL)+C(i)/B(i)+Tinf;
        DeltaHPresion(i)=(f(i)*DeltaL/D)*(V^2)/(2*9.81);
        Hpresion=Hpresion+(f(i)*DeltaL/D)*(V^2)/(2*9.81); % en m
    end
end
Hsistema(jj)=Hpresion;
end

```

## Perfil topográfico:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% GENERACION DEL PERFIL TOPOGRAFICO
ZH=[0 2000 4000 6000 8000 10000];
ZV=[3400 3700 3200 2800 3300 2100];
DT=length(ZH);
PTZ=zeros (DT-1,ZH(DT)); % Matriz de perfil topográfico
for zz=2:DT
    inc=((ZV(zz)-ZV(zz-1)))/(ZH(zz)-ZH(zz-1));
    PTT=ZV(zz-1)-inc; % Altura topográfica inicial de cada tramo
    DZH(zz-1)=ZH(zz)-ZH(zz-1); % Ancho de cada tramo
    for zzz=1:(ZH(zz)-ZH(zz-1))
        PTZ(zz-1,zzz)=PTT+inc; % Calcula la altura por cada metro
        PTT=PTZ(zz-1,zzz);
    end
end
auxz=0;
% Transforma la matriz en vector
for z0=1:(DT-1)
    for z1=1:DZH(z0)
        PTZx(z1+auxz)=PTZ(z0,z1); % Este es el vector topográfico
    end
    auxz=auxz+DZH(z0);
end

```

El perfil topográfico puede ser ingresado de forma manual en forma de vectores por ejemplo: ZV=[...] y ZH=[...].

## Sistema de bombeo:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% DATOS SISTEMA DE BOMBEO
% Datos de la bomba:
NRB=1800; % RPM de catalogo
clear
clc
disp('')
disp('')
disp('Por favor espere')

```

```

Hbomba=[100; 110; 100; 85; 60];% m %Ingrese datos propios de la bomba
Qbomba=[0; 0.15; 0.3; 0.4; 0.6];% m3/s %Ingrese datos propios de la bomba
ft = fittype('curvbomb(x,a,b)');
CurvBombp=fit(Qbomba,Hbomba,ft);
CurvBomb=coeffvalues(CurvBombp);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%-----CURVA DE LA BOMBA A DISTINTOS RPM-----%%

NBO=36000; %%RPM a las que va a trabajar la bomba
NRB=3600; %%RPM del catálogo
for k=1:length(Q);
    Hbomb(k)=CurvBomb(1)*(NBO/NRB)*Q(k)^2+CurvBomb(2)*((NBO/NRB)^2);
end
    plot(Q,Hsistema)
hold
plot(Q,Hbomb)

for io=1:55 %Encuentra el punto de intersección de Hsis-Qsis
    dhq=Hsistema(io)-Hbomb(io);
    if dhq<0.05;
        Hoptx=Hsistema(io);
        Qoptx=0.005*io;
    end
end
Qopt=Qoptx %Este es el caudal óptimo del sistema
Hopt=Hoptx %Esta es la altura ótima del sistema
Hpp=Hopt;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% CÁLULO DE TODAS LAS PROPIEDADES EN FUNCIÓN A Q ÓPTIMO%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[Tx,Hpx,f,Uenterrada,Re,Visx,RO,Cp,Kfx,Rex,ROx,Cpx,Ux,Prx,R3x,Rtotx,Aex,h
x,Nux,fx,hconax,Nuax] = FLUIDOSFTRAMO( Qopt, D, e, Tinicio, Tinf,Ltub, API,
Ktub,Ktierra ,Enfriamiento, Miul,T1,Miu2,T2, Hpp, TAE);
for ii=1:Ltub
    Ltubx(ii)=ii;
end
plot(Q,Hsistema)
hold on
plot(Q,Hbomb)

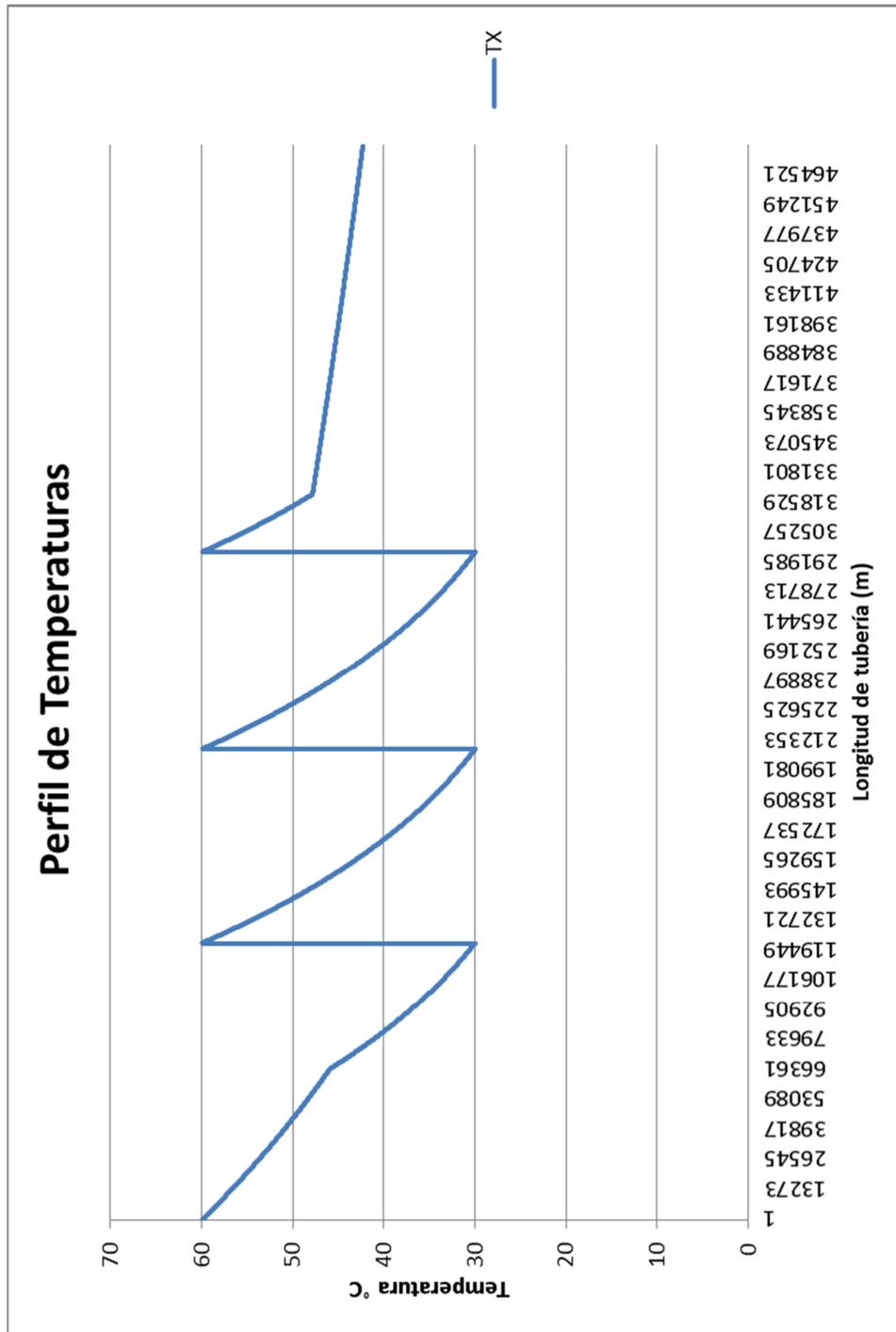
```

## **ANEXO 2. Perfil Topográfico OCP**

**Fuente:** Oleoducto de crudos pesados.



**ANEXO 4. Perfil de temperaturas oleoducto crudos pesados**



**ANEXO 5. Perfil de presiones oleoducto crudos pesados**

