

Procedimiento para determinar la variación de temperatura del petróleo pesado con comportamiento pseudoplástico en tuberías conductoras

Procedure to determine the temperature variation of heavy oil with pseudoplastic behavior in conductive pipes

Héctor Luis Laurencio Alfonso^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-2688-015X>

Yoalbys Retirado Mediaceja²  <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>

Enrique Torres Tamayo¹  <https://orcid.org/0000-0002-7226-7295>

Recibido 24 de julio de 2023, aceptado 29 de diciembre de 2023

Received: July 24, 2023 Accepted: December 29, 2023

RESUMEN

En las instalaciones de bombeo en sistemas industriales es común que se presente flujo no estacionario. Esto se debe a que estas instalaciones suelen estar operando a una temperatura superior a la del ambiente, lo que produce variaciones en la densidad y en la viscosidad del fluido en función del tiempo. En el caso de los fluidos no Newtonianos con comportamiento pseudoplásticos, el proceso se ve afectado por no encontrar procedimientos adecuados y específicos para determinar las propiedades termofísicas del fluido. En el presente artículo se propone un procedimiento de cálculo para determinar las variaciones de temperaturas del petróleo pesado bajo condiciones de intercambio térmico en tuberías aisladas; conformado por 24 ecuaciones. Se incluyen los parámetros reológicos en el modelo del coeficiente de convección del petróleo pesado. Las ecuaciones propuestas han sido validadas para casos reales en sistemas industriales, para el cual se pudo predecir el valor de estimación de variación de temperatura con un error máximo del 1,83% y un valor promedio de 1,39%. Los resultados de simulación indican que las pérdidas de temperatura en las tuberías aumentan con el aumento del caudal y la disminución del diámetro de la tubería; además, se encontró que estas pérdidas alcanzan un valor máximo de 0,58 °C para una tubería de menor diámetro (0,2 m) y menor flujo volumétrico (54,361 m³/h).

Palabras clave: Coeficiente de convección, flujo no estacionario, pérdidas de calor, fluido pseudoplástico.

ABSTRACT

In industrial pumping systems, non-stationary flow is common. Because these facilities usually operate at a temperature higher than the surroundings, this causes a variation in the density and viscosity of the fluid over time. In the case of non-Newtonian fluids with pseudoplastic behavior, the process is affected by the lack of adequate and specific procedures to determine the thermo-physical properties of the fluid. This article proposes a calculation procedure to determine the temperature variations of heavy oil under heat exchange conditions in insulated pipes, consisting of 24 equations. The proposed equations have been validated for real cases in industrial systems, for which the estimated temperature variation value could be predicted with a maximum error of 1,83% and an average value of 1,39%. The simulation results indicate that temperature losses in pipes increase with increasing flow rate and decreasing pipe diameter and that these losses reach a maximum value of 0,58 °C for a smaller diameter pipe (0,2 m) and lower volumetric flow rate (54,361 m³/h).

Keywords: Convection coefficient, unsteady flow, heat losses, pseudoplastic fluid.

¹ Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas. Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador. Email: hector.laurencio@utc.edu.ec; enrique.torres@utc.edu.ec

² Facultad de metalurgia y Electromecánica. Universidad de Moa. municipio de Moa. Holguín, Cuba. Email: yretirado@ismm.edu.cu

* Autor de correspondencia: hector.laurencio@utc.edu.ec

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tuberías son uno de los medios más utilizados para el transporte de fluidos en la industria. En la producción petrolera, es fundamental la disposición de redes de tuberías a lo largo de vastas extensiones de territorio para el transporte del crudo entre los sitios de extracción, refinación y centros de almacenamiento o puertos de exportación, por lo que estas tuberías atraviesan gran variedad de suelos, climas y en general, diferentes condiciones de operación [1].

Debido a que los petróleos crudos tienen una alta viscosidad y densidad, durante el flujo de estos por las tuberías se generan significativas pérdidas de presión; el calentamiento del fluido es el método preferido para disminuir estas pérdidas ocasionadas por el efecto viscoso. En este sentido, las pérdidas de calor en las tuberías son un tema de gran interés, ya que pueden afectar el rendimiento del sistema y la eficiencia energética. En particular, en el transporte de fluidos no newtonianos, la determinación de las pérdidas de calor se considera aún más complejas, debido a las características reológicas de estos fluidos [2]. En el caso de los petróleos pesados, la convección puede ser afectada por varios factores, como los parámetros reológicos, la densidad, la temperatura y el régimen de flujo.

El aislamiento térmico de tuberías de acero que transportan fluidos calientes es importante para reducir las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia del sistema. Estos recubrimientos pueden reducir las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia del sistema, lo que puede llevar a ahorros de energía y costos.

El uso de modelos predictivos para determinar el comportamiento térmico, es un enfoque válido para la obtención de resultados de simulación [3]. Referentes a la caída de presión de flujo no newtoniano en tuberías [2], se recomienda generar un modelo de correlación para la caída de presión en función del flujo, cuando se trate el análisis del flujo bajo diferentes temperaturas, donde debe incorporar el estado no estacionario por variación de propiedades termo físicas de los petróleos pesados.

Para elegir los parámetros óptimos para aislamiento, en la investigación *“Protection chilled pipelines from the frost-susceptible soil”* [4], se desarrolla un algoritmo para obtener los parámetros geométricos y

de deformación del lecho del suelo para proteger la tubería con aislamiento térmico contra las heladas, utilizando la simulación numérica y modelos matemático existente. Se encontró que el problema de la optimización de los tamaños geométricos de la cama de aislamiento del suelo tiene una solución única para las diferentes condiciones simuladas.

En el estudio de la convección forzada laminar en un tubo con materiales de cambio de fase nanoencapsulados [5], se realiza el análisis de transferencia de calor por convección y pérdidas de exergía, y compensaciones dentro de un tubo con una temperatura de pared constante; el número de Nusselt y la tasa de transferencia de calor aumentaron un 5,9% y un 2,5%, respectivamente.

En el análisis de la transferencia de calor por convección forzada laminar de un fluido no newtoniano en la región de entrada de un conducto cuadrado con diferentes condiciones límite, se llevó a cabo una simulación numérica para resolver las ecuaciones de gobierno tridimensionales completas para el flujo laminar de desarrollo constante en un conducto de sección transversal. Se incluyen el efecto de la viscosidad dependiente de la temperatura, así como la disipación viscosa. Los resultados se presentan sobre una amplia gama de índices de ley de potencia y números de Prandtl para condiciones de contorno de flujo de calor constante (tanto axial como periféricamente) y temperatura de pared constante [6].

En el análisis de la transferencia de calor por tuberías se deben considerar las variaciones de la viscosidad del fluido a transportar. En el artículo titulado *“Modelado de la viscosidad aparente de un petróleo crudo de 11 °API con comportamiento no newtoniano”*, se expone el comportamiento de flujo y la influencia que ejerce la temperatura sobre las propiedades reológicas de un petróleo crudo pesado de 11 °API. A partir del estudio reológico se demostró que el petróleo mantiene un comportamiento pseudoplástico para variación de temperatura de 29 a 69,8 °C. Para el intervalo de temperatura estudiado se obtiene el modelo de la viscosidad aparente en función de los parámetros reológicos, influenciados por la temperatura, variable de gran utilidad al definir el valor adecuado de la viscosidad aparente para variaciones de la temperatura durante el tratamiento y transporte del combustible [7].

Los estudios reológicos se enfocan en el estudio de la viscosidad y el comportamiento de flujo de los fluidos a diferentes temperaturas y presiones. La información obtenida de estos estudios es crítica para la determinación de las condiciones de transporte, incluyendo la selección de la temperatura y la velocidad de flujo óptimas, como se referencia en las recomendaciones dadas para el control de los sistemas de bombeo en oleoductos [8].

Con relación al transporte de petróleos pesados por sistemas de tuberías, se reporta el estudio del modelo para simulación de la potencia de flujo en tuberías conductoras de petróleo pesado con comportamiento pseudoplástico, donde se tomaron en consideración cuatro componentes para modelar la potencia de flujo, la potencia de flujo debido al esfuerzo viscoso del fluido, la potencia de flujo adicional por efectos de mezclado en la tubería, la potencia de flujo de carácter no estacionario y la potencia de flujo necesaria para vencer a los cambios de energía potencial. El modelo empírico teórico obtenido simula la potencia de flujo con un error promedio de 4,5%; el que se recomienda para la implementación en el diseño y evaluación energética de sistemas de bombeo de petróleos crudos con comportamiento pseudoplástico y carácter no estacionario [9].

El análisis de la influencia de la transferencia de calor en el comportamiento de flujo en ductos terrestres de petróleo, se muestran los resultados obtenidos para el problema no isotérmico, en el mismo se revela que el tipo de aislamiento es muy importante para garantizar que el intercambio de calor entre el petróleo caliente y el medio externo, más frío, permanezca en niveles adecuados [10].

La característica geométrica de tuberías con aislamiento térmico, que transportan fluidos a temperaturas superiores al ambiente, puede simplificarse como un cilindro horizontal con flujo exterior cruzado. Existen muchas correlaciones para evaluar la transferencia de calor para este tipo de geometría, las que cubren el intervalo completo del número de Reynolds, así como también un amplio intervalo de número de Prandtl [11].

De las consultas bibliográficas realizadas, relacionadas al transporte de petróleos pesados y a fluidos no newtonianos en general, se dificulta la determinación

de la variación de la temperatura de fluido transportado, a causa de las pérdidas de calor; por otra parte, no se involucra el comportamiento no newtoniano del fluido en la determinación de las propiedades termo físicas, lo que dificulta el análisis de pérdidas de presión en sistemas no estacionarios de flujo.

Como objetivo del presente artículo se plantea: Proponer un procedimiento para la determinación de la variación de la temperatura del petróleo pesado no newtoniano con comportamiento pseudoplásticos, durante el proceso de flujo por tuberías, considerando las pérdidas de calor y el carácter no estacionario del fluido.

ANÁLISIS TEÓRICO

Modelo para la determinación de pérdidas de calor del fluido en tuberías

Con el objetivo de conocer las variaciones de temperatura durante el transporte del combustible, se realizó la modelación teniendo en cuenta las configuraciones de las tuberías (Figura 1), las propiedades de los materiales y los fluidos que intervienen en el proceso de transporte.

Aplicando el balance de energía para la tubería representada Figura 1, donde: L - longitud de tubería (m). r_1 - radio interior de la tubería (m). r_2 - radio exterior de la tubería (m). r_3 - radio exterior del aislamiento(m). r_4 - radio exterior total de la tubería aislada (m).

Del análisis de componentes se obtienen las ecuaciones para la transferencia de calor por conducción en las tres resistencias (ecuación (1)-(3)).

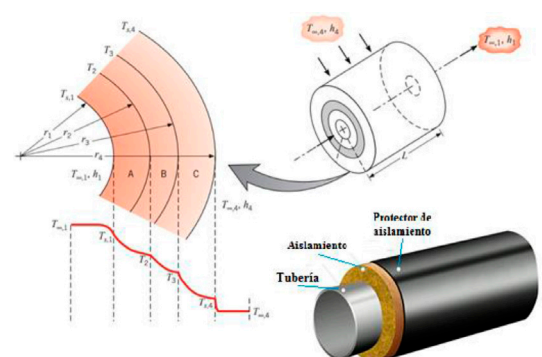


Figura 1. Esquema estructural de tubería aislada, utilizado en la obtención del modelo, obtenido a partir de [12].

$$-k_A \cdot r_2 \cdot \frac{dT^A}{dr} = r_1 \cdot q_s \quad (1)$$

$$-k_B \cdot r_3 \cdot \frac{dT^B}{dr} = r_1 \cdot q_s \quad (2)$$

$$-k_C \cdot r_4 \cdot \frac{dT^C}{dr} = r_1 \cdot q_s \quad (3)$$

Al integrar las ecuaciones (1)-(3); y tomadas como constante a k_A , k_B y k_C , se definen las ecuaciones (4)-(6), como:

$$T_1 - T_2 = r_1 \cdot q_s \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{K_A} \right) \quad (4)$$

$$T_2 - T_3 = r_2 \cdot q_s \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{k_B} \right) \quad (5)$$

$$T_3 - T_4 = r_3 \cdot q_s \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{k_C} \right) \quad (6)$$

análisis anterior, a partir de las ecuaciones presentadas, se deduce la ecuación del calor transferido del interior al exterior del conducto (ecuación (7)).

$$q_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_e)}{\frac{1}{r_1 \cdot h_p} + \frac{1}{k_A} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \dots + \frac{1}{r_1 \cdot h_p} \cdot \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) + \dots + \frac{1}{k_A} \cdot \ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right) + \frac{1}{r_4 \cdot h_a}} \quad (7)$$

Donde: h_p - coeficiente de convección del petróleo pesado ($W/m^2 \cdot ^\circ C$). h_a - coeficiente de convección del aire ($W/m^2 \cdot ^\circ C$). T_i - temperatura del fluido en el interior de la tubería ($^\circ C$). T_e - temperatura exterior del aire ($^\circ C$). k_A - coeficiente de conductividad térmica de la tubería (Tabla 1) ($W/m \cdot ^\circ C$). k_B - coeficiente de conductividad térmica del aislante (Tabla 1) ($W/m \cdot ^\circ C$). k_C - coeficiente de conductividad térmica del protector del aislamiento (Tabla 1) ($W/m \cdot ^\circ C$). Las propiedades termofísicas de los materiales que componen la tubería conductora se toman según la Tabla 1.

Coeficiente de convección y propiedades termofísicas del petróleo pesado

El coeficiente de convección para el combustible, tanto en convección forzada como natural, se determina por la expresión propuesta por [2], obtenida a partir de [12], (ecuación (8)).

$$h = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D_i} \quad (8)$$

Donde: Pr - número de Prandtl (adimensional). Re^* - número generalizado de Reynolds para fluidos pseudoplásticos (adimensional). D_i - diámetro interior de la tubería (m). k_p - coeficiente de conductividad térmica del petróleo ($W/m \cdot ^\circ C$).

El número generalizado de Reynolds para fluidos pseudoplásticos, se determina en dependencia del modelo reológico del fluido a transportar [7], según la siguiente función (ecuación (9)).

$$Re^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (9)$$

Donde: n - índice de flujo (adimensional). D - diámetro de la tubería (m). K - índice de consistencia másica (Pa·s).

La función obtenida por [7], (ecuación (10)), posibilita simular el comportamiento del índice

Tabla 1. Propiedades termofísicas de los materiales de la tubería aislada [12].

Description /Composition	Typical Properties		
	Density ρ (kg/m ³)	Thermal Conductivity k (W/m·°C)	Specific Heat c_p (J/kg·°C)
Glass fibber, coated, duct liner	32	0,038	835
Carbon steels (Mn ≤ 1% Si ≤ 0,1%)	7854	60,5	434
Aluminum	2702	237	903

de consistencia másica (K) al variar la temperatura (t), teniendo como recomendación que la misma es válida sólo para las condiciones experimentales en la que fue ajustada.

$$K = 59,86 \cdot e^{(-0,056 \cdot T)} \quad (10)$$

Donde: T - temperatura del petróleo pesado (°C). El índice de flujo para el petróleo pesado, según [7], muestra variaciones poco significativas, con el valor promedio de n = 0,925.

La densidad del petróleo crudo, en función de la temperatura, se determina según la ecuación (11) [2].

$$\rho = -7,62 \cdot \ln(T) + 1012 \quad (11)$$

Donde: ρ - densidad del combustible (kg/m³). T - temperatura a la que se desea conocer la densidad (°C).

Para los valores experimentados de la capacidad calorífica del combustible se recomienda el empleo de la ecuación (12) [2].

$$c_p = 8,56 \cdot T + 1483 \quad (12)$$

Donde: C_p - capacidad calorífica del combustible (J/kg.°C). T - temperatura del petróleo pesado; (°C). La conductividad térmica con tendencia decreciente se determina por la ecuación (13) [2].

$$k = (-0,13 \cdot t + 149,1) \cdot 10^{-3} \quad (13)$$

Donde: T - temperatura del petróleo pesado; (°C). El modelo recomendado, que describe el comportamiento de la viscosidad aparente del petróleo pesado (ecuación (14)), para variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad, en un fluido pseudoplástico, según [7], [9].

$$\mu_a = \frac{59,86}{e^{0,056 \cdot T}} \cdot \left(\frac{8,16 \cdot v}{D} \right)^{-0,075} \quad (14)$$

Mediante el modelo anterior (ecuación (14)), es posible definir la viscosidad aparente del durante su transporte por tuberías [7].

El número de Prandtl, que describe la característica termofísica del agente portador de calor [12], [13], se determina mediante la ecuación (15):

$$Pr = \frac{\mu_a \cdot c_p}{k} \quad (15)$$

Donde: c_p - capacidad calorífica; (J/kg. °C).

Coefficiente de convección y propiedades termofísicas del aire

Para el aire, el coeficiente de convección, tanto en convección forzada como natural se determina por la expresión (ecuación (16)) [12], [13]:

$$h = 0,0245 \cdot Re^{0,6} \cdot \frac{k}{D_e} \quad (16)$$

Donde: D_e - diámetro exterior del conducto; (m). k- coeficiente de conductividad térmica del aire (W/m. °C) (ecuación (18)).

El número de Reynolds para el aire ambiente, se determina según la siguiente función (ecuación (17)).

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (17)$$

Donde: v - velocidad del aire (m/s). D - diámetro de la tubería (m). ρ - densidad del aire (kg/m³) (ecuación (19)). μ - coeficiente dinámico de viscosidad del aire (Pa·s) (ecuación (21)).

Las propiedades termofísicas del aire son necesarias para el cálculo del intercambio de calor durante el transporte del combustible por tuberías, las mismas pueden ser determinadas a través de las ecuaciones (18)-(21); funciones empíricas reportadas por [14]-[16].

$$k = 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot T_p \quad (18)$$

$$\rho = \frac{353,44}{T_p + 273,25} \quad (19)$$

$$C_p = 999,2 + 0,1434 \cdot T_p + \dots + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot T_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot T_p^3 \quad (20)$$

$$\mu = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot T_p \quad (21)$$

Donde: k - coeficiente de conductividad térmica del aire (W/m.°C). ρ - densidad del aire (kg/m³).

c_p - capacidad calorífica del aire a presión constante (J/kg.°C), μ - coeficiente dinámico de viscosidad del aire (Pa.s), T_p - temperatura pelicular (°C).

La temperatura pelicular se determina mediante la ecuación (22).

$$T_p = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (22)$$

Siendo: t_a - temperatura del aire (°C), t_s - temperatura de la superficie (°C).

Modelo para la determinación de la variación de temperatura del fluido en tuberías

Para determinar la variación de temperatura en el conducto se utiliza la expresión (ecuación (23)) propuesta por [2].

$$T_f - T_i = \frac{q_s}{Q_p \cdot \rho_p \cdot c_p} \quad (23)$$

Donde: c_p - capacidad calorífica del petróleo pesado (J/kg.k), Q_p - flujo volumétrico del petróleo pesado (m³/s), T_f - temperatura final del petróleo (°C), T_i - temperatura inicial del petróleo pesado (°C), L - longitud de la tubería (m).

Al combinar la ecuación (6) con la ecuación (8) y la ecuación (16), y sustituida en la ecuación (23), se obtiene la ecuación de variación de temperatura aplicable al transporte de combustibles pesados por tuberías (ecuación (24)).

$$\Delta T = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_e)}{Q_p \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \left[\frac{1}{r_1 \cdot 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \cdot \frac{k_p}{D_i}} + \dots + \frac{1}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \dots + \frac{1}{k_A} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) + \dots + \frac{1}{r_4 \cdot 0,0245 \cdot Re^{0,6} \cdot \frac{k}{D_e}} \right]} \quad (24)$$

Mediante este modelo (ecuación 24), se pueden simular los valores de las propiedades que relacionan dicho combustible para variaciones de la temperatura y del gradiente de velocidad, de esencial aplicación

en la racionalización del transporte por tuberías de fluidos con intercambio térmico, obteniéndose los valores de la variación de temperatura en el transporte de combustible pesado.

Técnica experimental

El estudio y validación de los parámetros del modelo se realizó a escala industrial. La configuración está equipada con equipos y accesorios que permiten un registro de alta calidad, control variable y procesamiento posterior mediante el almacenamiento de datos en un programa de recolección. El experimento se realizó de acuerdo con el cambio de temperatura de 40 ~ 65 °C, y se obtuvieron datos para la verificación del modelo de gradiente de temperatura para 0,2 m y 0,3 m, que son diámetros representativos de las instalaciones industriales.

El número de liberaciones experimentales se determinó aplicando un plan de varias fases. Dependiendo del nivel determinado de cada variable, se establecen un mínimo de ocho niveles de caudales volumétricos para dos diámetros de tubería para dos repeticiones experimentales. La confiabilidad de los resultados experimentales por el modelo teórico se confirma a través del error relativo, es decir, la diferencia entre el coeficiente del valor experimental “ X_{exp} ” de potencia de flujo y el valor teórico “ X_{teo} ” obtenido del modelo, para las mismas condiciones experimentales. El error relativo puntual (EP) se calcula por la siguiente expresión (ecuación (25)):

$$E_p = \left| \frac{X_{teo_{exp}}}{X_{exp}} \cdot 100 \right| \quad (25)$$

Selección de las variables

En cuanto al modelo y enfoque desarrollado [1], [3], [11], [15] encontró que las pérdidas de calor en las tuberías durante el transporte de petróleo pesado dependían básicamente de los siguientes factores:

- Diámetro de la tubería.
- Flujo volumétrico de combustible en la tubería.
- Temperatura media de transporte del combustible.
- Diagramas geométricos de líneas de transmisión.

Se realizó un estudio de los parámetros y modos de transporte de combustible a escala industrial. La instalación cuenta con equipos y accesorios que permiten un mejor registro y control de las

variables, así como su posterior procesamiento mediante el programa de adquisición de datos Intouch 9.0 (Figura 2).

Los datos de validación del modelo, se obtuvieron en el intervalo de temperaturas de 55 a 69 °C, tomadas de forma aleatoria, obtenidos para los diámetros 0,2 m, 0,3 m y 0,4 m.

La instalación experimental cuenta con los siguientes instrumentos: flujómetros; termopares y manómetros.

RESULTADOS

Comprobación del modelo de variación de temperatura en la tubería

El objetivo radicó en comprobar el modelo propuesto para gradiente de temperaturas en las tuberías (ecuación 24). Se tuvo en cuenta la temperatura inicial (t_i) y la temperatura exterior promedio (t_e), así como los radios de la tubería (r_1 ; r_2 ; r_3 ; r_4), descritos en la Tabla 2. Se determinó el coeficiente de convección del aire y el del combustible, también se consideró la conductividad térmica de los materiales (k_A ; k_B ; k_C) según los parámetros dados en la Tabla 1.

Tabla 2. Relación de radios de las tuberías de conducción del combustible pesado.

Diámetro de la tubería (m)		0,2	0,3	0,4
Radios de tubería con aislamiento (m)	r_1	0,1	0,15	0,2
	r_2	0,103	0,153	0,203
	r_3	0,128	0,178	0,228
	r_4	0,13	0,18	0,23

Para obtener las variaciones de temperatura, se realizó un muestreo en la instalación, donde se determinaron

los resultados del gradiente de temperatura para tres flujos volumétricos, en busca de una mayor variabilidad de los datos, los cuales se utilizaron para la determinación del error de predicción del modelo, según se indica en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se muestran las diferencias de temperatura para tres diámetros de tuberías y tres flujos volumétricos, con los errores calculados en grados Kelvin y obtenidos los puntos experimentales para dos réplicas. Al comprobar el modelo del gradiente de temperatura en la tubería de transporte del combustible (ecuación (24)), en ninguno de los casos el error sobrepasó el 1,39%, lo que explica la proximidad de la simulación con los valores observados según la literatura. Los errores están estrechamente relacionados con las condiciones de deterioro de los aislamientos y la influencia de perturbaciones [2][13]. Se puede afirmar que la adecuación del modelo propuesto es aceptable para la comprobación y obtención del comportamiento de la temperatura en las tuberías de transporte del combustible.

Análisis del comportamiento de simulación del coeficiente de convección del petróleo pesado

Para el análisis del comportamiento del coeficiente de convección del petróleo pesado se consideraron las siguientes condiciones: caudal de petróleo de 20 a 160 m³/h; diámetro de tuberías de 0,2m, 0,3m y 0,4 m y temperaturas de 50 y 60 °C. El coeficiente de convección obtenido a partir del comportamiento seudoplásticos del petróleo pesado, se plantea por la Ecuación 8, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 3 y Figura 4.

Mediante la comparación de los resultados planteados en las Figura 3 y Figura 4, se observó



Figura 2. Esquema del sistema de adquisición de datos experimentales, Intouch 9.0.

Tabla 3. Comparación de las variaciones de la temperatura en la tubería.

Q	Diámetros	Longitud	ΔT (°C)				Error (%)
			Teórico	(Exp.) 1	(Exp.) 2	Promedio	
0,015	0,4	104,73	0,44	3,80	3,50	3,65	1,17
	0,3	7,45	0,04	2,50	1,90	2,20	0,79
	0,2	660	3,80	8,25	7,94	8,10	1,55
Error promedio							1,17
0,029	0,4	104,73	0,36	3,30	2,80	3,05	0,98
	0,3	7,45	0,029	1,28	1,17	1,23	0,44
	0,2	660	2,68	7,22	7,30	7,26	1,66
Error promedio							1,03
0,044	0,4	104,73	0,3	5,30	5,60	5,45	1,88
	0,3	7,45	0,023	1,26	1,23	1,25	0,45
	0,2	660	2,03	7,22	6,90	7,06	1,83
Error promedio							1,39

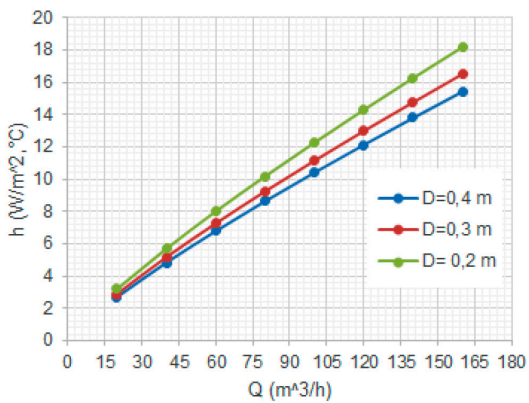


Figura 3. Comportamiento del coeficiente de convección del petróleo pesado para la temperatura de 60 °C.

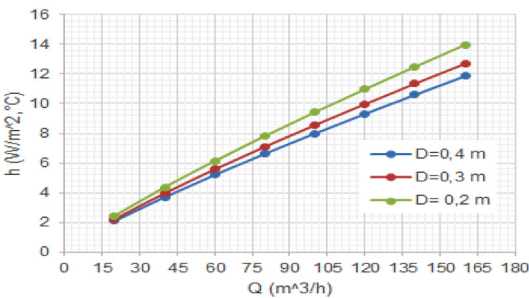


Figura 4. Comportamiento del coeficiente de convección del petróleo pesado para la temperatura de 50 °C.

que para aumento del caudal en las tuberías, el coeficiente de convección del petróleo pesado aumenta de forma progresiva, obteniéndose valores entre 2 y 14 W/m² °C y valores entre 2,4 y 18,3 W/m² °C, para los tres diámetros de tubería analizados; este coeficiente es mayor para los menores diámetros de tuberías, por lo que se deduce que en los sistemas de bombeo con menor diámetro se intensifican las pérdidas de calor, similar a lo que se plantea en otros trabajos de investigaciones reportados [2], [13].

El modelo propuesto (ecuación (8)), incluye el comportamiento pseudoplástico del fluido (no Newtoniano) el cual se relaciona con los parámetros reológicos índice de flujo e índice de consistencia másica, el mismo que se recomienda para el cálculo de pérdidas de presión y potencia hidráulica en fluidos no estacionarios por tuberías [7], [9].

Simulación del comportamiento de la variación de temperaturas en la tubería

Una vez realizada la validación del modelo general de pérdidas de temperatura en tuberías para el transporte de petróleo pesado, se procede a la simulación del comportamiento de la temperatura a lo largo de las tuberías, bajo diferentes condiciones de flujo volumétrico; de las simulaciones se obtienen las curvas de comportamiento mostradas en la Figura 5 y la Figura 6.

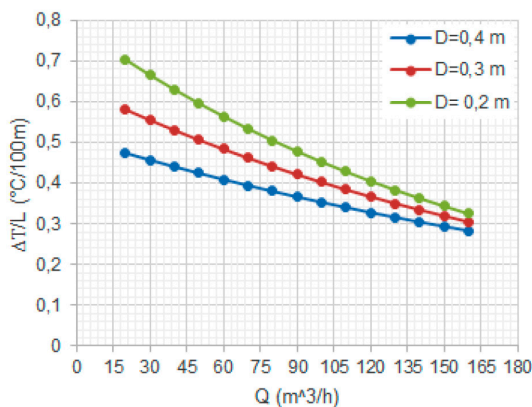


Figura 5. Comportamiento de la variación de temperatura en las tuberías de diámetros 0,2 m; 0,3 m y 0,4 m; para una distancia de 100 m de tubería horizontal.

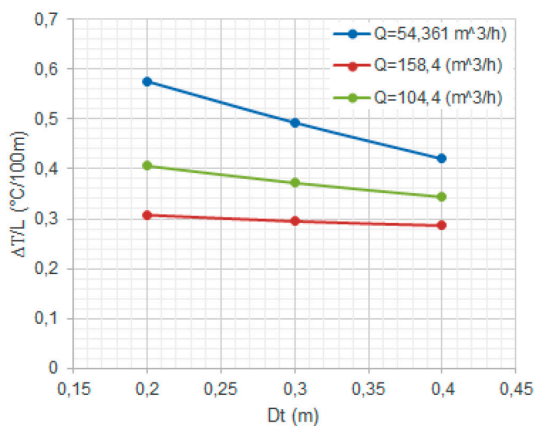


Figura 6. Comportamiento de la variación de temperatura en función del diámetro de tubería; para una distancia de 100 m de tubería horizontal.

Del análisis de comportamiento mostrado en la Figura 5, se observa que para mayores valores de flujo volumétrico se obtienen menores variaciones de temperaturas, siendo las mayores variaciones en la tubería de menor diámetro, como se puede observar en la Figura 6, la cual se analiza para los tres flujos volumétricos más frecuentes de la instalación de flujo en estudio.

Según se puede observar en la Figura 6, los valores obtenidos de variación de temperatura en 100 m de tubería, no sobrepasan en 0,58 °C para el flujo

volumétrico menor, en el cual se obtienen las menores pérdidas.

A partir del análisis del comportamiento de las variaciones de la temperatura en tuberías, se evidencia la importancia de incluir el comportamiento reológico del fluido en las estimaciones de variaciones de temperatura en tuberías que transportan fluidos no Newtonianos con comportamiento seudoplásticos.

CONCLUSIONES

La validez del procedimiento propuesto para determinar las variaciones de temperatura, en sistemas de tuberías que transportan fluidos no Newtonianos con comportamiento seudoplásticos; dependerá de la precisión de los valores de entrada que se proporcionan, como el coeficiente de convección del fluido, considerándose el comportamiento de las propiedades termofísicas.

Los modelos propuestos para obtención de las propiedades termofísicas del petróleo pesado (ecuaciones (10)-(14)), solo pueden utilizarse dentro de su rango validado; al aplicarse a situaciones que caen fuera de ese rango estos deben ser validados para estas nuevas condiciones.

El modelo de variación de temperaturas propuesto (ecuación (24)), es válido para tuberías que transportan fluidos donde se considera el intercambio térmico. Para tuberías que transportan petróleo con comportamiento seudoplástico, se deben considerar los valores del coeficiente de convección del fluido, obtenidos con la incorporación del índice de flujo y el índice de consistencia másica.

Según los resultados de simulación, pérdidas de temperatura en las tuberías aumentan con aumento del caudal y la disminución del diámetro de tubería; las que se encuentran con un valor máximo de 0,58 °C para tuberías analizada de menor diámetro (0,2 m) y el menor flujo volumétrico (54,361 m³/h).

REFERENCIAS

- [1] D. García-Muñoz, and F. Vargas-Galvis, "Aislamiento térmico de tuberías de acero que transportan fluidos calientes a partir de recubrimientos elaborados mediante proyección térmica", *Tecnológicas*,

- vol. 20, no. 40, pp. 53-69, 2017, doi: 10.22430/22565337.705.
- [2] H. Laurencio, "Método para la determinación de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650", Tesis de doctorado, Universidad de moa, Holguín, Cuba, 2012, pp. 35-57.
- [3] A. Oosterkamp, "Study of soil heat transfer of a natural gas pipeline," *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 90-101, 2017, doi: 10.17736/ijope.2017.bn10.
- [4] V. markov-Evgeniy, A. Pulnikov-Sergey, S. Sysoev-Yuri, and V. Rachkov, "Soil bedding optimization for protection chilled pipelines from the frost-susceptible soil," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 15, no. 6, pp. 4273-4287, 2020.
- [5] E. Golab, B. Vahedi, A. Jain, R. Taylor, and K. Vafai. "Laminar forced convection in a tube with a nano-encapsulated phase change materials: minimizing exergy losses and maximizing the heat transfer rate," *Journal of Energy Storage*, vol. 65, no. 15, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107233.
- [6] B. Huang, E. Seyed, and S. mujumdar, "Laminar forced convection heat transfer of a non newtonian fluid in the entrance region of a square duct with different boundary conditions," in *International Heat Transfer Conference 10*, Brighton, Reino Unido, 1994, pp. 231-236, doi: 10.1615/IHTC10.2820.
- [7] H. Laurencio-Alfonso, A. Gilbert-Hernández y Y. Retirado- Mediaceja, "Modelado de la viscosidad aparente de un petróleo crudo de 11°API con comportamiento no newtoniano", *Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 25, no. 4, pp. 674-680, 2017, doi: 10.4067/S0718-33052017000400674.
- [8] V. Fetisov, V. Ilyushin, G. Vasiliev, A. Leonovich-Igor. J. Müller, M. Riazzi, and H. Mohammadi, "Development of the automated temperature control system of the main gas pipeline," *Scientific Reports Nature*, vol. 13, no. 1, pp. 1-14, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29570-4.
- [9] H. Laurencio-Alfonso, Y. Retirado-mediaceja, J. Falcón-Hernández, E. Torres-Tamayo y M. Salazar-Corrales, "Modelo para simulación de la potencia de flujo en tuberías conductoras de petróleo pesado con comportamientoseudoplástico", *Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 30, no. 1, pp. 171-179, 2022, doi: 10.4067/S0718-33052022000100171.
- [10] J. Romero, H. Saad, I. Pereira y M. Romero, "Influence of heat transfer on two-phase flow behavior in onshore oil pipelines", *Ingeniería e Investigación*, vol. 36, no. 1, pp. 14-22, 2016, doi:10.15446/ing.investig.v36n1.51570.
- [11] R. Ovando-Castelar, A. García-Gutiérrez, J. martínez-Estrella, I. Canchola-Félix, P. Galván, Ca. Miranda-Herrera and O. Mora-Pérez, "Determinación de pérdidas de calor en la red de transporte de vapor del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, con base en el estado físico del aislamiento térmico de vapor-ductos", *Geotermia*, vol. 24, no. 2, pp. 11-24, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.geotermia.org.mx/app/assets/media/2017/11/Geotermia-Vol24-2.pdf>
- [12] F. Incropera, D. de Witt, T. Bergman, and A. Lavine, "One-dimensional steady-state conduction," in *Fundamentals of Heat and mass Transfer*, 6th ed., New Jersey, EEUU: John Wiley & Sons, 2013.
- [13] S. Trapeznikov, "Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente", Tesis de Doctorado, Instituto de minas de San Petersburgos, Rusia, pp. 89-96, 2011.
- [14] G. Tiwari, *Solar Energy: Fundamentals, design, modelling and applications*, 2nd., ed. Oxford, EEUU: Alpha Science International, 2013, pp. 45-51.
- [15] O. Adeodu and A. Daniyan, "Development and Optimisation of Drying Parameters for Low-Cost Hybrid Solar Dryer Using Response Surface method," *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 23-35. 2018, doi: 10.4236/jsbs.2018.82002.
- [16] A. Gilbert-Hernández, Y. Retirado-Mediaceja, H. Laurencio-Alfonso, A. Palacios-Rodríguez y E. Góngora-Leyva, "Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor", *Minería y Geología*, vol. 32, no. 2, pp. 21-37, 2016.