

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CALOR EN REDES DE TRANSPORTE DE VAPOR MEDIANTE MICROSOFT EXCEL

METHODOLOGY FOR CALCULATING HEAT LOSSES IN STEAM TRANSMISSION NETWORKS USING MICROSOFT EXCEL

Ovando Castelar Rosember¹, Jiménez Manzanares Jazmin², Vargas Vega Minerva Guadalupe³, Benitez Centeno Omar Christian⁴, Urzúa Rangel Roberto Martin⁵

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i2.391>

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, rosember.oc@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1491-7437>.

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, mg01090615@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0000-7835-777X>.

³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, minerva.vv@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3900-6293>.

⁴Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, omar.bc@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5756-1912>.

⁵Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, roberto.ur@zacatepec.tecnm.mx, <https://orcid.org/0009-0006-9267-6834>.

Resumen -- Los sistemas de transporte de vapor típicamente incluyen grandes líneas de vapor con una gran variedad y número de elementos de transición tales como válvulas, bridas, placas orificio, etc., instalados a lo largo de éstas. Al evaluar la eficiencia del proceso de transporte a través de una tubería que conduce vapor y determinar las causas principales que impactan la pérdida de energía, se ha encontrado que el procedimiento para la cuantificación de las pérdidas de energía en redes de tuberías que conducen vapor se apoya en simplificaciones que se derivan de la complejidad de condiciones bajo las cuales éstas operan. En este trabajo se presenta un procedimiento de cálculo para determinar las pérdidas de calor en las tuberías de una red de transporte de vapor, que se apoya en información geométrica de la línea y del estado de su aislamiento térmico, así como de las condiciones bajo las cuales opera la red. Los resultados que se obtuvieron se contrastaron contra cálculos de la temperatura de superficie y la pérdida de calor en un vapor ducto con diferente condición de aislamiento. La metodología propuesta presenta la ventaja de ser simple y fácil de implantar en una computadora personal con Microsoft Excel sin implicar una alta inversión, a diferencia del software comercial que tiene un costo elevado y que precisa de equipo de cómputo con características más específicas.

Palabras Clave: Aislamiento Térmico, Pérdidas energéticas, Redes de transporte de vapor, Transferencia de Calor.

Abstract -- Steam transportation systems typically include large steam lines with a large variety and number of transition elements such as valves, flanges, orifice plates, etc., installed along with them. When evaluating the efficiency of the transportation process through a

steam pipeline and determining the main causes that impact energy loss, it has been found that the procedure for quantifying energy losses in steam pipeline networks relies on simplifications that arise from the complexity of the conditions under which they operate. This paper presents a calculation procedure to determine heat losses in the pipes of a steam transportation network, which is based on geometric information of the line and the state of its thermal insulation, as well as the conditions under which the network operates. The results obtained were compared to calculations of surface temperature and heat loss in a steam pipeline with different insulation conditions. The proposed methodology has the advantage of being simple and easy to implement on a personal computer with Microsoft Excel without requiring a high investment, unlike commercial software that has a high cost and requires computer equipment with more specific features.

Key words – Thermal insulation, Energy losses, steam transportation network, Heat transfer.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las centrales de generadoras de energía están interesadas en implementar estrategias de ahorro energético que permitan incrementar la eficiencia de los procesos de conversión de la energía, garantizando un mejor aprovechamiento de la energía y una reducción de su impacto al medio ambiente. El conocimiento de la forma como ocurre esta pérdida de energía en tuberías que conducen vapor constituye un paso importante en el establecimiento de parámetros técnico-económicos para:

- a) la operación;
- b) el mantenimiento;

c) el crecimiento del proceso;

En el proceso de transporte de vapor en redes (Figura 1) ocurren cambios de naturaleza dinámica tanto en sus propiedades termodinámicas como las de transporte, que modifican sus condiciones terminales. Conocer cómo se presentan estos cambios ayudará a detectar anomalías en el comportamiento de las variables de flujo, con el fin de corregir problemas en la operación del sistema de transporte de vapor.

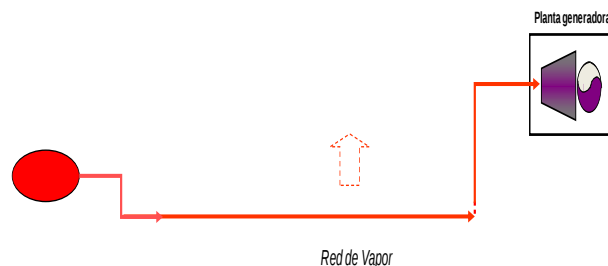


Figura 1. Red de transporte de vapor

Fuente. Autoría Propia (2021).

En particular, se pueden encontrar estudios relativos a la transferencia de calor en tuberías, como el desarrollado por Schroeder (1982) [1] quien presenta estudios detallados para calcular la temperatura de la superficie de los aislantes térmicos y las pérdidas o ganancias de calor por un tubo, mientras que varían otros factores de flujo. El modelo de Marconcini y Neri (1979) [2], incluye el transporte de calor por conducción, convección y radiación para el cálculo de las pérdidas de calor en vaporductos aislados térmicamente.

Los trabajos de Peña (1986) [3] y de Peña y Campbell (1988) [4], quienes plantearon un modelo basado en la expansión politrópica del vapor a medida que éste fluye por una tubería o una red de conductos horizontales de gran diámetro aislados térmicamente, a partir del cual se determina la caída de presión y la transferencia de calor hacia el medio ambiente.

En este trabajo se describe una metodología para la determinación de las pérdidas de calor en tuberías de vapor, mediante un programa de aplicación desarrollado en Microsoft Excel que facilita su cálculo tanto para tuberías aisladas como para tuberías descubiertas, tomando en cuenta los tres mecanismos básicos de transferencia de calor desde la superficie externa de la tubería hacia el medio ambiente.

DESARROLLO

La evaluación de las pérdidas de calor en las redes de vapor, tomando en cuenta el estado de su aislamiento, es un paso de gran importancia en la delimitación de áreas de oportunidad de mejora, porque permitirá conocer la magnitud de éstas en relación con las que se presentan por otros mecanismos de pérdida.

Con esto se podrá evaluar que tan conveniente resulta mantener el aislante y la protección metálica de las tuberías en buen estado, en términos de la relación costo-beneficio obtenido, por el impacto que tienen en la disminución de la pérdida de energía.

El cálculo de las pérdidas de calor en una red de tuberías que transportan vapor (vaporductos) es un problema complejo en el que ocurren de forma simultánea los tres mecanismos básicos de transporte de calor: conducción de calor, convección y radiación térmica.

En el interior del vaporducto la energía del vapor se transfiere por convección forzada. En este mecanismo de transporte de calor, se cuenta con la solución analítica desarrollada por Rohsenow y Choi [5] para el coeficiente de película en tuberías con flujo laminar:

$$N_{um} = 4.36 + \frac{0.036 Re_D P_r D/L}{1 + 0.0011 Re_D P_r D/L} \quad Ec.(1)$$

En el caso de flujo turbulento, para determinar el coeficiente de película interno se usa la correlación de Gnielinsky [6], la cual es válida desde la región de transición hasta la zona de flujo totalmente turbulento y cuya expresión matemática es:

$$N_{um} = \frac{(f/8)(Re - 1000)P_r}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(P_r^{2/3} - 1)} \quad Ec.(2)$$

El factor de fricción para la región de flujo turbulento en el interior del vaporducto se determina aplicando la correlación de Chen [7]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) - \frac{5.0452}{Re} \log \left[\frac{1}{2.8257} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right] \right\} \quad Ec.(3)$$

Para obtener un cálculo confiable de la convección en el interior del vaporducto para bajos números de Re en la zona de transición de flujo, Abraham et al [8], recomiendan usar la Ecuación (8) para determinar el factor de fricción en el rango de $2000 < Re < 4500$:

$$f = 3.03 \times 10^{-12} \cdot Re^3 - 3.67 \times 10^{-8} \cdot Re^2 + 1.46 \times 10^{-4} \cdot Re - 0.151 \quad Ec.(4)$$

Para el exterior del vaporducto, se puede presentar tanto convección natural como convección forzada, de acuerdo con las condiciones meteorológicas existentes.

En el caso del mecanismo de convección forzada con flujo externo que ocurre en el exterior del vaporducto, el coeficiente de transferencia de calor se suele determinar mediante correlaciones semiempíricas, que son función

del número de Prandtl (Pr) y de Reynolds (Re), y que a su vez éstos dependen de las propiedades termofísicas del aire ambiental. Un vaporoducto puede asumirse como un largo cilindro horizontal con flujo cruzado. El coeficiente de película externo se determina mediante la correlación de Churchill y Bernstein [9], cuya expresión matemática es:

$$Nu_m = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad Ec.(5)$$

En el caso de que se presenten condiciones externas al vaporoducto tales que la transferencia de calor ocurra por convección natural con flujo externo, la correlación más utilizada para cilindros horizontales es la desarrollada por Churchill y Chu [10], la cual es válida para un amplio rango de valores del número de Rayleigh.

$$Nu_m = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0.559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad Ec.(6)$$

Para evaluar las pérdidas de energía por unidad de longitud debido a la conducción de calor a través del sistema tubería-aislante, así como la convección en el interior del vaporoducto, se puede aplicar el concepto de resistencia térmica equivalente [11], con lo cual se deriva la Ecuación (7):

$$\frac{q_{cd}}{L} = \frac{T_{sat} - T_w}{\frac{1}{\pi D_i h_{mi}} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{mt}} + \frac{\ln(D_a/D_o)}{2\pi k_{ma}}} \quad Ec.(7)$$

Para poder determinar la pérdida de calor desde la superficie externa de la tubería hacia el medio ambiente, es preciso realizar un balance de calor (ver Figura 2) sobre esta superficie, a partir del cual se deriva la Ecuación (8).

$$\frac{q_{cd}}{L} = \frac{q_{cv}}{L} + \frac{q_r}{L} \quad Ec.(8)$$

El cálculo del calor transferido por convección entre la pared externa del vaporoducto y el aire del ambiente, por unidad de longitud, se evalúa aplicando la ley de enfriamiento de Newton [12], a partir de la cual se obtiene:

$$\frac{q_{cv}}{L} = h_m \pi D_a (T_w - T_\infty) \quad Ec.(9)$$

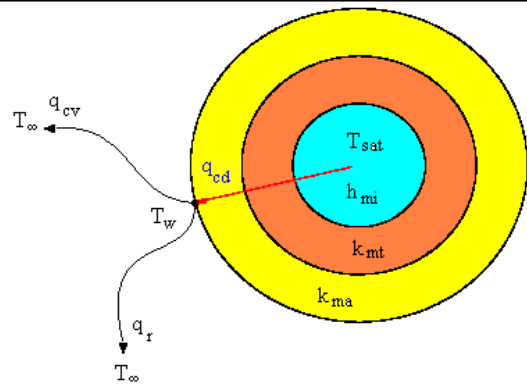


Figura 2. Balance de calor en la superficie externa de un vaporoducto

Fuente. Autoría Propia (2021)

El calor transferido al medio ambiente por radiación térmica desde un ducto depende de su temperatura absoluta y de la naturaleza de su superficie externa. Si se asume que tanto el vaporoducto como el aire que lo rodea son cuerpos grises, la pérdida de calor por unidad de longitud, se evalúa de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann [13]:

$$\frac{q_r}{L} = \varepsilon \sigma \pi D_a (T_w^4 - T_\infty^4) \quad Ec.(10)$$

Sustituyendo las ecuaciones (9) y (10) de los mecanismos básicos de transporte de calor en la Ecuación (7), se obtiene una ecuación implícita para evaluar en forma iterativa, la temperatura de la superficie externa (T_w) del vaporoducto:

$$f(T_w) = \frac{T_{sat} - T_w}{\frac{1}{\pi D_i h_{mi}} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{mt}} + \frac{\ln(D_a/D_o)}{2\pi k_{ma}}} - \frac{h_m \pi D_a (T_w - T_\infty) - \varepsilon \sigma \pi D_a (T_w^4 - T_\infty^4)}{L} = 0 \quad Ec.(11)$$

La Ecuación (11) se resuelve aplicando el método de Newton-Raphson [14] de primer orden para el cálculo de raíces de ecuaciones algebraicas.

En lo relativo al cálculo del coeficiente global de transferencia de calor basado en el área interna [15], es importante considerar teóricamente que el transporte de calor hacia el medio ambiente se realiza mediante los mecanismos de conducción y convección de calor. Ambos mecanismos serán considerados por el coeficiente global de transferencia de calor como si se tratara de convección pura.

$$\frac{q_{cd}}{L} = \frac{q_{cv}}{L} + \frac{q_r}{L} = U_{mi} \pi D_i (T_{sat} - T_\infty) \quad Ec.(12)$$

Despejando el coeficiente global de transferencia de calor basado en el área interna de la Ec. (12) y sustituyendo el valor de (q_{cd}/L) de la Ec. (7), se obtiene la Ec. (13) que representa la ecuación fundamental para el cálculo del coeficiente global en el programa de aplicación basado en Excel.

$$U_{mi} = \frac{T_{sat} - T_w}{\frac{1}{\pi D_i h_{mi}} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k_{mt}} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_o}\right)}{2\pi k_{ma}}} \quad Ec.(13)$$

Con el fin de facilitar el proceso de cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para una geometría específica de tubería de la red y considerando el estado del aislamiento térmico, se desarrolló un programa de cálculo apoyado en el software Microsoft Excel (ver Figura 3), donde se automatiza el proceso de cálculo del coeficiente global para las características de operación de la red de tuberías.

Para calcular las propiedades termo físicas del aire y del vapor, el proceso se realiza de forma automática. Para determinar las propiedades térmicas y de transporte del aire, se realiza una interpolación lineal con base en la temperatura de película del aire, sobre una tabla que contiene las propiedades del aire a presión atmosférica estándar. Las propiedades termodinámicas del vapor de agua se determinan a través de una biblioteca de funciones programada en visual basic y embebida en Excel, la cual se basa en el estándar industrial IAPWS-IF97 [16].

La conductividad térmica del aislante y del material de la tubería se evalúan mediante ajustes de tipo exponencial, apoyados en tablas de conductividad versus temperatura proporcionados por el fabricante.

En este programa embebido en Excel (ver Figura 4), se evalúan las temperaturas de superficie interior y exterior del vaporducto, la temperatura de la interfase tubería-aislante y el calor transferido desde el interior de la tubería hacia el exterior (aire ambiental), por unidad de longitud.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, con la finalidad de reducir el esfuerzo computacional requerido para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor en un vaporducto, se generaron una serie de hojas de cálculo en Microsoft Excel (Figura 3), que dispone de hojas separadas, una para el cálculo en tuberías aisladas y otra para tuberías desnudas (sin aislamiento).

En cada una de estas hojas se pueden manipular los datos referentes a las condiciones ambientales que imperan en el exterior del vaporducto (temperatura y velocidad del

viento), modificar la emisividad de los materiales involucrados en la radiación térmica (cubierta exterior del vaporducto o el material de la tubería) y también cambiar sus condiciones operativas (presión y flujo másico). Para la temperatura, así como para las propiedades térmicas y de transporte del vapor, en estas hojas de cálculo se asume que el vapor está saturado. En la determinación del coeficiente global de transmisión de calor para tuberías desnudas, sólo se excluyó la conducción de calor a través del aislante.

Cálculo de la Pérdida de Calor en Tuberías				
Tubería Completa, incluyendo la protección metálica				
				ITERA
Datos				
V [m/s]	0.28	α [W/m ² ·K ⁴]		ϵ
T _∞ [°C]	26.67	5.669E-08		0.30
Dnom, Ced	3	10, 20	12, 20	
Di [in]	3.000	10.250	12.250	
De [in]	3.500	10.750	12.750	
Da [in]	5.500	13.750	16.750	
P _{sat} [barg]	69.303	3.935	3.620	
T _{sat} [°C]	286.13	151.44	148.99	
T _i [°C]	185.478	151.443	148.986	
T _e [°C]	185.419	151.417	148.964	
T _w [°C]	55.775	50.274	45.435	
T _f [°C]	41.223	38.472	36.053	
k _{mt}	48.360	49.190	49.250	
k _{ma}	0.048	0.051	0.051	
h interna				
ρQ[ton/hr]	50.000	310.306	308.673	
ρQ[kg/s]	13.889	310.306	308.673	
ρ [kg/m ³]	36.708	2.642	2.483	
μ [kg/m·s]	1.897E-05	1.404E-05	1.396E-05	
K[W/m·K]	6.304E-02	3.181E-02	3.144E-02	
Cp[J/Kg·K]	5369.883	2409.031	2386.749	
Pr	1.616	1.063	1.059	
Re _D	1.22E+07	1.08E+08	9.05E+07	
e [in]	6.00E-03	6.00E-03	6.00E-03	
f	0.02343	0.01730	0.01662	

Figura 3. Programa en Excel para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor
Fuente. Autoría Propia (2021)

En el caso de vaporductos que no cuentan con la cubierta metálica exterior (protección mecánica), el usuario puede optar por el cálculo con una tubería totalmente aislada y cambiar la emisividad de la placa metálica por la del aislante.

45	R _T	1.4854	0.7633	0.8592
46	q/L	155.0820	132.5474	120.5228
47	U _m	2.4968	1.2988	1.0080
48	T _i [°C]	286.135	151.443	148.986
49	T _e [°C]	286.039	151.417	148.964
50	T _w [°C]	73.181	50.274	45.435
51				
52	IT	T _{wn+1}	T _{wn+1}	T _{wn+1}
53	1	385.471	367.203	366.413
54	2	348.469	326.618	322.680
55	3	346.337	323.440	318.615
56	4	346.331	323.424	318.585
57	5	346.331	323.424	318.585

Figura 4. Principales resultados reportados por el programa basado en Excel para el cálculo de la pérdida de calor

Fuente. Autoría Propia (2021).

El proceso de validación se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados obtenidos por el programa de aplicación basado en Excel y los que reporta un programa desarrollado con aplicación en calculadoras programables HP-67 y HP-97, el cual tiene como finalidad realizar el cálculo de la temperatura de superficie de vaporductos, a partir de casos prácticos reportados en [1].

El programa con aplicación en calculadoras programables se basa en la premisa que el calor conducido a través del aislamiento debe estar balanceado con el intercambio de calor que se lleva a cabo entre la superficie exterior y la atmósfera, mediante los mecanismos de convección y radiación. Para su simplificación, el programa asume que la temperatura de la superficie interna del aislamiento es igual que la temperatura en el interior de la tubería.

El programa asume que la temperatura de superficie del aislante es una variable dependiente desconocida, por lo que se propone un valor estimado para ésta y se calcula el calor transferido por cada mecanismo de transferencia de calor (conducción, convección y radiación). Una vez obtenido el resultado de cada mecanismo, se realiza una comparación entre el calor transferido por conducción a través del vaporducto (tubería y aislamiento) y la suma del calor transferido desde la superficie externa hacia la atmósfera por convección y radiación.

De esta manera, despejando la temperatura de superficie y sustituyendo las ecuaciones de los tres mecanismos de transferencia de calor, mediante el uso del método de aproximaciones sucesivas, el programa es capaz de estimar la temperatura de superficie.

El caso de estudio analizado para comparación de resultados es un vaporducto de acero al carbono con diámetro nominal de 3" (3.5" de diámetro exterior) que transporta vapor de agua a 150 psig (10.341 barg) y 366 °F (185.6 °C). Está aislado con 1" de aislante de fibra de

vidrio con una conductividad térmica de 0.0028 Btu/hr-ft-°F (0.048 W/m-°C) y una cubierta de tela con pintura mate con emisividad (ε) de 0.94. Para el acero al carbono se tiene ε = 0.79, en tanto que la temperatura del aire ambiental es de 80°F (26.67°C).

Las variantes por realizar para el cálculo de las pérdidas de calor por unidad de longitud y la temperatura de superficie son:

- Se asume que la tubería está aislada y dispone de una cubierta de tela pintada con pintura mate;
- Asumir que la tubería está aislada y cuenta con una cubierta de tela pintada con pintura con 26% de aluminio (ε = 0.30);
- Se asume que la tubería está desnuda (sin aislante y sin cubierta de tela);

En las Figuras 5 a 7 se muestran los resultados obtenidos mediante el programa de aplicación basado en Excel para cada una de las variantes antes indicadas.

Cálculo de la Pérdida de Calor en Tuberías

Tubería Completa, incluyendo la protección metálica

Datos

T _a [°C]	26.67	α [W/m ² ·K ⁴]	5.669E-08	ε	0.94
D _{nom} , Ced	3				
D _i [in]	3.000				
D _e [in]	3.500				
D _a [in]	5.500				
P _{sat} [barg]	10.341				
T _{sat} [°C]	185.48				
T _i [°C]	185.480				
T _e [°C]	185.416				
T _w [°C]	46.722				
T _f [°C]	36.696				
k _{int}	48.360				
k _{ext}	0.048				
h interna					
ρQ [ton/hr]	50.000				
ρQ [kg/s]	13.889				
ρ [kg/m ³]	5.809				
μ [kg/m·s]	1.521E-05				
K [W/m·K]	3.742E-02				
C _p [J/Kg·K]	2786.026				
Pr	1.133				
Re _D	1.53E+07				
e [in]	6.00E-03				
f	0.02342				

Convección Natural

No. de Rayleigh

$$Ra_D = \frac{g \beta (T_w - T_a) D^3}{\nu \alpha}$$

Correlación de Chen para el cálculo

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left[\frac{1}{3.7065} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) - \frac{5.04}{Re_D^{0.25}} \right]$$

Correlación de Gnielinsky para Co

$$Nu_{re} = \frac{(f/8)(Re_D - 1000) Pr}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr^{1/4})}$$

Botones: Completo, Completo-Sin-Lámina, Descubierta

Figura 5. Solución del caso a) mediante el programa de aplicación basado en Excel

Fuente. Autoría Propia (2021)

Se puede apreciar que se sustituyeron en la hoja de Excel los datos geométricos y las condiciones operativas del caso de estudio: diámetro interno, diámetro externo, presión del vapor, las conductividades térmicas de la tubería y su aislante, la rugosidad de la tubería. Se tomó en cuenta un flujo de vapor elevado (50 ton/hr) para

asegurar que el coeficiente de película interno sea grande, dado que el programa con aplicación en calculadoras programables no considera la convección en el interior del vaporducto.

Cálculo de la Pérdida de Calor en Tuberías			
Tubería Completa pero sin protección metálica			
Fibra			
Yeso			
Mast			
Mast			
Datos			
T_{∞} [°C]	26.67	σ [W/m ² ·K ⁴]	5.669E-08
		ε	0.30
Dnom, Ced	3		
Di [in]	3.000	Convección Natural	
De [in]	3.500		
Da [in]	5.500	No. de Rayleigh	
P _{sat} [barg]	10.341		
T _{sat} [°C]	185.48	$Ra_D = \frac{g \beta (T_{\pi} - T_{\infty}) D^3}{\nu \alpha}$	
T _i [°C]	185.480		
T _e [°C]	185.420		
T _w [°C]	55.760		
T _f [°C]	41.215		
k _{mt}	48.360	Correlación de Chen para el cálculo	
k _{ma}	0.048		
h interna			
ρQ[ton/hr]	50.000	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) - \right.$	
ρQ[kg/s]	13.889		
ρ [kg/m ³]	5.809	Correlación de Gnielinsky para	
μ [kg/m·s]	1.521E-05		
K[W/m·K]	3.742E-02	$N_{um} = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr)^{2/3}}$	
Cp[J/Kg·K]	2786.026		
Pr	1.133		
Re _D	1.53E+07		
e [in]	6.00E-03		
f	0.02342		
<	>	...	Completo
		Completo-Sin-Lámina	Descubierto

Figura 6. Solución del caso b) mediante el programa de aplicación basado en Excel
Fuente. Autoría Propia (2021).

En la Tabla 1 se comparan los resultados obtenidos por el programa de aplicación basado en Excel y el programa con aplicación en calculadoras programables HP-67 y HP-97, para los distintos casos de estado de aislamiento analizados.

Se puede notar que la diferencia entre los resultados calculados por ambos programas es mínima debido a que el error relativo no excede el 2%, lo cual se considera que es bastante aceptable.

Trabajos previos como los desarrollados por Peña [3] y Peña y Campbell [4], quienes predicen las pérdidas de calor y de presión en redes de tuberías horizontales de diámetros grandes y con aislamiento térmico mediante un modelo de una ecuación apoyada en la expansión politrópica del vapor, tal y como éste fluye a lo largo de la red. El modelo determina la presión, las temperaturas del aislante y del vapor, la entalpía y la humedad de éste a lo largo de la tubería, cuando se conocen su diámetro, el espesor y el tipo de aislamiento. Sin embargo, los casos analizados por estos autores incluyen sólo tramos de tubería relativamente cortas, en relación con la longitud

total de las redes de vaporductos características de la industria en la actualidad.

Tabla 1. Comparación de resultados para distintos casos de estudio analizados

	Caso de Estudio Analizado					
	a)		b)		c)	
Herramienta utilizada	T _w [°C]	q/L [W/m]	T _w [°C]	q/L [W/m]	T _w [°C]	q/L [W/m]
Programa de aplicación basado en Excel	46.7	93.41	55.8	87.33	184.9	835.22
Programa con aplicación en calculadoras programables [8]	46.2	93.88	54.9	88.04		838.91
	1.08	0.50	1.59	0.81		0.44
Diferencia Relativa [%]						

Fuente. Autoría Propia (2021)

Cálculo de la Pérdida de Calor en Tuberías			
Tubería Descubierta			
Datos			
T_{∞} [°C]	26.67	σ [W/m ² ·K ⁴]	5.669E-08
		ε	0.79
Dnom, Ced	3	Convección Natural	
Di [in]	3.000		
De [in]	3.500	No. de Rayleigh	
P _{sat} [barg]	10.341		
T _{sat} [°C]	185.48	$Ra_D = \frac{g \beta (T_w - T_{\infty}) D^3}{\nu \alpha}$	
T _i [°C]	185.330		
T _w [°C]	184.906	Correlación de Chen para el cálculo	
T _f [°C]	105.788		
k _{mt}	48.368	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) - \right.$	
h interna			
ρQ [ton/hr]	50.000	Correlación de Gnielinsky para Co	
ρQ [kg/s]	13.889		
ρ [kg/m ³]	5.809	$N_{um} = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr)^{2/3}}$	
μ [kg/m·s]	1.521E-05		
K [W/m·K]	3.742E-02	Correlación de Gnielinsky para Co	
Cp [J/Kg·K]	2786.004		
Pr	1.133	$N_{um} = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr)^{2/3}}$	
Re _D	1.53E+07		
e [in]	6.00E-03	$N_{um} = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr)^{2/3}}$	
f	0.02342		
Num _D	47745.11	$N_{um} = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr)^{2/3}}$	
hm _i	23444.009		
h externa		$N_{um} = \frac{(f/8)(Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (Pr)^{2/3}}$	
ν [m ² /s]	2.392E-05		

Figura 7. Solución del caso c) mediante el programa de aplicación basado en Excel

Fuente. Autoría Propia (2021)

Otro trabajo relevante es el realizado por Cruickshank, Ordoñez y Castillo, quienes desarrollaron un modelo adiabático para simular la red de vaporductos de la planta geotérmica de Cerro Prieto [17], en el cual la ecuación de conservación de cantidad de movimiento se resuelve sin predecir perfiles de temperatura y sin tomar en cuenta la tasa de condensado en purgas.

El programa de aplicación basado en Excel presenta las ventajas de ser preciso, dado que éste incorpora correlaciones más actuales y precisas, además de que

realiza un cálculo más completo, sin aplicar simplificaciones o consideraciones a los mecanismos de transferencia de calor mediante los cuales un vaporducto pierde calor hacia el medio ambiente.

CONCLUSIONES

Este trabajo describió una metodología de cálculo para la determinación de las pérdidas de calor en tuberías que transportan vapor saturado, la cual fue implementada en Microsoft Excel, aprovechando las ventajas de este software para facilitar la realización de los cálculos iterativos, así como la programación de fórmulas para la evaluación automática de las propiedades termofísicas del agua y del aire, así como las conductividades térmicas de la tubería y su aislamiento (programa de aplicación basado en Excel).

En este programa se consideraron los tres mecanismos básicos para la transferencia de calor entre el vaporducto el aire de los alrededores, seleccionando las mejores correlaciones para el cálculo del factor de fricción en el interior de la tubería y los coeficientes de película tanto interno (vapor y tubería) como externo (superficie externa y el aire ambiental que lo rodea) para la convección.

Se diseñaron cálculos separados en hojas de Excel para tomar en cuenta el estado de aislamiento del vaporducto, por lo que es posible realizar el cálculo de la pérdida de calor y la temperatura en las distintas interfases del sistema tubería-aislante-ambiente exterior tanto en vaporductos aislados como desnudos (tubería sin aislamiento).

Para verificar los resultados obtenidos mediante el programa de aplicación basado en Excel, se realizaron cálculos de pérdida de calor para un ejemplo de un vaporducto con distintas condiciones de aislamiento [1] y éstos se contrastaron contra los resultados que se obtuvieron al utilizar un programa desarrollado para el mismo propósito, pero con aplicación en calculadoras programables HP-67 y HP-97, el cual es más simple dado que se basa en la premisa que el calor conducido a través del aislamiento sólo se realiza mediante los mecanismos de convección y radiación, asumiendo que la temperatura de la superficie interna del aislamiento es igual que la temperatura en el interior de la tubería.

Los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios, debido a que las diferencias relativas en el cálculo tanto de la pérdida de calor hacia el medio ambiente como de la temperatura de la superficie externa del vaporducto entre ambos programas, no es superior al 2%.

Cálculo de la Pérdida de Calor en Tuberías

Tubería Descubierta

Datos

T_∞ [°C]

26.67

α[W/m²·K⁴]

5.669E-08

ε

0.79

Dnom, Ced

3

Di [in]

3.000

De [in]

3.500

P_{sat} [barg]

10.341

T_{sat} [°C]

185.48

T_i [°C]

185.330

T_w [°C]

184.906

T_r [°C]

105.788

k_{int}

48.368

h interna

ρQ[ton/hr]

50.000

ρQ[kg/s]

13.889

ρ [kg/m³]

5.809

μ [kg/m·s]

1.521E-05

K[W/m·K]

3.742E-02

Cp[J/Kg·K]

2786.004

Pr

1.133

Re_D

1.53E+07

e [in]

6.00E-03

f

0.02342

Num_D

47745.11

hm_i

23444.009

h externa

ν [m²/s]

2.392E-05

Convección Natural

No. de Rayleigh

$$Ra_D = \frac{g \beta (T_w - T_\infty) D^3}{\nu \alpha}$$

Correlación de Chen para el cálculo

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) - \frac{5}{Re_D} \right\}$$

Correlación de Gnielinsky para Ci

$$Nu_m = \frac{(f/8)(Re - 1000) P}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (P_r)^{2/3}}$$

<

>

...

Completo

Completo-Sin-Lámina

Descubierta

Figura 7. Solución del caso c) mediante el programa de aplicación basado en Excel.

Fuente. Autoría Propia (2021).

Otros programas como los descritos en [3] y [4] no consideran condiciones distintas de acuerdo con el estado del aislamiento del vaporducto (completo, sin protección mecánica y desnudo) y no son apropiados para redes grandes de tuberías. Otros autores [17] desarrollaron un modelo adiabático para simular redes de vaporductos sin predecir perfiles de temperatura y sin tomar en cuenta la tasa de condensado en purgas. Sin embargo, el programa de aplicación basado en Excel es más completo en sus cálculos, dado que incorpora correlaciones más precisas para el cálculo de los coeficientes de película tanto interno como externo, así como permite tomar en cuenta cálculos más detallados para las propiedades termofísicas del agua y del aire, y las conductividades térmicas de la tubería y su aislamiento térmico.

Como trabajo futuro, se está considerando utilizar este programa de aplicación basado en Excel para determinar la temperatura de superficie de vaporductos con distintos estados de aislamiento (completo con protección mecánica, completo sin protección mecánica y totalmente desnudo) y condiciones de operación (presión y flujo másico de vapor) en redes industriales, usando como referencia datos medidos en campo usando tecnología infrarroja.

AGRADECIMIENTOS

La Ing. Jazmín Jiménez Manzanares agradece el apoyo proporcionado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) a través de la beca para la realización de sus estudios de maestría en ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Schroeder, F.S. Calculating heat loss or gain by an insulated pipe. Chemical Engineering, January 25, 1982, pp. 111- 114.
- [2] Marconcini, R. y Neri, G., Numerical simulation of a steam pipeline network, Geothermics, Vol. 7, 1979, pp. 17-27.
- [3] Peña, J. M., Energy losses in horizontal steam lines. GRC Transactions, Vol. 10, 1986, pp. 347-252.
- [4] Peña, J M. y Campbell H., Evaluación de las pérdidas de calor en líneas de vapor geotérmico, Memorias, 3er Congreso latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, Guanajuato, Gto., 4-7 Julio, 1988, pp. 53-64.
- [5] Rohsenow, W. M. H.Y. Choi., Heat, Mass and Momentum Transfer, 1961, 391.
- [6] Gnielinsky, New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, Int. Chem. Eng., Vol. 16, No. 2, 1976, pp. 359-368.
- [7] Chen N. H., An explicit equation for friction factor in pipes. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals 18, 1979, 296–297.
- [8] P. Abraham, E. M. Sparrow, W. J. Minkowycz, Internal-flow Nusselt numbers for the low-Reynolds number end of the laminar-to-turbulent transition regime, Int. J. Heat Mass Tran., 54, 2011, 584–588.
- [9] Churchill, S. W. y Bernstein, M. A., Correlating Equation for Forced Convection from Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Cross Flow. J. Heat Transfer, 99, 1977, pp. 300-306.
- [10] Churchill, S. W., & Chu, H. H., Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. International journal of heat and mass transfer, 18(9), 1975, 1049-1053.
- [11] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S., Fundamentals of heat and mass transfer. 2007. Hoboken, NJ: John Wiley; 1985.
- [12] Ozisik, M. N., Heat transfer: a basic approach. McGraw-Hill; 1985
- [13] Holman, J. P., Heat Transfer, 10th edition. Mc-Graw Hill Higher education; 2010.
- [14] Chapra, S. C., Canale, R. P., Ruiz, R. S. G., Mercado, V. H. I., Díaz, E. M., & Benites, G. E., Métodos numéricos para ingenieros (Vol. 5, pp. 154-196). New York, NY, USA: McGraw-Hill; 2010.
- [15] Kreith, F., & Bohn, M. S., Principles of heat transfer, St. Paul: West Publishing Company; 1993.
- [16] Wagner, W., & Kretschmar, H. J., IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam. International steam tables: properties of water and steam based on the industrial formulation IAPWS-IF97, 2008, 7-15.
- [17] C. Cruickshank, E. Ordoñez y G. Castillo (1990), Modelo matemático de la red de vaporductos de la planta

geotermoeléctrica de Cerro Prieto, UNAM, Informe del proyecto 9361.

Tabla de roles de contribución

Rol	Autor(es)
Conceptualización	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares
Curación de datos	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares
Metodología	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares
Administración del proyecto	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares
Recursos	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares
Software	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares
Supervisión	Omar Christian Benítez Canteno Minerva Guadalupe Vargas Vega
Validación	Roberto Marín Urzúa Rangel Minerva Guadalupe Vargas Vega
Visualización	Omar Christian Benítez Canteno Roberto Marín Urzúa Rangel
Redacción (Borrador original)	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares Minerva Guadalupe Vargas Vega
Redacción (Revisión y edición)	Rosember Ovando Castelar Jazmín Jiménez Manzanares Minerva Guadalupe Vargas Vega



Esta obra está bajo
una licencia internacional
Creative Commons Atribución 4.0.