

Calor, trabajo y leyes de la termodinámica



Cuando dos cuerpos que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto, se produce una transferencia de energía en forma de calor hasta que ambos cuerpos consiguen igualarla, es decir, hasta llegar al equilibrio térmico. Distinguir los procesos que permiten esta transferencia de calor, definir los coeficientes de transmisión para cada proceso, así como definir el coeficiente total de transmisión resultante de la simultaneidad de los distintos mecanismos de transferencia térmica, es fundamental para aplicaciones como el aislamiento de las tuberías o de las paredes. La transmisión de energía en forma de calor junto con el concepto de trabajo sientan las bases para comprender el primer principio de la termodinámica y su aplicación a máquinas térmicas.

3

Contenidos

- 3.1. Concepto de calor
- 3.2. Concepto de trabajo
- 3.3. Primer principio de la termodinámica
- 3.4. Aplicación del primer principio de la termodinámica a máquinas térmicas
- Resumen
- Actividades finales

Objetivos

- Definir el concepto de calor y de trabajo.
- Distinguir los mecanismos de transmisión del calor.
- Calcular la velocidad de transmisión del calor por los tres mecanismos: conducción, convección y radiación.
- Calcular la resistencia térmica de muros y de tuberías.
- Relacionar calor y trabajo mediante la primera ley de la termodinámica en sistemas abiertos y cerrados.
- Saber aplicar el primer principio de la termodinámica a máquinas térmicas.

3.1. Concepto de calor

Cuando colocamos un cuerpo en un entorno que tiene distinta temperatura, lo que ocurre es una transferencia o trasvase de energía hasta que se consigue igualar ambas temperaturas, en otras palabras, hasta llegar a un equilibrio térmico. Esa transferencia de energía siempre se produce del foco de mayor al de menor temperatura.

Partiendo de lo anterior, diremos que los cuerpos pueden calentarse (aumentar su energía interna) o enfriarse (perder energía interna). La energía ganada o perdida en estos procesos es el calor.

Por tanto, podemos definir **calor (Q)** como una forma de energía que se transfiere entre un sistema y sus alrededores debido a una diferencia de temperaturas.

$$Q = M \times C_e \times (T_1 - T_2)$$

Donde Q es la cantidad de calor que absorbe o cede una sustancia (kJ), M es la masa de la sustancia (kg), C_e es el calor específico de la sustancia [es la energía necesaria para aumentar en 1K la temperatura de 1 kg de masa de una sustancia (kJ/kg K)], T_1 es la temperatura final de la sustancia (K) y T_2 es la temperatura inicial de la sustancia (K).

Para saber si el calor se transmite del sistema a los alrededores o viceversa, tenemos el siguiente convenio de signos:

- El **calor es positivo** si entra en el sistema desde los alrededores. Por ejemplo, en una cazuela en la que se hierve agua, el calor es positivo puesto que se está aplicando una energía para calentar el agua.
- El **calor es negativo** si el sistema pierde calor hacia los alrededores. Por ejemplo, en los alimentos de un frigorífico, el calor será negativo ya que el frigorífico está extrayendo energía en forma de calor para conservarlos.

Actividad resuelta

3.1. Una sustancia de masa 20 kg y calor específico 0,1 kJ/kg K está a la temperatura de 280 °C. ¿Qué calor tendrá que absorber o emitir para pasar a una temperatura de 310 °C?

Solución:

$$Q = M \times C_e \times (T_1 - T_2) = 20 \text{ kg} \times 0,1 \text{ kJ/kg} \times \text{K} \times (583 - 553) \text{ K} = 60 \text{ kJ}$$

Puesto que el calor tiene signo positivo, nos indica que el calor es absorbido.

RECUERDA

Si calentamos la misma masa de agua y de alcohol en dos recipientes, cuando lleguemos a 78 °C el alcohol empezará a hervir, sin embargo, el agua no hervirá hasta que llegue a 100 °C. Decimos que el alcohol es más fácil de calentar (y de enfriar) que el agua, debido a que tiene menor calor específico.

3.1.1. Transmisión de calor por radiación

Todos los cuerpos con temperatura absoluta superior a 0 K emiten radiaciones de calor y su intensidad depende de la temperatura y de la longitud de onda. Cuanto mayor sea la temperatura del cuerpo, mayor será la intensidad de calor, independientemente del entorno.

La **radiación térmica** es la energía emitida por los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz debido a su temperatura. Si esta energía llega a otro cuerpo, puede ser reflejada, transmitida o absorbida por él.

Sin embargo, la radiación térmica no necesita un medio físico de transmisión y puede ocurrir incluso en el vacío.

Pensemos, por ejemplo, un cuerpo en el interior de un recinto cerrado cuyas paredes tienen una temperatura menor que la del cuerpo. En esta situación, la temperatura del cuerpo disminuirá debido a la radiación independientemente del medio de transmisión. La **velocidad de transmisión de calor** por radiación térmica entre el cuerpo y el recinto se expresa así:

$$Q_{\text{radiación}} = \epsilon \times \sigma \times A_s \times (T_s^4 - T_{\text{pared}}^4)$$

Donde $Q_{\text{radiación}}$ es la velocidad de transferencia de calor por radiación (W), ϵ es la emisividad del cuerpo que está en el interior de un recinto cerrado (tiene un valor entre 0 y 1 que depende del material y es adimensional), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$),



Figura 3.1. Imagen realizada por cámara térmica

A_s es el área del cuerpo (m^2), T_s es la temperatura absoluta de la superficie del cuerpo que está dentro de la superficie (K) y T_{pared} es la temperatura de las paredes interiores que rodean al cuerpo (K).

Tabla 3.1. Emisividad de algunos materiales a 300 K

Material	Emisividad
Aluminio	0,82
Cobre pulido	0,03
Oro pulido	0,03
Plata pulida	0,02
Acero inoxidable pulido	0,17
Pintura negra	0,98
Pintura blanca	0,90
Asfalto	0,85-0,93
Piel humana	0,95
Madera	0,82-0,92
Agua	0,96

Actividad resuelta

3.2. Juan se encuentra en el salón de su casa y tiene el termostato de la calefacción regulado a 21 °C de temperatura. La temperatura de las superficies interiores de las paredes es de 15 °C. Determina la velocidad de transferencia de calor por radiación entre Juan y las superficies del salón si el área de piel de Juan es de 1,5 m² y su temperatura superficial es de 35 °C.

Solución:

Juan pierde calor por radiación hacia las paredes del salón. Considerando que la temperatura en todas las paredes del recinto (suelo, techo y paredes verticales) es la misma y que el aire no interviene en la transferencia, la velocidad de esta transferencia por radiación es:

$$Q_{\text{radiación}} = \varepsilon \times \sigma \times A_s \times (T_s^4 - T_{\text{pared}}^4) = 0,95 \times (5,67 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4) \times 1,5 \text{ m}^2 \times [(35 + 273)^4 - (15 + 273)^4] \text{ K}^4 = 17.124,799 \text{ W}$$

3.1.2. Transmisión de calor por conducción

La **transmisión de calor por conducción** de un cuerpo es debida a la transferencia de energía cinética entre sus moléculas o entre sus moléculas y otros cuerpos. La transferencia de calor por conducción no puede realizarse en el vacío.

Si aplicamos calor a una barra de metal, el punto donde está el foco de calor aumenta su temperatura debido a los movimientos moleculares, es decir, aumenta su energía interna. Esos movimientos se transmiten a las moléculas adyacentes que están a una temperatura inferior, por lo que se trasmite el calor de la zona de mayor temperatura a la de menor temperatura.

Para realizar los cálculos de conducción, consideraremos que trabajamos en régimen permanente, lo que quiere decir que no habrá variaciones de temperatura con el tiempo en un punto concreto.



Figura 3.2. Transmisión de calor por conducción a través de un metal

Conducción térmica en una pared plana homogénea

Suponiendo que las dos caras de la pared o del muro formado por un único material tienen siempre una temperatura constante (régimen permanente) y están separadas por una distancia que llamaremos espesor, puede expresarse la **velocidad de transmisión del calor en el caso de una pared plana homogénea** de la siguiente forma:

$$Q_{\text{conducción}} = \lambda \times A \times (T_1 - T_2)/e$$

Donde $Q_{\text{conducción}}$ es la velocidad de transmisión de calor por conducción (W), λ es la conductividad térmica [es una propiedad física propia del material de la pared y puede definirse como la capacidad que tiene un material para transmitir el calor por conducción. Si tiene un valor elevado, significa que el material es buen conductor, por el contrario, si el valor es bajo, significa que es mal conductor (aislante). Los valores de conductividad térmica para distintos materiales vienen recogidos en la norma UNE EN ISO 10456:2001 o en otros documentos reconocidos. (W/m × K)], A es el área de una de las superficies de la pared (m²), T_1 es la temperatura mayor de las dos superficies de la pared (K), T_2 es la temperatura menor de las dos superficies de la pared (K) y e es el espesor de la pared o la distancia entre las dos superficies de la pared (m).

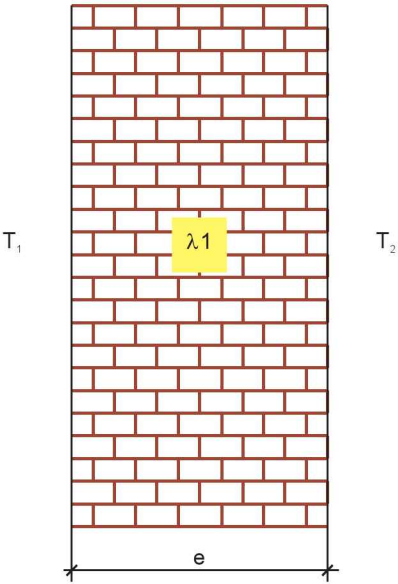


Figura 3.3. Transmisión de calor por conducción a través de una pared simple

Al igual que en electricidad se emplea la resistencia eléctrica, aquí utilizaremos la resistencia térmica, de forma que podremos hacer un símil entre la ley de Ohm y la ecuación de conducción de calor (Tabla 3.2.).

De acuerdo con la tabla anterior, **la resistencia térmica de conducción** en el caso de una pared homogénea es:

$$R_{\text{térmica}} = e / (\lambda \times A) \text{ (K/W)}$$

Por otro lado, definimos **la resistencia térmica interna o específica** de una pared homogénea como la resistencia térmica de una pared de 1 m² de superficie, es decir:

$$R_{\text{térmica interna}} = e / \lambda \text{ (m}^2 \text{ K/W)}$$

Por último, **la conductancia térmica** se define como la inversa de la resistencia térmica interna:

$$C = 1 / R_{\text{térmica}} = \lambda / e \text{ (W/m}^2 \times \text{K)}$$

Tabla 3.2. Comparativa entre magnitudes eléctricas y térmicas

	Eléctrica	Térmica
Ecuación	$I = V / R_{\text{eléctrica}}$	$Q_{\text{conducción}} = \lambda \times A \times (T_1 - T_2) / e$ o $Q_{\text{conducción}} = (T_1 - T_2) / [e / (\lambda \times A)]$
Resistencia	$R_{\text{eléctrica}}$	$R_{\text{térmica}} = e / (\lambda \times A)$
Intensidad	I	$Q_{\text{conducción}}$
Diferencial	$V_1 - V_2$	$T_1 - T_2$

Tabla 3.3. Conductividad térmica de algunos materiales constructivos

Material	$\lambda \text{ (W/m} \times \text{K)}$
Acero	50
Aglomerado entre 500 y 600 kg/m³	0,17
Aluminio	230
Asfalto	0,70
Cobre	380
Betún	0,17
Hormigón armado > 2.500 kg/m³	2,50
Hormigón con arcilla expandida 600 kg/m³	0,19
Bloque de hormigón convencional 520-1.230 kg/m³	1,18
Yeso, dureza media entre 600 y 900 kg/m³	0,30
Enlucido de yeso entre 1.000 y 1.300 kg/m³	0,57
Ladrillo hueco LH	0,32

Actividad resuelta

3.3. El suelo de una vivienda tiene unas dimensiones de 6 m de largo, 9 m de ancho y 0,25 m de espesor y está construido con un material cuya conductividad térmica es $0,7 \text{ W/m} \times ^\circ\text{C}$. Las temperaturas de las superficies interior y exterior del suelo son de $16 ^\circ\text{C}$ y $4 ^\circ\text{C}$, respectivamente. Responde a las cuestiones siguientes:

- Determina la velocidad de la pérdida de calor a través del suelo durante un día.
- Estima cuál sería el coste de esa pérdida de calor para el propietario de la vivienda durante un día, suponiendo que la calefacción sea eléctrica, si el coste de la electricidad es de $0,14 \text{ €/kWh}$.
- Halla la resistencia térmica, la resistencia térmica interna y la conductividad térmica del suelo.

Solución:

- La velocidad de transmisión del calor a través del suelo es:

$$Q_{\text{conducción}} = \lambda \times A \times (T_1 - T_2)/e$$

$$(0,7 \text{ W/m} \times ^\circ\text{C}) \times (6 \times 9) \text{ m}^2 \times (16 - 4) ^\circ\text{C}/0,25 \text{ m} = 1.814,4 \text{ W}$$

Se nos pide calcular la pérdida en un día, para ello, sabiendo que $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ y que $1 \text{ día} = 24 \text{ h} = 86.400 \text{ s}$, podemos concluir que:

$$\text{Pérdida de calor en un día} = 1.814,4 \text{ W} = 1.814,4 \text{ J/s}$$

$$1.814,4 \text{ J/s} \times 86.400 \text{ s/1 día} = 156.764.160 \text{ J/día} = 156,76416 \text{ MJ/día}$$

- La pérdida de calor en 1 día (24 h) es: $1.814,4 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 43,545 \text{ kWh}$

Y, sabiendo que el coste de la electricidad es de $0,14 \text{ €/kWh}$, el coste de calor en 1 día es:

$$43,545 \text{ kWh} \times (0,14 \text{ €/kWh}) = 6,096 \text{ €}$$

- La resistencia térmica es:

$$R_{\text{térmica}} = e/(\lambda \times A)$$

$$0,25 \text{ m}/[(0,7 \text{ W/m} \times ^\circ\text{C}) \times (6 \times 9) \text{ m}^2] = 6,613 \times 10^{-6} ^\circ\text{C/W}$$

La resistencia térmica interna es:

$$R_{\text{térmica interna}} = e/\lambda = 0,25 \text{ m}/0,7 \text{ W/m} \times ^\circ\text{C} = 0,175 \text{ m}^2 ^\circ\text{C/W}$$

Y la conductividad térmica del suelo es:

$$C = \lambda/e = 0,7 \text{ W/m} \times ^\circ\text{C}/0,25 \text{ m} = 2,8 \text{ W/m}^2 \times ^\circ\text{C}$$

Actividad propuesta

3.1. Las superficies interior y exterior de un muro de ladrillos tienen unas temperaturas de 20 y de $5 ^\circ\text{C}$, respectivamente. Las dimensiones del muro son 5 m de alto, 8 m de ancho y 25 cm de espesor. Sabiendo que la conductividad térmica es de $0,69 \text{ W/(m} \times ^\circ\text{C)}$, calcula:

- La velocidad de transferencia de calor a través del muro en vatios.
- La resistencia térmica, la resistencia térmica interna y la conductividad térmica.

propio espesor. Por consiguiente, en el caso de una pared con tres materiales, las resistencias térmicas de cada uno de ellos son:

- $R_{\text{térmica1}} = e_1/(\lambda_1 \times A)$.
- $R_{\text{térmica2}} = e_2/(\lambda_2 \times A)$.
- $R_{\text{térmica3}} = e_3/(\lambda_3 \times A)$.

De acuerdo con lo anterior, la **resistencia térmica total** se expresa como la suma de las resistencias térmicas de cada uno de los materiales:

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{térmica1}} + R_{\text{térmica2}} + R_{\text{térmica3}} \text{ (K/W)}$$

De la misma forma, la **resistencia interna total** es la suma de las resistencias térmicas internas de cada material.

Por último, la **velocidad de transmisión de calor por conducción** en el caso de una pared compuesta de tres materiales puede expresarse como:

$$Q_{\text{conducción}} = (T_1 - T_4)/R_{\text{total}} \text{ (W)}$$

Conducción térmica en una pared plana heterogénea

Para calcular la conducción térmica en una pared con varios materiales diferentes, se tendrá en consideración que cada material tiene su propia conductividad térmica y su

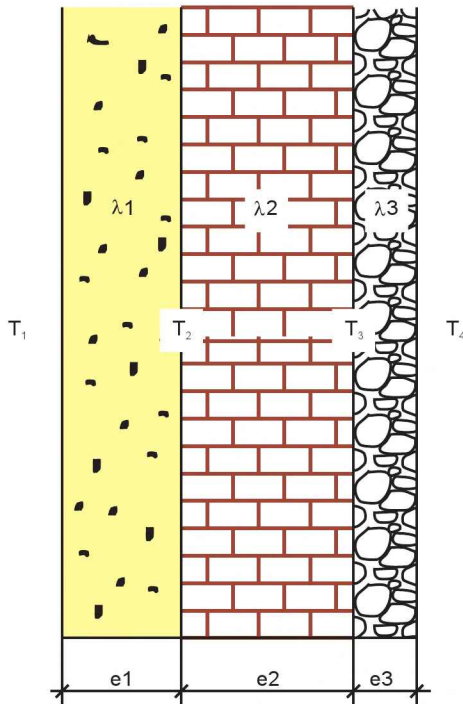


Figura 3.4. Transmisión de calor por conducción a través de una pared compuesta por tres materiales

RECUERDA

Siempre que existe una diferencia de temperaturas, se produce un flujo de calor.

La transferencia se produce del foco más caliente al menos caliente.

Actividad propuesta

3.2. Las superficies interior y exterior de la pared de un refrigerador de 2 m de alto y 3 m de ancho tienen unas temperaturas de 30 y de 90 °F, respectivamente. Sabiendo que la pared está formada de exterior a interior por un panel de corcho (0,035 W/m × K) de 2 cm de espesor, una hoja de material aislante (0,009 W/m × K) de 1 cm de espesor y un recubrimiento de aluminio (0,15 W/m × K) de 0,3 cm sobre la superficie interna. Calcula:

- La velocidad de transferencia de calor a través de la pared en vatios.
- La resistencia térmica, la resistencia térmica interna y la conductividad térmica.

Actividad resuelta

3.4. Mario es un albañil que va a colocar una ventana de dimensiones 1 m × 0,7 m en la cocina de una vivienda. La ventana está formada por dos capas de vidrio de 3 mm de espesor con una conductividad térmica de 0,78 W/(m × °C), separadas por un espacio de aire que actúa de aislante de 0,2 mm de ancho y cuya conductividad térmica es de 0,026 W/(m × °C). Calcula la velocidad de transferencia de calor a través de la ventana si la temperatura interior es de 20 °C y la exterior es de 4 °C.

Solución:

Puesto que la ventana tiene dos capas de vidrio y una capa de aire que actúa de aislante, estaremos ante un caso de pared compuesta por tres capas, por lo tanto, la resistencia total de la ventana es:

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{térmicavidrio}} + R_{\text{térmicaaire}} + R_{\text{térmicavidrio}}$$

$$[e_1/(\lambda_1 \times A)] + [e_2/(\lambda_2 \times A)] + [e_3/(\lambda_3 \times A)] = [0,003 \text{ m}/0,78 \text{ W}/(\text{m} \times ^\circ\text{C}) \times (1 \times 0,7) \text{ m}^2] + [0,0002 \text{ m}/0,026 \text{ W}/(\text{m} \times ^\circ\text{C}) \times (1 \times 0,7) \text{ m}^2] + [0,003 \text{ m}/0,78 \text{ W}/(\text{m} \times ^\circ\text{C}) \times (1 \times 0,7) \text{ m}^2] = 5,495 \times 10^{-3} + 0,0109 + 5,495 \times 10^{-3} = 0,0218 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

La velocidad de transmisión de calor por conducción de la ventana es:

$$Q_{\text{conducción}} = (T_1 - T_4)/R_{\text{total}} = (20 - 4) \text{ } ^\circ\text{C}/0,0218 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W} = 730,927 \text{ W}$$

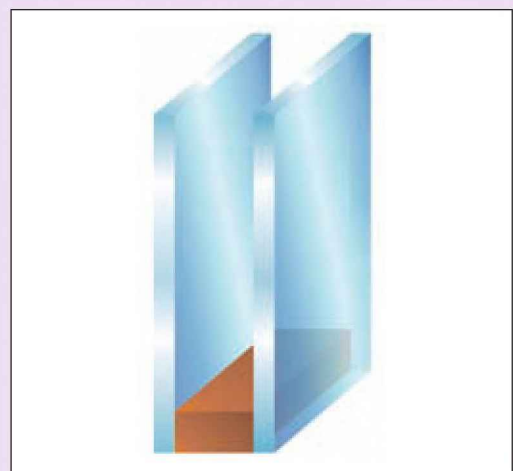


Figura 3.5. Las ventanas con un espacio de aire que actúa como aislante son un ejemplo de transmisión de calor a través de una pared compuesta

Conducción térmica en una pared tubular homogénea

La conducción de calor a través de una pared tubular tiene uno de sus ejemplos más claros en los tubos de la calefacción a través de los que circula agua caliente por su interior. En este caso, diremos que, si la superficie exterior de un tubo de calefacción está a menor temperatura que la interior, el calor fluirá desde el interior hacia el exterior del tubo.

La **velocidad de transmisión de calor por conducción en el caso de una pared tubular** con una longitud de tubería L se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{\text{conducción}} = 2 \times \Pi \times L \times \lambda \times (T_1 - T_2) / \ln (R/r) \text{ (W)}$$

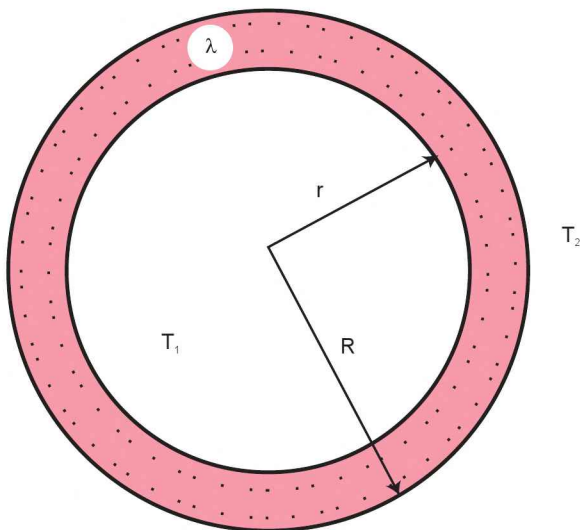


Figura 3.6. Transmisión de calor por conducción a través de una tubería simple

Del mismo modo que para una pared plana, podemos obtener la **resistencia térmica** para una pared tubular:

$$R_{\text{térmica}} = \ln (R/r) / (2 \times \Pi \times L \times \lambda) \text{ (K/W)}$$

Actividad propuesta

3.3. Una varilla larga cilíndrica con un diámetro interior de 3,5 cm y exterior de 4 cm transporta un gas a una temperatura de 150 °C durante una distancia de 50 m. La varilla (100 W/m × K) discurre por una nave a una temperatura de 18 °C.

Determina:

- La velocidad de transferencia de calor a través de la pared en vatios.
- La resistencia térmica.

Actividad resuelta

3.5. Un tubo de acero con un diámetro interior de 24 cm y exterior de 30 cm transporta vapor sobrecalentado a una temperatura de 110 °C durante una distancia de 20 m. El tubo está ubicado en un entorno cuya temperatura es de 22 °C. Determina la rapidez con la que se transmite el calor a través de las paredes del tubo.

Solución:

La velocidad de transmisión de calor por conducción en el caso de una pared tubular se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Q_{\text{conducción}} &= 2 \times \Pi \times L \times \lambda \times (T_1 - T_2) / \ln (R/r) = \\ &= 2 \times \Pi \times 20 \text{ m} \times (50 \text{ W/m} \times \text{K}) \times \\ &\quad \times (110 - 22) \text{ K} / \ln (0,15/0,12) = \\ &= 552.920,307 / \ln (0,15/0,12) = 2.477.868,187 \text{ W} \end{aligned}$$



Figura 3.7. Las tuberías son un ejemplo de transmisión de calor por conducción en pared tubular homogénea

Conducción térmica en una pared tubular heterogénea

Supongamos una pared tubular compuesta que está formada por varios materiales, por ejemplo, un tubo con una capa de aislamiento.

Cabe observar que la resistencia térmica total de la tubería será la suma de la resistencia térmica del tubo y la del aislamiento.

$$R_{\text{térmica 1}} = \ln (r_2/r_1) / 2 \times \Pi \times L \times \lambda_{\text{tubo}}$$

$$R_{\text{térmica 2}} = \ln (r_3/r_2) / 2 \times \Pi \times L \times \lambda_{\text{aislamiento}}$$

De tal forma que la **resistencia térmica total** se expresa como la suma de las resistencias de cada uno de los materiales que forman el tubo:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2$$

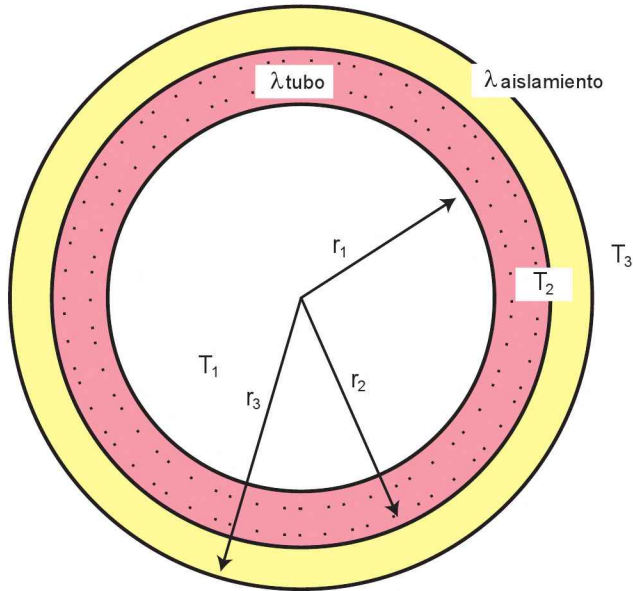


Figura 3.8. Transmisión de calor por conducción a través de una tubería compuesta por dos materiales

Podemos concluir que la **velocidad de transmisión de calor por conducción en el caso de un tubo con aislamiento** se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{\text{conducción}} = (T_1 - T_3)/R_{\text{total}} \text{ (W)}$$

3.1.3. Transmisión de calor por convección

En la **convección térmica**, la transferencia de calor se produce entre una superficie sólida y un fluido que está en movimiento. El fluido, al calentarse, aumenta de volumen y su densidad disminuye, por lo que asciende y desplaza al que se encuentra en la parte superior y que se encuentra a menor temperatura. Cuanto más rápido se desplace el fluido, mayor será la transferencia de calor.

Existen dos tipos de convección térmica:

1. **Convección natural.** Debido a diferencias de temperaturas en el fluido, se producen variaciones de la densidad del fluido y se produce su movimiento. Un ejemplo es la calefacción con radiadores, el aire caliente sube hacia arriba, ya que es menos denso que el aire frío, y desplaza hacia abajo al aire frío que estaba arriba.

2. **Convección forzada.** El movimiento del fluido se favorece mediante medios externos, como puede ser un ventilador, una bomba o el viento, y consigue de esta manera una transmisión del calor más rápida. Un ejemplo es el aire acondicionado de una habitación.

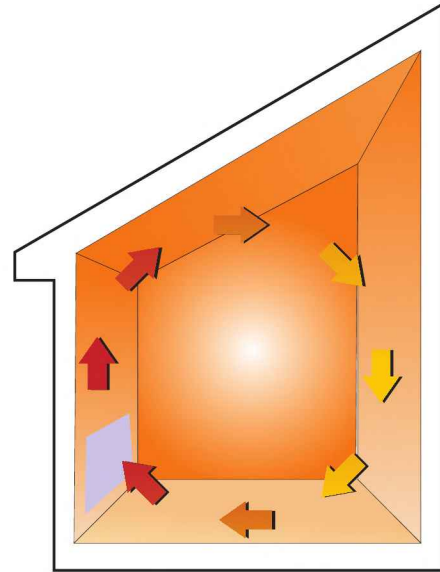


Figura 3.9. Transmisión de calor por convección en una habitación con calefacción

La **velocidad de transferencia de calor por convección** se expresa con la ley del enfriamiento de Newton:

$$Q_{\text{convección}} = h \times A \times (T_{\text{superficie}} - T_{\text{fluido}})$$

Donde h es el coeficiente superficial de transmisión de calor [se determina de forma experimental, no es una propiedad de fluido y depende de múltiples parámetros relacionados con el flujo del fluido como son el tipo de convección (forzada o natural), el régimen del fluido (laminar o turbulento), la velocidad del flujo o la densidad del fluido. $(W/(m^2 \times K))$, A es el área de la superficie a través de la cual se produce la transferencia de calor por convección (m^2), $T_{\text{superficie}}$ es la temperatura de la superficie (K) y T_{fluido} es la temperatura del fluido lejos de la superficie (K).

Al igual que en la transferencia de calor por conducción teníamos resistencia térmica y resistencia térmica interna, en la convección, también existen la resistencia de convección y la resistencia térmica superficial.

De acuerdo con:

$$Q_{\text{convección}} = h \times A \times (T_{\text{superficie}} - T_{\text{fluido}}) = (T_{\text{superficie}} - T_{\text{fluido}})/(1/h \times A)$$

Tendremos que la **resistencia térmica de convección** es:

$$R_{\text{convección}} = 1/h \times A \text{ (K/W)}$$

Por último, definimos la **resistencia térmica superficial** como la resistencia térmica a la convección de una superficie de 1 m², es decir:

$$R_{\text{convección}} = 1/h \text{ (m}^2 \times \text{K/W)}$$

SABÍAS QUE...

En el Código Técnico de la Edificación (CTE), aparecen los cálculos para cerramientos en contacto con el aire exterior, tales como muros de fachada, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior.

Coeficiente total de transmisión de calor (U)

Hasta ahora, hemos visto las formas de transmisión de calor por separado, pero, normalmente, la transmisión de calor no se produce mediante una única forma de transferencia. Por ejemplo, en las superficies de muros, paredes o chapas que están en contacto con fluidos diferentes a temperaturas distintas, la transferencia se lleva a cabo por conducción y por convección.

Cuando existen varias formas de transmisión de calor simultáneamente, la pregunta que nos haríamos es **¿cómo cal-**

culamos la velocidad de transmisión de calor? y **¿cómo calculamos la resistencia térmica total del muro?**

Para explicarlo, proponemos un ejemplo. Observemos una pared de una casa en la que su cara interna está en contacto con un fluido caliente, que puede ser el aire calentado por un radiador, y la cara externa está en contacto con el aire de la calle, que es más frío.

La transmisión de calor a través de las superficies de las caras interior y exterior se produce por convección. Sin embargo, también hay una transmisión de calor a través de la pared que se produce por conducción. Así pues, la **resistencia térmica total** del cerramiento compuesto por un material se expresa de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} R_{\text{total}} &= R_{\text{superficial int}} + R_{\text{pared}} + R_{\text{superficial ext}} = \\ &= (1/h_i \times A) + (e/\lambda \times A) + (1/h_e \times A) \end{aligned}$$

(K/W)

Los valores de las resistencias superficiales interiores ($1/h_i$) y exteriores ($1/h_e$) vienen recogidos en el Documento Básico de Ahorro Energético del Código Técnico de la Edificación (CTE-HE1):

Tabla 3.4. Resistencias térmicas superficiales de particiones interiores en m² × K/W







Posición de la partición interior y sentido del flujo de calor		$R_{se} = 1/h_e$	$R_{si} = 1/h_i$
	Particiones interiores verticales o con pendiente sobre la horizontal > de 60° y flujo horizontal.	0,13	0,13
	Particiones interiores horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≥ de 60° y flujo ascendente.	0,10	0,10
	Particiones interiores horizontales y flujo descendente.	0,17	0,17

Tabla 3.5. Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en m² × K/W

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		$R_{se} = 1/h_e$	$R_{si} = 1/h_i$
	Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal > de 60° y flujo horizontal.	0,04	0,13
	Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≥ de 60° y flujo ascendente.	0,04	0,10
	Cerramientos horizontales y flujo descendente.	0,04	0,17

También definimos **la resistencia térmica total interna** de 1 m² de superficie de pared como:

$$R_{\text{total interna}} = 1/h_i + e/\lambda + 1/h_e \text{ [(m}^2 \times \text{K)/W]}]$$

La inversa de la resistencia térmica total de metro cuadrado de superficie de pared es el **coeficiente total de transmisión de calor o transmitancia térmica (U)**, que se expresa como:

$$U = 1/R_{\text{total interna}} = 1/(1/h_i + e/\lambda + 1/h_e) \text{ [W/(m}^2 \times \text{K)]}$$

En el caso de que la pared esté formada por más de un material, tendremos que añadir los cálculos de transmisión del calor por conducción de cada uno de los materiales.

Por ejemplo, para el caso de tener tres materiales distintos, el coeficiente total de transmisión se expresa así:

$$U = 1/R_{\text{total interna}} = 1/(1/h_i + e_1/\lambda_1 + e_2/\lambda_2 + e_3/\lambda_3 + 1/h_e)$$

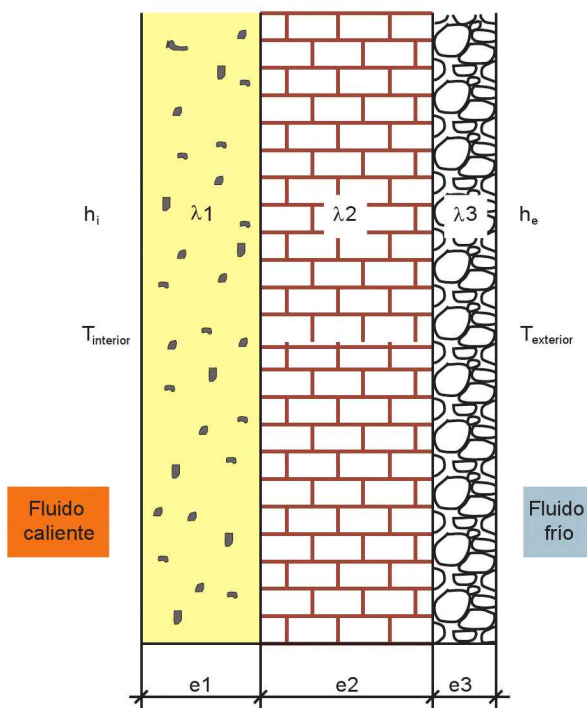


Figura 3.10. Transmisión de calor por conducción y convección a través de una pared compuesta

La **velocidad de transmisión de calor total** a través del muro se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= Q_{\text{convección i}} + Q_{\text{conducción}} + Q_{\text{convección e}} = \\ &= A \times U \times (T_{\text{interior}} - T_{\text{exterior}}) \end{aligned}$$

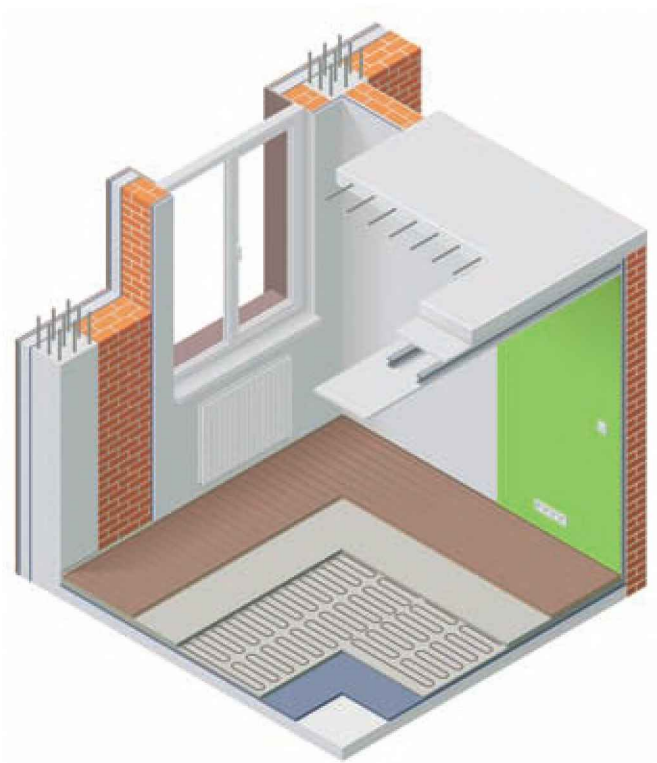


Figura 3.11. Las construcciones formadas por varias capas de distintos materiales son un ejemplo de transmisión de calor por conducción y por convección

Actividad resuelta

3.6. Una pared de ladrillo de 1 m de alto, 0,75 m de ancho y 0,5 m de espesor expone su pared exterior al viento frío a una temperatura de 265 K y, en el lado interior de la pared, la temperatura es de 335 K. Calcula la velocidad de transferencia de calor total.

Solución:

En la Tabla 3.5., podemos obtener los valores de $1/h_e = 0,04 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$ y de $1/h_i = 0,13 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$. Por lo tanto, la resistencia térmica interna total del muro es:

$$R_{\text{total interna}} = 1/h_e + e/\lambda + 1/h_i = 0,04 + (0,5/0,32) + 0,13 = 1,733 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$$

El coeficiente total de transmisión de calor U es:

$$U = 1/R_{\text{total interna}} = 1/1,733 = 0,577 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$$

La velocidad de transmisión de calor total a través del muro:

$$Q_{\text{total}} = A \times U \times (T_{\text{interior}} - T_{\text{exterior}})$$

$$0,75 \text{ m}^2 \times 0,577 \text{ W/m}^2 \times \text{K} (335 - 265) \text{ K} = 29,243 \text{ W}$$

Actividad propuesta

3.4. Un muro de cemento de 0,5 m de espesor tiene una temperatura superficial exterior de 10 °C y 18 °C de interior, la conductividad térmica del cemento es de 1,2 W/m × K y las dimensiones del muro son 5 m de largo y 2 m de alto. Calcula:

- La resistencia térmica total interna.
- El coeficiente total de transmisión de calor.
- La velocidad de transferencia de calor total a través de la pared en vatios.

3.2. Concepto de trabajo

Como dijimos, en un sistema cerrado, la energía puede cruzar la frontera de dos formas distintas: en forma de calor y de trabajo. Una vez que ya sabemos lo que es el calor, cabe preguntarse **¿qué es el trabajo?**

Diremos que el trabajo (W) es una forma de energía que se transfiere entre cuerpos (un sistema y sus alrededores) y que no es debida a una diferencia de temperaturas.

Para realizar un trabajo, es preciso ejercer una fuerza (F) sobre un cuerpo y que este se desplace una distancia (d).

$$W = F \times d \text{ (J)}$$

Otra forma de definir el trabajo es el producto de la potencia (P) y el tiempo(t):

$$W = P \times t$$

De la misma forma que para el calor, para saber si el trabajo se transmite del sistema a los alrededores o viceversa, tenemos un convenio de signos que es el siguiente:

- El **trabajo es positivo** si entra en el sistema desde los alrededores. Por ejemplo, en un compresor, el trabajo es positivo porque se está aplicando una energía para que comprima o expanda un gas en un dispositivo cilindro-pistón.
- El **trabajo es negativo** si el sistema realiza el trabajo y, por tanto, sale de él hacia los alrededores. Por ejemplo, en un motor de un coche, el trabajo será negativo porque es el motor el que realiza el trabajo y este se emplea para mover el coche.

En las máquinas frigoríficas, el compresor realiza el trabajo mecánico. El gas refrigerante que entra en el compresor a baja temperatura y baja presión después de la compresión (realización del trabajo) sale a alta temperatura y a alta presión.

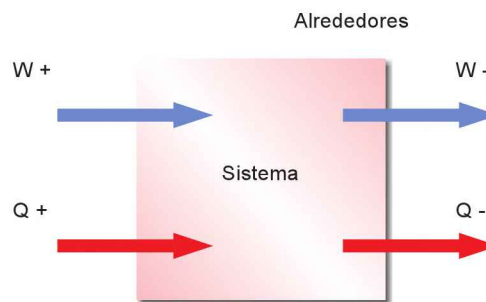


Figura 3.12. Convenio de signos para calor y trabajo

RECUERDA

Cuando se transfiere energía entre dos cuerpos, puede hacerse de forma mecánica (mediante la realización de un trabajo) o de forma térmica (mediante el calor).

Actividad resuelta

3.7. María sube en un ascensor, que asciende 30 m hasta llegar a su destino. Calcula el trabajo necesario si el motor produce una fuerza de 800 N. ¿Cuál es la potencia del motor sabiendo que tarda 20 s en hacer el recorrido?

Solución:

$$W = F \times d = 800 \text{ N} \times 30 \text{ m} = 2.400 \text{ J}$$

$$P = W/t = 2.400 \text{ J}/20 \text{ s} = 120 \text{ W}$$

3.3. Primer principio de la termodinámica

Cuando el vapor de agua sale de una cazuela que se encuentra tapada, su energía es capaz de levantar la tapadera. Parte del calor que aportamos al agua se está convirtiendo en trabajo mecánico. También sabemos que, frotando dos cuerpos, una forma de trabajo mecánico, se produce calor.

Así pues, **¿cuál es la relación entre el trabajo mecánico y el calor?** Vamos a explicarlo a partir del primer principio de la termodinámica. Hasta ahora, hemos visto que la primera ley de la termodinámica, basándose en observaciones experimentales, dice que la energía ni se crea ni se destruye, tan solo se transforma.



Figura 3.13. Cuando el vapor levanta la tapa de la cazuela, se produce la transformación de calor en trabajo

3.3.1. Primer principio de la termodinámica para un sistema cerrado

El primer principio de la termodinámica **para un sistema cerrado** puede enunciarse así:

$$Q + W = \Delta E$$

Q es el calor que el sistema gana o pierde.

W es el trabajo producido.

ΔE es la variación de la energía total del sistema ($\Delta E = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}$).

La energía total de un sistema consta de: energía interna (ΔU), energía cinética (E_c) y energía potencial (E_p).

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

Para variar la energía de un sistema cerrado, es necesario que el sistema ceda o absorba calor. Sin embargo, también se consigue si el sistema realiza o recibe un trabajo.

RECUERDA

Un sistema cerrado es aquel en el que no entra ni sale masa, solo energía.

SABÍAS QUE...

Mayer y Joule fueron los primeros en comprobar la transformación de trabajo mecánico en calor, y viceversa, y obtuvieron el valor de la caloría. En 1846, Mayer presentó el estudio en el que enuncia el principio de conservación de la energía.

3.3.2. Primer principio de la termodinámica para un sistema abierto

Recordando la definición de sistema abierto, observamos que, además de la energía, debemos tener en cuenta la masa.

- Cuando entra masa en el sistema, la energía total del sistema se incrementa ya que la masa transporta energía.
- Cuando sale masa del sistema, la energía total del sistema disminuye porque la masa transporta energía.

El primer principio de la termodinámica **para un sistema abierto** puede enunciarse así:

$$Q + W + M_{\text{ent}} - M_{\text{sal}} = \Delta E$$

En los sistemas abiertos, tendremos en cuenta las variaciones de masa que se producen a través de sus fronteras. Por ejemplo, para que un fluido (la masa) pueda entrar o salir de una tubería (sistema) es necesario que se produzca un trabajo.

Puesto que $W = F \times d$, diremos que, para desplazar el fluido cuyo volumen es V por la tubería, es necesaria una fuerza F que lo desplace una distancia d para que pueda atravesar su orificio de salida.

Sabiendo que $F = p \times S$, podemos decir que **el trabajo necesario para desplazar el fluido** es:

$$W = p \times S \times d = p \times V$$

Tendremos en cuenta este trabajo para definir la energía total de un sistema (E), de forma que:

$$E = U + E_c + E_p + W_{\text{flujo}} = U + E_c + E_p + p \times V$$

RECUERDA

La presión es la fuerza que se aplica por unidad de superficie:
 $p = F/S$.

Esto nos lleva a definir la **entalpía (H)** como la variación de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno. Otra forma de definirla es: la energía interna de un fluido que se desplaza.

$$H = U + p \times V$$

Teniendo en cuenta la definición de entalpía, la energía total del sistema puede expresarse así:

$$E = H + E_c + E_p$$

3.4. Aplicación del primer principio de la termodinámica a máquinas térmicas

A la máquina térmica como sistema termodinámico abierto, le aplican las propiedades del primer principio de la termodinámica que vimos en el apartado anterior. A continuación, vamos a particularizar este principio y a analizarlo más en detalle.

3.4.1. Flujo permanente y transitorio de un fluido

En el caso de las máquinas térmicas, diremos que el fluido que utilizan trabaja en régimen permanente. Pero **¿qué es régimen permanente?** Para explicarlo, veremos que existen dos tipos de flujos:

- **Flujo permanente** es aquel en el que las propiedades del fluido no pueden cambiar con el tiempo, aunque sí en el espacio. Por ejemplo, en un canal, las características del flujo son: velocidad, caudal y profundidad. Estas son independientes del tiempo, aunque pueden variar a lo largo del canal.

En un proceso en el que el flujo es permanente, no se producen incrementos ni pérdidas de masa en el sistema ya que las características del flujo no varían con el tiempo. Lo que sí puede ocurrir son salidas y entradas de masa, pero, en el balance final, la masa es la misma.

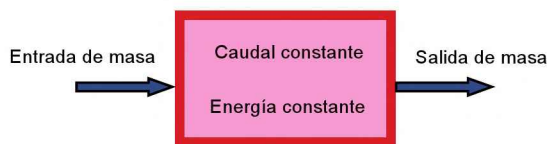


Figura 3.14. Flujo permanente

- **Flujo transitorio** es aquel en el que las propiedades del fluido pueden cambiar con el tiempo.

Si, en el ejemplo anterior, lo que hacemos es aumentar el caudal del canal durante un tiempo, estaríamos variando la velocidad del flujo.

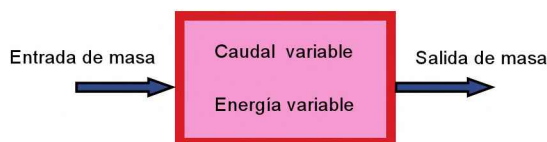


Figura 3.15. Flujo transitorio

SABÍAS QUE...

Una máquina frigorífica por compresión de vapor tiene como objetivo transferir energía en forma de calor entre dos puntos. La más sencilla de ellas es la refrigeración por compresión mecánica de una etapa.



3.4.2. Expresión de la primera ley de la termodinámica para máquinas térmicas en régimen permanente

En una máquina térmica, como hemos visto, se cumple el primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos y con flujo permanente.

Para explicarlo, partimos de la primera ley de la termodinámica:

$$Q + W + M_{\text{ent}} - M_{\text{sal}} = \Delta E$$

Recordando el concepto de entalpía, sabíamos que el primer principio de la termodinámica podía expresarse como: $\Delta E = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$.

$$\text{Con lo cual: } Q + W = (\Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p) (M_{\text{sal}} - M_{\text{ent}}).$$

En las máquinas térmicas, ya que se trabaja con flujo permanente, las características del flujo no cambian con el tiempo, por lo tanto, la variación de energía potencial y de la energía cinética específica puede considerarse despreciable frente a la entalpía, resultando:

$$Q + W = \Delta H (M_{\text{sal}} - M_{\text{ent}}) = M_{\text{sal}} \times h_{\text{sal}} - M_{\text{ent}} \times h_{\text{ent}}$$

Finalmente, como se trata de flujo permanente, la masa de fluido que entra y la que sale debe ser la misma, por tanto:

$$Q + W = M (h_{\text{sal}} - h_{\text{ent}})$$

■ RECUERDA

Los elementos básicos de una máquina frigorífica de compresión de vapor son:

- El evaporador.



- El condensador.



- El compresor.



- El expansor.



Imágenes: cortesía de Danfoss

Actividad resuelta

- 3.8.** Un fluido caliente que circula por una tubería va a ceder calor al ambiente, de forma que, al inicio de la tubería, la energía interna del fluido es de 700 kJ y durante el proceso pierde 400 kJ de calor. Además, para impulsar el fluido, se realiza un trabajo sobre él de 75 kJ. Calcula la energía interna total del fluido considerando las propiedades del fluido constantes en el tiempo y que no existen variaciones de masa.

Solución:

Consideramos que el flujo es permanente puesto que las propiedades del fluido son constantes en el tiempo y el sistema es cerrado porque no existen variaciones de masa. Por lo tanto, según el primer principio de la termodinámica, tenemos que:

$$Q + W = \Delta E$$

$$-400 \text{ kJ} + 75 \text{ kJ} = E_{\text{final}} - 700 \text{ kJ}$$

$$E_{\text{final}} = 700 \text{ kJ} - 400 \text{ kJ} + 75 \text{ kJ} = 250 \text{ kJ}$$

Por tanto, a la salida de la tubería, la energía del fluido es de 250 kJ.

■ ■ 3.4.3. Aplicación de la primera ley de la termodinámica a los elementos de un sistema frigorífico

Cuando buscamos disminuir la temperatura de un local, utilizamos máquinas frigoríficas. En una máquina frigorífica, hay un fluido llamado *refrigerante* (el sistema). Este será sobre el que se realicen las transferencias de energía.

Los elementos de una máquina frigorífica en los que se produce transferencia de energía por calor o por trabajo son:

- En el **evaporador**, el refrigerante absorbe el calor del local a refrigerar. Puesto que el calor entra en el sistema, el $Q_{\text{evaporador}}$ tendrá signo positivo.
- En el **compresor**, el refrigerante eleva su temperatura y su presión al actuar sobre él un trabajo para realizar la compresión. Puesto que el trabajo entra en el sistema, el $W_{\text{compresor}}$ tendrá signo positivo.
- En el **condensador**, el refrigerante cede calor al exterior del local, por ejemplo, a la calle. Puesto que el calor sale del sistema, el $Q_{\text{condensador}}$ tendrá signo negativo.
- En la **válvula de expansión**, el refrigerante ni cede ni absorbe calor ni trabajo.

Aplicando el principio de conservación de la energía (primer principio de la termodinámica) y puesto que se tra-

ta de un ciclo termodinámico en el que los estados inicial y final son idénticos ($h_{ent} = h_{sal}$), diremos que:

$$Q_{\text{evaporador}} - Q_{\text{condensador}} + W_{\text{compresor}} = 0$$

$$Q_{\text{evaporador}} + W_{\text{compresor}} = Q_{\text{condensador}}$$

Por tanto, la cantidad de calor cedida por el condensador ($Q_{\text{condensador}}$) será igual a la suma de la cantidad de calor

absorbida por el refrigerante en el evaporador ($Q_{\text{evaporador}}$) y la cantidad de trabajo recibida por el refrigerante en el compresor ($W_{\text{compresor}}$).

El primer principio de la termodinámica nos demuestra que, en el condensador de una máquina frigorífica, va a eliminarse el calor absorbido en el evaporador más la energía del trabajo de compresión.

Enlaces web de interés
<p>http://www.codigotecnico.org</p> <p>Coefficientes de transmisión de calor, programa de Limitación de la Demanda Energética en edificios.</p>
<p>http://www.idae.es/</p> <p>En la página del instituto para la diversificación y el ahorro de energía, puedes encontrar la guía técnica: diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.</p>
<p>http://www.isover.es/Aislamiento-TECNICO-Climatizacion-Industria-y-Marina</p> <p>Guía técnica del fabricante de aislamiento Isover.</p>
<p>http://www.aluthermo.be/es</p> <p>Fabricante de aislantes.</p>
<p>http://www.uponor.es</p> <p>Proveedor en soluciones para el transporte de fluidos en la edificación.</p>
<p>http://www.tubacero.es</p> <p>Fabricante de tuberías de acero.</p>
<p>http://www.fegeca.com</p> <p>Fabricantes de generadores y de emisores de calor para el agua caliente.</p>
<p>http://www.danfoss.com</p> <p>Fabricante de compresores y soluciones automáticas para la industria de la refrigeración y el aire acondicionado.</p>

- Calor es una forma de energía que se trasfiere entre un sistema y sus alrededores debido a una diferencia de temperaturas. El calor será positivo si entra en el sistema, es decir, que gana calor, y será negativo si sale, es decir, si pierde calor.
- Existen tres formas de transmisión del calor:

Forma de transmisión	Definición	Velocidad de transmisión del calor	Resistencia térmica
Por radiación térmica.	La transferencia de calor se produce por la energía emitida por los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas debido a su temperatura.	$Q_{\text{radiación}} = \varepsilon \times \sigma \times A_s \times (T_s^4 - T_{\text{pared}}^4)$	
Por conducción a través de una pared.	La transferencia de calor de un cuerpo se produce como transferencia de energía cinética entre sus moléculas o entre sus moléculas y otros cuerpos.	$Q_{\text{conducción}} = \lambda \times A \times \Delta T / e$	$R_{\text{conducción}} = e / (\lambda \times A)$
Por conducción a través de tuberías.		$Q_{\text{conducción}} = 2 \times \pi \times L \times \lambda \times (T_1 - T_2) / \ln(R/r)$	$R_{\text{conducción}} = \ln(R/r) / (2 \times \pi \times L \times \lambda)$
Por convección.	La transferencia de calor se produce entre una superficie sólida y un fluido que está en movimiento.	$Q_{\text{convección}} = h \times A \times (T_{\text{superficie}} - T_{\text{fluido}})$	$R_{\text{convección}} = \frac{1}{h \times A}$

- El coeficiente total de transmisión de calor o transmitancia térmica es la inversa de la resistencia térmica total del metro cuadrado de superficie de pared.

$$U = 1/R_{\text{total interna}} = 1/(1/h_i + e/\lambda + 1/h_e)$$

- Trabajo es una forma de energía que se trasfiere entre cuerpos (un sistema y sus alrededores) y que no es debida a una diferencia de temperaturas. El trabajo es positivo si entra en el sistema desde los alrededores y es negativo si el sistema realiza el trabajo y, por tanto, sale de él hacia los alrededores.
- El primer principio de la termodinámica:
 - En el caso de un sistema cerrado, nos dice que, para variar la energía del sistema, es necesario que el sistema ceda o absorba calor o que el sistema realice o reciba un trabajo: $Q + W = \Delta E$.
 - En el caso de un sistema abierto, además, tendremos en cuenta el intercambio de masa: $Q + W + M_{\text{ent}} - M_{\text{sal}} = \Delta E$.
- El primer principio de la termodinámica para máquinas frigoríficas nos demuestra que el condensador va a eliminar el calor absorbido en el evaporador y la energía del trabajo de compresión.

■ Actividades de comprobación

- 3.1.** Para un sistema cerrado, el primer principio de la termodinámica o principio de conservación de la energía se expresa:
- $W = \Delta E$.
 - $E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}} = 0$.
 - $E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}} = \text{constante}$.
 - $\Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} + \Delta U = W + Q$.
- 3.2.** Podríamos definir el calor como:
- Una forma de transmitir energía entre diferentes cuerpos.
 - La temperatura que tiene un cuerpo.
 - Un fluido que pasa de los cuerpos calientes a los cuerpos fríos.
 - Una forma de medir la energía que almacena un cuerpo.
- 3.3.** El primer principio de la termodinámica dice que, cuando un cuerpo absorbe calor:
- Se convierte íntegramente en trabajo.
 - Parte se convierte en trabajo y parte, en energía interna.
 - Siempre se convierte íntegramente en un incremento de energía interna.
 - Se cede íntegramente al exterior.
- 3.4.** El trabajo realizado sobre un objeto al trasladarlo 6 m por aplicación de una fuerza de 2 N en la dirección del desplazamiento es:
- De 12 J.
 - De 12 N.
 - De 3 J.
 - De 3 N.
- 3.5.** El calor que recibimos del Sol se transmite por:
- Radiación.
 - Conducción.
 - Convección.
 - Ninguna de las respuestas es correcta.
- 3.6.** El calor, cuando funciona el aire acondicionado, se transmite por:
- Radiación.
 - Conducción.
 - Convección.
 - Ninguna de las respuestas es correcta.
- 3.7.** El calor que recibe una cazuela de un fuego eléctrico es por:
- Radiación.
 - Conducción.
 - Convección.
 - Ninguna de las respuestas es correcta.
- 3.8.** El calor del agua de la piscina que se enfría durante la noche se transmite por:
- Radiación.
 - Conducción.
 - Convección.
 - Ninguna de las respuestas es correcta.
- 3.9.** Cuando un sistema termodinámico puede intercambiar energía, pero no materia con el exterior, puede definirse desde el punto de vista termodinámico como:
- Un sistema cerrado.
 - Un sistema intercambiador de energía.
 - Un sistema abierto.
 - Un sistema aislado.
- 3.10.** ¿Cuál es la afirmación correcta? El calor puede transferirse de tres formas:
- La conducción es la transferencia de calor a través de un objeto sólido: es lo que ocurre cuando el asa de una taza se calienta, aunque el líquido no esté en contacto directo con ella.
 - La convección se produce por el intercambio de moléculas frías y calientes: es la causa de que el agua de una cazuela se caliente uniformemente, aunque solo su parte inferior esté en contacto con el foco de calor.
 - La radiación es la transferencia de calor por radiación electromagnética: es el principal mecanismo por el que un fuego calienta un recinto.
 - La conducción es energía emitida por los cuerpos: es el principal motivo por el que una pared oscura absorbe más calor que una clara.

Actividades de aplicación

- 3.11.** Define los tres mecanismos o modos de transmisión del calor indicando sus características fundamentales.
- 3.12.** Un radiador por el que circula vapor trabaja con una temperatura superficial de $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su área superficial efectiva es de $1,2\text{ m}^2$ y su emisividad es 1. Indica cuánto calor (en kcal/h) será radiado a una habitación cuya temperatura media es de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3.13.** Durante el invierno, las superficies interior y exterior de una ventana de vidrio de $0,5\text{ cm}$ de espesor y de $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ están a 10 y a $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Si la conductividad térmica del vidrio es de $0,78\text{ W/(m} \times ^{\circ}\text{C)}$. Determina:
- La pérdida de calor por conducción en kJ durante un periodo de 5 h.
 - La pérdida de calor por conducción en kJ durante un periodo de 5 h si el vidrio tuviera un espesor de 1 cm .
 - La resistencia térmica por conducción, la resistencia térmica interna y la conductividad térmica.
- 3.14.** Una pared vertical de un local se compone de:
- Enlucido cemento exterior: $e_1 = 2,5\text{ cm}$; $\lambda_1 = 1,15\text{ W/m} \times ^{\circ}\text{C}$.
 - Ladrillo hueco: $e_2 = 20\text{ cm}$; $\lambda_2 = 0,5\text{ W/m} \times ^{\circ}\text{C}$.
 - Poliuretano: $e_3 = 14\text{ cm}$; $\lambda_3 = 0,03\text{ W/m} \times ^{\circ}\text{C}$.
 - Enlucido de cemento interior: $e_4 = 3\text{ cm}$; $\lambda_4 = 1,15\text{ W/m} \times ^{\circ}\text{C}$.
 - Sus dimensiones son: $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ y la temperatura interior es de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la exterior de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Sabiendo esto, calcula: la resistencia térmica total del muro, el coeficiente total de transmisión del calor y la velocidad de transmisión del calor para el muro.
- 3.15.** El muro de una cámara frigorífica de conservación de productos congelados de dimensiones $4\text{ m} \times 3\text{ m}$ consta de:
- Revoco de cemento de 2 cm de espesor ($\lambda_1 = 0,8\text{ kcal/h} \times \text{m} \times ^{\circ}\text{C}$).
 - Ladrillo macizo de 1 pie ($\lambda_2 = 0,6\text{ kcal/h} \times \text{m} \times ^{\circ}\text{C}$).
 - Corcho expandido ($\lambda_3 = 0,05\text{ kcal/h} \times \text{m} \times ^{\circ}\text{C}$).
 - Ladrillo hueco de 7 cm de espesor ($\lambda_4 = 1,1\text{ kcal/h} \times \text{m} \times ^{\circ}\text{C}$).
 - Revoco de cemento de 2 cm de espesor ($\lambda_5 = 0,8\text{ kcal/h} \times \text{m} \times ^{\circ}\text{C}$).
- La temperatura del aire interior de la cámara es de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la del aire exterior de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si las pérdidas de calor del muro de la cámara han de ser inferiores a 60 kcal/h , determina: el coeficiente total de transmisión de calor y el espesor de aislamiento (corcho) que debe colocarse.
- Los coeficientes superficiales de transmisión de calor exterior e interior son 20 y $12\text{ kcal/h} \times \text{m}^2 \times ^{\circ}\text{C}$, respectivamente.
- 3.16.** Calcula cuántas kcal/h se perderán por conducción a través de una puerta de roble ($\lambda = 0,5\text{ W/(m} \times ^{\circ}\text{C)}$) de 40 mm de espesor, 90 cm de ancho y 210 cm de altura si la temperatura de la superficie interior es de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de la superficie exterior de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 3.17.** Un tubo de cobre de 10 m por el que circula vapor saturado a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiene un diámetro interior de 12 cm y exterior de 15 cm . Está ubicado en el interior de un local a $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se sabe que, en la parte exterior del tubo, hay una coquilla que actúa de aislante de 3 cm de espesor. Compara la pérdida de calor a través del tubo sin aislar y si después le colocamos un aislante. Dato: la conductividad térmica del tubo es de $0,4\text{ W/m} \times \text{K}$ y la del aislante es de $0,30\text{ W/m} \times \text{K}$.
- 3.18.** Una grúa con un motor de 10 CV eleva 1.000 kg de hierro hasta una altura de 50 m del suelo en 2 min .
- Expresa la potencia del motor en vatios.
 - Establece qué trabajo realiza el motor.
- 3.19.** Calcula el trabajo que realiza el motor de un ascensor en una atracción para subir 906 kg , teniendo en cuenta la masa del ascensor y la de los pasajeros, hasta una altura de 42 m . Averigua la potencia desarrollada por el motor si tarda en subir 28 s .
- 3.20.** Indica cómo se aplica la primera ley de la termodinámica a cada uno de los elementos básicos de una máquina frigorífica. Ten en cuenta la cantidad de calor y el trabajo de cada elemento.
- 3.21.** En un laboratorio, se lleva a cabo una combustión quemando una mezcla de gasolina y de oxígeno en una probeta de volumen constante sumergida en agua. Durante la combustión, se observa que la temperatura del agua aumenta.
- Razona si existe transferencia de calor.
 - Indica si se efectúa algún trabajo y justifica tu respuesta.
 - Deduce el signo de la variación de la energía.

Actividades de ampliación

3.22. LIDER es un programa informático que permite cumplir con la exigencia de Limitación de Demanda Energética establecida en el Documento Básico de la Habitabilidad y Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-HE1). Este programa está diseñado para verificar las exigencias del CTE y, para ello, se realiza una descripción geométrica, constructiva y operacional de los edificios.

El programa puede descargarse a través de la página web: <http://www.codigotecnico.org/web>.

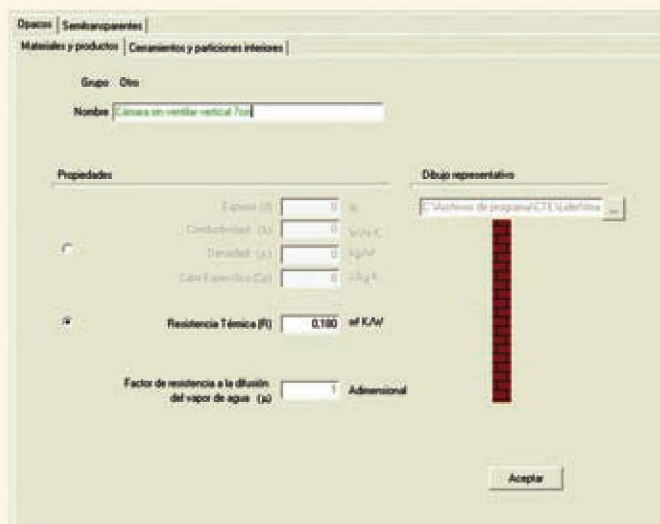


Figura 3.16. Cámara de aire sin ventilación vertical de 7 cm

Realiza la siguiente actividad: tenemos una fachada de obra vista compuesta por los siguientes materiales:

- $\frac{1}{2}$ pie LM métrico o catalán 40 mm < G < 50 mm cuyo espesor es de 0,13 m y su resistencia térmica es de 0,30 m² K/W.
- Poliuretano proyectado cuyo espesor es de 0,03 m y su resistencia térmica es de 0,50 m² K/W.
- Cámara sin ventilar vertical de 7 cm cuyo espesor es de 0,07 m y su resistencia térmica es de 0,18 m² K/W.
- Tabique de LH sencillo (40 mm < espesor < 60 mm) cuyo espesor es de 0,04 m y su resistencia térmica es de 0,44 m² K/W.
- Enlucido de yeso < 1.000 cuyo espesor es de 0,01 m y su resistencia térmica es de 0,40 m² K/W.

Determina el coeficiente total de transmisión de calor o transmitancia térmica (U) a partir de los cálculos descritos en el tema y el programa LIDER. Comprueba que, en ambos casos, el resultado es el mismo.

3.23. El aire transmite calor por convección, lo que reduce su capacidad de aislamiento. Por esta razón, se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos o fibrosos, capaces de impedir el paso del aire y de retenerlo en el interior de celdillas más o menos estancas. Esto explica por qué, aunque la madera es mejor aislante que el vidrio, suele emplearse fibra de vidrio (material fibroso) para aislar construcciones de madera.

Realiza la siguiente actividad: busca en internet otros materiales aislantes y compara sus coeficientes de conductividad térmica. Señala cuáles serán mejores aislantes: los que tienen un coeficiente alto o los que lo tienen bajo.

3.24. En el reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas, se nos indica qué recipientes, intercambiadores o tuberías y accesorios que trabajen a temperaturas por debajo de 15 °C deberán estar protegidos mediante aislamiento térmico.

También se indica que el aislamiento deberá estar protegido mediante una barrera de vapor, aplicada en la parte exterior del aislante, excepto cuando la permeabilidad del aislante sea suficientemente baja como para garantizar una protección equivalente.

A partir de la información anterior, realiza la siguiente actividad:

Calcula a qué temperatura deberá estar la barrera de vapor si sabemos que esta hace de aislante de una tubería de acero de 10 cm de diámetro interior, 2 cm de espesor y 1 m de longitud por la que circula un fluido a 10 °C, en caso de querer limitar la pérdida de calor a 240 KW. Toma el valor de conductividad térmica del acero de la Tabla 3.3.

3.25. Las cámaras frigoríficas deberán ser diseñadas para mantener en condiciones adecuadas el producto que contienen. Para alcanzar este objetivo, existe una gran diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la misma, por ello se aislarán térmicamente con materiales como el poliestireno expandido, poliestireno extruido, espuma rígida de poliuretano, espumas fenólicas, vidrio celular, corcho expandido, paneles sándwich aislante con recubrimiento metálico o paneles sándwich de poliuretano inyectado. Además, para garantizar la minimización del impacto ambiental, la potencia calorífica que atravesará las paredes será inferior a 8 W/m² para temperaturas positivas (productos frescos) y de 6 W/m² para cámaras con temperatura negativa (productos congelados).

A partir de la información anterior, realiza la siguiente actividad:

Calcula el espesor mínimo de una cámara frigorífica de 2 m^2 de superficie para conservar guisantes congelados a una temperatura de -18°C . Ten en cuenta que la temperatura exterior es de 22°C y que la conductividad térmica de las paredes de la cámara es de $0,02 \text{ W/m} \times \text{K}$.

- 3.26.** En un local refrigerado cuyas dimensiones son 4 m de ancho y 6 m de largo, se desea mantener una temperatura de 13°C . Dado que ésta temperatura es inferior a la del ambiente (25°C), el local deberá estar aislado con criterios de optimizar los costes de inversión y consumo eléctrico. El aislamiento se selecciona y dimensiona para conseguir un flujo térmico inferior a 15 W/m^2 (para temperaturas de diseño entre 7 y 20°C), de acuerdo con la normativa. Compara el espesor mínimo necesario de aislamiento si se aísla térmicamente con alguno de los siguientes materiales:

Poliestireno expandido. ($\lambda_1 = 0,038 \text{ w/m} \times \text{k}$)

Poliestireno extruido. ($\lambda_2 = 0,034 \text{ W/mK}$)

Espuma rígida de poliuretano. ($\lambda_3 = 0,024 \text{ W/mK}$)

Espumas fenólicas. ($\lambda_4 = 0,02 \text{ w/m K}$)

Vidrio celular. ($\lambda_5 = 0,042 \text{ W/mK}$)

Corcho expandido. ($\lambda_6 = 0,039 \text{ W/mk}$)

Paneles sándwich aislante con recubrimiento metálico. ($\lambda_7 = 0,0375 \text{ W/mk}$)

Paneles sándwich de poliuretano inyectado. ($\lambda_8 = 0,024 \text{ W/mk}$)

- 3.27.** La puerta isoterma de una cámara frigorífica, cuya superficie es 30 m^2 , lleva dispositivos que permiten su apertura manual desde dentro sin necesidad de llave, aunque desde el exterior se pueda cerrar con llave, de forma que cumple con la normativa. Se desea incorporar a la misma dispositivos de calentamiento, ya que la temperatura interna es inferior a -5°C . Los dispositivos de calentamiento (protegidos mediante un diferencial sensible al contacto de las personas) se pondrán en marcha siempre que funcione la cámara por debajo de dicha temperatura, sin interponer interruptores que puedan impedirlo.

El aislamiento de la puerta se ha de seleccionar en coherencia con el aislamiento de las paredes. De forma que su resistencia térmica será al menos el 70 % del valor de la resistencia térmica de la pared salvo si la diferencia entre el interior de la cámara y el exterior de la puerta sea igual o inferior a 10 K , en cuyo caso será del 50 %.

Responde a las siguientes cuestiones:

- Indica qué tipo de dispositivos de calentamiento se deberán instalar.
- Calcula el valor mínimo de espesor del poliestireno expandido. ($\lambda = 0,038 \text{ w/m} \times \text{k}$) que actúa de aislamiento de la cámara cuyas paredes tienen una resistencia térmica de $0,67^\circ\text{C/W}$.