



Reducción de las pérdidas de flujo de calor mediante el uso de aislantes térmicos

Apellidos, nombre	Castelló Gómez, Marisa (mcasgo@upv.es) Heredia Gutiérrez, Ana (anhegu@tal.upv.es) Fito Suñer, Pedro (pedfisu@tal.upv.es) Tarrazó Morell, José (jtarrazo@tal.upv.es)
Departamento	Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen

En este artículo vamos a presentar la aplicación de la **ecuación del transporte de calor en régimen estacionario**, obtenida a partir de la Ley de Fourier, en la predicción de la reducción de la pérdida de calor en un sistema compuesto por varios aislantes dispuestos perpendicularmente al flujo de calor. Para ello, nos familiarizaremos con la estructura general de la ecuación del flujo de calor aplicada a un sistema con varios elementos dispuestos en serie y en régimen estacionario:

$$q=UA\Delta T$$

Donde q : velocidad de transporte de calor (W); U : Coeficiente Global de transmisión de calor A : área perpendicular al transporte y ΔT : diferencia de temperatura entre los puntos considerados de un sistema.

2 Introducción

Según el principio cero de la termodinámica, la energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, en un proceso que va acompañado de un cambio de entropía hasta que se alcanza, si es posible, el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas. En un proceso de intercambio de calor entre cuerpos a distintas temperaturas, en tanto se mantenga una diferencia finita de temperaturas entre los mismos, existirá un flujo irreversible de calor entre dichos cuerpos y no se alcanzará el equilibrio. Sí pueden darse, sin embargo, situaciones en las que las variables macroscópicas del sistema no cambian con el tiempo. Esta situación no corresponde a un estado de equilibrio real sino a un régimen estacionario caracterizado porque se mantienen constantes las temperaturas de los distintos cuerpos involucrados y el flujo de calor entre ellos en el tiempo (Tarrazó, 2002; Tarrazó y Sanjuan, 2005; Conesa 2015).

La transmisión de calor puede tener lugar por tres mecanismos básicos:

- **Conducción:** fenómeno de transmisión de calor entre moléculas, es decir por transporte molecular, donde las moléculas de mayor energía interna intercambian calor sólo con las moléculas adyacentes, sea por vibración en sólidos o por vibración y traslación en fluidos.
- **Convección:** fenómeno de transmisión de calor entre grupos de moléculas con capacidad asociativa y con energía interna similar. Se da sólo en fluidos a partir de la formación de vórtex o turbulencias, que pueden ser naturales (diferencia de densidades) o forzadas con la ayuda de ventiladores, bombas, etc.).
- **Radiación:** fenómeno de calentamiento asociado a la recepción de fotones en el espectro térmico y de microondas. Todo cuerpo con una temperatura mayor del cero absoluto emite fotones con un nivel de energía proporcional a su temperatura, dichos fotones se transforman en calor al alcanzar otros cuerpos en función de la capacidad de estos para absorberlos. El grill del horno, el microondas o la estufa radiante son ejemplos de este fenómeno. Otro ejemplo de este fenómeno es el calentamiento global del planeta por los rayos solares que atraviesan la atmósfera, se transforman en calor en el momento en que entran en contacto con la superficie de la Tierra y después, esta no es capaz de radiar el sobrante por el exceso de dióxido de carbono, provocando el efecto invernadero.

En los procesos químicos, bioquímicos, biotecnológicos y microbiológicos son comunes las operaciones unitarias en las que intervienen fenómenos de transmisión de calor entre dos puntos del sistema a diferente temperatura. Algunos ejemplos, son las reacciones químicas de polimerización, la fermentación, la esterilización, congelación, secado o liofilización, entre otras. El **uso de aislantes térmicos** para limitar el intercambio de calor es común para lograr este objetivo.

¿Estás preparado para ver cómo diseñar este tipo de sistemas? Pues en este documento encontrarás las claves.

3 Objetivos

Una vez te leas con detenimiento este documento, serás capaz de aplicar la ecuación para estimar el transporte de calor entre dos puntos de un sistema. Para ello, tendrás que realizar una **representación gráfica** de los **materiales sólidos** involucrados en el caso de estudio, **incluyendo las características** tanto de los **fluidos** y los **sólidos** que intervienen en el mismo. Por otra parte, será necesario **establecer si hay variación o no del área perpendicular al transporte** para poder hacer la predicción de la velocidad de transporte de calor adecuadamente.

4 Desarrollo

En este apartado vamos a ver cómo manejar tanto desde un punto de vista teórico como práctico las variables de las ecuaciones que se emplean en la estimación del transporte de calor por los mecanismos de conducción y convección.

4.1 Fundamentos del transporte de calor en régimen estacionario

Cuando sólo estemos considerando el transporte de calor en el seno de un **sólido**, aplicaremos la **Primera Ley de Fourier**. Si pensamos en una superficie cuyos extremos están expuestos a temperaturas distintas, el flujo de calor (q/A , siendo q la velocidad de transporte de calor) será directamente proporcional a la conductividad térmica (k) y al gradiente de temperaturas entre dichos puntos e inversamente proporcional a la distancia que los separa. Se dice en este caso, que la **resistencia térmica por conducción** se define como el cociente entre el espesor del material y su conductividad térmica y el área perpendicular al transporte (A) (Figura 1).

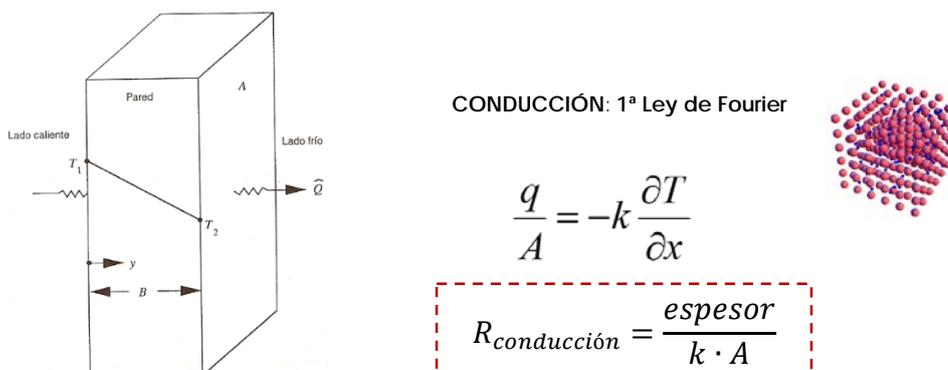


Figura 1. Representación del transporte de calor a través de un único material sólido. Aplicación de la primera Ley de Fourier

En los fluidos, hemos comentado anteriormente que el mecanismo predominante es la convección. Pues bien, puesto que los fluidos siempre tienen que estar contenidos en recipientes sólidos (tuberías, tanques, paredes...), en la interfase entre el sólido y el fluido se produce una ralentización del movimiento de las moléculas del fluido. Esa región se denomina **capa límite** (Bird et al., 2002; Ibarzt y Barbosa-Cánovas, 2005) y en ella se considera, desde un punto de vista teórico, la concentración de la resistencia debida a la convección, siguiendo una expresión similar a la 1ª Ley de Fourier, en la que δ es el espesor de la capa límite y k sería la conductividad del fluido. De esta forma, surge la teoría de la capa límite equivalente (Figura 2).

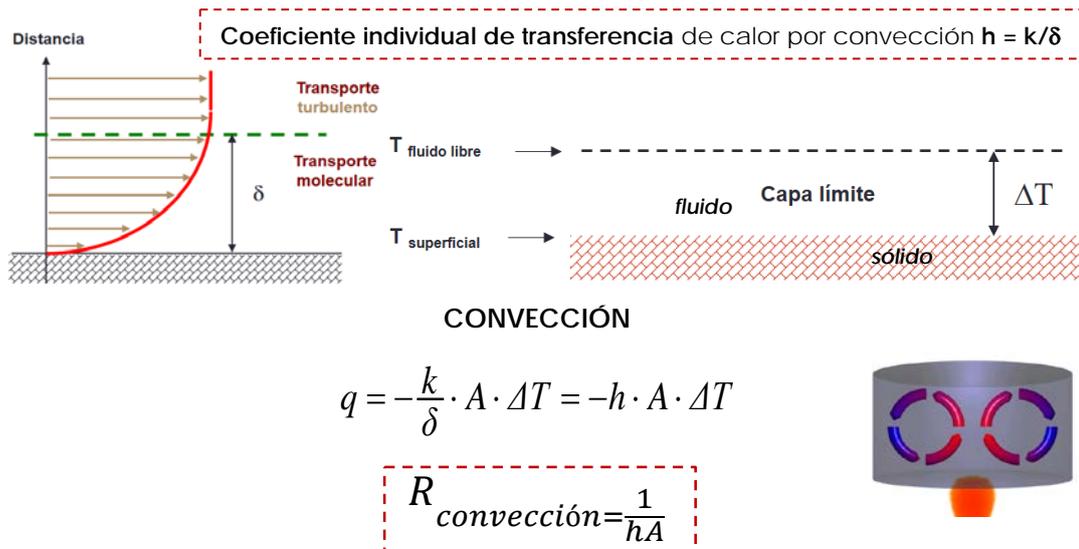


Figura 2. Teoría de la capa límite equivalente

¿Qué sucede cuando se producen de forma combinada la conducción y la convección y además tenemos varios materiales aislantes colocados en serie?

En esos casos el calor que se transfiere a través de un único material es el mismo que el que se transfiere entre todos los materiales porque, al estar en estado estacionario, se cumple que $q = \text{cte}$. Eso sí, tendremos que tener en cuenta en cada tramo la resistencia que se atraviesa. En esos casos, recurriremos al coeficiente global de transmisión (U) y la ecuación que usaremos se muestra en la Figura 3.

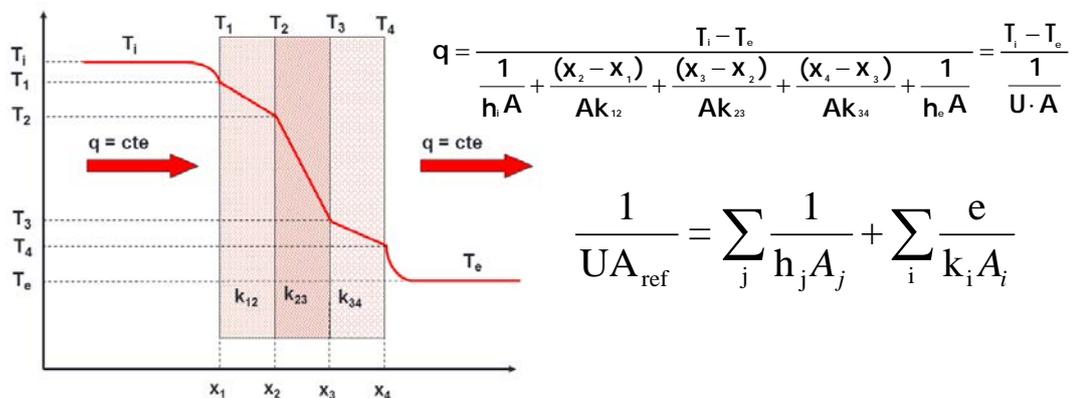


Figura 3. Disposición de varios materiales en serie donde hay conducción y convección. Coeficiente global de transferencia de calor (U)

En este caso, la unidad dividida por el coeficiente global de transmisión de calor y el área perpendicular al transporte de referencia (A_{ref}) será la suma de las resistencias debidas a la convección y las resistencias debidas a la conducción. En el ejemplo de la Figura 3, el esquema representa una pared plana con varios materiales en serie, pero,

¿cómo se trata el revestimiento de una tubería cilíndrica o de un tanque cilíndrico con distintos aislantes?

En estas situaciones, el área perpendicular al transporte no va a ser constante, sino que dependerá de lo alejada que se encuentre la capa de estudio del centro del cilindro. Por ello, se recurre al **área media logarítmica (A_{ml})** para el cálculo de las resistencias debidas a la conducción (Figura 4). Para la resistencia debida a la convección, usaremos el área lateral de un cilindro ($A=2\pi rL$), usando el radio que corresponda en cada caso (interior o exterior). Aquí, el coeficiente global de transporte habrá que referirlo al área interna o externa (A_{ref}).

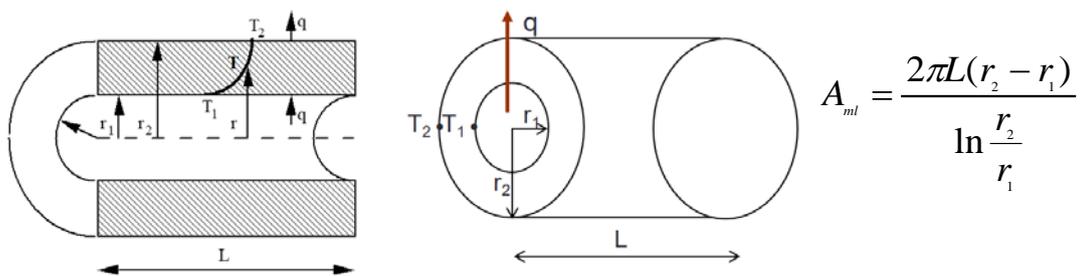


Figura 4. Representación de la variación del área perpendicular al transporte de calor en superficies cilíndricas y ajuste mediante el área media logarítmica (A_{ml})

4.2 Planteamiento del caso práctico

Como la mejor manera de ver cómo se trabaja con la ecuación $q=UA\Delta T$ es mediante un caso práctico, **vamos a** suponer que tenemos que **diseñar un tanque cilíndrico que se va utilizar para mantener un líquido a una temperatura constante** por la aplicación de una fuente calor en su base. El líquido va a estar perfectamente agitado con el fin de evitar perfiles de temperatura. Se manejan 4 posibilidades técnicas según la composición de las paredes del tanque (Figura 5).

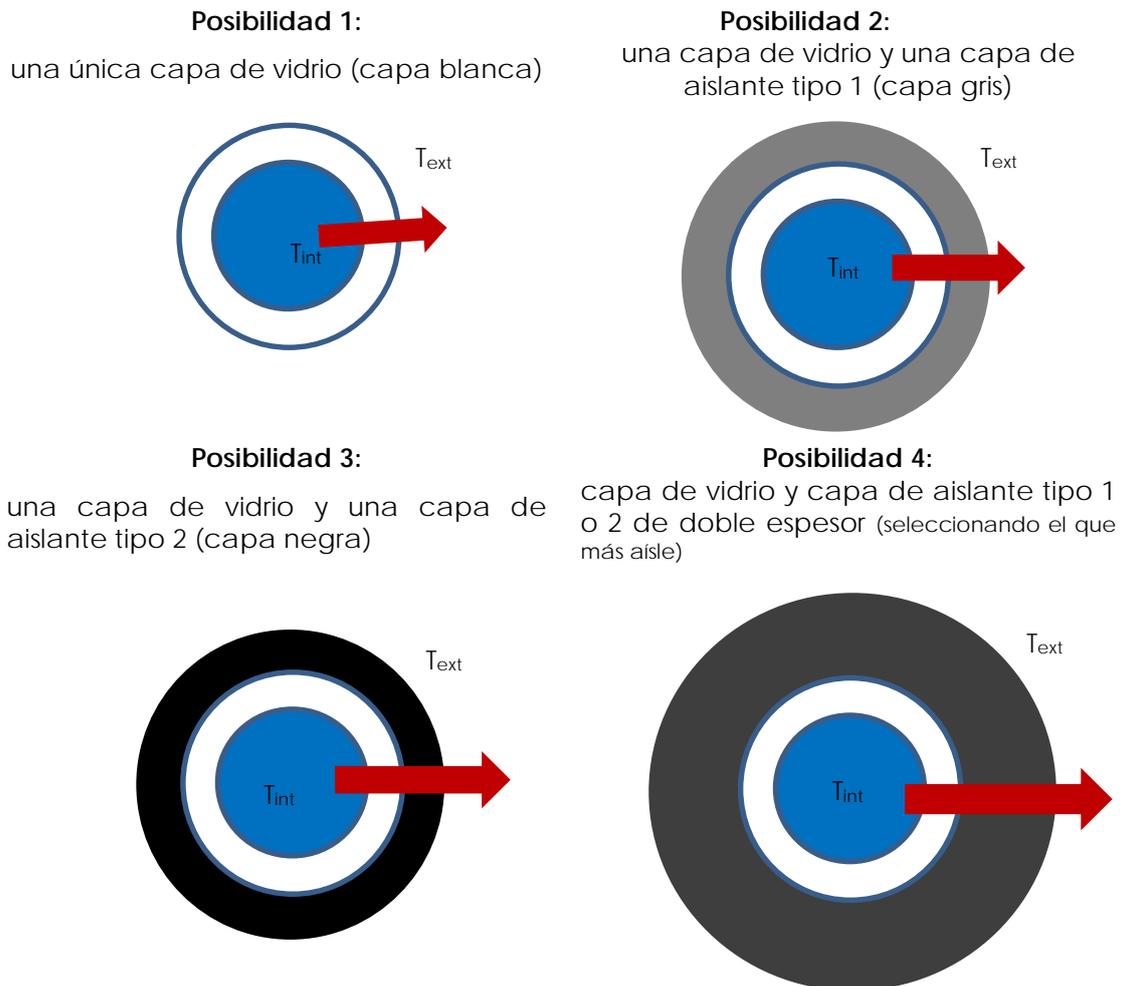


Figura 5. Configuración de las 4 posibles soluciones técnicas de diseño de un tanque cilíndrico

4.2.1 Aplicación a los datos experimentales para evaluar la efectividad en la pérdida de calor

Pongamos valores al caso planteado. Para ello, vamos a considerar que el líquido que se mantiene a 50°C es agua y que la temperatura del ambiente donde se ubica el tanque es de 25°C. La información que necesitamos para abordar este caso, se muestra en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Dimensiones del tanque y espesores de los materiales (mm)

Altura	110
Diámetro exterior	85
Vidrio	6.2
Aislante 1. Polietileno reticulado	10
Aislante 2. Policloropreno	10

Tabla 2. Conductividades térmicas ($W/m^{\circ}C$) de los materiales y coeficientes individuales de transmisión de calor ($W/m^2{\circ}C$) del agua y el aire

$k_{\text{polietileno reticulado}}$	0.04
$k_{\text{policloropreno}}$	0.2
k_{vidrio}	0.8
h_{exterior} (aire ambiente)	40
h_{interior} (agua a $50^{\circ}C$)	2000

¿Os animáis a calcular la velocidad de pérdida de calor (q) para cada posibilidad?

En base a los resultados, podremos calcular el porcentaje de reducción de pérdida de calor respecto a la posibilidad 1 (sin aislantes) y decidir cuál es la más eficiente. Además, también podríamos calcular la temperatura de la superficie exterior del tanque.

1º) Obtener el valor los radios de las interfases de los materiales

$$r_1 (\text{radio interior del tanque de vidrio}) = r_2 - \text{espesor vidrio} = 0.0363 \text{ m}$$

$$r_2 (\text{radio exterior del tanque de vidrio}) = \text{diámetro exterior tanque}/2 = 0.0425 \text{ m}$$

$$r_3 (\text{radio exterior del tanque con un aislante}) = r_2 + \text{espesor aislante} = 0.0525 \text{ m}$$

$$r_4 (\text{radio exterior del tanque con dos aislantes}) = r_3 + \text{espesor aislante} = 0.0625 \text{ m}$$

2º) Calcular la velocidad de pérdida de calor con la fórmula $q=UA\Delta T$

$$q_{\text{posibilidad 1}} = - \frac{(25 - 50)}{\frac{1}{2\pi \cdot 0.110 \cdot 0.0363 \cdot 2000} + \frac{\ln\left(\frac{0.0425}{0.0363}\right)}{2\pi \cdot 0.110 \cdot 0.8} + \frac{1}{2\pi \cdot 0.110 \cdot 0.0425 \cdot 40}}$$

$$q_{\text{posibilidad 1}} = - \frac{2\pi \cdot 0.110 \cdot (25 - 50)}{\frac{1}{0.0363 \cdot 2000} + \frac{\ln\left(\frac{0.0425}{0.0363}\right)}{0.8} + \frac{1}{0.0425 \cdot 40}} = 21.6 \text{ W}$$

$$q_{\text{posibilidad 2}} = - \frac{2\pi \cdot 0.110 \cdot (25 - 50)}{\frac{1}{0.0363 \cdot 2000} + \frac{\ln\left(\frac{0.0425}{0.0363}\right)}{0.8} + \frac{\ln\left(\frac{0.0525}{0.0425}\right)}{0.04} + \frac{1}{0.0525 \cdot 40}} = 2.9 \text{ W}$$

$$q_{\text{posibilidad 3}} = - \frac{2\pi \cdot 0.110 \cdot (25 - 50)}{\frac{1}{0.0363 \cdot 2000} + \frac{\ln\left(\frac{0.0425}{0.0363}\right)}{0.8} + \frac{\ln\left(\frac{0.0525}{0.0425}\right)}{0.2} + \frac{1}{0.0525 \cdot 40}} = 9.9 \text{ W}$$

Como puede observarse, las pérdidas de calor considerando la posibilidad 2 son menores que los de la posibilidad 3, por lo que seleccionaríamos el polietileno reticulado como material de aislante en lugar del policloropreno. Así, en la posibilidad 4, consideraríamos una capa doble de polietileno para ver si sería conveniente hacer

un desembolso mayor y ocupar más espacio en el revestimiento del tanque para asegurar su estanqueidad térmica.

$$q_{\text{posibilidad 4}} = - \frac{2\pi \cdot 0.110 \cdot (25-50)}{\frac{1}{0.0363 \cdot 2000} + \frac{\ln\left(\frac{0.0425}{0.0363}\right)}{0.8} + \frac{\ln\left(\frac{0.0625}{0.0425}\right)}{0.04} + \frac{1}{0.0625 \cdot 40}} = 1.7 \text{ W}$$

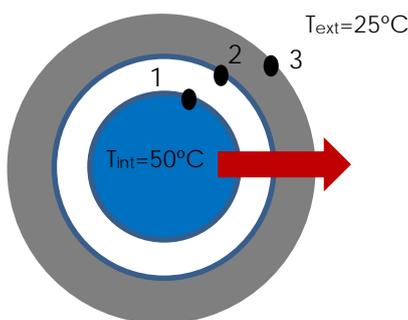
3º) Deducir el porcentaje de reducción de la pérdida de calor, predecir alguna temperatura o el porcentaje de resistencia debida a la conducción o convección

Para lo primero, aplicaremos la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Reducción} = 100 \cdot \frac{(q_{\text{sólo vidrio}} - q_{\text{con aislante/s}})}{q_{\text{sólo vidrio}}}$$

Por tanto, el porcentaje de reducción de las pérdidas de calor utilizando una capa de polietileno reticulado de 1 cm de espesor serían del 86.6%. Si el espesor de este material fuera de 2 cm, la reducción sería del 92.2%. Sin embargo, el policloropreno sólo aportaría un 54.2% de reducción. La elección del material, obviamente, estaría condicionada también a aspectos económicos y de otro tipo técnico (ignífugo, estabilidad, facilidad de limpieza...).

Supongamos que tuviéramos que calcular la temperatura en la capa exterior del tanque. En este ejemplo, el fluido del interior del tanque no está muy caliente (50°C), pero en otra situación, podríamos estar trabajando a temperaturas peligrosas que pusieran en riesgo a los operarios de la industria. Por ello, si quisiéramos saber la temperatura que hay en la parte más externa del tanque (T_3) utilizando el aislante polietileno de 1 cm y sabiendo que $q = \text{constante}$, procederíamos como se muestra en la Figura 6.



$$q_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} = q_{3 \rightarrow \text{ext}} = \frac{-(T_{\text{ext}} - T_3)}{\frac{1}{h_{\text{ext}} A_{\text{ext}}}}$$

$$T_3 = q_{3 \rightarrow \text{ext}} \cdot \frac{1}{h_{\text{ext}} A_{\text{ext}}} + T_{\text{ext}} = 27 \text{ °C}$$

Figura 6. Estimación de la temperatura de la capa más externa del tanque

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el porcentaje de resistencia que se considera debido a la conducción o a la convección. Así, por ejemplo, en la posibilidad 2 diríamos que:

$$\% \text{ Resistencia}_{\text{conducción}} = 100 \frac{\sum \frac{\text{espesores}}{K_i A_{ml}}}{\frac{1}{U A_{\text{ref}}}} = 100 \frac{7.93}{7.93 + 0.71} = 91.8\%$$

$$\% \text{ Resistencia}_{\text{convección}} = 100 \frac{\sum \frac{1}{h_j A_j}}{\frac{1}{U A_{\text{ref}}}} = 100 \frac{0.71}{7.93 + 0.71} = 8.2\%$$



5 Cierre

En resumen, en este artículo hemos visto cómo predecir la velocidad de transporte de calor por conducción y convección cuando hay varios materiales en un sistema, analizando la variación del área perpendicular al transporte en sistemas cilíndricos. Para ello, hemos calculado las resistencias debidas a la conducción o a la convección. Por último, hemos calculado cómo predecir la reducción de pérdida de calor según el aislante considerado y su grosor. De esta forma, podremos seleccionar la solución técnica más adecuada y eficiente para evitar de la transferencia de energía.

6 Bibliografía

Bird, R.B, Stewart, W.E. y Lightfoot, E.N. (2002). Transport Phenomena, Revised 2nd Edition, Editorial: Wiley & Sons Inc. New York (EEUU).

Conesa, J.A. (2015). Mecanismos de transferencia de calor. <https://www.ingenieriaquimica.net/recursos/384-mecanismos-de-transferencia-de-calor>

Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas G.V. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Editorial Mundi-Prensa

Tarrazó, J. (2002). Introducción a las operaciones básicas en la ingeniería de alimentos. Editorial UPV.

Tarrazó, J., Sanjuán N. (2005). Problemas de ingeniería de procesos en las industrias agroalimentarias. Editorial UPV.