

Selección del espesor de aislamiento térmico para tuberías de petróleo con traza de vapor

Amauris Gilbert-Hernández
Héctor L. Laurencio-Alfonso
Isnel Rodríguez-González
Yoalbys Retirado-Mediaceja
Enrique Torres-Tamayo

Resumen

Se desarrolló un modelo matemático que permite seleccionar el espesor de aislamiento térmico para tuberías de trasiego de petróleo con traza de vapor, el cual incorpora características termofísicas y de flujo del combustible trasegado (CM-650). Utilizando el valor de espesor obtenido por el modelo y normalizado, para manta de lana de roca Spintex 322-G-70S, se realizó un análisis comparativo entre una instalación con traza de vapor y otra con las tuberías dispuestas de forma independiente, evidenciándose en la primera una reducción de las pérdidas energéticas de 19,11 W por metro de tubería, un mejoramiento de las condiciones de flujo y una disminución del gradiente de temperatura del combustible

Palabras clave: aislamiento térmico; traza de vapor; trasiego; petróleo

Insulation thickness selection for fuel oil transfer piping with steam trace

Abstract

A mathematical model was designed to select the thickness for the insulation to be installed on the fuel oil transfer pipeline with steam trace. This includes the (CM-650) fuel oil thermo-physical characteristics and flow rate. Using the thickness obtained by the model and standardized for Spintex 322-G-70S rock-fiber, a comparative analysis was conducted between the piping with steam trace and another one installed separately. The results indicated a total energy loss of 19,11 W per tube meter, improvements to the flow conditions and a reduction in the fuel temperature gradient in the first piping system.

Keywords: insulation; steam trace; fuel oil transfer pipe

1. INTRODUCCIÓN

El medio por excelencia para el transporte de combustible en tierra lo constituye el empleo de tuberías (oleoducto), siendo esta la vía más económica y rápida de trasegar cantidades considerables. Cuando se transportan petróleos con altas viscosidades, o a grandes distancias, la incorporación de trazas de vapor aisladas térmicamente permite mantener un nivel más estable de temperatura y viscosidad (Monteagudo *et al.* 1998; Gilbert *et al.* 2012).

En los líquidos y suspensiones la disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura ha sido reportada por distintos investigadores (Balagui *et al.* 2010; Bourbon *et al.* 2010; Chenlo *et al.* 2010; Colby 2010; Laurencio 2012). Para fluidos pseudoplásticos, como el crudo mejorado (CM-650), el parámetro de la viscosidad más afectado por la temperatura es el índice de consistencia másica, siendo poca su incidencia en el índice de flujo para el modelo de ley de potencia (Branco & Gasparetto 2003; Da Silva *et al.* 2005; Dak *et al.* 2007; Sánchez *et al.* 2008; Andrade *et al.* 2009; Vandresen *et al.* 2009).

La disminución de la viscosidad se debe a dos efectos principales, la reducción de la viscosidad del medio dispersante y el debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura (Garcell 1993; Laurencio & Delgado 2008; Cárdenas & Fonseca 2009; Trapeznikov 2011).

Paul (1978) y Peláez & Stachenco (1999) plantean que por debajo del punto de enturbiamiento presente a temperaturas moderadas, ciertos petróleos crudos tienen un rápido aumento de viscosidad debido a la precipitación de parafina y debilitamiento del enlace entre componentes. La viscosidad de los líquidos (aceites y petróleos) ha sido ampliamente tratada, mostrando, para la mayoría de los casos, una disminución exponencial con el aumento de la temperatura (Reid & Sherwood 1966; Andrade *et al.* 2009; Vandresen *et al.* 2009; Trapeznikov 2011).

En la práctica, el método más empleado (Laurencio & Delgado 2008; Nikolaev 2011, com. oral) para disminuir la viscosidad del combustible es la aplicación de temperatura, sin embargo, a distancias considerables la temperatura no se mantiene estable. Este problema tiene lugar en las instalaciones de transporte de crudo de las plantas metalúrgicas productoras de níquel de Moa, cuya longitud excede de

5 km, dificultad que pudiera ser atenuada al incorporar la traza de vapor a la tubería y aislándolas térmicamente.

La selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías con trazas de vapor (Figura 1a) se obtiene a partir de un balance de energía realizado en la instalación de trasiego de petróleo (Gilbert *et al.* 2012), donde todo el calor disipado por la traza de vapor (q^A) se fracciona en el calor absorbido por la tubería principal (q^C), las pérdidas de calor a través de la sección aislada del oleoducto (q^P) y la cavidad termoaislada (q^E). Expresado matemáticamente queda de la siguiente forma:

$$q^A = q^C + q^P + q^E \quad (1)$$

La tubería principal debe aislarse conjuntamente con la traza de vapor para formar una cavidad termoaislada; esta cavidad se monta a partir de materiales flexibles. Las cotas, superficies de cálculo, así como su estructura básica se muestran en la Figura 1b.

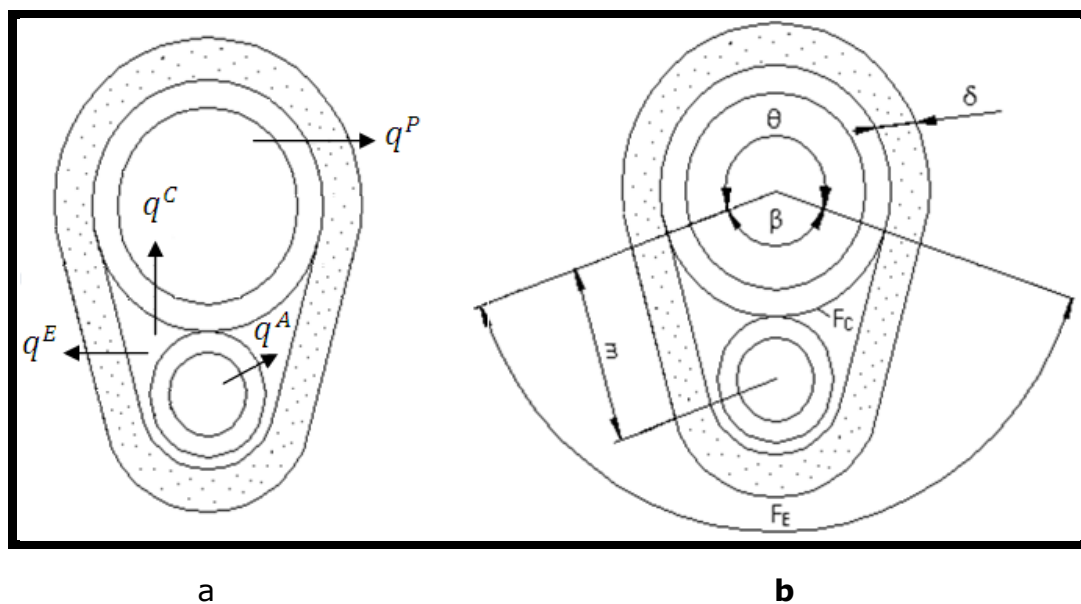


Figura 1. Vista frontal de una tubería con traza de vapor.

El presente trabajo tiene como objetivo establecer un modelo matemático para la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías de trasiego de petróleo crudo con traza de vapor, y evaluar el comportamiento energético en instalaciones con traza y sin esta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Pérdida de calor desde la sección aislada de la tubería principal

En una instalación de transporte de combustible, las pérdidas de calor se producen por todo el área de la superficie aislada, no mostrándose este comportamiento en un sistema con trazas de vapor; donde parte del flujo de calor se transfiere considerando el ángulo formado por la parte de la tubería principal sobre la cual se dispone el aislamiento. El calor disipado se puede determinar por la siguiente expresión:

$$q^P = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_P - t_0}{R_P} \quad (2)$$

Siendo:

$$\theta = 360 - \beta \quad (3)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{2r_2 - 2r_A - 0,02}{2r_2 + 2r_A} \right) \quad (4)$$

$$R_P = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_P} \quad (7)$$

$$R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} \quad (8)$$

$$R_4 = \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \quad (9)$$

Donde:

q^P : Pérdida de calor desde la tubería principal hacia el medio exterior por unidad de longitud; [W/m].

θ : Ángulo formado por la parte de la tubería sobre la cual se dispone el aislamiento; [grados sexagesimales].

t_P : Temperatura a la cual debe transportarse el petróleo en la tubería principal; [K].

t_0 : Temperatura ambiente a la que se realiza el cálculo; [K].

R_P : Resistencia térmica desde el combustible hasta el aire ambiente; [m·K/W].

β : Ángulo de incidencia del calor de la tubería principal desde el aire en la cavidad termoaislada; [grados sexagesimales].

r_2 : Radio exterior de la tubería principal; [m].

r_A : Radio exterior de la traza de vapor; [m].

R_1 : Resistencia térmica por convección desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal; [m·K/W].

R_2 : Resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería principal; [m·K/W].

R_3 : Resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de aislamiento; [m·K/W].

R_4 : Resistencia térmica por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente; [m·K/W].

h_1 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal; [W/m²·K].

r_1 : Radio interior de la tubería principal; [m].

k_p : Conductividad térmica del material de la tubería principal; [W/m·K].

r_3 : Radio exterior del aislamiento colocado en la tubería principal; [m].

k_A : Conductividad térmica del material aislante; [W/m·K].

h_2 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente; [W/m²·K].

El coeficiente de convección para el crudo mejorado 650 se determina por la expresión propuesta por Laurencio (2012), la cual recoge características termofísicas y de flujo del combustible; la misma fue obtenida a partir de las recomendaciones realizadas por Incropera y Dewitt (2003).

$$h_1 = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \cdot \frac{k_C}{2r_1} \quad (10)$$

Donde:

Re : Número de Reynolds; [adimensional].

Pr : Número de Prandtl; [adimensional].

k_C : Conductividad térmica del petróleo; [W/m·K].

Para el aire, el coeficiente de convección se determina por la expresión obtenida a partir de las recomendaciones propuestas por Bergman (2011).

$$h_2 = 0,245 \cdot Re^{0.6} \cdot \frac{k}{D} \quad (11)$$

Donde:

k : Conductividad térmica del aire; [W/m·K].

D : Diámetro exterior del conducto; [m].

2.2 Calor recibido por la tubería principal

Desde la traza de vapor se genera un flujo de calor que queda atrapado en la cavidad termoaislada; este, por diferencia de densidades, se eleva a la parte no aislada de la tubería principal denominada área de calentamiento, siendo por esta zona donde se transmite el calor:

$$q^c = \frac{\beta}{360} \cdot h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p) \quad (12)$$

Donde:

q^c : Calor que recibe la tubería principal desde el aire en el interior de la cavidad por unidad de longitud; [W/m].

t_c : Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada; [K].

h_3 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el aire en el interior de la cavidad a la tubería principal; [W/m²·K].

Los coeficientes de transferencia de calor por convección (h_3 ; h_4), en el interior de la cavidad termoaislada, consideran la transferencia de calor entre el aire y la superficie interior del conducto. Según Monteagudo et al. (1998), es posible establecer la dependencia de los coeficientes en función de la temperatura y el diámetro de la tubería, tal como se expone en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Coeficiente de transferencia de calor h_3

Temperatura del vapor	411	424	437	450	463	476
Coeficiente h_3	13,5	14	14,5	15	15,5	16

2.3 Temperatura del aire en la cavidad

Para determinar la temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada es conveniente realizar un balance de energía. En el mismo se parte del principio que todo el calor disipado por la traza de vapor se destina a calentar la tubería principal más las pérdidas al medio ambiente.

Calor disipado desde la traza de vapor:

$$q^A = \frac{F_A}{R_A} \cdot (t_V - t_c) \quad (13)$$

Siendo:

$$F_A = \pi \cdot 2r_A \quad (14)$$

$$R_A = \frac{1}{h_4 \cdot 2\pi \cdot r_A} \quad (15)$$

Donde:

q^A : Calor disipado desde la traza de vapor por unidad de longitud; [W/m].

F_A : Superficie de la traza de vapor por unidad de longitud; [m²/m].

t_V : Temperatura del vapor en el interior de la traza; [K].

R_A : Resistencia térmica desde la traza de vapor al aire en la cavidad termoaislada; [m²·K/W].

h_4 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde la traza de vapor hasta el aire en la cavidad; [W/m²·K].

Tabla 2. Coeficiente de transferencia de calor h_4

Temperatura del vapor	Diámetro de la tubería acompañante [mm]				
	25	50	75	100	150
411	20	18,38	16,76	15,14	11,90
424	21	19,22	17,44	15,66	12,10
437	22	20,44	18,88	17,32	14,20
450	23	21,41	19,82	18,23	15,05
463	24	22,44	20,88	19,32	16,20
476	25	23,47	21,94	20,41	17,35

Calor que absorbe la tubería principal:

$$q^c = \frac{F_C}{R_C} \cdot (t_c - t_p) \quad (16)$$

Siendo:

$$F_C = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot 2r_2 \quad (17)$$

$$R_C = \frac{1}{h_3} \quad (18)$$

Donde:

F_C : Superficie de cálculo de la tubería principal por unidad de longitud; [m²/m].

R_C : Resistencia térmica por convección desde el aire en la cavidad termoaislada a la tubería principal; [m²·K/W].

La resistencia R_C se determina según la expresión de resistencia térmica establecida para superficies planas, considerando la misma de radio de pequeña curvatura.

Calor que se pierde al medio:

$$q^E = 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_C - t_O) \quad (19)$$

Siendo:

$$F_E = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m \quad (20)$$

$$m = \sqrt{(2r_2 - 0,01) \cdot (2r_A + 0,01)} \quad (21)$$

$$R_E = \frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2} \quad (22)$$

Donde:

q^E : Calor que se pierde al medio desde la cavidad por unidad de longitud; [W/m].

F_E : Área superficial del aislamiento que no incluye la porción que se dispone sobre la tubería principal, por unidad de longitud; [m²/m].

R_E : Resistencia térmica desde el aire en la cavidad termoaislada al exterior; [m²·K/W].

m : Distancia entre los centros de la traza y la tubería principal; [m].

δ : Espesor de aislamiento térmico; [m].

h_5 : Coeficiente de transferencia de calor por convección desde el aire en la cavidad a la superficie interior del aislamiento; [W/m²·K].

Para establecer el coeficiente de transferencia de calor h_5 , la bibliografía consultada (Monteagudo et al. 1998; Isover 2004) recomienda asumir un valor de 12 W/m²·K sin que se introduzca un error que influya significativamente en el resultado final.

El calor disipado por la tubería acompañante es numéricamente igual a la suma del calor absorbido por la tubería principal y el que se pierde al medio; por lo que al despejar la temperatura del aire en la cavidad, según sus ecuaciones matemáticas (13; 16; 19), quedaría planteado de la siguiente forma:

$$t_C = \frac{\frac{F_A}{R_A} \cdot t_V + \frac{F_C}{R_C} \cdot t_p + 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot t_O}{\frac{F_A}{R_A} + \frac{F_C}{R_C} + 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E}} \quad (23)$$

2.4 Espesor de aislamiento

Asumiendo un flujo de calor constante que permita mantener un nivel estable de temperatura del petróleo, y despreciando el calor almacenado en la tubería principal, se igualan las expresiones 2 y 12, lo que compensa la entrada y salida de calor; desarrollando las expresiones resulta:

$$\frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{R_p} = \frac{\beta}{360} \cdot h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p) \quad (24)$$

Despejando la resistencia térmica total en la tubería principal se obtiene:

$$R_p = \frac{\theta}{\beta} \cdot \frac{t_p - t_o}{h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p)} \quad (25)$$

Sustituyendo 6, 7, 8, 9, 10 en 25 e introduciendo un coeficiente para considerar las pérdidas por sujeción y anclaje igual a 1,25; y despejando el espesor de aislamiento se obtiene:

$$\delta = r_2 \cdot \text{Exp} \left[\left[\frac{\theta}{\beta} \cdot \frac{1,25(t_p - t_o)}{h_3 \cdot \pi \cdot 2r_2 \cdot (t_c - t_p)} - \left(\frac{1}{\left(0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \cdot \frac{k_c}{D_i} \right) \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3'} \right)} \right] \cdot 2\pi \right] \cdot k_A - r_2 \quad (26)$$

Para determinar el valor de t_c y δ es necesario aplicar un procedimiento iterativo hasta lograr la convergencia del método, para lo cual se asume un valor inicial de r_3' , y se computa mediante el uso de las expresiones 23 y 26.

2.5 Técnica operatoria

Se realizó un análisis comparativo entre una instalación con traza de vapor y otra con las tuberías dispuestas de forma independiente (situación actual), para el valor obtenido del espesor de aislante. Se tomó como referencia la instalación industrial, cuyas características se describen en la Tabla 3, ubicada entre el puerto de Moa y la planta productora de níquel Comandante Ernesto Che Guevara. Se experimentó con variaciones de temperaturas del vapor (de 411 a 476 K), del combustible (de 313 a 343 K), y también se consideraron las posibles variaciones de la temperatura ambiente. Se simuló la caída de temperatura del combustible en el oleoducto con traza de vapor y sin esta para distancias de 1 020, 2 040, 3 060, 4 080 y 5 100 m.

Tabla 3. Características de la instalación de transporte de crudo

Parámetro	Valor
Radio interior de la tubería principal	0,125 m
Radio exterior de la tubería principal	0,140 m
Radio exterior de la traza de vapor	0,086 m
Longitud total de la instalación	5 100 m
Conductividad térmica de las tuberías	60,5 W/m·K
Flujo de petróleo crudo	0,05 m ³ /s

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El espesor de aislamiento obtenido para manta de lana de roca Spintex 322-G-70, fabricada por Isover, no mostró correspondencia con ninguno de los productos establecidos por el fabricante para este tipo de aislamiento, por lo que se fijó un valor normalizado.

Tabla 4. Resultados del cálculo para espesor normalizado

Magnitud	Símbolo	Valor
Ángulo sobre el cual se dispone el aislamiento	θ	282°
Angulo de calentamiento de la tubería principal	β	78°
Superficie de la tubería acompañante	F_A	0,540 m ² /m
Superficie de cálculo de la tubería principal	F_C	0,190 m ² /m
Área superficial del aislamiento que no incluye la porción que se dispone sobre la tubería principal	F_E	0,628 m ² /m
Conductividad térmica media del material aislante	k_A	0,036 W/m·K
Resistencia térmica desde la tubería acompañante a la cavidad termoaislada	R_A	0,155 m ² ·K/W
Resistencia térmica desde la cavidad termoaislada a la tubería principal	R_C	0,074 m ² ·K/W
Resistencia térmica desde la cavidad termoaislada al exterior	R_E	1,261 m ² ·K/W
Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada	t_c	374,484 K
Resistencia térmica desde el combustible hasta la pared interior de la tubería principal	R_1	0,013 m·K/W
Resistencia térmica que presupone el espesor de la tubería principal	R_2	0,0002 m·K/W
Resistencia térmica que presupone el espesor de aislamiento	R_3	1,112 m·K/W
Resistencia térmica desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente	R_4	0,059 m·K/W
Pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior	q^P	27,774 W/m
Calor que recibe la tubería principal desde el aire en el interior de la cavidad	q^C	80,996 W/m
Calor que se pierde al medio desde la cavidad	q^E	45,783 W/m
Calor perdido usando traza de vapor	q^T	73,557 W/m
Calor que se perdería si no se usara traza de vapor	q^S	92,665 W/m
Espesor del aislamiento a emplear	δ	0,04 m

Para el espesor de aislamiento normalizado (0,04 m) se recalcularon los parámetros característicos (Tabla 4), y se realizó un análisis mediante gráficos comparativos.

Empleando los modelos establecidos por Gilbert (2012) y Pérez (2013) se realizó una comparación de las pérdidas energéticas de la instalación con las tuberías independientes (q^S), y con la traza de vapor instalada (q^T); mostrando que para el espesor de 0,04 m las pérdidas energéticas disminuyen en 19,11 W por cada metro de tubería.

3.1 Influencia de la temperatura en las pérdidas energéticas

Al aumentar la temperatura ambiente en el posible rango de operación, se observó una disminución de los valores de las pérdidas energéticas (Figura 2), lo cual refleja la marcada incidencia de los parámetros climáticos en el proceso de transporte de crudo por sistemas que emplean trazas de vapor aislados térmicamente, acentuándose la temperatura ambiental.

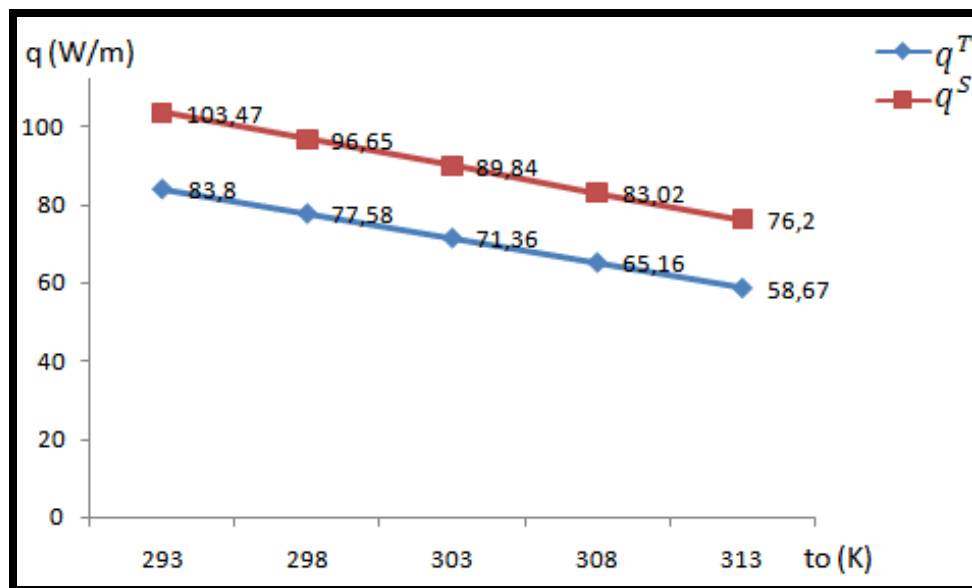


Figura 2. Influencia de la temperatura ambiente en las pérdidas energéticas.

Realizando el ajuste del comportamiento de las pérdidas energéticas a una tendencia lineal se obtuvieron las expresiones en función de la temperatura ambiente (ecuación 27 y 28), con un coeficiente de correlación múltiple en ambos casos de 0,99. Mediante las ecuaciones ya descritas se estableció el comportamiento de las pérdidas energéticas, a partir de las variaciones de la temperatura ambiente.

$$q^T = 451,1 - 1,253 \cdot t_o \quad (27)$$

$$q^S = 502,9 - 1,363 \cdot t_o \quad (28)$$

Las funciones obtenidas (ecuación 27 y 28) posibilitan simular el comportamiento de las pérdidas energéticas al variar la temperatura t_o , las mismas se recomiendan emplear solo para las condiciones experimentales para las que fueron ajustadas.

Similar análisis se realizó para determinar la influencia de la temperatura del vapor en las pérdidas energéticas, mostrando un aumento de las mismas al incrementar la temperatura del vapor en la traza (Figura 3), lo cual enmarca otra variable con incidencia significativa en el proceso.

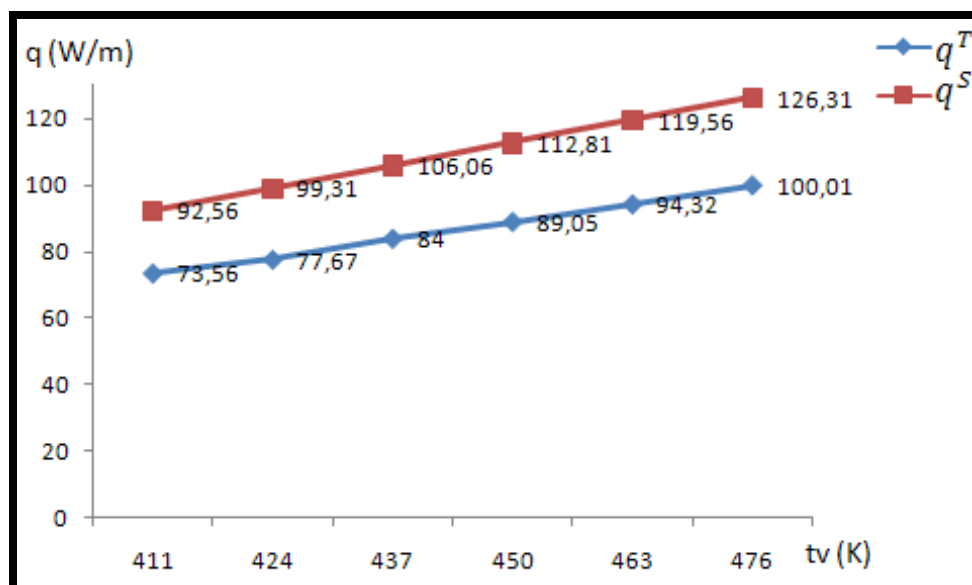


Figura 3. Influencia de la temperatura del vapor en las pérdidas energéticas.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 3, se correlacionó el comportamiento de las pérdidas energéticas en función de la temperatura del vapor, determinándose las ecuaciones 29 y 30, obtenidas con un coeficiente de correlación múltiple de 0,99; lo que satisface los resultados esperados mediante el análisis de la adecuación del modelo.

$$q^T = -96,08 + 0,411 \cdot t_V \quad (29)$$

$$q^S = -120,8 + 0,519 \cdot t_V \quad (30)$$

Finalmente, se simuló realizando variaciones en la temperatura del combustible, para un rango inferior a los 343 K (70 °C), según las especificaciones de CUPET. Lo cual mostró, al igual que la temperatura del vapor, un incremento de las pérdidas energéticas con el aumento de la temperatura del combustible (Figura 4).

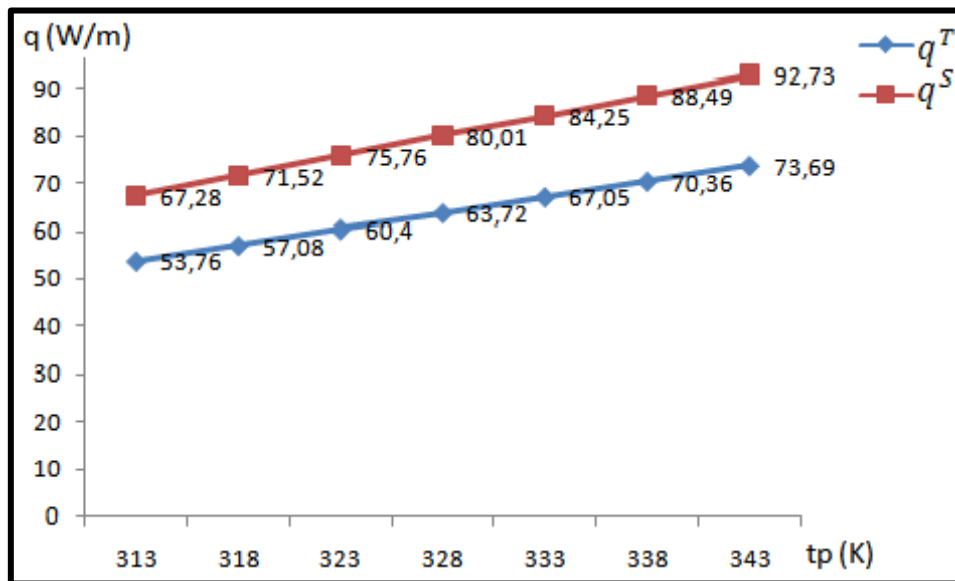


Figura 4. Influencia de la temperatura del combustible en las pérdidas energéticas.

Para los valores simulados de temperatura del combustible se observó una tendencia lineal, para la cual se obtienen la ecuaciones 31 y 32, con un coeficiente de correlación múltiple de 0,99; considerándose satisfactorios los resultados de predicción.

$$q^T = -154,1 + 0,664 \cdot t_p \quad (31)$$

$$q^S = -198,2 + 0,848 \cdot t_p \quad (32)$$

3.2 Simulación de la caída de temperatura en el oleoducto

Para determinar las variaciones de temperatura en las tuberías, según el modelo propuesto por Laurencio (2012), se tuvo en cuenta la temperatura inicial de trasiego y la temperatura ambiental promedio, así como el espesor del aislante térmico, definido en la Tabla 4. Se determinó el coeficiente de convección del aire y del combustible para las condiciones del transporte; también se consideró la conductividad térmica de la tubería principal y del aislante, donde se obtuvo la relación de variación de temperatura del combustible, en la instalación con traza y en la instalación sin traza de vapor; se observó la ganancia de calor que se obtiene en la primera de estas.

En la Figura 5 se expone el comportamiento de la temperatura del combustible en el oleoducto, para una temperatura inicial de trasiego de 343 K (70 °C), la cual se establece como la máxima a la que debe transportarse el combustible y la más empleada para operar.

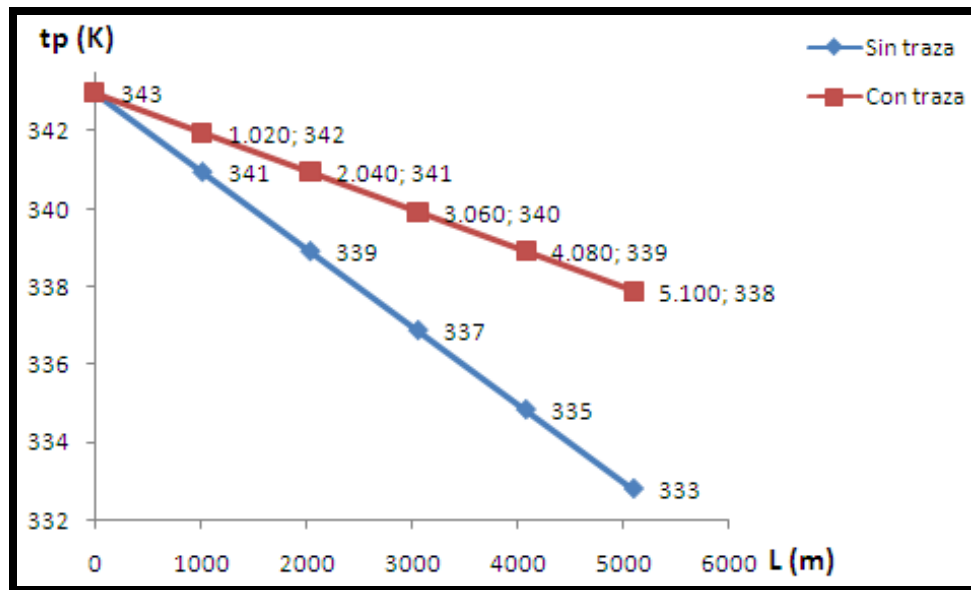


Figura 5. Caída de temperatura del combustible en el oleoducto.

Dicha figura demuestra que existe una disminución de la caída de temperatura con el empleo de la traza de vapor aislada térmicamente, reduciendo la variación de la temperatura del combustible desde su ingreso en el oleoducto hasta su descarga, lo cual permite mantener un nivel más estable de operación, factor necesario cuando se transportan fluidos con altas viscosidades como es el caso del crudo mejorado 650. Por su importancia práctica se correlacionaron los valores de temperatura en función de la longitud del oleoducto, para obtener modelos simples que describan el fenómeno, los mismos mostraron una tendencia lineal para una buena adecuación del modelo, alcanzando el coeficiente de correlación múltiple valores de 0,99 en ambos casos.

$$t_{p \text{ con traza}} = 343 - 0,001 \cdot L \quad (33)$$

$$t_{p \text{ sin traza}} = 343 - 0,002 \cdot L \quad (34)$$

4. CONCLUSIONES

La expresión 26 constituye el modelo matemático teórico para la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías de trasiego de petróleo crudo (CM-650) con trazas de vapor, la misma incorpora como elemento novedoso características termofísicas y de flujo del combustible que se trasiega.

Al incorporar al oleoducto la traza de vapor, con espesor de aislamiento de 0,04 m, usando como aislante manta de roca Spintex 322-G-70, se produce una reducción de las pérdidas energéticas de 19,11 W por metro de tubería,

mejoran las condiciones de flujo y disminuye el gradiente de temperatura del combustible en el oleoducto.

5. REFERENCIAS

- ANDRADE, R.; TORRES, R. & MONTES, E. 2009: Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpas orgánicas. *Revista de la Facultad de Agronomía* 26(3): 599-612.
- BALAGUI, S.; MOHAMMADIFAR, M. & ZARGARAAN, A. 2010: Physicochemical and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of iranian astragalus. *Journal of Food Biophysics* 15(4): 59-71.
- BERGMAN, T.; LAVINE, A.; INCROPERA, F. & DEWIT, D. 2011: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New Jersey. ISBN 13 978-0470-50197-9.
- BRANCO, I. & GASPARETTO, C. 2003: Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices. *Science and Alimentary Technologic* 23(1): 166-171.
- BOURBON, A.; PINHEIRO, A.; RIBEIRO, C.; MIRANDA, C.; MAIA, J.; TEIXERA, J. & VICENTE, A. 2010: Characterization of galactomannans extracted from seeds of gleditsia triacanthos and sophorajaponica through shear and extensional rheology. *Journal of Food Hydrocolloid* 12(4): 184-192.
- CÁRDENAS, J. & FONSECA, E. 2009: Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiado desde la relación viscosidad y temperatura. *Revista EIA* 12(2): 125-137.
- CHENLO, F.; MOREIRA, R. & SILVA, C. 2010: Rheological behavior of aqueous systems of tragacanth and guar gums with storage time. *Journal of Food Engineering* 32(6): 107-113.
- COLBY, R. 2010: Structure and linear viscoelasticity of flexible polymer solutions: comparison of polyelectrolyte and neutral polymer solutions. *Journal of Rheological* 24(9): 425-442.
- DA SILVA, F.; GUIMARAES, D. & GASPARETTO, C. 2005: Rheology of acerola juice, effects of concentration and temperature. *Science and Alimentary Technologic* 25(1): 121-126.
- DAK, M.; VERMA, R. & JAAFFREY, S. 2007: Effect of temperatures and concentration on rheological properties of kesar. *Journal of Food Engineering* 28(4): 1 011-1 015.
- GARCELL, L. 1993: Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica. Informe de investigación. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química.
- GILBERT, A.; PÉREZ, O.; LAURENCIO, H. & RODRÍGUEZ, I. 2012: Selección de espesor de aislamiento térmico para tuberías con trazas de vapor bajo

- criterios técnicos. En: IV ENERMOA. Fórum Tecnológico Especial de Energía. Holguín, Cuba. ISBN 978-959-16-2067-5.
- INCROPERA, F. & DEWITT, D. 2003: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Pueblo y Educación, La Habana.
- ISOVER. 2004: *Manual de aislamiento en la industria*. Saint-Gobain Isover España, Madrid.
- LAURENCIO, H. & DELGADO, Y. 2008: Comportamiento reológico de emulsiones de petróleo pesado en agua. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 16(2): 244-250. Consulta: 15 de dic de 2009. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx>.
- LAURENCIO, H. 2012: *Método para la determinación de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 97 p.
- MONTEAGUDO, J.; PÉREZ, J. & GUERRA, E. 1998: Aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor. *Ingeniería química* 350: 161-167. ISSN 0210-2064.
- PAUL, C. 1978: Effect of chemical structure on the conduction and breakdown of paraffin oil. *Indian Journal Technological* 8(1): 64-78.
- PELÁEZ, C. & STACHENCO, E. 1999: Estudio del efecto del campo magnético en crudos parafínicos por cromatografía de gases de alta resolución. Informe. Ecopetrol-ICP.
- PÉREZ, O. 2013: *Determinación de los parámetros técnico económicos racionales para el transporte de petróleo por tuberías*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- REID, C. & SHERWOOD, K. 1966: *The properties of gases and liquids*. New York, Mc. Graw-Hillbook Company.
- SÁNCHEZ, C.; ORIA, R. & SÁNCHEZ, A. 2008: Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés. En: Simposio Poscosecha, Orihuela, Valencia, España.
- TRAPEZNIKOV, S. 2011: *Fundamentación de los regímenes de temperaturas de trabajo de los oleoductos superficiales en caliente*. Tesis doctoral. Instituto de Minas de San Petersburgos, Rusia.
- VANDRESEN, S.; QUADRI, M.; DE SOUZA, J. & HOTZA, D. 2009: Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices. *Journal of Food Engineering* 29(3): 269-274.

Amauris Gilbert – Hernández aghernandez@ismm.edu.cu
Ingeniero Mecánico. Profesor Instructor.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba

Héctor L. Laurencio – Alfonso hlaurencio@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

Isnel Rodríguez – González irgonzalez@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Departamento de Ingeniería Mecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

Yoalby Retirado – Mediaceja yretirado@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba

Enrique Torres – Tamayo etorrest@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba