

I. PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

I.1. INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Térmica trata de los procesos de transferencia de calor y la metodología para calcular la velocidad con que éstos se producen y así poder diseñar los componentes y sistemas en los que son de aplicación. La transferencia de calor abarca una amplia gama de fenómenos físicos que hay que comprender antes de proceder a desarrollar la metodología que conduzca al diseño térmico de los sistemas correspondientes.

Siempre que existe una diferencia de temperatura, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de temperatura más baja; de acuerdo con los conceptos termodinámicos la energía que se transfiere como resultado de una diferencia de temperatura, es el calor. Sin embargo, aunque las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, sólo se aplican a sistemas que están en equilibrio; pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para modificar un sistema de un estado de equilibrio a otro, pero no sirven para predecir la rapidez (tiempo) con que puedan producirse estos cambios; la fenomenología que estudia la transmisión del calor complementa los principios termodinámicos, proporcionando unos métodos de análisis que permiten predecir esta velocidad de transferencia térmica.

Para ilustrar los diferentes tipos de información que se pueden obtener desde ambos puntos de vista, (termodinámico y transferencia de calor) consideraremos, a título de ejemplo, el calentamiento de una barra de acero inmersa en agua caliente. Los principios termodinámicos se pueden utilizar para predecir las temperaturas finales una vez los dos sistemas hayan alcanzado el equilibrio y la cantidad de energía transferida entre los estados de equilibrio inicial y final, pero nada nos dicen respecto a la velocidad de la transferencia térmica, o la temperatura de la barra al cabo de un cierto tiempo, o del tiempo que hay que esperar para obtener una temperatura determinada en una cierta posición de la barra. Un análisis de la transmisión del calor permite predecir la velocidad de la transferencia térmica del agua a la barra y de esta información se puede calcular la temperatura de la barra, así como la temperatura del agua en función del tiempo.

Para proceder a realizar un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar tres mecanismos diferentes, conducción, convección y radiación. Estas tres formas de transferencia son las más sencillas que se pueden considerar aisladamente, si bien en la práctica, lo normal es que se produzcan simultáneamente al menos dos de ellas, con lo que los fenómenos resultan más complejos de estudiar.

I.2 MODOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se acepta de manera general que el calor se transmite de tres modos diferentes, que se designan como *conducción*, *convección* y *radiación*. Estas tres formas de transferencia son las más sencillas que se pueden considerar aisladamente, si bien en la práctica, lo normal es que se produzcan simultáneamente al menos dos de ellas, con lo que los fenómenos resultan más complejos de estudiar.

Conducción. La transmisión de calor por conducción puede realizarse en cualquiera de los tres estados de la materia: sólido líquido y gaseoso.

La conducción es básicamente un mecanismo de *cesión de energía entre partículas contiguas*. La energía de las moléculas aumenta al elevarse la temperatura. Esta energía puede pasar de una molécula a otra contigua y de esta a la siguiente y así sucesivamente ya se por choque entre partículas, en los fluidos o por vibraciones reticulares en los sólidos.

La conducción en los sólidos goza pues de un soporte material, que son las moléculas del propio cuerpo, las cuales vibran en posiciones fijas sin desplazarse, por lo tanto la transferencia de energía por conducción, macroscópicamente no involucra transporte de materia. El razonamiento es válido tanto para la transferencia de energía dentro de un sólido, como para sólidos en contacto.

En los *fluidos*, la conducción se explica gracias al intercambio de energía cinética de sus moléculas, que se produce como consecuencia de *choques* entre las mismas. La transmisión de calor por conducción en los fluidos se produce fundamentalmente en lo que definiremos como la *capa límite* y tiene poca importancia en el resto de la masa.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en término de ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como *Ley de Fourier*.

Para la pared plana que se muestra en la figura 1, la cual tiene una distribución de temperaturas $T(x)$ la ecuación o modelo unidimensional se expresa como

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

El *flujo de calor* o *transferencia de calor por unidad de área* q (W/m^2) es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura.

La constante de proporcionalidad k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica ($W/m \cdot K$) y es una característica del material de la pared. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

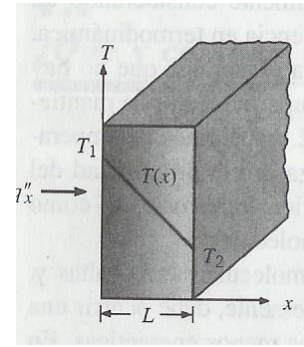


Figura 1. Transferencia de calor unidimensional por conducción

En las condiciones de estado estable que se muestran en la figura 1, la distribución de temperaturas es lineal.

Convección. En contraposición con la conducción, la convección implica *transporte de energía y de materia*, por lo tanto, esta forma de transmisión de calor es posible solamente en los *fluidos* y es además característica de ellos.

De un modo más general, podemos explicar que el *modo de transferencia de calor por convección* se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al *movimiento molecular aleatorio* (conducción), la energía también se transfiere mediante el *movimiento global o macroscópico* del fluido, esto es la transferencia de calor se debe entonces a una superposición de dos transportes de energía, uno por el movimiento aleatorio de las moléculas y el otro por el movimiento global del fluido. Se acostumbra a utilizar el término convección haciendo referencia a este transporte acumulado.

Analizaremos la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante, cuando estos tienen diferentes temperaturas.

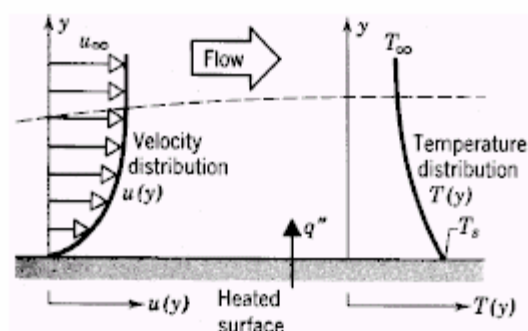


Figura 2. Desarrollo de la capa límite en la Transferencia de calor por convección

Una consecuencia de la interacción fluido-superficie, es el desarrollo de una región en el fluido en la que la velocidad varía de cero en la superficie a un valor finito, u_{∞} , asociado con el flujo. Esta región del fluido se conoce como *capa límite hidrodinámica o de velocidad*. Más aún, si las temperaturas de la superficie y del fluido difieren, habrá una región del fluido

a través de la cual la temperatura varía de T_s en $y=0$, a T_∞ en el flujo exterior. Esta región, denominada *capa límite térmica*, puede ser de diferente tamaño que la capa límite de velocidad. La apreciación de los fenómenos de la capa límite es esencial para la comprensión de la transferencia de calor por convección.

La ecuación o modelo apropiado que caracteriza los procesos de transferencia de calor por convección, es de la forma:

$$q = h(T_s - T_\infty)$$

donde q , es el flujo de calor por convección (W/m^2), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la *Ley de enfriamiento de Newton*, y la constante de proporcionalidad h ($W/m^2 \cdot K$) se denomina *coeficiente de calor por convección*. Este depende de las condiciones de la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades del fluido. Cualquier estudio de convección, se reduce finalmente a un estudio de los medios por los que es posible determinar h .

La transferencia de calor por convección, se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Hablamos de convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o el viento. En la convección libre el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidades ocasionadas por variaciones de temperaturas en el fluido. Es decir, las moléculas del fluido al calentarse se dilatan, pierden densidad y tienden a subir dejando su lugar a otras de mayor densidad, se originan así corrientes de convección que producen la mezcla de las distintas capas del fluido y el aumento en la energía de sus moléculas. A su vez, estos tipos de flujos pueden ser externos o internos.

Hemos descrito el modo de transferencia de calor por convección como la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a los efectos combinados de conducción y movimiento global del fluido. Por lo general la energía que se transfiere es la energía sensible o energía interna térmica del fluido. Sin embargo, hay procesos de convección en los cuales existe además intercambio de calor latente. Dos casos de especial interés son la ebullición y la condensación que no los estudiaremos en este curso.

Radiación. La *radiación térmica* es la energía *emitida* por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Centraremos nuestra atención en la radiación de superficies sólidas, si bien esta radiación también puede provenir de líquidos o gases.

En la radiación térmica, el calor se transmite mediante *ondas electromagnéticas*, al igual que la luz, pero de distintas longitudes de onda. La energía radiante depende de las características de la superficie y de la temperatura del cuerpo emisor. Al incidir sobre un receptor, parte de la energía pasa a este otro cuerpo, dependiendo de las características del mismo y de su poder de absorción. Esta energía se traduce en un aumento de la temperatura del segundo cuerpo. La transferencia de calor por radiación involucra únicamente el transporte de energía, *no necesita un soporte material*, efectuándose incluso en el vacío.

Considere los procesos de transferencia de radiación para la superficie de la figura 3. La radiación que la superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m^2) se denomina la *potencia emisiva superficial* E . Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecido por la Ley de Stefan - Boltzmann

$$E_b = \sigma T_s^4$$

donde T_s , es la temperatura absoluta (K) de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot K^4$). Dicha superficie se llama *radiador ideal* o *cuerpo negro*. El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada *emisividad*. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro.

La radiación también puede *incidir* sobre una superficie desde los alrededores y puede provenir de una fuente especial, como el sol, o de otras superficies a la que se expone la superficie de interés. Sin tener en cuenta la fuente, designaremos la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la *irradiación* G . Una parte de la irradiación, o toda, tal vez sea *absorbida* por la superficie, y así se incrementaría la energía térmica del material. La velocidad a la que la energía radiante por unidad de área superficial es absorbida se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad α . Es decir,

$$G_{abs} = \alpha G$$

donde $0 \leq \alpha \leq 1$. Si $\alpha < 1$ y la superficie es opaca ($\tau = 0$), parte de la irradiación se refleja. Si la superficie es semitransparente ($\tau \neq 0$), parte de la irradiación también se transmite. Sin embargo, mientras la radiación absorbida y emitida, aumenta y disminuye respectivamente

la energía térmica de la materia, la radiación transmitida y reflejada no tienen ningún efecto sobre esta energía.

Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña a T_s y una superficie isotérmica, mucho más grande que rodea por completo a la pequeña (figura 3). Los alrededores podrían ser las paredes de un cuarto cuya temperatura T_{alr} es diferente a la de una superficie rodeada ($T_s \neq T_{alr}$).

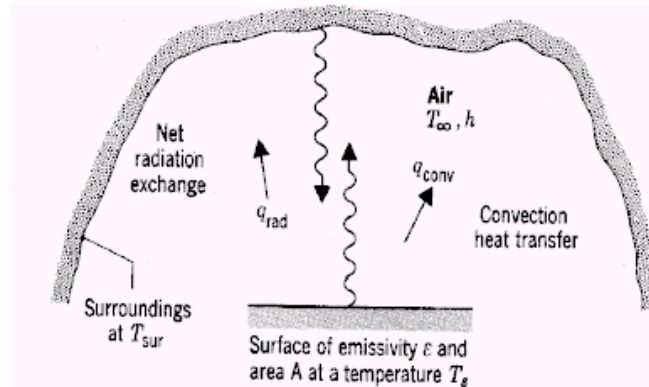


Figura 3. Intercambio de radiación: (a) en la superficie (b) entre una superficie y sus alrededores

Si aceptamos que para tal condición la irradiación se aproxima a la emisión de un cuerpo negro a T_{alr} , entonces $G = \sigma T_{alr}^4$. Si además suponemos que la superficie es tal que $\alpha = \epsilon$ (superficie gris), entonces la velocidad neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie, expresada por unidad de área de la superficie, es:

$$q = \frac{Q}{A} = \epsilon E_b(T_s) - \alpha G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

Esta expresión proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación. El intercambio neto de radiación también se puede expresar en la forma

$$q = h_r (T_s - T_{alr})$$

donde, el coeficiente de transferencia de calor por radiación es $h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{alr})(T_s^2 + T_{alr}^2)$

1.6. TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

Mientras que la conducción y la convección térmicas tienen lugar sólo a través de un medio material, la radiación térmica puede transportar el calor a través de un fluido o del vacío, en

forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz. Existen muchos fenómenos diferentes de radiación electromagnética pero en Ingeniería Térmica sólo consideraremos la radiación térmica, es decir, aquella que transporta energía en forma de calor.

La energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta a que se encuentre y de la naturaleza de la superficie.

Un radiador perfecto o cuerpo negro emite una cantidad de energía radiante de su superficie Q_r , dada por la ecuación:

$$Q_r = \sigma AT^4 = AE_b$$

en la que E_b es el poder emisor del radiador, viniendo expresado el calor radiante Q_r en W , la temperatura T de la superficie en K , y la constante dimensional σ de Stefan-Boltzman en unidades SI, en la forma:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

La ecuación anterior dice que toda superficie negra irradia calor proporcionalmente a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Aunque la emisión es independiente de las condiciones de los alrededores, la evaluación de una transferencia neta de energía radiante requiere una diferencia en la temperatura superficial de dos o más cuerpos entre los cuales tiene lugar el intercambio. Si un cuerpo negro a T_1 (K) irradia calor a un recinto que le rodea completamente y cuya superficie es también negra a T_2 (K), es decir, absorbe toda la energía radiante que incide sobre él, la transferencia de energía radiante viene dada por:

$$Q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Si los dos cuerpos negros tienen entre sí una determinada relación geométrica, que se determina mediante un factor de forma F , el calor radiante transferido entre ellos es:

$$Q_r = Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)$$

Los cuerpos reales no cumplen las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación con un ritmo inferior al de los cuerpos negros. Si a una temperatura igual a la de un cuerpo negro emiten una fracción constante de la energía que emitirían considerados como cuerpo negro para cada longitud de onda, se llaman cuerpos grises.

Un **cuerpo gris** emite radiación según la expresión: $Q_r = \varepsilon AE_b = \varepsilon \sigma AT^4$

El calor radiante neto transferido por un cuerpo gris a la temperatura T_1 a un cuerpo negro que le rodea a la temperatura T_2 es:

$$Q_r = \varepsilon_1 A_1 (E_{b1} - E_{b2}) = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

siendo ε_1 la emitancia de la superficie gris, igual a la relación entre la emisión de la superficie gris y la emisión de un radiador perfecto a la misma temperatura. El hecho de que la transferencia de calor dependa de T^4 complica los cálculos.

Si T_1 y T_2 no difieren demasiado, $\left(T_1 \approx T_2 \approx T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad \text{y} \quad T_1 - T_2 \ll T_1 \right)$ se puede poner:

$$Q_r = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^2 + T_2^2)(T_1^2 - T_2^2) = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) =$$

$$= \varepsilon_1 \sigma A_1 \left[\underbrace{(T_1 + T_2)^2}_{4T_m^2} - \frac{2T_1 T_2}{2T_m^2} \right] \underbrace{(T_1 + T_2)(T_1 - T_2)}_{2T_m} = A_1 \varepsilon_1 \sigma \underbrace{[4T_m^2 - 2T_m^2]}_{h_r} 2T_m (T_1 - T_2) = A_1 h_r (T_1 - T_2)$$

siendo: $h_r = 4 \varepsilon_1 \sigma T_m^3$, el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

A la temperatura de $25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$, se obtiene: $h_r = 6 \varepsilon_1 \text{ W/m}^2\text{K}$, por lo que el coeficiente de transferencia de calor por radiación a la temperatura ambiente es del orden de 6 veces la emitancia de la superficie.

Para: $T_1 = 320 \text{ K}$ y $T_2 = 300 \text{ K}$, el error debido al empleo de la aproximación es del 0,1%

Para: $T_1 = 400 \text{ K}$ y $T_2 = 300 \text{ K}$, el error debido al empleo de la aproximación es del 2%

Si ninguno de los dos cuerpos es un radiador perfecto, pero poseen entre sí una determinada relación geométrica, el calor radiante neto transferido entre ellos viene dado por:

$$Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma A_1 F_{1-2}^* (T_1^4 - T_2^4) = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{\rho_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{A_1 \rho_1}{A_2 \varepsilon_1}} A_1$$

en la que F_{1-2}^* es un factor de forma que modifica la ecuación de los radiadores perfectos para tener en cuenta las emitancias y las geometrías relativas de los cuerpos reales.

En muchos problemas industriales, la radiación se combina con otros modos de transmisión del calor. La solución de tales problemas se puede simplificar utilizando una resistencia térmica R_r para la radiación; su definición es semejante a la de la resistencia térmica de convección y conducción.

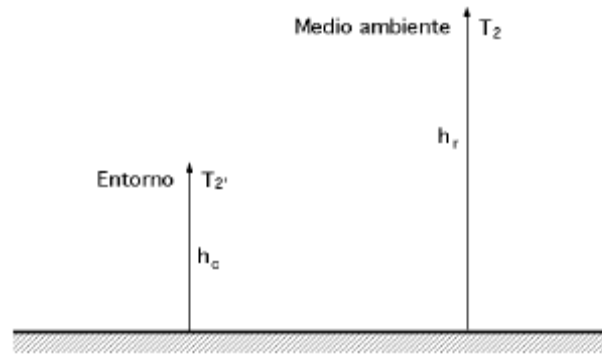
Si el calor transferido por radiación se escribe en la forma convectiva:

$$Q_r = \frac{T_1 - T_2}{R_r} = h_r A (T_1 - T_2)$$

en la que T_2 es una temperatura de referencia cuya elección viene impuesta por las condiciones de convección, (temperatura media del entorno en contacto con la superficie), mientras que T_1 es una temperatura de referencia que viene impuesta por las condiciones de radiación, (medio ambiente), Fig I.13.

La resistencia térmica radiativa viene dada por:

$$R_r = \frac{T_1 - T_2}{\sigma A_1 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)} = \frac{1}{\sigma A_1 F_{1-2} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}$$



Figl.13

La conductividad térmica unitaria de la radiación h_r se define mediante la expresión:

$$h_r = \frac{1}{R_r A_1} = \frac{\sigma F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} = \sigma F_{1-2} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

en la mayoría de los casos T_1 y T_2 coinciden.

I.3 RELACIÓN CON LA TERMODINÁMICA

En este punto es conveniente notar las diferencias fundamentales entre transferencia de calor y termodinámica. Aunque la termodinámica trata de la interacción del calor y del papel vital que ésta desempeña en la primera y segunda leyes, no considera los mecanismos que realizan el intercambio de calor ni los métodos que existen para calcular la velocidad de éste intercambio. La termodinámica trata de estados en equilibrio de la materia, donde un estado de equilibrio necesariamente excluye la existencia de un gradiente de temperatura. Aunque la termodinámica sirve para determinar la cantidad de energía que se requiere en forma de calor para que un sistema pase de un estado de equilibrio a otro, no reconoce que la transferencia de calor es inherentemente un proceso de no equilibrio. Para que ocurra la transferencia de calor, debe haber un gradiente de temperatura, es decir un desequilibrio termodinámico. La disciplina de la transferencia de calor busca llevar a cabo lo que la termodinámica es intrínsecamente incapaz de hacer. Esto es, cuantificar la velocidad a la que ocurre la transferencia de calor en términos del

grado de desequilibrio térmico. Esto se lleva a cabo a través de las ecuaciones o modelos para los tres modos de transferencia expresados en el punto anterior

I.4. REQUERIMIENTO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Los temas de la termodinámica y de la transferencia de calor son sumamente complementarios. Por ejemplo, como la primera trata la velocidad a la que se transfiere calor el tema de la transferencia de calor se considera una extensión de la termodinámica. A su vez, para muchos problemas de transferencia de calor, la primera ley de la termodinámica (ley de conservación de la energía) proporciona una herramienta útil, a menudo esencial. En previsión de este tipo de problemas se obtendrán ahora las formulaciones generales de la primera ley,

I.4.1 Conservación de la energía para un volumen de control

Para aplicar la primera ley, necesitamos primero identificar el volumen de control, una región de espacio limitada por una superficie de control a través de la cual pueden pasar la energía y la materia. Una vez que se identifica el volumen de control debe especificarse una base temporal adecuada, hay dos opciones. Como la primera ley debe satisfacerse en todos y cada uno de los instantes de tiempo t , una opción implica formular la ley sobre una base de velocidades; es decir, en cualquier instante debe haber un balance entre todas las velocidades de energía medidas en joules por segundo (W). De manera alternativa, la primera ley también debe satisfacerse sobre cualquier intervalo de tiempo Δt . Para este intervalo tiene que existir un balance entre las cantidades de todos los cambios de energía, medidos en joules.

De acuerdo con la base temporal, las formulaciones de la primera ley más convenientes para el análisis de transferencia de calor se expresan como sigue:

En un instante (t)

La velocidad a la que la energía térmica y mecánica ingresa en un volumen de control, más la velocidad a la que se genera energía térmica dentro del volumen de control, menos la velocidad a la que sale energía térmica y mecánica del volumen de control debe ser igual a la velocidad de incremento de la energía almacenada dentro del volumen de control.

En un intervalo de tiempo (Δt)

La cantidad de energía térmica y mecánica que ingresa en un volumen de control, más la cantidad de energía térmica que se genera dentro del volumen de control, menos la

cantidad de energía térmica y mecánica que sale del volumen de control debe ser igual al incremento en la cantidad de energía almacenada en el volumen de control.

Si el flujo entrante y la generación de energía exceden al flujo saliente habrá un aumento en la cantidad de energía almacenada (acumulada) en el volumen de control; si ocurre lo contrario, habrá una disminución en el almacenamiento de energía. Si el flujo entrante y la generación de energía igualan al flujo de salida, debe prevalecer una condición de estado estable en la que no habrá cambio en la cantidad de energía almacenada en el volumen de control.

Considérese la aplicación de la conservación de la energía al volumen de control que se muestra en la figura 4. El primer paso es identificar la superficie de control trazando una línea punteada. El siguiente es identificar los términos de energía. En un instante estos términos incluyen la velocidad a la que la energía térmica y mecánica entra y sale a través de la superficie de control, \dot{E}_{ent} y \dot{E}_{sal} . También es posible generar energía térmica dentro del volumen de control debido a la conversión de otras formas de energía. Nos referimos a este proceso como generación de energía, y la velocidad a la que ocurre se denomina \dot{E}_g . La velocidad de cambio de la energía almacenada dentro del volumen de control, dE_{alm}/dt , se designa \dot{E}_{alm} . Una forma general del requerimiento de conservación de la energía se expresa entonces en una base de velocidades como:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{alm}}{dt} = \dot{E}_{alm} \quad \text{Ec .1}$$

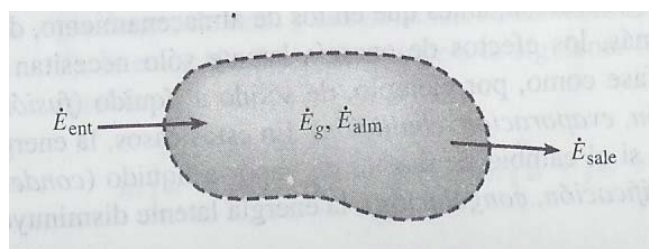


Figura 4 Conservación de la energía para un volumen de control

La ecuación anterior se aplica en cualquier instante de tiempo. La forma alternativa que se aplica para un intervalo de tiempo Δt se obtiene integrando esta ecuación en el tiempo:

$$E_{ent} + E_g - E_{sal} = \Delta \dot{E}_{alm} \quad \text{Ec .2}$$

Expresada en palabras, esta relación indica que las cantidades del flujo de entrada y generación de energía actúan para incrementar la cantidad de energía almacenada

dentro del volumen de control, mientras que el flujo saliente actúa para disminuir la energía almacenada.

Los términos de flujo de entrada y de salida son fenómenos de superficie. Es decir, se asocian exclusivamente con procesos que ocurren en la superficie de control y son proporcionales al área de la superficie. Una situación común comprende los flujos de entrada y de salida debido a la transferencia de calor por conducción, convección y/o radiación. En situaciones que abarcan un flujo de fluido a través de la superficie de control, los términos también incluyen energía transmitida con la materia que entra y sale del volumen de control. Esta energía puede estar compuesta de las formas interna, cinética y potencial. Los términos del flujo de entrada y de salida también incluyen interacciones de trabajo que ocurren en las fronteras del sistema.

El término generación de energía se asocia con la conversión de otra forma de energía (química, eléctrica, electromagnética o nuclear) a energía térmica. Es un fenómeno volumétrico. Es decir, ocurre dentro del volumen de control y es proporcional a la magnitud de su volumen. Por ejemplo, al convertir energía química a térmica tal vez ocurra una reacción química exotérmica. El efecto neto es un aumento en la energía térmica de la materia dentro del volumen de control. Otra fuente de energía térmica es la conversión de energía eléctrica que ocurre debido al calentamiento de la resistencia cuando se hace pasar una corriente eléctrica por un conductor. Es decir, si una corriente eléctrica I pasa a través de una resistencia R en el volumen de control, se disipa energía eléctrica a una razón de I^2R , que corresponde a la velocidad a la que se genera (libera) energía térmica dentro del volumen. Aunque es posible tratar alternativamente este proceso como uno en el que se realiza trabajo eléctrico sobre el sistema (flujo entrante de energía), el efecto neto sigue siendo la creación de energía térmica.

El almacenamiento de energía es también un fenómeno volumétrico y los cambios dentro del volumen de control se deberán a cambios en las energías interna, cinética y/o potencial de su contenido. En consecuencia, para un intervalo de tiempo, Δt , el término de almacenamiento de la ecuación integrada, ΔE_{alm} se puede igualar a la suma, $\Delta U + \Delta KE + \Delta PE$. El cambio en la energía interna, ΔU , consiste en un componente sensible o térmico, que explica los movimientos traslacional, rotacional y vibracional de los átomos y moléculas que componen la materia: un componente latente, que relaciona las fuerzas intermoleculares que influyen en el cambio de fase entre los estados sólido, líquido y vapor: un componente químico, que explica la energía almacenada en las uniones químicas entre átomos; y un componente nuclear, que explica las fuerzas de unión en el núcleo del átomo.

En todas las aplicaciones de interés en este texto, si existen efectos químicos o nucleares, éstos se tratan como fuentes de energía térmica y por ello se incluyen en los términos de generación, antes que en los de almacenamiento, de las ecuaciones anteriores. Además, los efectos de energía latente sólo necesitan considerarse si hay un cambio de fase como, por ejemplo, de sólido a líquido (fusión) o de líquido a vapor (vaporización, evaporación, ebullición). En estos casos, la energía latente aumenta. Por el contrario, si el cambio de fase es de vapor a líquido (condensación) o de líquido a sólido (solidificación, congelación), la energía latente disminuye. Por tanto, si los efectos de la energía cinética y potencial se pueden dejar de lado, como casi siempre es el caso en el análisis de la transferencia de calor, los cambios en el almacenamiento de energía se deben sólo a cambios en las energías térmica interna y/o, en el caso de un cambio de fase, en las energías latentes ($\Delta E_{alm} = \Delta U = \Delta U_t + \Delta U_{lat}$).

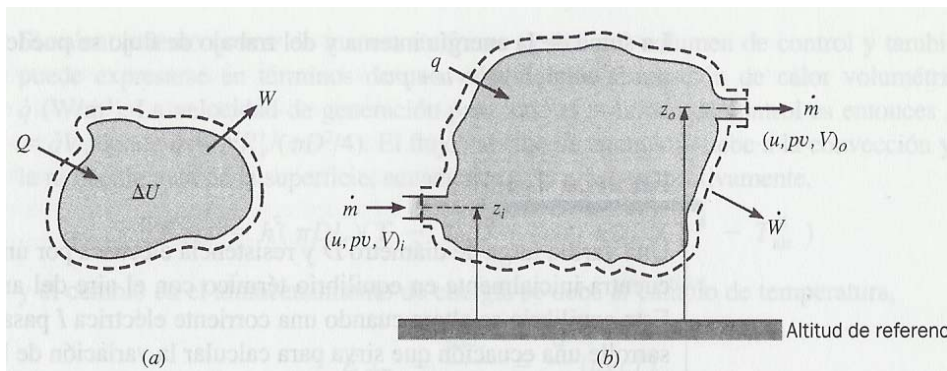


Figura 5 Conservación de la energía (a) aplicación a un sistema cerrado en un intervalo de tiempo (b) aplicación a un sistema abierto de flujo estable en un instante

Las ecuaciones anteriores sirven para desarrollar formas más específicas del requerimiento de conservación de la energía, que incluyen las exigencias consideradas anteriormente en su estudio de la termodinámica. Considere un sistema cerrado de masa fija (figura 5 a.), a través de cuyos límites la energía es transferida por las interacciones de calor y trabajo. Si en un intervalo de tiempo Δt se transfiere calor al sistema en la cantidad Q (flujo de entrada de energía), el sistema realiza trabajo en la cantidad W (flujo saliente de energía), no ocurre conversión de energía dentro del sistema ($E_g = 0$) y los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes, la ecuación 2 se reduce a:

$$Q - W = \Delta U \quad \text{Ec . 3}$$

El término de trabajo W se deberá al desplazamiento de una frontera, un eje rotatorio y/o a efectos electromagnéticos. De forma alternativa, en un instante, el requerimiento de conservación de la energía es:

$$q - \dot{W} = dU \quad \text{Ec . 4}$$

La otra forma del requerimiento de conservación de la energía con el que ya está familiarizado pertenece a un sistema abierto (figura 5 b.), donde el flujo de masa proporciona el transporte de energía interna, cinética y potencial hacia dentro y fuera del sistema. En tales casos, es habitual dividir el intercambio de la energía en forma de trabajo en dos contribuciones. La primera contribución, denominada trabajo de flujo, se asocia con el trabajo realizado por fuerzas de presión que mueven el fluido a través de las fronteras del sistema. Para una masa unitaria, la cantidad de trabajo es equivalente al producto de la presión por el volumen específico del fluido (pv). Respecto a todos los otros trabajos se supone que los realizó el sistema y se incluyen en el término W .

De aquí, si se supone que se transferirá calor al sistema, no ocurre conversión de energía dentro de éste, y la operación se encuentra en condiciones de estado estable ($E_{alm} = 0$), la ecuación 1 se reduce a la siguiente forma de la ecuación de energía de flujo estable:

$$\dot{m} \left(u + pv + \frac{V}{2} + gz \right)_{ent} - \dot{m} \left(u + pv + \frac{V}{2} + gz \right)_{sal} + q - \dot{W} = 0 \quad \text{Ec . 5}$$

La suma de la energía interna y del trabajo de flujo se puede, por supuesto, reemplazar por la entalpía, $i = u + pv$.

1.4.2 Balance de energía en una superficie

Con frecuencia tendremos oportunidad de aplicar el requerimiento de conservación de la energía a la superficie de un medio. En este caso especial la superficie de control no incluye masa o volumen y aparece como se muestra en la figura 6. En concordancia, los términos de generación y almacenamiento de la expresión de conservación, ecuación 1, ya no son relevantes y sólo es necesario tratar con el fenómeno superficial.

Para este caso el requerimiento de conservación se convierte en

$$E_{ent} - E_{sal} = 0 \quad \text{Ec . 6}$$

Aunque la generación de energía térmica ocurriera en el medio, el proceso no afectaría al balance de energía en la superficie de control. Además, este requerimiento de conservación es válido para las condiciones de estado estable y transitorio.

En la figura 6 se muestran tres formas de transferencia de calor para la superficie de control. En una base de área unitaria, éstas son conducción desde el medio hacia la superficie de control (q_{cond}), convección desde la superficie hacia el fluido (q_{conv}) e intercambio de

radiación neta desde La superficie hacia los alrededores (q_{rad}). El balance de energía toma entonces la forma

$$q_{cond} - q_{conv} - q_{rad} = 0 \quad \text{Ec .7}$$

y es posible expresar cada uno de los términos con las ecuaciones o modelos adecuados.

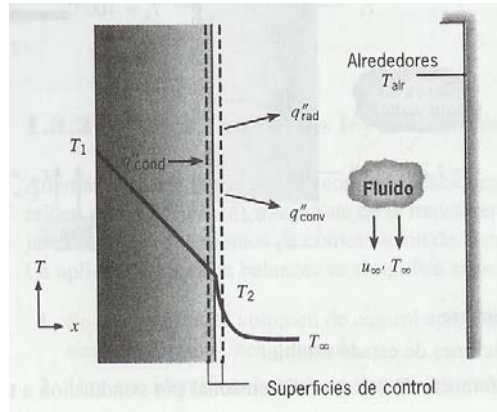


Figura 6 Balance de energía en la superficie de un medio

1.4.3 Aplicación de las leyes de conservación: metodología

Además de estar familiarizado con las ecuaciones o modelo de transporte que se describen en la sección 1.2, el analista de la transferencia de calor debe ser capaz de trabajar con los requerimientos de conservación de la energía de las ecuaciones 1, 2 y 6. La aplicación de estos balances se simplifica si se siguen unas cuantas reglas básicas.

1. Se debe definir el volumen de control apropiado con la superficie de control representada por una línea punteada.
2. Hay que identificar la base de tiempo apropiada.
3. Tienen que identificarse los procesos de energía relevantes. Cada proceso ha de mostrarse en el volumen de control mediante una flecha etiquetada en forma apropiada.
4. Hay que escribir la ecuación de conservación, y las expresiones de flujo apropiadas deben sustituirse para los términos en la ecuación.

Es importante observar que el requerimiento de conservación de la energía se aplica a un volumen de control finito o a un volumen de control diferencial (infinitesimal). En el primer caso, la expresión resultante determina el comportamiento general del sistema. En el segundo, se obtiene una ecuación diferencial que se resuelve para condiciones en cada punto del sistema.

I.5 ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR: METODOLOGÍA

A los fines de resolver problemas de ingeniería que incluyan procesos de transferencia de calor, es recomendable un procedimiento sistemático que se caracteriza por un formato establecido. Consiste en los siguientes pasos:

1. *Se conoce*: después de leer cuidadosamente el problema, establezca breve y concisamente lo que se conoce de éste. No repita el planteamiento del problema.
2. *Encontrar*: plantee de forma breve y concisa qué se debe encontrar.
3. *Esquema*: dibuje un esquema del sistema físico. Si prevé la aplicación de las leyes de conservación, represente la superficie de control que se requiere mediante líneas punteadas sobre el esquema. Identifique los procesos de transferencia de calor relevantes con flechas apropiadamente etiquetadas sobre el esquema.
4. *Suposiciones*: haga una lista de todas las suposiciones de simplificación pertinentes.
5. *Propiedades*: reúna los valores de las características necesarias para los cálculos siguientes e identifique la fuente de la que se obtienen.
6. *Análisis*: Comience el análisis aplicando las leyes de conservación apropiadas, e introduzca las ecuaciones de flujo necesarias. Desarrolle el análisis lo más completo que sea posible antes de sustituir valores numéricos. Ejecute los cálculos necesarios para obtener los resultados deseados.
7. *Comentarios*: analice sus resultados. Este análisis incluirá un resumen de conclusiones clave, una crítica de las suposiciones originales y una inferencia de las tendencias obtenidas ejecutando cálculos adicionales del tipo qué sucedería si y de sensibilidad de parámetros.