

Procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor

Amauris Gilbert-Hernández
Yoalbys Retirado-Mediceja
Héctor L. Laurencio-Alfonso
Amaury Palacios-Rodríguez
Ever Góngora-Leyva

Resumen

Se desarrolló un procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor. Una revisión bibliográfica permitió determinar, en las investigaciones precedentes, limitaciones relacionadas con la selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías al ser aplicadas a los sistemas de transporte con trazas de vapor; ello condujo a la obtención del modelo para el cálculo de la pérdida total de calor. El procedimiento toma en cuenta criterios económicos en la selección del espesor y fija como el espesor óptimo aquel que garantiza el costo total mínimo al establecer un balance entre los costos de las pérdidas energéticas y los costos de inversión.

Palabras clave: tuberías; espesor óptimo económico; aislamiento térmico; trazas de vapor.

Procedure for the selection of maximum pipe thickness for efficient thermal insulation in piping with steam trace

Abstract

A procedure for the selection of maximum pipe thickness to achieve efficient thermal insulation in piping with steam tracing was developed. The bibliographical review allowed identifying the limitations of previous investigations with regard to the selection of pipe thickness in transfer systems with steam tracing. The model for calculating the overall lost heat was prepared. The procedure considers economic criteria for the selection of pipe thickness and established an optimal thickness value which guarantees a total minimum cost by establishing a balance between the expenditures resulting from heat loss and the project costs.

Keywords: pipelines; maximum thickness; thermal insulation; steam trace.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de un espesor de aislamiento térmico obedece, en algunos casos, a condiciones exclusivamente técnicas, pero las inversiones en aislamiento poseen un carácter económico. Por ello es necesario introducir criterios económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor (Figura 1), ya que el costo total será mínimo precisamente para el espesor óptimo económico (Isover 2004a; Isover 2004b; Idae 2007; Conuee 2008; Cener 2012).

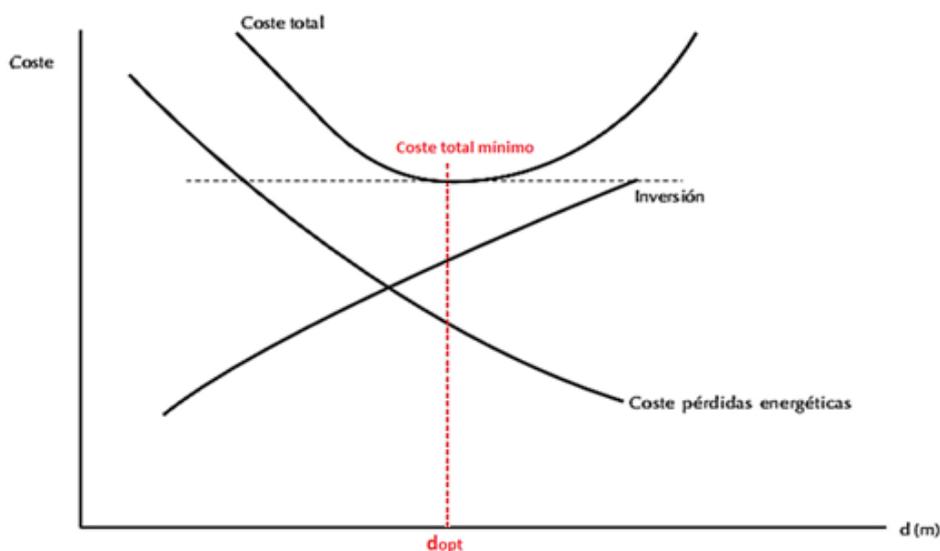


Figura 1. Método de selección del espesor óptimo económico de aislamiento.
Fuente: Isover, 2004a.

La existencia de un espesor óptimo de aislamiento para los sistemas radiales (tuberías sin trazas) es explicada por la presencia de efectos inversos asociados a un incremento del espesor; por tanto, el espesor óptimo de aislamiento es aquel que hace mínima la pérdida de calor maximizando la resistencia térmica total (Incropera y Dewitt 2007; Bergman *et al.* 2011). Estos autores recomiendan emplear la expresión 1 para calcular la pérdida de calor que se produce desde el interior al exterior de una tubería.

$$q_r = \frac{t_{\infty 1} - t_{\infty 2}}{R_T} \quad (1)$$

Donde:

q_r : Calor transferido en la tubería, [W/m];

$t_{\infty 1}$: Temperatura del fluido caliente, [K];

$t_{\infty 2}$: Temperatura del fluido frío, [K];

R_T : Resistencia térmica total, [K/W].

Aunque los cálculos realizados por la ecuación 1 poseen validez para los sistemas radiales presentan errores de estimación al ser aplicados a instalaciones con trazas de vapor debido, fundamentalmente, a las características geométricas de estos sistemas, lo cual no es considerado en el modelo.

Monteagudo, Pérez y Guerra (1998) proponen una metodología que permite determinar el espesor del aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor, cuya finalidad es mantener un nivel estable de temperatura; sin embargo, no se toma en consideración la marcada influencia del costo del aislamiento en la selección de su espesor.

El proceso de selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor ha sido escasamente estudiado, debido fundamentalmente a la complejidad de estos sistemas. De ahí que la selección se realice, generalmente, por procedimientos desarrollados para sistemas radiales que poseen otra geometría y, por ende, un análisis diferente (Gilbert 2015).

El objetivo del presente trabajo es exponer un procedimiento para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor.

2. PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DEL ESPESOR DE AISLAMIENTO

2.1. Espesores de aislamiento

De acuerdo con las expresiones conocidas, Isover (2004a) plantea que las pérdidas de energía disminuyen con el aumento del espesor de aislamiento, lo cual coincide con lo expresado por diferentes autores (Huang & Zhang 2014; Zavattoni *et al.* 2014; Haiqian *et al.* 2012; Luamkanchanaphan, Chotikaprakhan & Jarusombati 2012; Bomberg 2013; Lulic *et al.* 2014). De ahí que se proceda a determinar para cada inversión en aislamiento el valor actualizado neto de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión.

2.2. Pérdidas energéticas para cada espesor de aislamiento

Según Monteagudo, Pérez y Guerra (1998) la pérdida de calor de la tubería principal hacia el medio exterior y la cantidad de calor disipada por la parte restante de la superficie del aislamiento pueden determinarse por las expresiones 2 y 10, respectivamente.

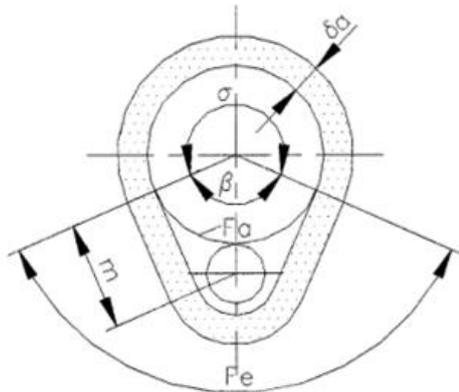


Figura 2. Tuberías de vapor acompañante con ángulo selectivo de calentamiento. Fuente: Monteagudo, Pérez y Guerra (1998).

Sin embargo, las consideraciones realizadas por este excluye la resistencia térmica por convección desde el fluido a la pared interior de la tubería principal (expresión 6) y la resistencia térmica por conducción que presupone el espesor de la tubería (expresión 7), lo que limita la precisión de los modelos.

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

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 principal sobre la cual se dispone el aislamiento, [grados sexagesimales];

t_p : Temperatura a la cual se transporta el petróleo en la tubería principal, [K];

t_o : Temperatura ambiente a la que se realiza el cálculo, [K];

R_p : Resistencia térmica desde el combustible hasta el aire ambiente por unidad de longitud, [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 por unidad de longitud, [m·K/W];

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

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

R_4 : Resistencia térmica por convección desde la superficie exterior del aislamiento al aire ambiente por unidad de longitud, [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].

$$q^E = 1,25 \cdot \frac{F_E}{R_E} \cdot (t_c - t_o) \quad (10)$$

Siendo:

$$F_E = \frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m \quad (11)$$

$$m = \sqrt{(2r_2 - 0,01) \cdot (2r_A + 0,01)} \quad (12)$$

$$R_E = \frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2} \quad (13)$$

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];

t_C : Temperatura del aire en el interior de la cavidad termoaislada, [K];

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].

En una instalación con traza de vapor (Figura 3), la pérdida total de calor (q^T) está fraccionada entre las pérdidas a través de la sección aislada de la tubería principal (q^P) y la cavidad termoaislada (q^E). (Gilbert *et al.* 2014).

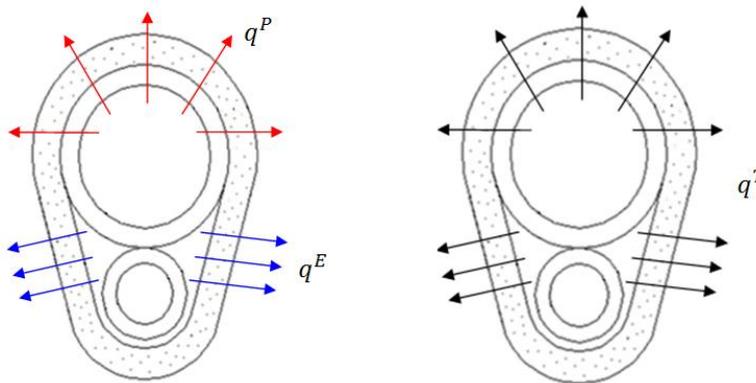


Figura 3. Pérdidas de calor en una instalación con traza de vapor.

De ahí que, al introducir un coeficiente para considerar las pérdidas por apoyo igual a 1,25 (Monteagudo, Pérez & Guerra 1998), se infiere que es posible emplear un modelo único que integre las expresiones anteriores y permita determinar la pérdida total de calor en una instalación con trazas de vapor (expresión 14), lo cual constituye un modesto aporte en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico, en instalaciones con este tipo de configuración.

$$q^T = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{t_p - t_o}{\left(\frac{1}{h_1 \cdot 2\pi \cdot r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_p} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_A} + \frac{1}{h_2 \cdot 2\pi \cdot r_3} \right)} + 1,25 \cdot \left[\frac{\frac{\beta}{360} \cdot \pi \cdot (2r_2 + 2 \cdot \delta + 0,02) + 2 \cdot m}{\frac{1}{h_5} + \frac{\delta}{k_A} + \frac{1}{h_2}} \right] \cdot (t_c - t_o) \quad (14)$$

Donde:

q^T : Pérdida total de calor por unidad de longitud, [W/m].

2.3. Valor de las pérdidas energéticas

Si se consideran dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas entre ellos tendrá un valor económico que puede ser considerable (Isover, 2004a). Para determinar dicha diferencia es necesario calcular el valor de las pérdidas para cada uno de los espesores de aislamiento evaluados, lo cual es posible auxiliándose de la expresión 15:

$$V = q^T \cdot E \cdot Z \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

Donde:

V : Valor de las pérdidas energéticas, [CUP/m·año];

E : Costo de la energía, [CUP/kW·h];

Z : Tiempo de funcionamiento de la instalación al año, [h/año].

2.4. Valor actualizado de las pérdidas

Para cada inversión en aislamiento se determina el valor actualizado neto de los ahorros energéticos aportados en el periodo analizado (ecuación 16) y se comparan con los incrementos que supone la inversión (Isover 2004a).

$$V_A = V \cdot C_{VAN} \quad (16)$$

Siendo:

$$C_{VAN} = \frac{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \cdot \left[\left(\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} \right)^n - 1 \right]}{\frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r} - 1} \quad (17)$$

$$r = c - d \quad (18)$$

Donde:

V_A : Valor actualizado de las pérdidas, [CUP/m];

C_{VAN} : Coeficiente de actualización, [adimensional];

b: Aumento previsible del costo de la energía, [%];

r: Tasa de actualización neta; equivalente al interés bancario deducido los impuestos y la tasa de inflación, [%];

n: Número de años para los que se efectúa el estudio;

c: Interés anual del dinero deducidos impuestos, [%];

d: Tasa de inflación anual prevista, [%].

2.5. Incremento del ahorro

El conocido comportamiento que genera una disminución de las pérdidas energéticas al aumentar el espesor del material aislante (Patsis, Petropoulos & Kaltsas 2012; Zach *et al.* 2013; De Elsafty *et al.* 2013; De Angelis & Serra 2014) favorece que se produzca un incremento del ahorro energético (IDAE 2007), lo que se traduce en una disminución de los gastos por concepto de pérdidas al exterior. Este incremento del ahorro puede estimarse mediante la expresión 19:

$$A = V_{A(\delta)} + V_{A(\delta+1)} \quad (19)$$

Donde:

A: Incremento de ahorro entre dos espesores consecutivos, [CUP/m];

$V_{A(\delta)}$: Valor actualizado de las pérdidas correspondiente al aislamiento de menor espesor, [CUP/m];

$V_{A(\delta+1)}$: Valor actualizado de las pérdidas correspondientes al aislamiento de mayor espesor, [CUP/m].

2.6. Incremento de la inversión del aislamiento

El aumento del espesor de aislamiento térmico genera incremento de la inversión para su compra e instalación, aunque esto no posee leyes determinadas de crecimiento; se puede emplear la expresión 20 para determinar el incremento de la inversión en espesores consecutivos.

$$I_A = I_{(\delta+1)} - I_{(\delta)} \quad (20)$$

Donde:

I_A : Incremento de la inversión del aislamiento entre dos espesores consecutivos, [CUC/m];

$I_{(\delta+1)}$: Inversión del aislamiento de mayor espesor, [CUC/m];

$I_{(\delta)}$: Inversión del aislamiento de menor espesor, [CUC/m].

Para: 0,04 m de espesor 11,05 CUC/m
0,05 m de espesor 13,65 CUC/m

0,06 m de espesor 15,35 CUC/m
 0,07 m de espesor 17,55 CUC/m
 0,08 m de espesor 19,70 CUC/m
 0,10 m de espesor 23,05 CUC/m
 0,12 m de espesor 25,45 CUC/m

Fuente: Isover 2015.

2.7. Espesor óptimo económico

El espesor óptimo económico se corresponde con aquel que tiende a cero al establecer la diferencia entre el incremento del ahorro (A) y el incremento de la inversión (I_A), condición que debe ser comprobada según la expresión 21:

$$A - I_A \approx 0 \quad (21)$$

Este modo de selección permite equilibrar ambos costos, empleando el aislamiento cuyo espesor minimice el costo total (Ct), lo cual puede ser comprobado mediante la ecuación 22:

$$Ct = V_A + I \quad (22)$$

2.8. Caracterización de la instalación donde se aplicó el procedimiento

La instalación analizada se utiliza para el transporte del crudo mejorado 650 (CM-650) hacia una termoeléctrica, de esta manera se garantiza el suministro de combustible para su combustión y permite el trabajo continuo de dos unidades generadoras, con una potencia instalada de 250 MW cada una. Con la energía generada se abastecen a las principales empresas del oriente cubano, entre las que resaltan las industrias metalúrgicas del nordeste de Holguín y la zona turística de Guardalavaca, las cuales constituyen uno de los principales renglones económicos de la economía nacional.

Tabla 1. Principales características de la instalación

Parámetro	Valor	UM
Diámetro interior de la tubería principal	0,42	m
Espesor de la tubería principal	0,013	m
Diámetro interior de la traza de vapor	0,025	m
Espesor de la traza de vapor	0,003	m
Longitud total de la instalación	3 200	m
Conductividad térmica de las tuberías	60,5	W/m·K
Flujo de combustible trasegado	0,044	m ³ /s
Tiempo de funcionamiento promedio	767	h/año

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estimación del espesor óptimo económico de aislamiento

La obtención de la pérdida total de calor se calculó mediante la ecuación 14, la cual es el resultado de la integración de las expresiones 2 y 10. Para las condiciones estimadas resulta evidente que la pérdida de calor que se produce desde la parte aislada de la tubería principal al medio exterior (q^P) sea mayor que la pérdida generada desde la cavidad termoaislada (q^E), lo cual está asociado fundamentalmente a una mayor área de disipación de calor, debido a la diferencia de los diámetros de la tubería principal y la traza de vapor. La Figura 4 muestra el valor de la pérdida total de calor disgregado en sus dos componentes y exhibe los porcentajes que representan del total.

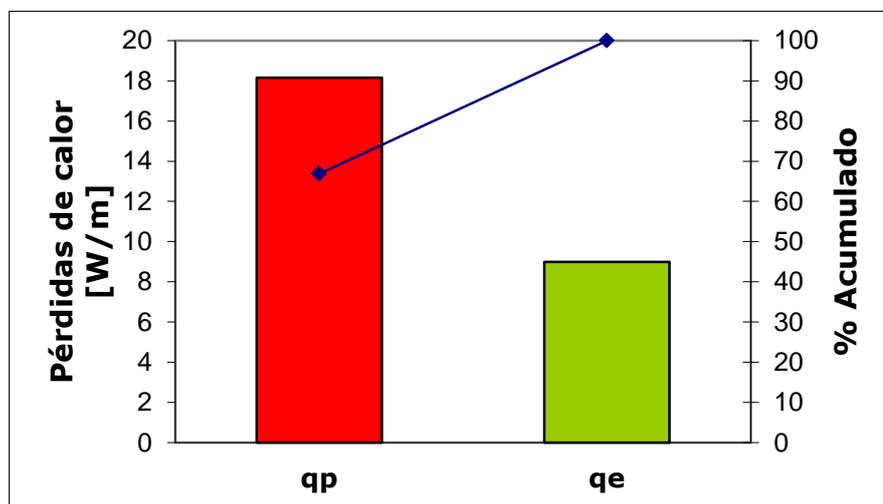


Figura 4. Distribución de la pérdida total de calor por componentes.

El cálculo de los parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento se obtuvo en correspondencia con el procedimiento descrito anteriormente; el valor de las pérdidas energéticas, el valor actualizado de dichas pérdidas, el aumento del ahorro, el incremento de la inversión y la diferencia entre estos dos últimos parámetros han sido determinadas por las expresiones 15, 16, 19, 20 y 21, respectivamente. El espesor óptimo económico de aislamiento se determinó considerando, entre otros parámetros, el tiempo de funcionamiento de la instalación (767 h/año), el costo energético (0,09 CUP/kW·h), la duración estimada del aislamiento (10 años), el incremento del costo de la energía (3 %), la tasa de interés (5 %) y la tasa de inflación prevista (1 %). Los precios de los aislamientos se fijaron dependientes de los espesores empleados, en relación a lo establecido por Isover (2015), y no se ha tenido en cuenta un costo adicional del aislamiento por mano de obra.

Tabla 2. Parámetros característicos del espesor óptimo económico de aislamiento

δ [m]	q^T [W/m]	V [CUP/m-año]	V_A [CUP/m]	A [CUP/m]	I_A [CUC/m]	$A - I_A$ [CUP+CUC/m]
0,04	55,284	3,813	36,178			
0,05	46,558	3,211	30,467	5,710	2,6	3,110
0,06	40,401	2,787	26,438	4,028	1,7	2,328
0,07	35,820	2,471	23,441	2,997	2,2	0,797
0,08	32,277	2,226	21,122	2,318	2,15	0,168
0,10	27,147	1,872	17,765	3,356	3,35	0,006
0,12	23,609	1,628	15,450	2,315	2,4	-0,084

La estimación del espesor óptimo económico se realizó considerando siete espesores de aislamiento (0,04 m; 0,05 m; 0,06 m; 0,07 m; 0,08 m; 0,1 m y 0,12 m) de lana de roca (*TECH Wired Mat MT 6.1*), según valores normalizados por la compañía española Isover para este material aislante. Para cada espesor evaluado se calcularon los parámetros característicos mostrados en la Tabla 2, resultando evidente que la pérdida total de calor, el valor de las pérdidas energéticas y el valor actualizado de dichas pérdidas disminuyen al aumentarse el espesor de aislamiento (lo cual resulta lógico considerando la dependencia matemática entre estos parámetros, en el mismo orden expuesto), mientras que el incremento del ahorro no muestra tendencia a ascender o disminuir con el incremento del espesor, comportamiento análogo al mostrado por el aumento de la inversión del aislamiento, influenciado por los precios establecidos para los diferentes espesores. La diferencia entre el incremento del ahorro y el aumento de la inversión manifiesta cierta disminución, obteniéndose su valor mínimo positivo justamente para el espesor óptimo económico, siendo para este caso de 0,1 m.

El análisis de los costos en la selección del espesor óptimo económico de aislamiento garantizó el escenario de forma tal que quedaron desestimados aquellos espesores para los cuales el gasto de energía resultó elevado, o los costos de inversión no amortizaban en el período evaluado.

La selección del espesor de aislamiento térmico en tuberías con traza de vapor está relacionada a factores de naturaleza opuesta, como son los costos asociados a la pérdida de calor y la inversión en aislamiento.

La Figura 5 muestra cómo al evaluar para un mismo espesor de aislamiento existe una disminución del valor actualizado de la pérdida total de calor (V_A), asociado al incremento de la resistencia térmica por conducción, mientras el costo de inversión de aislamiento (I) crece a

causa del aumento de material aislante, comportamientos análogos a los obtenidos por Cener (2012), Galdámez y Guzmán (2011), e Izquierdo y colaboradores (2005).

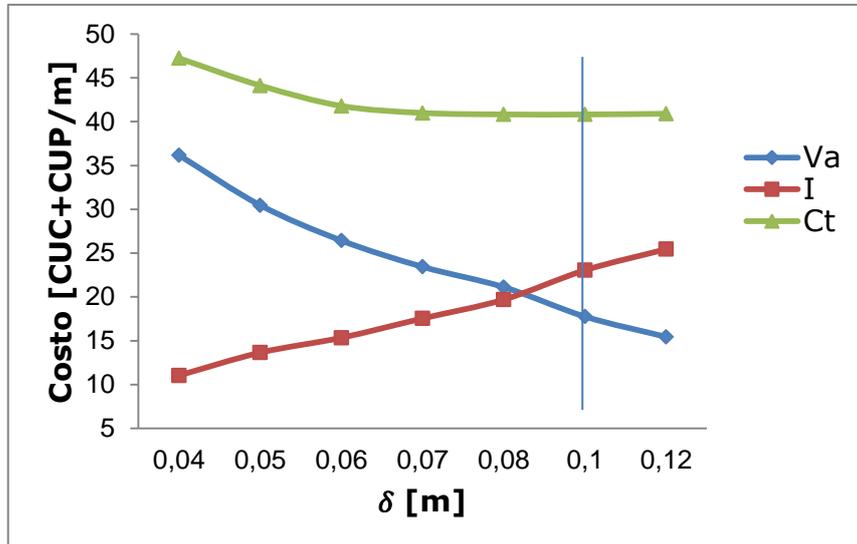


Figura 5. Espesor óptimo económico de aislamiento.

La suma del valor actualizado de las pérdidas energéticas con el costo de inversión posibilitó la búsqueda del valor mínimo de costo total (40,816 CUC+CUP), demostrándose que para las condiciones analizadas el espesor óptimo económico de aislamiento es de 0,1 m.

Si se eligiera un espesor de aislamiento menor que el óptimo económico la pérdida total de calor sería mayor y el costo también aumentaría. Si por el contrario se seleccionara un espesor mayor, el ahorro de la energía (asociado a este espesor) no compensaría el costo efectuado por su compra.

3.2. Impacto económico

En la Tabla 3 se muestran los gastos monetarios producto de la pérdida total de calor para cada espesor de aislamiento; aunque para el espesor de 0,12 m se obtiene una pérdida de calor inferior al espesor óptimo económico, este no se toma en consideración pues su costo de inversión resulta superior al ahorro generado y no logra amortizar el dinero desembolsado por su compra e instalación, para el periodo evaluado.

Tabla 3. Gastos monetarios por espesor de aislamiento

δ [m]	q^T [W/m]	V_A [CUP/m]	Gastos [CUP]
0,04	55,284	36,178	115 769,6
0,05	46,558	30,467	97 494,4
0,06	40,401	26,438	84 601,6
0,07	35,820	23,441	75 011,2
0,08	32,277	21,122	67 590,4
0,1	27,147	17,765	56 848

Para el espesor óptimo económico (0,1 m) la pérdida total de calor ascendió a los 27,147 W/m. Si se analiza que el valor actualizado de las pérdidas es de 17,765 CUP/m y que la instalación posee una longitud de 3 200 m resulta fácil percibir que se incurren en gastos de 56 848 CUP para el periodo evaluado; sin embargo, al comparar estos valores con los aportados por el espesor de 0,04 m resulta evidente que la pérdida total de calor asociada a este espesor es de 55,284 W/m, incurriendo en gastos de 115 769,6 CUP. De ahí que, al emplear el espesor adecuado de aislamiento, se produzca un ahorro de energía respecto al espesor con 0,04 m de 28,137 W/m, que equivale en términos monetarios a 58 921,6 CUP, lo que representa un ahorro del 104 %.

4. CONCLUSIONES

- Quedó establecido el procedimiento que permite seleccionar el espesor óptimo económico de aislamiento térmico en tuberías con trazas de vapor, el cual incorpora como elemento novedoso la expresión (14) para el cálculo de la pérdida total de calor, para las instalaciones con este tipo de configuración.
- Para la selección del espesor óptimo económico de aislamiento térmico en instalaciones que no empleen trazas de vapor el procedimiento desarrollado es aplicable empleando la expresión 1 para el cálculo de la pérdida de calor.

5. AGRADECIMIENTO

Los autores de este trabajo consideramos ineludible mostrar nuestra gratitud al Dr. C. José Pedro Monteagudo Yanes, profesor de la Universidad de Cienfuegos; quien, despegado de cualquier interés, cedió su tiempo y brindó su conocimiento para mostrar un mejor resultado y ponerlo al servicio de la ciencia.

6. REFERENCIAS

- BERGMAN, T.; LAVINE, A.; INCROPERA, F. & DEWITT, D. 2011: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New Jersey, 1 039 p.
- BOMBERG, M. 2013: Glows and shadows of thermal insulation. *Frontiers of architectural research* 2(2): 263-266.
- CENER. 2012: El potencial de ahorro de energía y reducción de emisiones de CO₂ en viviendas mediante incremento del aislamiento. Consultado: 16 marzo 2015. Disponible en: www.cener.com.
- CONUEE, PYME, SENER. 2008: *Beneficios del aislamiento en la industria*. 52 p. Consultado: 20 febrero 2015. Disponible en: www.conuee.gob.mx.
- DE ANGELIS, E. & SERRA, E. 2014: Light steel-frame walls: thermal insulation performances and thermal bridges. *Energy Procedia* 45: 362-371.
- DE ELSAFTY, A.; JOUMAA, C.; ABO-ELAZM, M. & ELHARIDI, A. 2013: Case study analysis for building envelop and its effect on environment. *Energy Procedia* 36: 958-966.
- GALDÁMEZ, V. & GUZMÁN, H. 2011. *Evaluación térmica, energética y económica del uso de aislantes térmicos*. Tesis de grado. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. 61 p.
- GILBERT, A.; LAURENCIO, H.; RODRÍGUEZ, I.; RETIRADO, Y. & TORRES, E. 2014: Selección del espesor de aislamiento térmico para tuberías de petróleo con traza de vapor. *Minería y Geología* 30(1): 62-79.
- GILBERT, A. 2015: *Selección de espesor de aislamiento térmico en tuberías de transporte de combustible con trazas de vapor*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. 91 p.
- HAIQIAN, Z.; XIAOYAN, L.; LIJUN, L.; YONGNING, W.; XIAOHUI, L. & YING, Z. 2012: Study on new thermal insulation construction of thermal recovery boiler. *Energy Procedia* 16: 1 466-1 471.
- HUANG, C. & ZHANG, Y. 2014: Calculation of high-temperature insulation parameters and heat transfer behaviors of multilayer insulation by inverse problems method. *Chinese Journal of Aeronautics* 27(4): 1-6.
- IDAE. 2007: *Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos*. Madrid, 59 p.
- INCROPERA, F. & DEWITT, D. 2007: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3 t. Pueblo y Educación, La Habana.
- ISOVER. 2004A: *Manual de aislamiento en la industria*. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 148 p.
- ISOVER. 2004B: *Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios y sus instrucciones técnicas complementarias*. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 52 p.

- ISOVER. 2015: *Lista de precios*. Saint-Gobain Isover España, Madrid, 53 p.
- IZQUIERDO, M.; GAVIRA, M.; ALFARO, J. & LECUONA, A. 2005: Espesor óptimo del aislante térmico para las viviendas de Madrid. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/5865>
- LUAMKANCHANAPHAN, T.; CHOTIKAPRAKHAN, S. & JARUSOMBATI, S. 2012: A study of physical, mechanical and thermal properties for thermal insulation from narrow-leaved cattail fibers. *APCBEE Procedia* 1: 46-52.
- LULIC, H.; CIVIC, A.; PASIC, M.; OMERSPAHIC, A. & DZAFEROVIC, E. 2014: Optimization of thermal insulation and regression analysis of fuel consumption. *Procedia Engineering* 69: 902-910.
- MONTEAGUDO, J.; PÉREZ, J. & GUERRA, E. 1998: Aislamiento térmico de tuberías con acompañamiento de vapor. *Energía: Ingeniería Química* 24(3): 161-167.
- PATSIS, G.; PETROPOULOS, A. & KALTSAS, G. 2012: Modelling and evaluation of a thermal microfluidic sensor fabricated on plastic substrate. *Microsystem technologies* 18(3): 359-364.
- ZACH, J.; HROUDOVÁ, J.; BROŽOVSKÝ, J.; KREJZA, Z. & GAILIUS, A. 2013: Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems. *Procedia Engineering* 57: 1 288-1 294.
- ZAVATTONI, S.; GAETANO, A.; MONTORFANO, D.; BARBATO, M.; AMBROSETTI, G. & PEDRETTI, A. 2014: A novel CSP receiver based on airlight energy technology - optimization of the thermal insulation system by means of CFD analysis. *Energy Procedia* 49: 589-598.

Amauris Gilbert-Hernández, aghernandez@ismm.edu.cu
Máster en Metalurgia. Profesor Asistente.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba.

Yoalbys 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.

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

Amaury Palacios-Rodríguez, apalacios@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar.
Departamento de Metalurgia y Materiales.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Holguín, Cuba

Ever Góngora-Leyva, egongora@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.