

Transferencia de calor

7.1. INTRODUCCIÓN

Cuando la técnica de Bond-Graph es aplicada a la transferencia de calor, no aparecen todos los elementos clásicos; solamente existen las puertas resorte y las puertas resistencia.

En este dominio de la física los grafos llevan asociado como esfuerzo la temperatura T ; y como flujo, la variación de la cantidad de calor, es decir, el flujo de calor.

En la definición anterior aparece la diferencia más significativa que se produce en la aplicación de Bond-Graph a la transferencia de calor y consiste en que el producto de las variables esfuerzo y flujo no es potencia. Efectivamente, solamente ya el flujo de calor es potencia.

A pesar de esta gran diferencia con los anteriores dominios de la física, la técnica puede aplicarse correctamente como se verá en los ejemplos posteriores.

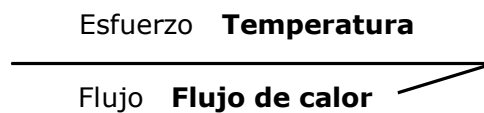


Figura 7.1

En el cuadro siguiente se presenta el significado de las variables en el campo de la transferencia de calor.

	General	Transmisión de calor	Unidades S.I
Esfuerzo	$e(t)$	T , Temperatura	Grados Kelvin
Flujo	$f(t)$	Q , Flujo de calor	J/s
Desplazamiento	$q(t)$	q , Cantidad de calor	J

El resto de variables o no tienen sentido físico o no son necesarias.

Puerta resistencia

El flujo de calor que atraviesa una placa viene definido por:

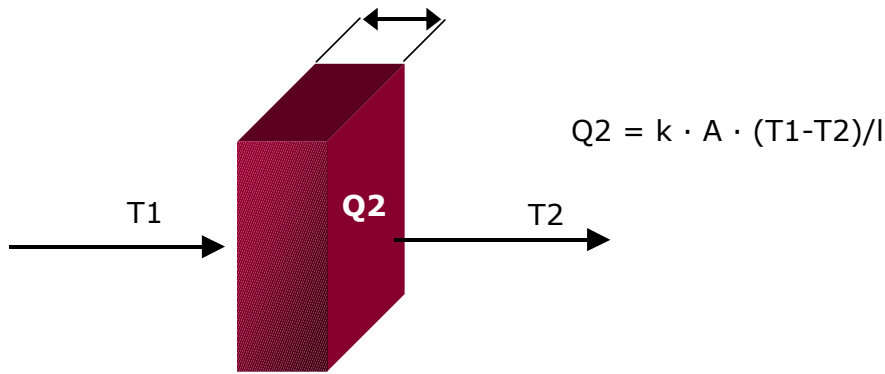


Figura 7.2

En donde:

k = Conductividad del material expresada en $W/m \cdot K$

A = Superficie de la placa

l = Espesor de la placa

En definitiva, el flujo de calor que atraviesa una placa depende de un factor $k \cdot A/l$, y de la diferencia de temperaturas a las que está sometida la placa. La conductividad del material k , depende de la temperatura a la que se encuentra el cuerpo pero, para pequeñas diferencias de temperaturas, puede considerarse constante.

La representación mediante Bond-Graph del flujo de calor que atraviesa una placa, se hace por medio de una puerta resistencia unida a una unión 1.

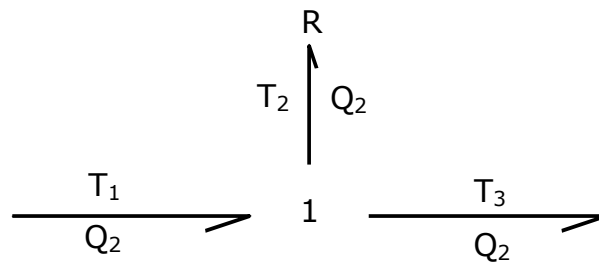


Figura 7.3

Por ser puerta resistencia se cumple que:

$$Q_2 = T_2 / R$$

Teniendo en cuenta que $T_2 = T_1 - T_3$, y dándole a R el valor de $l/k \cdot A$, se tiene definitivamente:

$$Q_2 = k \cdot A \cdot (T_1 - T_3) / l$$

Puerta resorte

Del flujo de calor que entra en un cuerpo, parte se emplea en calentarlo y el resto es conducido o evacuado hacia otro cuerpo o hacia el exterior.

Este comportamiento viene expresado por la ecuación: $q = m \cdot c \cdot T$ cuyo significado es que para elevar la temperatura de un cuerpo a una temperatura T , es necesario aportar una cantidad de calor q , que depende de la propia temperatura T , de la masa del cuerpo m y de su calor específico C .

Esta ecuación se simula en Bond-Graph mediante una puerta resorte unida a una unión 0. En la puerta resorte se cumple que:

$$q = \int^t Q_5 \cdot dt$$

Interpretando que T_5 es el incremento de temperatura y que q es la cantidad de calor obtenida en la integración del flujo de calor Q_5 , basta con darle a la rigidez de la puerta resorte el valor de $1/m \cdot c$ para que se cumpla definitivamente que: $T_5 = q/m \cdot c$

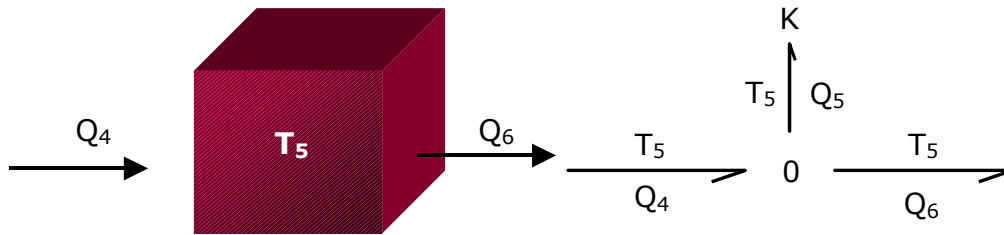


Figura 7.4

7.2. TEMPERATURA PRODUCIDA POR UNA RESISTENCIA ELÉCTRICA

Como primer ejemplo de simulación mediante Bond-Graph de un fenómeno de transferencia de calor, estudiaremos la temperatura producida en un cuerpo por una resistencia interna que está sometida a una tensión eléctrica.

Como valor de la fuente de flujo de entrada al diagrama de grafos, se tiene el producto de la tensión eléctrica e , multiplicada por la intensidad i . Por otra parte, el valor de la temperatura ambiente se representa mediante una fuente de esfuerzo de valor T_0 .

En este ejemplo puede comprobarse perfectamente la diferencia existente entre la transferencia de calor y los demás dominios de la física. Efectivamente, el producto de las dos variables asociadas en electricidad, tensión e e intensidad, produce potencia; que se transforma en flujo de calor.

En la figura 7.5, se observa cómo el producto de $e \cdot i$ en la resistencia define el valor de la fuente de flujo con la que comienza el sistema térmico.

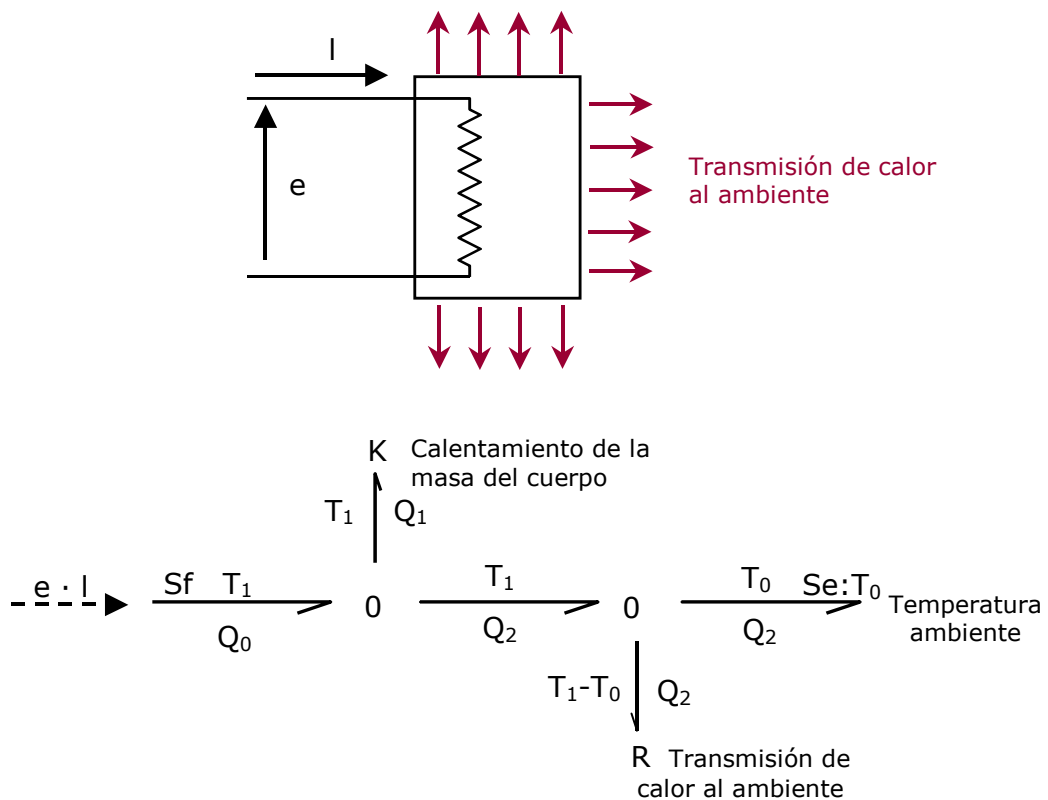


Figura 7.5

En el ejemplo que se plantea, el calor generado por la resistencia se empleará en parte para calentar la masa y el resto será transmitido al ambiente.

$K = 1/m \cdot c$ en donde m es la masa y c , el calor específico del material.

En cuanto a la puerta resistencia, como en este caso no se trata de una placa, tiene como valor:

$R = 1/h \cdot A$ en donde A es la superficie de intercambio de calor y h el coeficiente de transferencia de calor.

Los flujos y esfuerzos asociados a cada grafo tienen la siguiente expresión.

$$Q_0 = e \cdot i$$

$$T_1 = k \cdot x = (1/m \cdot c) \int^t Q_1 dt = q_1 / m \cdot c$$

$$Q_2 = (T_1 - T_0) / R = h \cdot A \cdot (T_1 - T_0)$$

$$Q_1 = Q_0 - Q_2 = e \cdot i - h \cdot A (T_1 - T_0)$$

En general, toda puerta resistencia supone una generación de calor y por tanto, la entrada en un sistema de transferencia de calor.

Veamos, por ejemplo, el caso de un amortiguador hidráulico del que se quiere obtener la temperatura que alcanza el aceite en su funcionamiento. Como se observa en la figura 7.6, el diagrama de grafos es prácticamente igual al planteado para el caso de la resistencia interna.

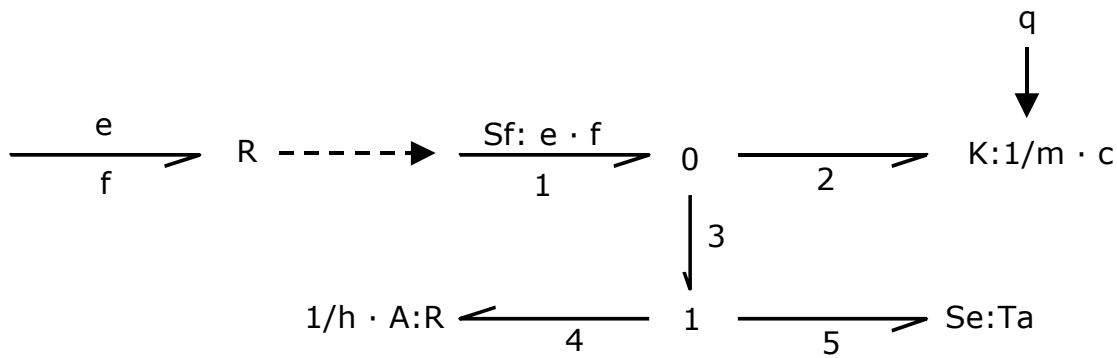


Figura 7.6

En este caso se tiene

e = esfuerzo en la puerta resistencia que simula al amortiguador

f = flujo en la puerta resistencia anterior

m = masa del aceite

c = calor específico del aceite

h = coeficiente de transferencia total del calor

A = superficie de contacto entre la carcasa del amortiguador y el ambiente

T_a = temperatura del ambiente

Cálculo de flujos y esfuerzos

Como siempre, se toma como variable el desplazamiento asociado a la puerta resorte, que en este caso significa el calor almacenado en el aceite.

$f_1 = e \cdot f = Q$ Flujo de calor generado en el amortiguador.

$e_2 = q / m \cdot c$ Incremento de la temperatura del aceite.

$e_1 = e_2 = e_3$

$e_5 = T_a$ Temperatura del ambiente

$e_4 = e_3 - e_5 = q / m \cdot c - T_a$ Diferencia de temperatura entre el aceite y el ambiente.

$$f_4 = e_4/R = (q/m \cdot c - T_a) \cdot h \cdot A \quad \text{Flujo de calor que es evacuado al ambiente.}$$

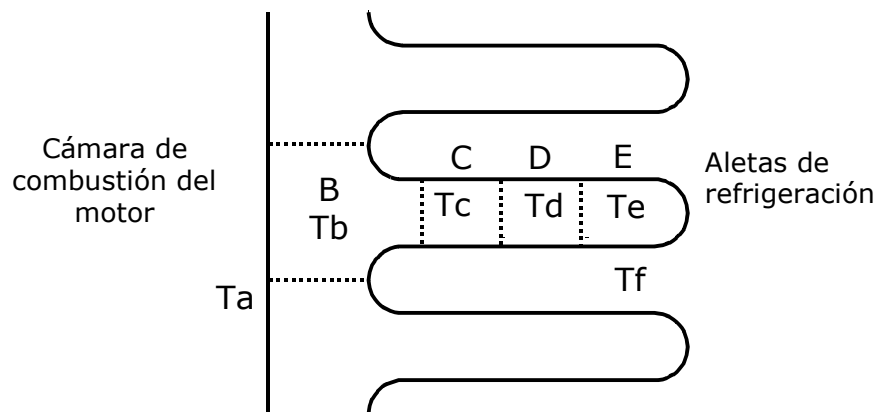
$$f_3 = f_4$$

$$f_2 = f_1 - f_3 = Q - (q/m \cdot c - T_a) \cdot h \cdot A$$

$$f_5 = f_4$$

7.3 ANÁLISIS DE CUERPOS COMPLEJOS

En la figura 7.7 se representa un fragmento de un motor refrigerado por aire, del que solamente se va a estudiar una de las aletas. Para ello se divide en varias partes, planteando en cada una de ellas las puertas resorte y resistencia necesarias.



B, C, D, E Partes en que se divide la aleta

T_a Temperatura en la cámara de combustión del motor

T_b , T_c , T_d , T_e Temperatura de la aleta en diversas zonas. En cada una de ellas se considera que la temperatura es uniforme

T_f Temperatura del aire que rodea a las aletas. Se considera constante alrededor de la aleta

Figura 7.7

La discretización del modelo depende de la precisión que se desee, aumentando conforme lo hace el número de partes en que se divide la pieza.

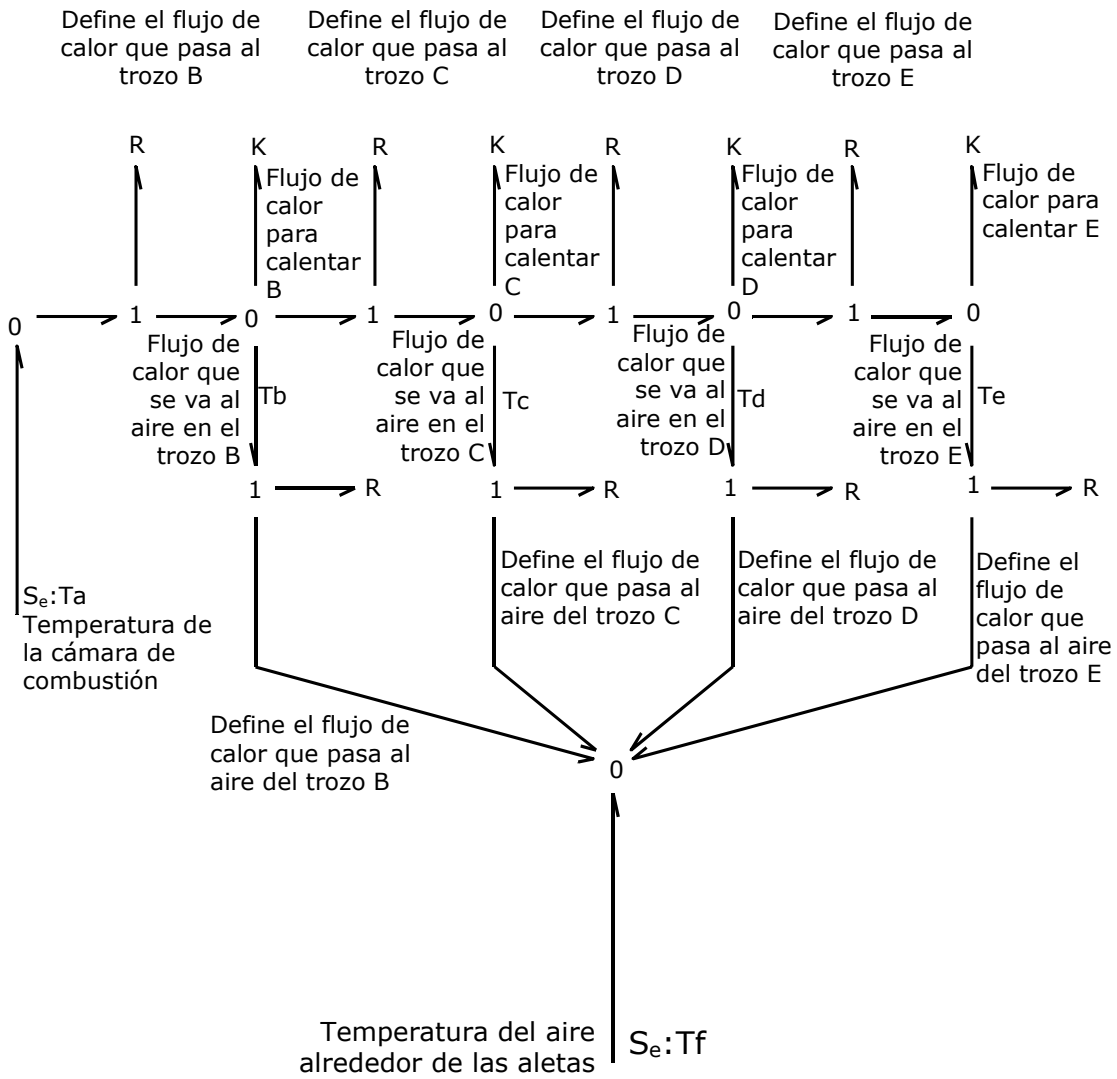


Figura 7.8