

TEMA 10. CONTROL TÉRMICO DE LOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

10.1.INTRODUCCIÓN

10.2.MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL CALOR

10.2.1. Convección.

10.2.2. Radiación.

10.2.3. Conducción.

10.2.3.1. Modelo Térmico Estático

10.2.3.2. Modelo Térmico Dinámico

10.2.3.3. Cálculo de la Temperatura de la Unión en Situaciones Transitorias

10.3.DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS

10.3.1. Radiadores

10.3.1.1. Convección Forzada

10.3.1.2. Cálculo de la Resistencia Térmica

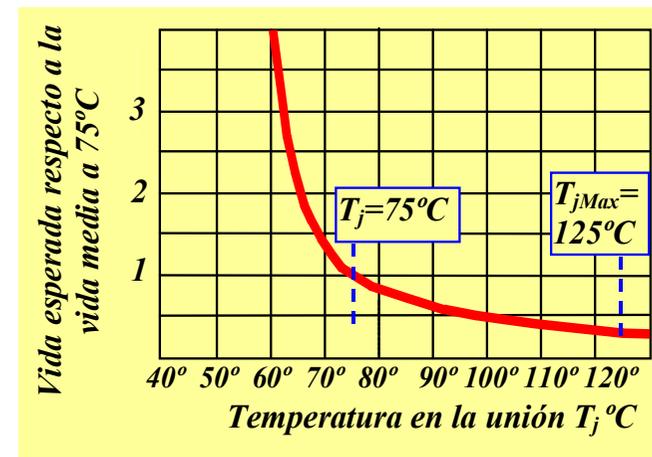
10.3.2. Refrigeradores por líquidos

INTRODUCCIÓN

Problema a resolver: Al circular corrientes por los dispositivos y conmutar entre corte y saturación se producen unas pérdidas de potencia en forma de calor en el dispositivo. Si este calor no es extraído del interior del dispositivo, provocará una subida de la temperatura del semiconductor.

La temperatura en el cristal de silicio no puede superar un valor máximo, (normalmente $T_{jmax}=125^{\circ}C$), ya que:

- ◆ Empeoran las características funcionales del dispositivo.
- ◆ La vida media esperada disminuye al aumentar la temperatura.



Puede observarse que un dispositivo funcionando a $75^{\circ}C$ **durará unas cuatro veces más** que si trabaja a su temperatura máxima, por tanto es muy importante mantener la temperatura del cristal controlada, aún en las condiciones más desfavorables (Máximas disipación de potencia y temperatura del medio ambiente)

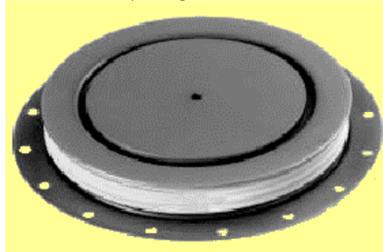
ACCIONES A TOMAR:

INTRODUCCIÓN

ACCIONES A TOMAR:

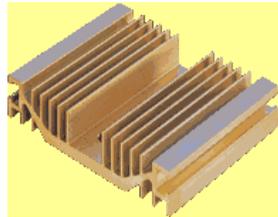
- ◆ Debe **limitarse la potencia disipada** en el dispositivo (pérdidas):
- Usar dispositivos con menor caída en conducción.
- Limitar la corriente máxima por el dispositivo.
- Usar técnicas que minimicen las pérdidas en conmutación.
- ◆ O bien **facilitar la evacuación del calor generado** hacia el medio ambiente (supuesto como un sumidero de calor infinito) empleando:

- Cápsulas adecuadas (Fabricante).



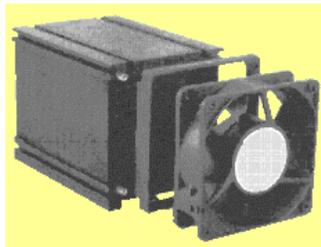
Ejemplo de Encapsulado: IGCT

- Radiadores.



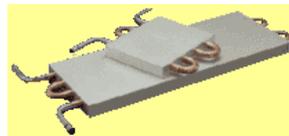
Disipador de Aluminio Extrusionado

- Radiadores con ventilación forzada.



Disipador de Aluminio con ventilador

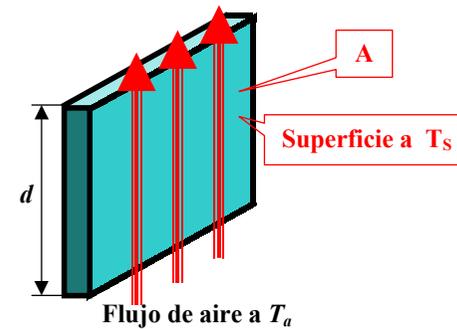
- Refrigeración por líquidos. (con o sin evaporación)



Dos refrigeradores por agua

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL CALOR.

Convección



El mecanismo de convección del calor ocurre entre un sólido y el fluido con el que está en contacto. Las capas del fluido más próximas se calientan y crean un flujo (**convección natural**) o mediante un ventilador o bomba se establece un flujo (**convección forzada**)

La transferencia de calor por **Convección** (natural, en el aire) se puede estimar por:

$$P_{conv} = 1.34 A (\Delta T)^{1.25} / d^{0.25}$$

donde:

- P_{conv} es la potencia transferida por el mecanismo de convección desde el disipador hacia el ambiente (W).
- A es el área de la superficie vertical (m^2).
- d es la altura vertical del área de la superficie A (m).
- ΔT es el incremento de temperatura entre el fluido y la superficie ($^{\circ}C$).

La **resistencia térmica** equivalente será por tanto:

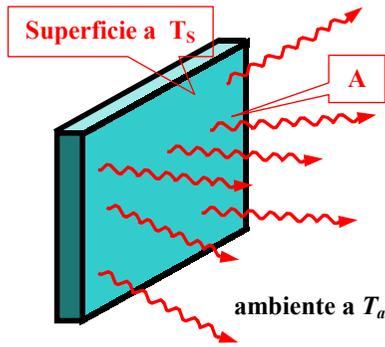
$$R_{\theta sa, conv} = \frac{1}{1.34 A} \left(\frac{d}{\Delta T} \right)^{1/4}$$

En algunos manuales se suele aproximar por:

$$P_{conv} = h A \Delta T$$

Sistema Empleado		$h (W m^{-2} ^{\circ}K^{-1})$
Convección Natural	Gases	2-25
	Líquidos	50-1.000
Convección Forzada	Gases	25-250
	Líquidos	50-20.000
Convección con Cambio de Fase	Líquido+Gas (Evaporación y Condensación)	2.500-100.000

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL CALOR. Radiación



El mecanismo de radiación consiste en la emisión por una superficie de energía en forma de radiación electromagnética (infrarrojos), por tanto no necesita un medio material para producirse.

La transferencia de calor por **Radiación** se rige por la **ley de Stefan Boltzmann**:

$$P_{rad} = \sigma EA(T_s^4 - T_a^4)$$

donde:

- P_{rad} es la potencia transferida entre la superficie del disipador y el ambiente (W).
- E es la emisividad de la superficie del disipador. Esta constante depende del tipo de material. Para objetos oscuros, como el aluminio pintado de negro utilizado en radiadores es 0.9.
- A es el área de la superficie (m^2).
- T_s es la temperatura de la superficie expresada en grados Kelvin.
- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} oK^{-4}$ es la constante de Stefan Boltzmann

La **resistencia térmica** equivalente será por tanto:

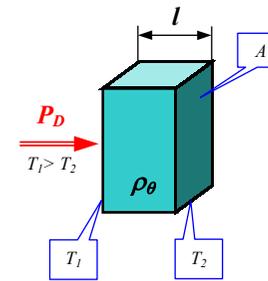
$$R_{\theta sa, rad} = \frac{\Delta T}{5.7 \times 10^{-8} EA(T_s^4 - T_a^4)}$$

Al instalar radiadores, se debe tener en cuenta que si se colocan próximos a otros objetos más calientes absorberán más energía que la que emitan por radiación.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL CALOR. Conducción

En un material conductor del calor, **el flujo de calor va desde los puntos más calientes del material hacia los más fríos.**

Según la **ley de Fourier**, la evacuación de calor por conducción se puede aproximar suponiendo que el material que conduce el calor presenta una **resistencia térmica** independiente de la temperatura y de la cantidad de calor evacuada:



$$R_{\theta} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{\Delta T}{P_D} \left(\frac{^{\circ}C}{W} \right),$$

$$\text{con } \dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = P_D$$

$$\text{y } R_{\theta} = \frac{\rho_{\theta} l}{A}$$

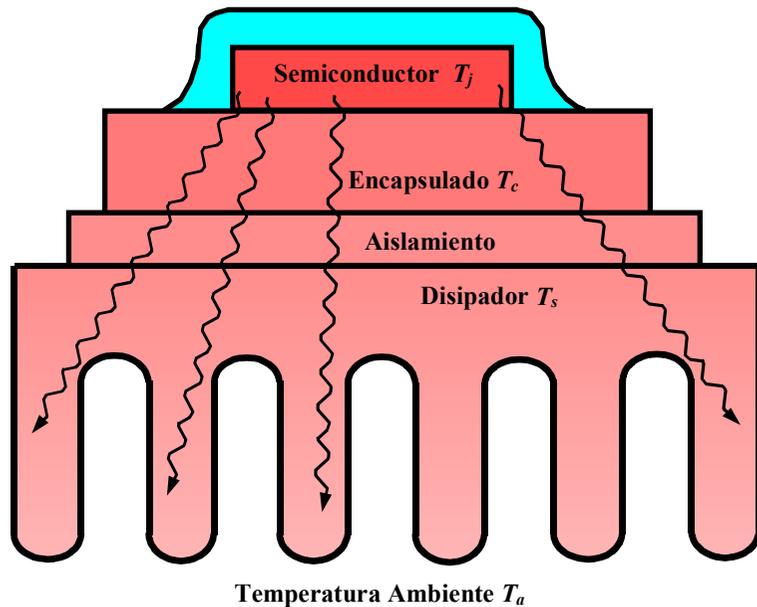
donde:

- ρ_{θ} es la resistividad térmica del material ($^{\circ}C \cdot m/W$).
- l es la longitud (m).
- A es el área (m^2).
- P_D es la potencia disipada (W).
- R_{θ} es la resistencia térmica del trozo de material ($^{\circ}C/W$).

Material	ρ_{θ} ($^{\circ}C \cdot cm/W$)
Diamante	0.02 - 0.1
Cobre	0.3
Aluminio	0.5
Estaño	2.0
Grasa térmica	130
Mica	150
Mylar	400
Aire en calma	3000

Comparación de la Resistividad Térmica de Algunos Materiales Típicos

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.
Modelo Térmico Estático



Modelo Multicapa de un Semiconductor Montado sobre un Disipador para analizar la Transferencia de Calor desde el Silicio hacia el Ambiente

$$R_{\theta ja} = R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta sa}$$

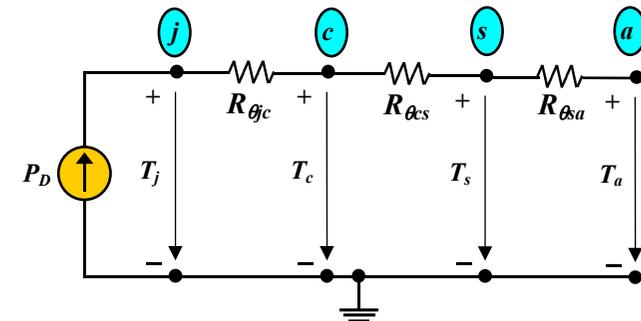
donde:

- $R_{\theta jc}$ es la resistencia térmica debido a mecanismos de transferencia de calor por **conducción** entre el silicio y el encapsulado del dispositivo.
- $R_{\theta cs}$ es la resistencia térmica debido a mecanismos de transferencia de calor por **conducción** entre el encapsulado del dispositivo y el disipador.
- $R_{\theta sa}$ es la resistencia térmica debido a mecanismos de transferencia de calor por **convección y radiación** entre el disipador y el ambiente. Estos mecanismos, aunque más complejos, se pueden modelar de forma aproximada mediante una resistencia térmica y serán estudiados posteriormente.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.
Modelo Térmico Estático

Se puede hacer una analogía con los circuitos eléctricos:

Magnitud Eléctrica	Magnitud Térmica
Diferencia de Potenciales	Diferencia de Temperaturas
Intensidad	Potencia
Resistencia Eléctrica	Resistencia Térmica



Circuito Equivalente Basado en Resistencias Térmicas

$$T_j = P_D (R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta sa}) + T_a$$

dónde:

- T_j es la temperatura de la unión del semiconductor.
- T_a es la temperatura ambiente del medio exterior.

Estos cálculos **no son exactos**, debido a que las resistencias térmicas varían con:

- ♦ La Temperatura.
- ♦ Contacto térmico entre cápsula y radiador (Montaje).
- ♦ Dispersiones de fabricación.
- ♦ Efectos transitorios.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN. Modelo Térmico Dinámico

Hasta ahora se ha estudiado el funcionamiento en situaciones estacionarias. Vamos a considerar otros casos:

- ◆ Arranque de un sistema \Rightarrow Potencia constante pero temperatura subiendo.
- ◆ Funcionamiento con cargas pulsantes \Rightarrow Potencia variable, pero la temperatura puede considerarse constante (o no).

La temperatura que alcanza un material al que se aplica una cantidad de calor depende de su **calor específico** definido como:

La energía requerida para elevar la temperatura de un material un grado centígrado una unidad de masa de dicho material

La masa del material hace de “almacenamiento” de energía, modificando la temperatura con una determinada dinámica.

En la analogía con los circuitos eléctricos el producto **masa x calor específico** sería la capacidad de un condensador, ya que:

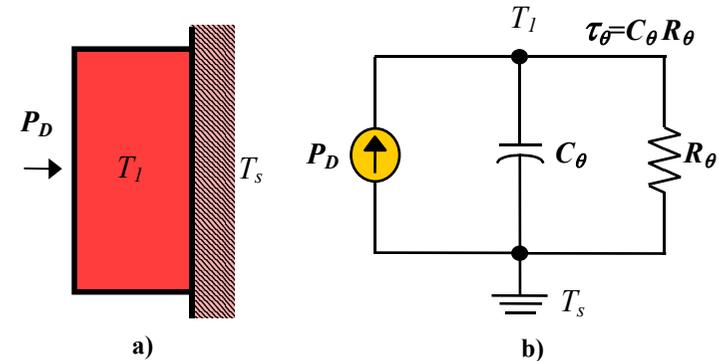
$$\Delta T = (M \cdot C_e) \Delta Q = C_\theta \Delta Q$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = C_\theta \frac{\partial Q}{\partial t} = C_\theta P_D \Leftrightarrow \frac{\partial V}{\partial t} = C \cdot I_C$$

donde:

- C_e es el calor específico del material ($W \text{ } ^\circ C^{-1} \text{ Kg}^{-1}$)
- M es la masa del material (Kg)
- C_θ es la capacidad térmica equivalente ($W \text{ } ^\circ C^{-1}$)

TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN. Modelo Térmico Dinámico



- a) Sistema Térmico Simple Consistente en una Masa a Temperatura inicial T_S a la cual se le suministra un escalón de potencia P_D , estando en contacto con un Disipador a Temperatura T_S . La temperatura final alcanzada es T_1 .
- b) Modelo equivalente eléctrico utilizado para modelar comportamientos transitorios de un sistema térmico.

La evolución en el tiempo de la temperatura cuando se aplica un cambio brusco (escalón) de la potencia disipada será:

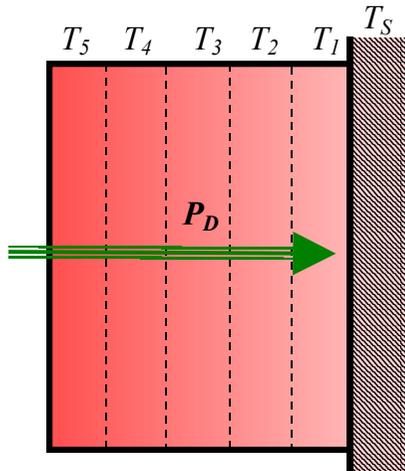
$$T_1(t) - T_S = P_D R_\theta (1 - e^{-t/\tau_\theta})$$

En régimen permanente coincide con lo estudiado anteriormente para el caso estático:

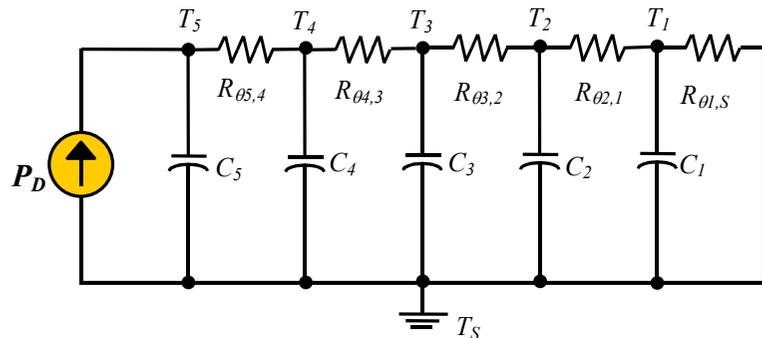
$$T_1(t = \infty) - T_S = P_D R_\theta$$

**TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.
Modelo Térmico Dinámico.**

Para una masa de cierto tamaño se tendrá una distribución continua de temperaturas. Para calcular la evolución de la temperatura se aproxima el material en varios trozos en los que se supone que la temperatura es constante:



a) Sistema térmico aproximado por cinco trozos.

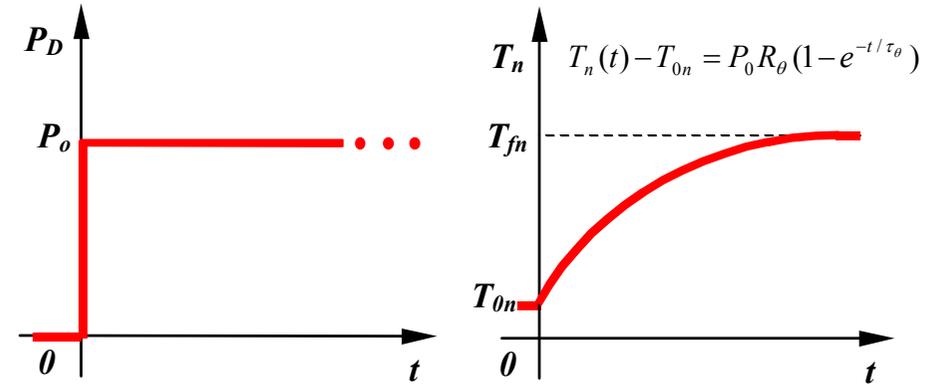


b) Modelo Eléctrico Equivalente

La temperatura final en un nodo debe coincidir con la obtenida con el modelo estático

**TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.
Modelo Térmico Dinámico.**

Respuesta de la Temperatura de un material ante un escalón de potencia:



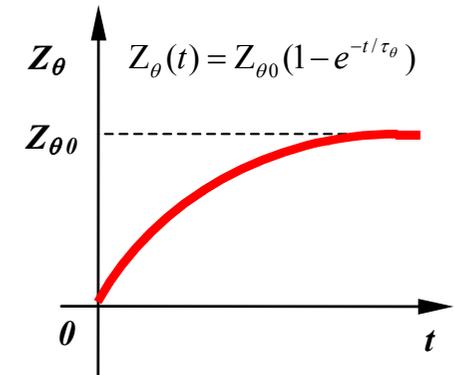
a) Escalón de Potencia

b) Evolución de la Temperatura en el trozo n

Respuesta Transitoria de la Temperatura en el Nodo n Frente a un Cambio en escalón en la Potencia Disipada.

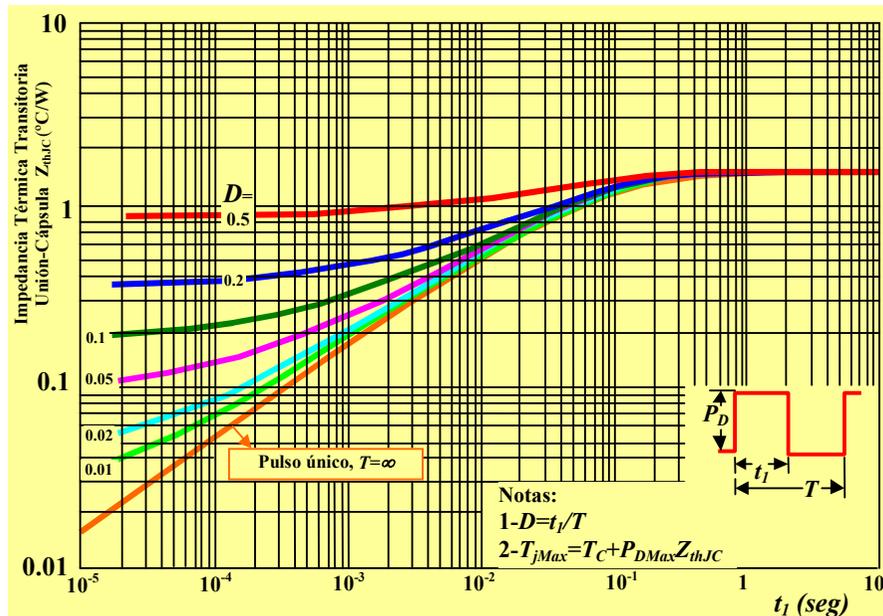
Definimos la impedancia transitoria como:

$$Z_{\theta}(t) = \frac{T(t) - T_{n0}}{P_0} = \frac{\Delta T(t)}{P_0}$$



Cálculo de la Temperatura de la Unión en Situaciones Transitorias

Los fabricantes suelen dar curvas en las que se representa la impedancia térmica transitoria para un dispositivo al que se aplica una potencia disipada tipo escalón o ondas cuadradas periódicas, por ejemplo:

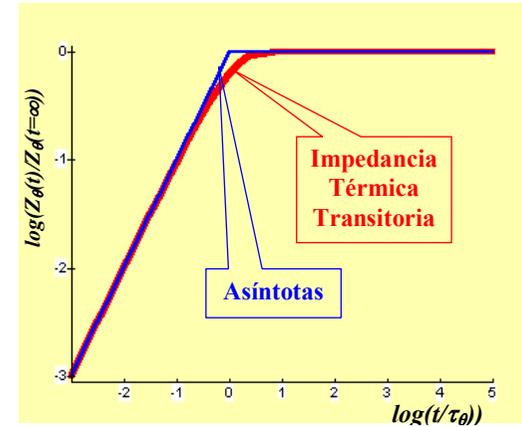


Curvas de la **Impedancia Térmica Transitoria** del transistor **MOSFET IRF 330** donde la Impedancia Térmica Transitoria está parametrizada en función del ciclo de trabajo del **MOSFET**

Puede observarse que para valores altos de D y bajos de t_l (=altas frecuencias), las curvas se vuelven horizontales, es decir, la inercia térmica hace que la temperatura de la unión no varíe y por tanto estas curvas no sirven. En general, para frecuencias mayores de 3kHz es suficiente trabajar con la característica estática.

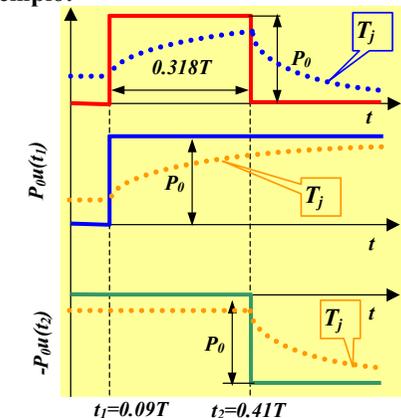
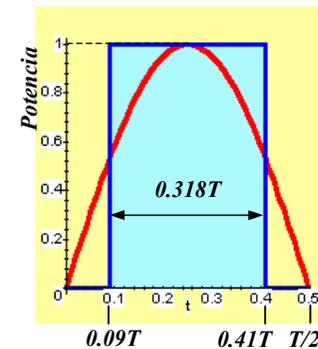
Cálculo de la Temperatura de la Unión en Situaciones Transitorias

En otros casos, los fabricantes dan únicamente una curva que representa la impedancia térmica transitoria para una potencia disipada tipo escalón:



Impedancia Térmica Transitoria de un Dispositivo (incluyendo la curva asintótica).

Para formas de ondas diferentes de escalones y ondas cuadradas, se puede aproximar por ondas de duraciones comparables que inyecten la misma energía (área) que la onda cuadrada, así por ejemplo:



Se hace equivalente un arco de senoide a una onda cuadrada de la misma amplitud y duración $0.318T$

El pulso se descompone en dos escalones:

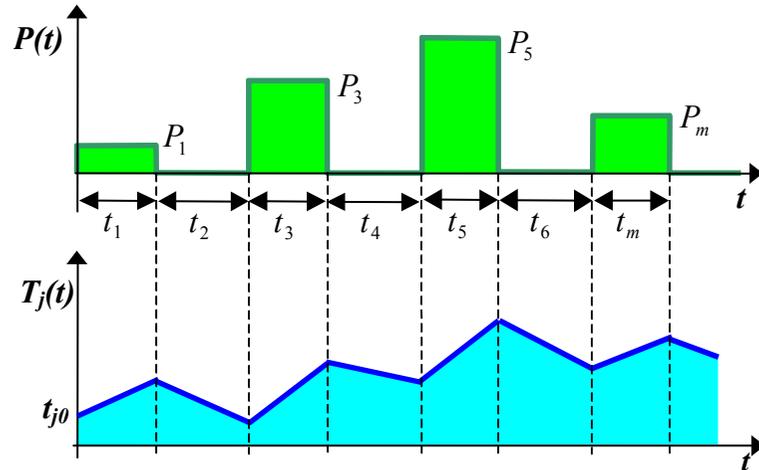
$$P(t) = P_0u(t_1) - P_0u(t_2) = P_0(u(t_1) - u(t_2))$$

y la temperatura puede calcularse de:

$$T_j(t) = T_{j0} + P_0(Z_\theta(t_1) - Z_\theta(t_2))$$

Cálculo de la Temperatura de la Unión en Situaciones Transitorias

Para otros tipos de pulsos se puede generalizar:



Temperatura de la Unión con Pulsos de Potencia Rectangulares

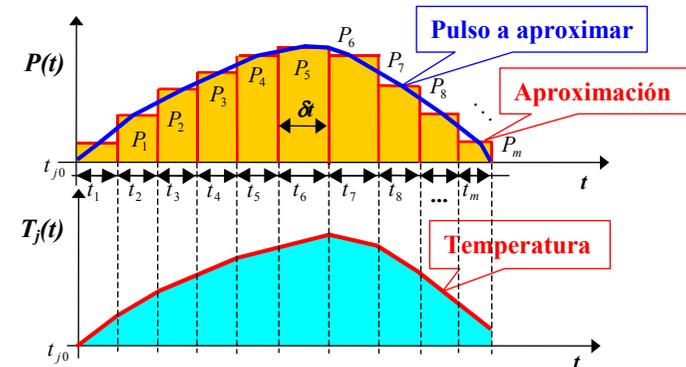
Llamando $Z_n = Z(t = t_n)$ y teniendo en cuenta que $P_2 = P_4 = P_6 = \dots = 0$, se puede escribir que la temperatura después del pulso m es:

$$T_j(t) = T_{j0} + P_1(Z_1 - Z_2) + P_3(Z_3 - Z_4) + P_5(Z_5 - Z_6) + \dots =$$

$$= T_{j0} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^m P_n (Z_n - Z_{n+1})$$

Cálculo de la Temperatura de la Unión en Situaciones Transitorias

Para otras formas de ondas, se puede hacer la siguiente aproximación:

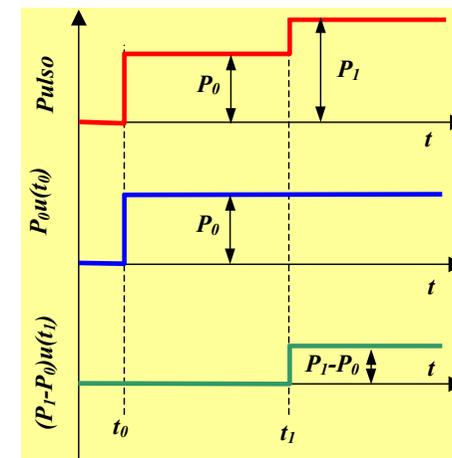


Aproximación de un Pulso de Potencia mediante Pulsos Rectangulares

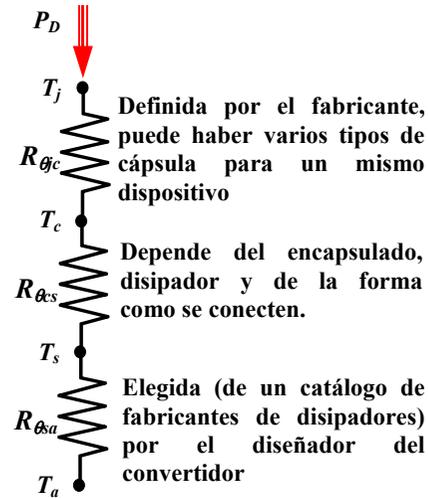
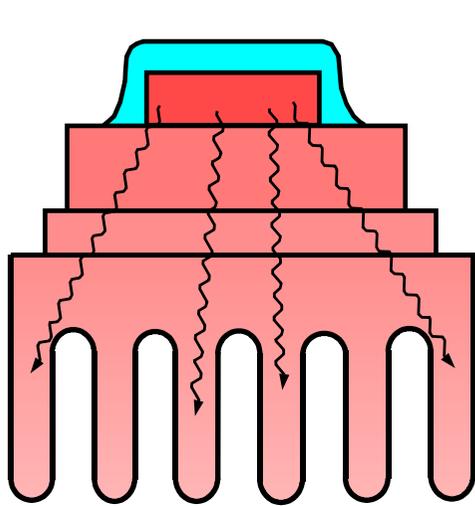
$$T_j(t) = T_{j0} + Z_1 P_1 + Z_2 (P_2 - P_1) + Z_3 (P_3 - P_2) + \dots =$$

$$= T_{j0} + \sum_{n=1,2,\dots}^m Z_n (P_n - P_{n-1})$$

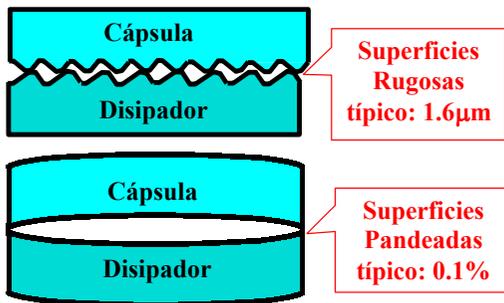
ya que la secuencia de pulsos P_i se puede descomponer en una secuencia de pulsos de tipo escalón:



DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS. Radiadores



La resistencia $R_{\theta cs}$ depende mucho de la forma como se conecten la cápsula y el disipador, le afecta especialmente el acabado superficial de ambos:

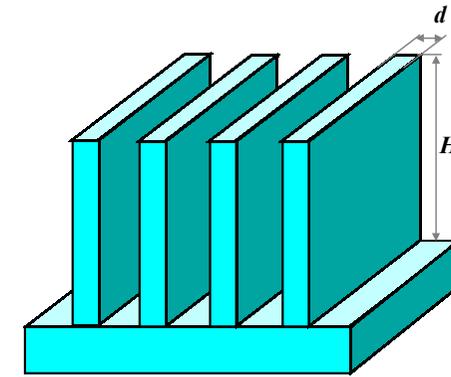


Uso de materiales intermedios "blandos" que llenen los huecos, por ejemplo:

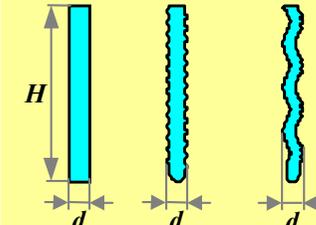
- Mica
- Grasa de Silicona

Uso de tornillos que acerquen las superficies por presión

DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS. Convección Forzada



Tipos de Superficies (secciones):
 Recta Serrada Corrugada

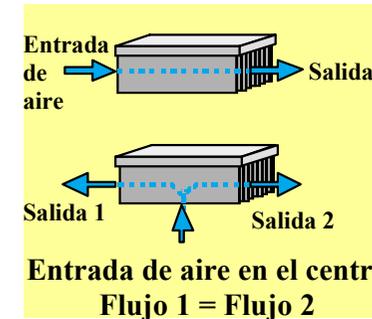


100% 102% 107%
 Áreas relativas para tamaños iguales

Las secciones de tipo **corrugadas** se usan en aplicaciones de convección natural porque son más delgadas y permiten una separación mayor entre láminas.

Las secciones de tipo **serradas** se usan en aplicaciones de convección forzada, ya que aumentan la turbulencia del flujo y por tanto el flujo de calor entre el disipador y el fluido.

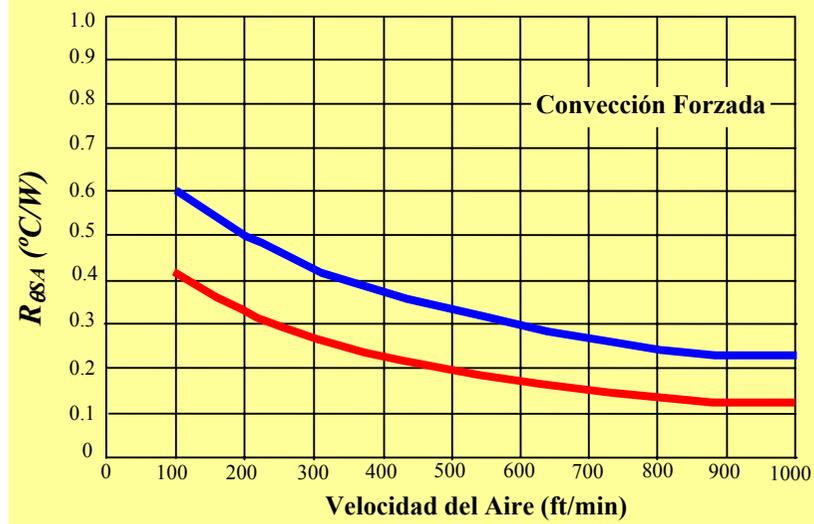
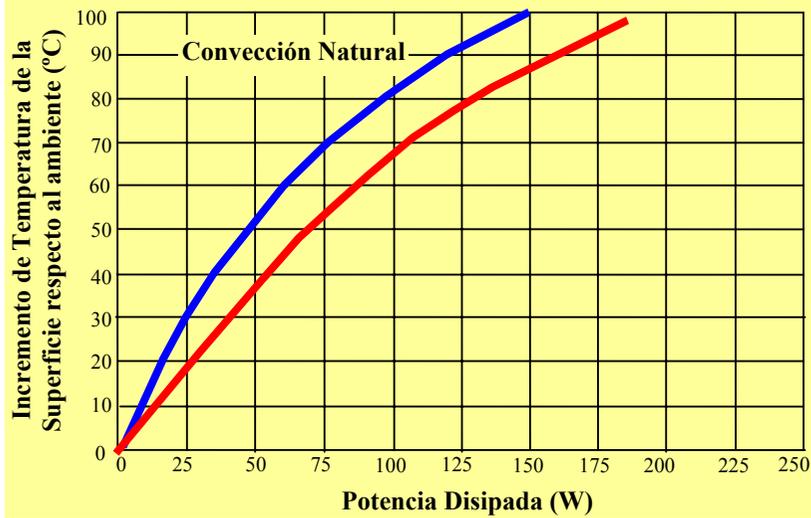
Las secciones **rectas** no se recomiendan en aplicaciones de gran potencia debido a su menor capacidad de transferencia de calor.



En el segundo caso, al ser la superficie atravesada por el flujo de aire el doble, las pérdidas de presión son la mitad y por tanto se necesita un esfuerzo menor (ventilador de menos potencia) para conseguir el mismo flujo. O bien con el mismo ventilador se puede conseguir una velocidad del aire mayor, bajando la resistencia térmica equivalente.

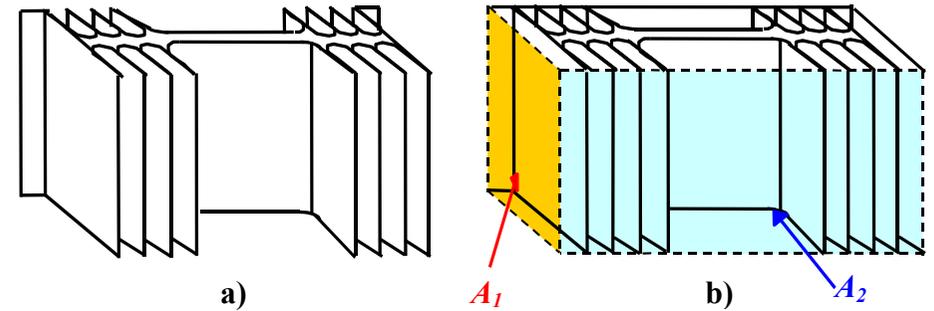
DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS.
Convección Forzada

Curvas dadas por un fabricante:



Características de la Resistencia Térmica de dos disipadores comerciales (azul y rojo) con convección natural y forzada.

DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS. Cálculo de la Resistencia Térmica



(a) Ejemplo de Disipador. b) Definición de las Áreas Usadas para Calcular la Resistencia Térmica en el Disipador de la Figura por Convección y Radiación.

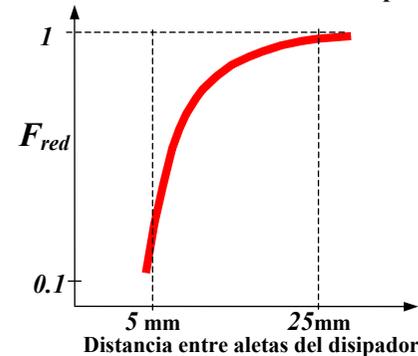
$$A_{con} = 2 A_2 + n A_1$$

donde:

- A_1 es la superficie frontal del disipador.
- A_2 es la superficie lateral del disipador.
- n es el número de superficies laterales generadas por las aletas que componen el disipador. En el caso del disipador de la figura $n=16$.

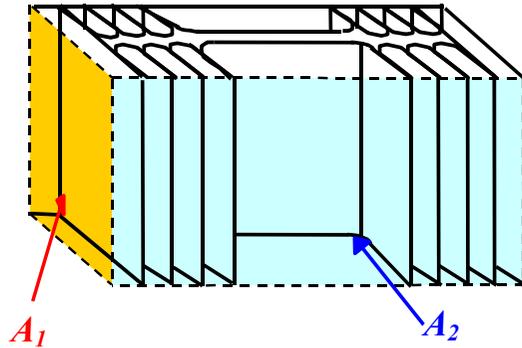
$$R_{\theta ka, conv} = \frac{1}{1.34 A_{con} F_{red} \Delta T^{1/4}}$$

donde d es el lado vertical de las superficies A_1 o A_2 .



F_{red} en Función de la Distancia en mm entre Aletas del Disipador, para Distancias Menores que 25 mm

DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS. Cálculo de la Resistencia Térmica



Para calcular la resistencia térmica debida a la radiación:

$$A_{rad} = 2 A_1 + 2 A_2$$

donde:

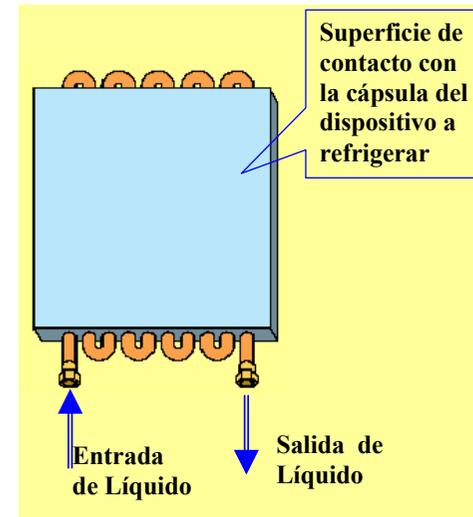
- A_1 es la superficie frontal del disipador.
- A_2 es la superficie lateral del disipador.

$$R_{\theta_{sa,rad}} = \frac{\Delta T}{5.7 \times 10^{-8} E A_{rad} (T_s^4 - T_a^s)}$$

La **Resistencia Térmica del Disipador** será la resistencia equivalente a conectar en paralelo las dos resistencias térmicas calculadas anteriormente:

$$R_{\theta_{sa}} = \frac{R_{\theta_{sa,rad}} R_{\theta_{sa,con}}}{R_{\theta_{sa,rad}} + R_{\theta_{sa,con}}}$$

DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS. Refrigeradores por líquidos

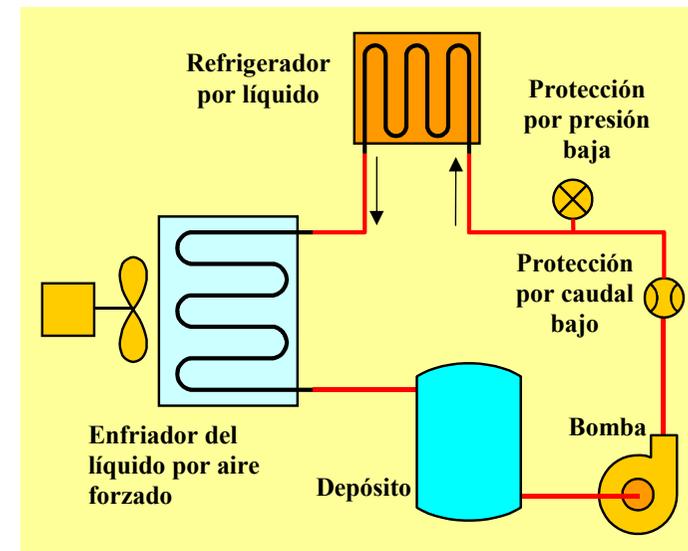


Mediante estos dispositivos, se puede evacuar una gran cantidad de calor con un tamaño de disipador mucho más reducido si se compara con los refrigeradores por aire.

Normalmente se empleará un circuito cerrado, y se forzará mediante una bomba la circulación del líquido.

Suele utilizarse como líquido refrigerante agua (a veces con aditivos).

El circuito completo será:



DISIPADORES. ASPECTOS PRACTICOS.
Refrigeradores por líquidos

Como se vio al estudiar el mecanismo de convección, si se utiliza un sistema que incluya un líquido que se evapora y condensa, el coeficiente h que define la cantidad de calor que se evacua por convección, alcanza un valor muy alto.

