

El problema del calor.

Todo componente electrónico real tiene pérdidas durante su operación, lo que significa en primera aproximación que, inevitablemente, parte de la energía eléctrica que circula por el componente se convierte en energía térmica.

Esta energía térmica tiende a aumentar la temperatura del componente, por lo que debe ser extraída antes de que la temperatura alcance un valor que pueda causar daños; muchos componentes electrónicos pasivos no superan los 60°C, no todos los dispositivos electrónicos de control de potencia pueden operar a 120°C, y muy pocos pueden llegar a 150°C o más.

Es por lo tanto necesario poder calcular, aunque solo de manera aproximada, la cantidad de calor que se está generando en cada componente, y disponer de medios para disipar la energía térmica antes de que su acumulación pueda causar sobre calentamiento dañino.

I.-Conceptos básicos de transferencia de calor.

La energía térmica se transmite de un cuerpo caliente a otro frío a través de tres mecanismos distintos:

1.- Conducción.

2.-Convección.

3.-Radiación.

1.-Conducción: El medio a través del cual se transmite el calor está estacionario, el calor se transmite por vibración atómica o molecular.

2.-Convección: El calor se transmite mediante el movimiento de un fluido (gas o líquido) que está en contacto con el cuerpo caliente, toma calor de este y luego se desplaza.

El desplazamiento (flujo) del fluido puede ser:

a.-Natural. El fluido se dilata al calentarse, se hace menos denso y es desplazado por las fuerzas gravitacionales causadas por el gradiente de densidades entre el fluido caliente y el frío.

b.-Forzado: El fluido es movido por un mecanismo externo, tipo ventilador (gas) o bomba (líquido).

3.-Radiación: Parte de la energía térmica se convierte en electromagnética y es emitida al medio circundante en forma de fotones infra-rojos. Dadas las temperaturas a las cuales trabajan los equipos electrónicos que se pretende enfriar el método de radiación es poco útil, salvo en aplicaciones espaciales.

En general en un dispositivo electrónico el calor se genera dentro de un sólido, por lo que por lo menos la primera etapa del enfriamiento debe producirse básicamente por conducción.

II.-MODELAJE ELÉCTRICO DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN.

La cantidad de energía térmica, Q_{1-2} , que se transmite por unidad de tiempo de un punto a temperatura T_1 a otro a temperatura T_2 ($T_1 > T_2$) es linealmente proporcional a la diferencia de temperatura $T_1 - T_2$, e inversamente proporcional a un parámetro físico, la resistencia térmica, R_q , que depende de la naturaleza del material donde se realiza la transferencia de calor.

$$Q_{1-2} = \frac{T_1 - T_2}{R_\theta} = \frac{\Delta T_{1-2}}{R_\theta}$$

La energía térmica se mide en vatios (W), las temperaturas en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) o Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) y la resistencia térmica en $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ o $^{\circ}\text{K}/\text{W}$ (la resistencia térmica también se designa como R_{Th} , ambas notaciones son perfectamente intercambiables)

Para propósitos del modelo eléctrico del proceso térmico, esta ecuación es equivalente a la Ley de Ohm, así que el modelo se puede establecer aceptando las siguientes analogías:

1.- Diferencia de potencial térmico, análoga a la diferencia de potencial eléctrico.

$$\Delta T_{1-2} \Leftrightarrow \Delta V_{1-2}$$

La diferencia de temperatura entre dos puntos en un circuito térmico (potencial térmico) es el equivalente a la diferencia de tensión eléctrica entre dos puntos en un circuito eléctrico (potencial eléctrico):

2.-Flujo de energía térmica, análogo con el flujo de la corriente eléctrica

$$Q_{1-2} \Leftrightarrow i$$

El flujo de calor del punto caliente al punto frío es equivalente a la corriente que circula del punto de mayor tensión al de menor tensión.

3.-Resistencia térmica, análoga a la resistencia eléctrica.

$$R_{\theta} \Leftrightarrow R$$

La resistencia térmica al flujo de energía térmica es equivalente funcional a la resistencia eléctrica al flujo de la corriente.

El análogo a la resistividad eléctrica, ρ , medida en $\Omega\text{-cm}$ es la resistividad térmica, ρ_{θ} , medida en $^{\circ}\text{C-cm/W}$ ó $^{\circ}\text{K-cm/W}$.

Conocida ρ_{θ} , la longitud del camino recorrido por la energía térmica, l , y la sección transversal del mismo, A , la resistencia térmica del cuerpo, R_{θ} , resulta:

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

Resistividades térmicas de materiales comúnmente considerados en los modelos térmicos de equipos electrónicos.

Material	Resistividad (°C-cm/W)
Aire quieto	3050
Mylar	635
Grasa de silicona	520
Mica	150
Grasa térmica	130
Alúmina Al_2O_3	6
Silicio (Si)	1,2
Óxido de Berilio (BeO)	1
Nitruro de aluminio (AlN)	0,64
Aluminio (Al)	0,48
Cobre (Cu)	0,25

4.-Capacidad térmica, análoga de la capacidad eléctrica.

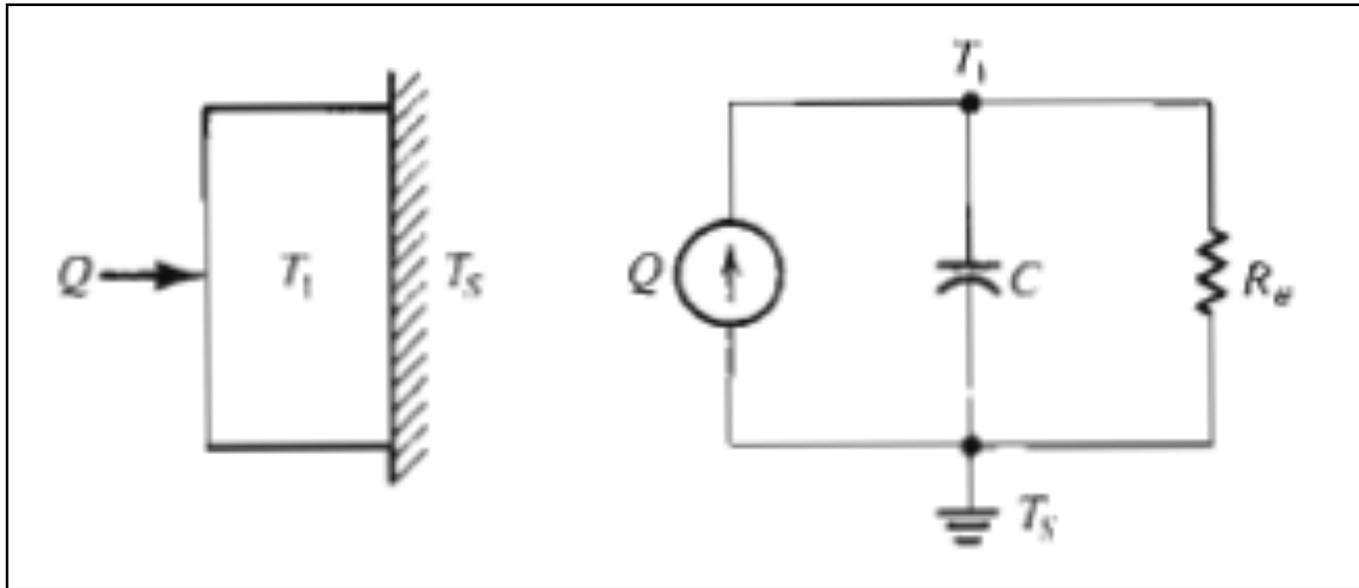
Para que la temperatura de un cuerpo de masa determinada aumente del valor inicial T_i al valor final T_f es preciso que este cuerpo reciba una cierta cantidad Q de energía térmica, cantidad de energía que deberá ser retirada del cuerpo para que este regrese a la temperatura inicial.

Trabajando en el sistema Si de unidades la capacidad térmica de un material es la energía (en Joules) que se requiere para aumentar en 1°K la temperatura de un kilogramo del material.

La capacidad térmica por lo tanto se mide en $\text{J}/^\circ\text{K}\text{-kg}$ (o $\text{J}/^\circ\text{C}\text{-kg}$).

Las masas de los cuerpos a través de los cuales circula la energía térmica actúan como almacenes inerciales de energía térmica, de forma análoga a la de los condensadores en los circuitos eléctricos, lo que trae como consecuencia que el modelo eléctrico dinámico de cualquier cuerpo esté formado por el arreglo paralelo de su resistencia térmica, R_{θ} , con su capacidad térmica, C_{θ} , lo que forma la impedancia térmica del cuerpo, Z_{θ} .

La impedancia térmica debe ser considerada cuando se trate de resolver un problema térmico en el cual la energía a disipar no es constante en el tiempo.



Sistema térmico básico (izquierda); modelo térmico equivalente (derecha).

Q : cantidad de calor a disipar

T_1 : temperatura del extremo caliente del cuerpo.

T_2 : temperatura de referencia (temperatura ambiente).

R_θ : resistencia térmica del cuerpo.

C : capacidad térmica del cuerpo.

5.-Para completar el modelo térmico estacionario, asumiendo que toda la energía térmica fluye por conducción a través de R_{θ} , se cumple que la potencia disipada por el flujo de calor, P_{dis} , es igual a Q_{1-2} , por lo que también se cumple:

$$P_{dis} = Q_{1-2} = i$$

III.-FLUJO TÉRMICO.

La energía térmica tiende a buscar equilibrio térmico, fluyendo desde la región donde se genera (el punto caliente) hacia regiones de menor temperatura. En este movimiento se pueden considerar dos tipos de flujo:

1.-Flujo térmico en paralelo.

Si existen n caminos alternativos a través de los cuales la energía térmica puede pasar simultáneamente del punto caliente al frío, cada uno caracterizado por una resistencia térmica $R_{\theta i}$, todos los caminos serán utilizados proporcionalmente en función de las respectivas resistencias térmica.

El proceso se puede modelar en base a una resistencia térmica, $R_{\theta p}$, equivalente a la conexión en paralelo de las n resistencias térmicas individuales:

$$\frac{1}{R_{\theta p}} = \sum_{1}^n \frac{1}{R_{\theta i}}$$

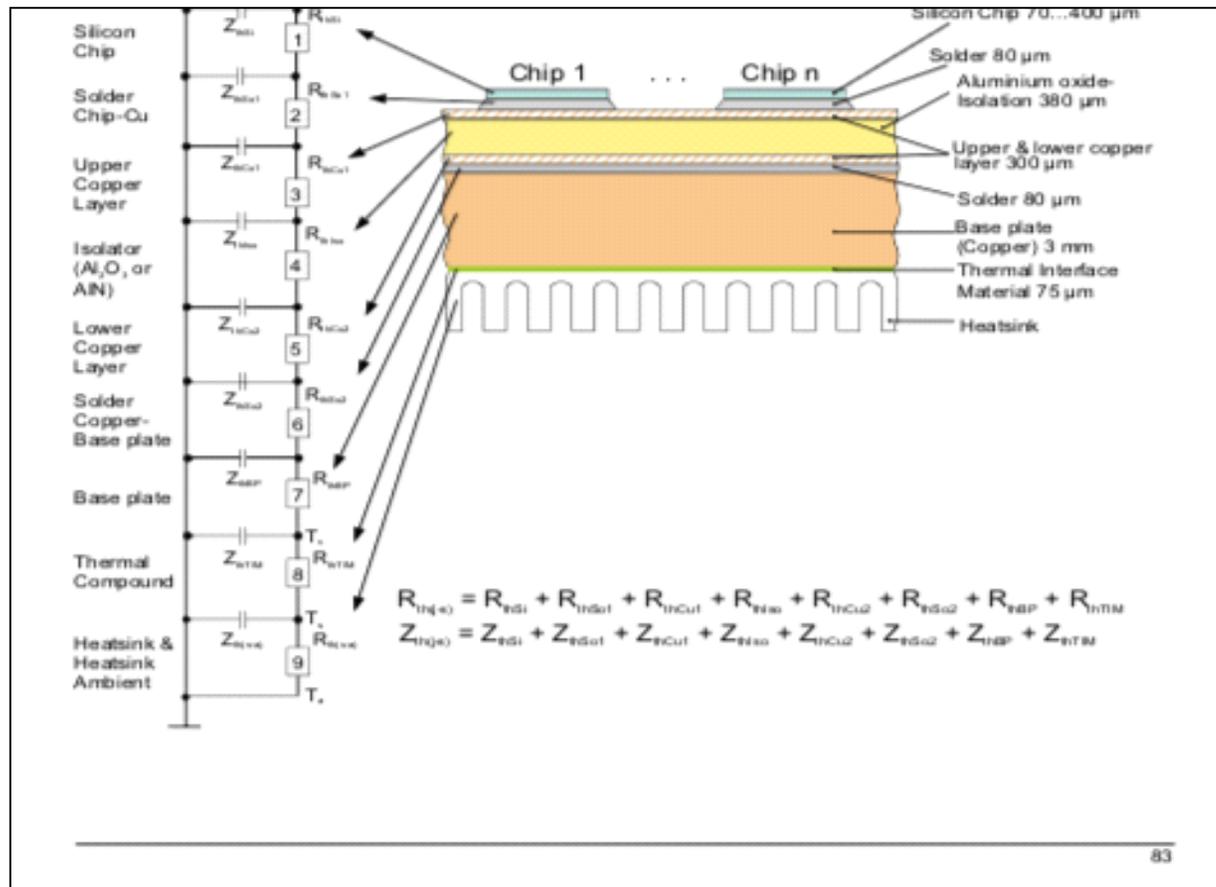
2.-Flujo térmico en serie.

Si para pasar del punto caliente al punto frío el flujo de calor debe atravesar en secuencia n cuerpos, cada uno caracterizado por una resistencia térmica $R_{\theta i}$, el proceso se puede modelar en base a una resistencia térmica, $R_{\theta s}$, equivalente a la conexión en serie de las n resistencias térmicas individuales:

$$R_{\theta s} = \sum_{1}^n R_{\theta i}$$

3.- Desarrollo del modelo térmico básico unidimensional de un dispositivo electrónico de control de potencia.

Un dispositivo electrónico de control de potencia es un componente bastante complejo desde el punto de vista de su modelo térmico exacto, dado que está formado por varias piezas que tienen características térmicas significativamente distintas, que ofrecen además diversos caminos térmicos entre el material semiconductor que es la parte activa del componente, en la cual se genera la energía térmica a disipar y el medio ambiente.

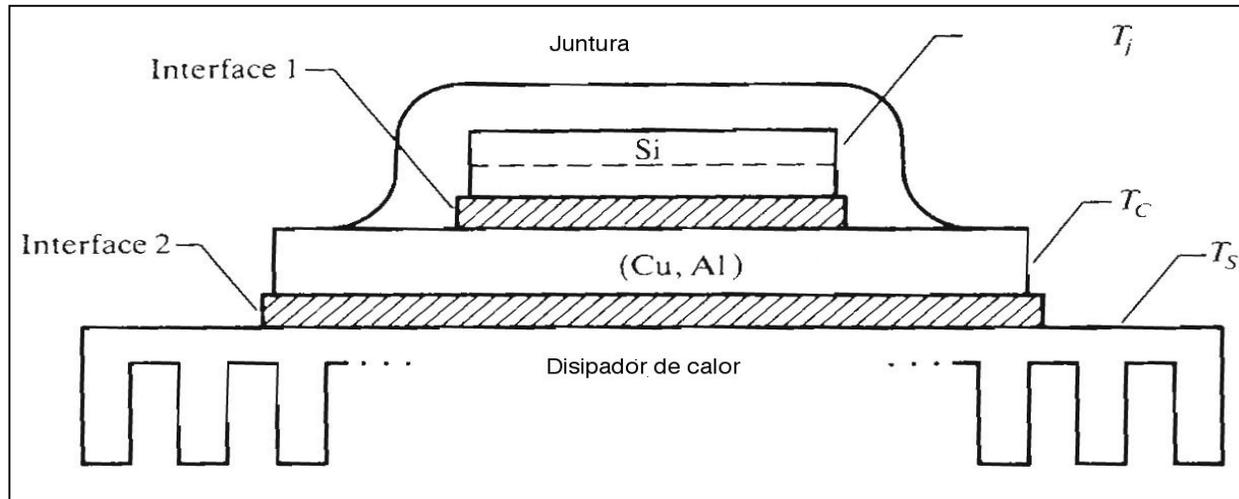


Modelo unidimensional completo del sistema térmico junta-ambiente en un módulo con n chips.

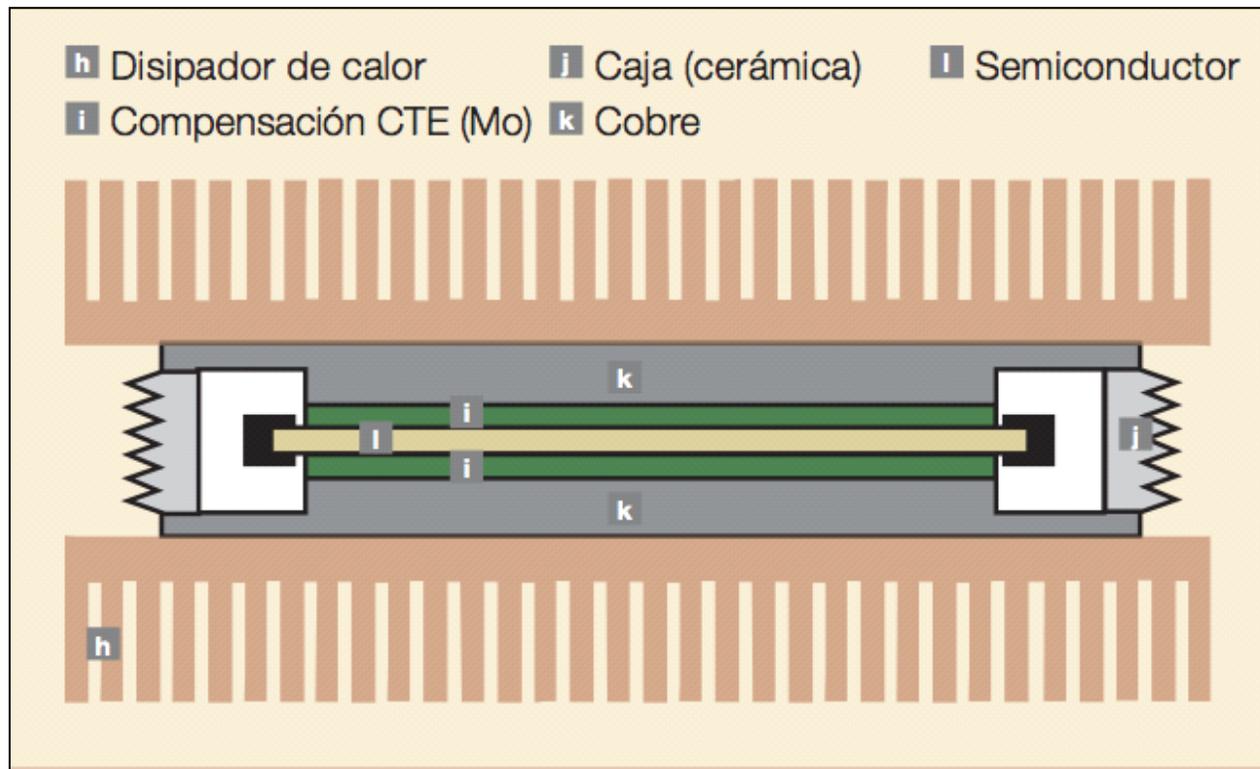
IV.-MODELO TÉRMICO UNIDIMENSIONAL SIMPLIFICADO.

El modelo térmico exacto es en general complejo, y la información necesaria para implementarlo no suele estar disponible; sin embargo esto no es un problema insuperable, ya que se pueden realizar cálculos aproximados razonablemente exactos usando el modelo aproximado para el cual los datos necesarios si se encuentran en las hojas de características de los distintos componentes.

En gran parte eso es posible porque los parámetros fundamentales del modelo térmico dependen principalmente del tipo de encapsulado empleado en el componente, y no del elemento semiconductor específico contenido en el encapsulado, el cual básicamente define el valor de la potencia a disipar y la temperatura máxima que no debe superarse.



Corte esquemático del arreglo térmico a considerar en el desarrollo del modelo térmico de un dispositivo electrónico de control de potencia baja/media presentado en un encapsulado con disipación de calor en una sola cara.

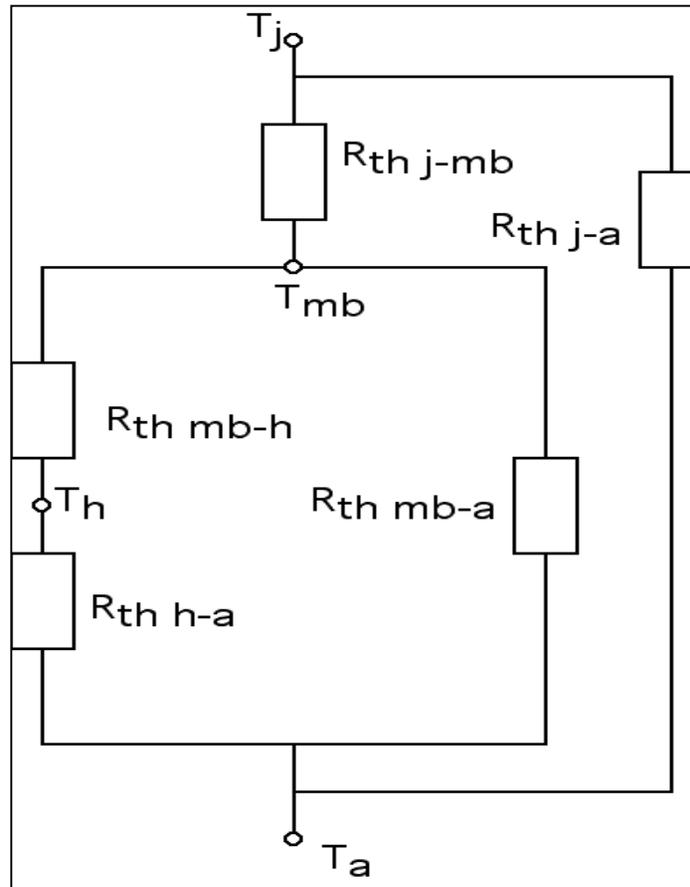


Corte esquemático del arreglo térmico a considerar en el desarrollo del modelo térmico de un dispositivo electrónico de control de alta potencia presentado en un encapsulado tipo "hockey puck", con disipación de calor en ambas caras.

El modelo considera que toda la energía térmica se genera en un solo punto, y modela cada uno de los caminos que existen entre esa fuente puntual y el medio ambiente como una conexión serie de resistencias o impedancias térmicas, según se desee un análisis del problema térmico en estado estacionario o en estado transitorio.

En general, dado el tamaño de los dispositivos electrónicos de control de potencia, es razonable asumir por hipótesis que será necesario incluir un disipador de calor para aumentar el área de intercambio de calor entre la juntura y el medio ambiente, aumentando así la disipación para mantener la temperatura de juntura a una temperatura inferior a la máxima en todo el régimen de operación del dispositivo considerado.

A pesar de las diferencias evidentes entre ambos tipos, el modelo térmico básico es el mismo:



Modelo térmico simplificado unidimensional resistivo DC equivalente del arreglo junta-dispositivo-disipador-medio ambiente.

$R_{th\ j-a}$ = Resistencia térmica junta-ambiente.

$R_{th\ j-mb}$ = Resistencia térmica junta-carcasa.

$R_{th\ mb-h}$ = Resistencia térmica de contacto carcasa-disipador.

$R_{th\ mb-a}$ = Resistencia térmica carcasa-ambiente.

$R_{th\ h-a}$ = Resistencia térmica disipador-ambiente.

T_j = Temperatura de junta.

T_{mb} = Temperatura de la carcasa (externa).

T_h = Temperatura del disipador de calor (cara de contacto con el dispositivo).

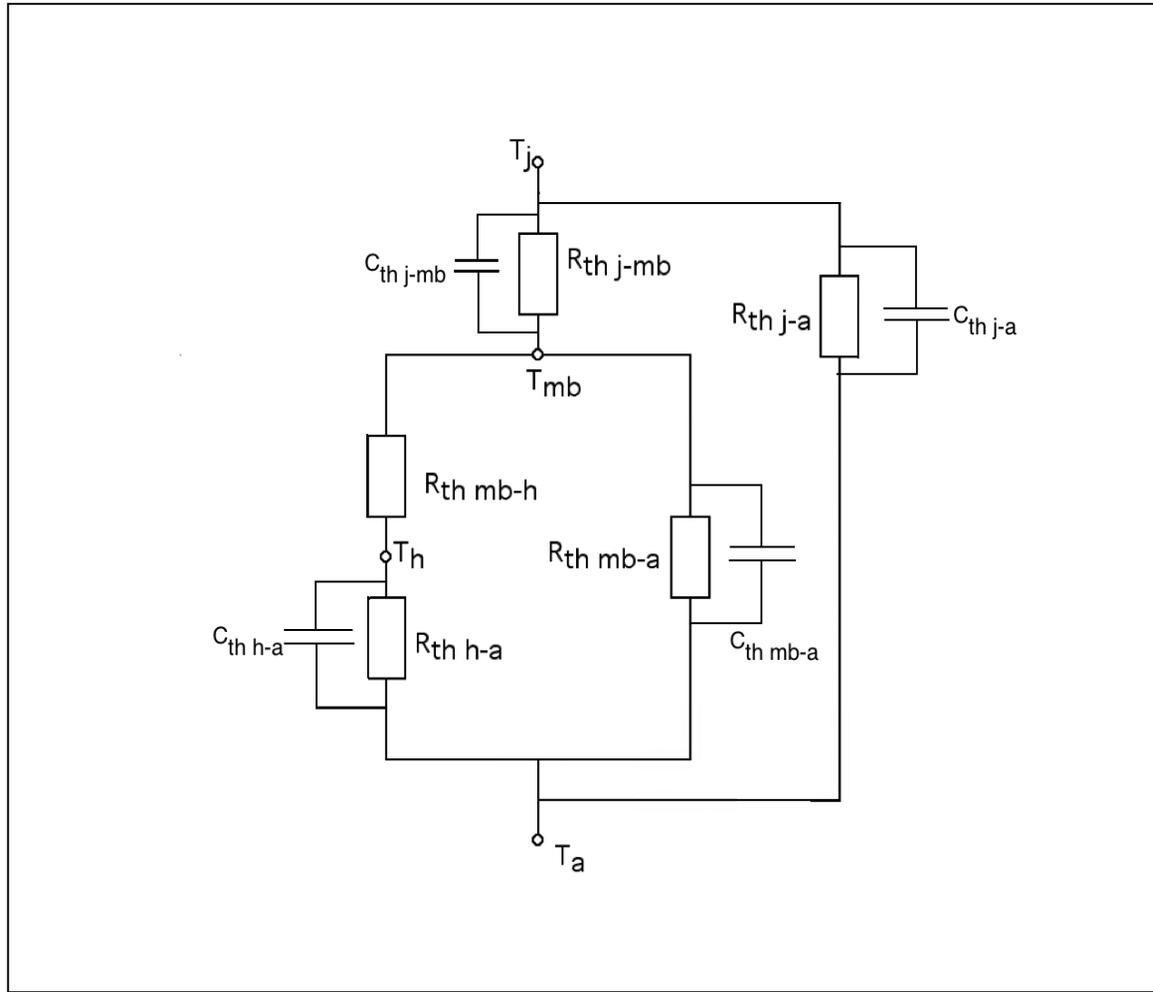
T_a = Temperatura ambiente de referencia (en las cercanías del disipador).

El modelo básico sirve tanto para los dispositivos con disipación de calor en una cara como para los que disipan en las dos caras, en cuyo caso las resistencias $R_{th\ j-mb}$, $R_{th\ mb-h}$ y $R_{th\ h-a}$ se reducen a la mitad, para tomar en cuenta los dos caminos equivalentes en paralelo.

Si solo se quiere calcular la temperatura en estado estacionario DC, estos parámetros son suficientes en primera aproximación.

Si es necesario estudiar los cambios de temperatura en régimen pulsante o transitorio, hay que incluir además la capacidad térmica del material.

La interfaz de contacto entre la base de montaje y el disipador no tiene una capacidad térmica asociada.



Modelo térmico unidimensional con impedancias térmicas equivalente del arreglo juntura-dispositivo-disipador-medio ambiente.

$R_{th\ j-a}$ = Resistencia térmica junta-ambiente.

$C_{th\ j-a}$ = Capacidad térmica junta-ambiente.

$R_{th\ j-mb}$ = Resistencia térmica junta-carcasa.

$C_{th\ j-mb}$ = Capacidad térmica junta-carcasa.

$R_{th\ mb-h}$ = Resistencia térmica de contacto carcasa-disipador.

$R_{th\ mb-a}$ = Resistencia térmica carcasa-ambiente.

$C_{th\ mb-a}$ = Capacidad térmica carcasa-ambiente.

$R_{th\ h-a}$ = Resistencia térmica disipador-ambiente.

$C_{th\ h-a}$ = Capacidad térmica disipador-ambiente.

T_j = Temperatura de junta.

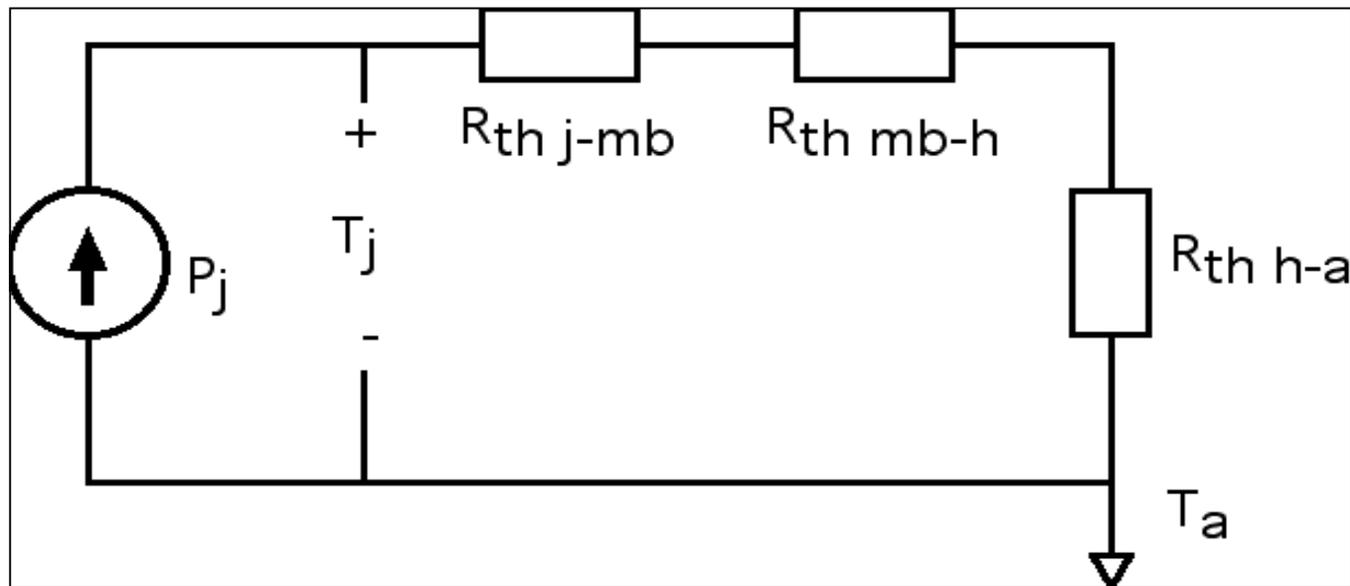
T_{mb} = Temperatura de la carcasa (externa).

T_h = Temperatura del disipador de calor (cara de contacto con el dispositivo).

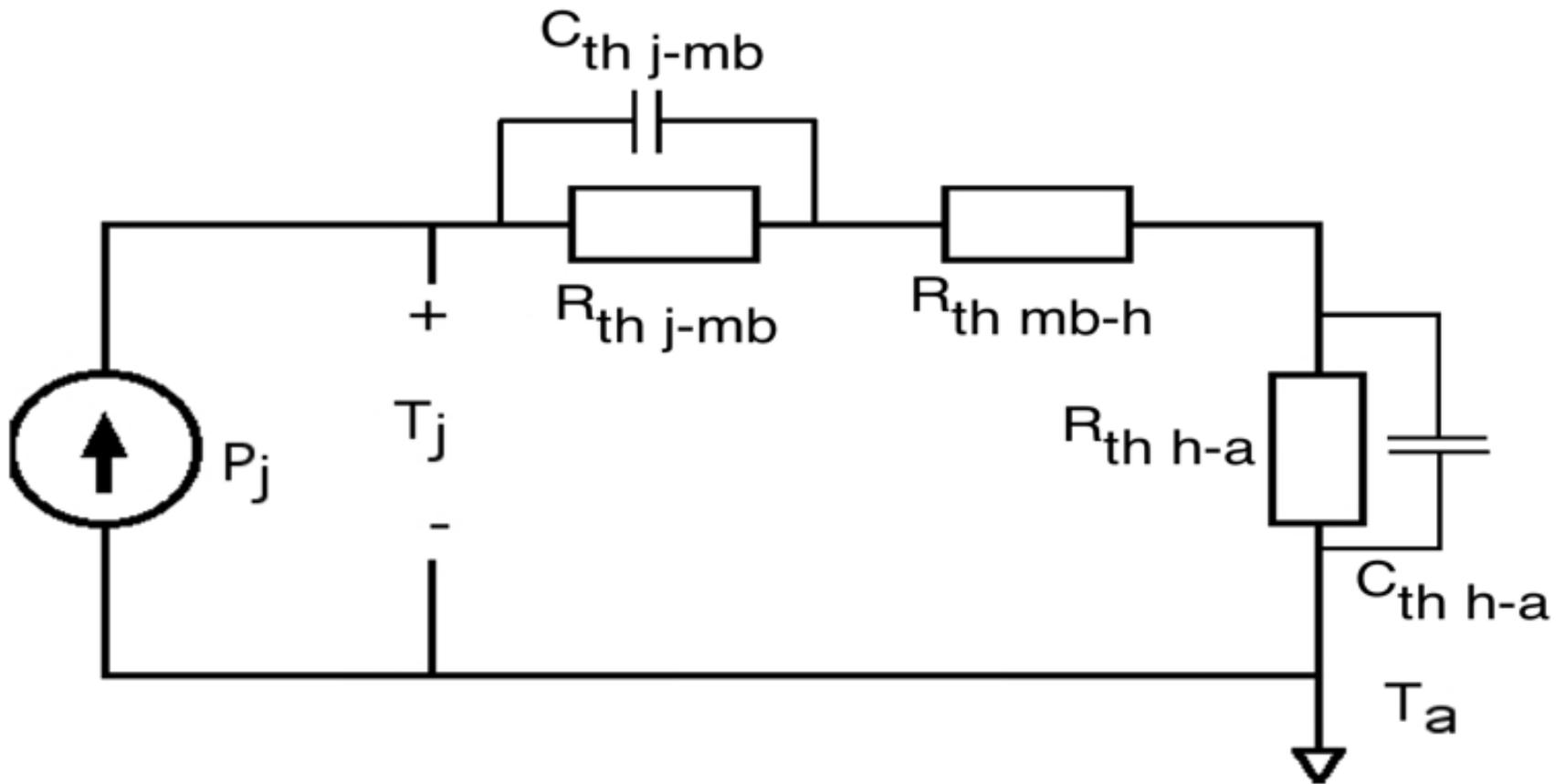
T_a = Temperatura ambiente de referencia (en las cercanías del disipador).

En general, dada la estructura de los componentes electrónicos, es razonable asumir que no puede haber transferencia directa significativa de energía térmica desde la juntura al medio ambiente (se asume $R_{th\ j-a}$ infinita) y también que, dado el tamaño de los componentes electrónicos, la resistencia térmica que se opone a la transferencia directa de calor desde la parte de la carcasa no conectada directamente al disipador de calor y el ambiente, $R_{th\ mb-a}$, será mucho mas alta que la resistencia térmica entre la carcasa y el disipador de calor, $R_{th\ mb-h}$, por lo que el modelo se simplifica adicionalmente despreciando el efecto de las resistencias térmicas $R_{th\ j-a}$ y $R_{th\ mb-a}$, que son significativamente mucho mas grandes que las resistencias térmicas conectadas en paralelo con estas.

Estas aproximaciones son en todo caso válidas ya que al ignorarse algunos caminos marginales, se trabaja en el “peor caso”, en el que se subestima la capacidad de enfriamiento, lo que lleva a calcular una temperatura de junta ligeramente superior a la real, dando un margen de seguridad adicional al diseño.



Modelo térmico unidimensional estacionario DC, simplificado para calcular la temperatura de junta en primera aproximación estacionaria.



Modelo térmico unidimensional con impedancias térmicas, simplificado para calcular la temperatura de junta en primera aproximación en régimen dinámico.

V.-EL PROBLEMA DE LAS INTERFACES.

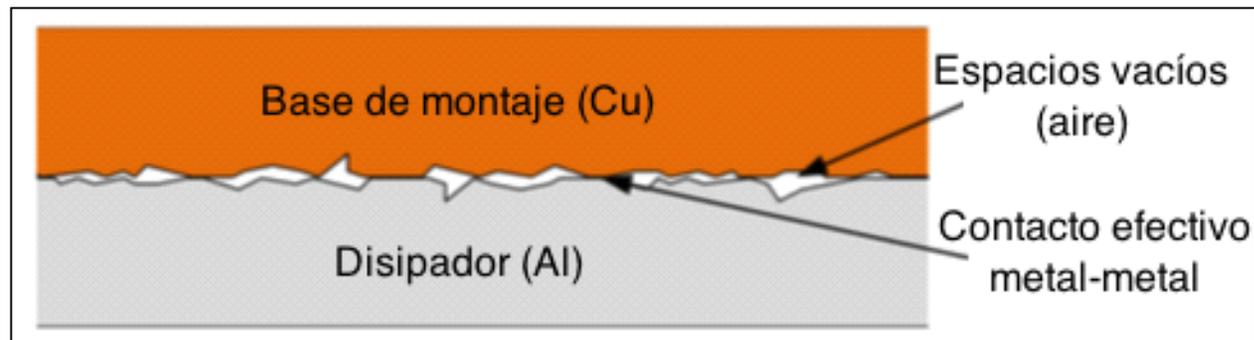
Si las caras de dos cuerpos que están en contacto fueran perfectamente lisas, sin ningún tipo de irregularidades y perfectamente paralelas, el contacto térmico entre ellas sería perfecto y la interfaz no tendría efecto en el cálculo de la resistencia térmica total.

En la práctica existen dos factores de error básicamente inevitables.

1.- Error de aplanado (run-out): es la máxima desviación respecto al plano ideal que una superficie plana presenta en una determinada distancia. Usualmente se expresa en cm/cm. Una extrusión de aluminio bien fabricada, del tipo usado en disipadores de calor tiene un "run-out" del orden de 0,008cm/cm.

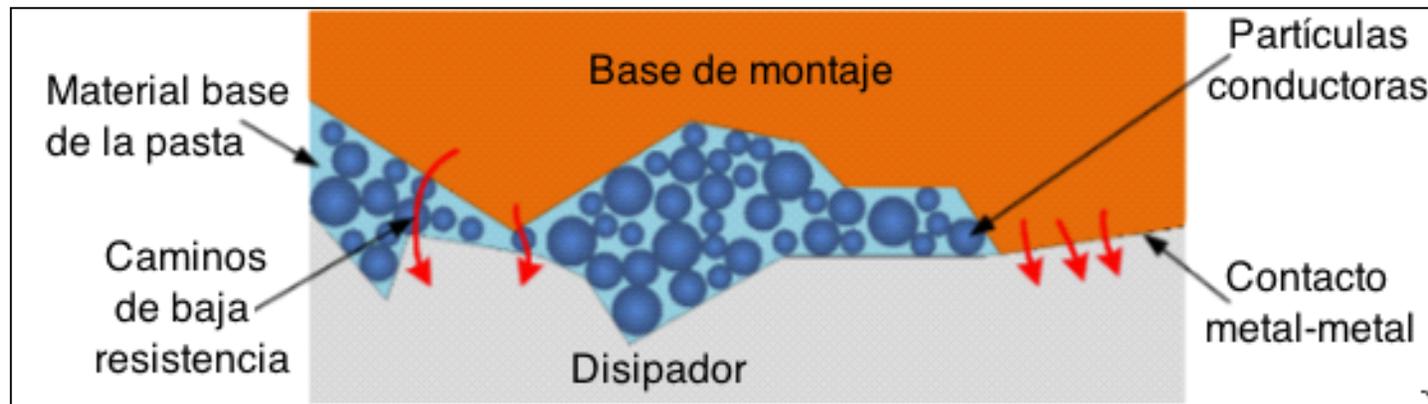
2.-Irregularidades superficiales, tales como rayas, pequeños huecos, protuberancias, incrustaciones, etc.

El efecto combinado de ambos factores es hacer que la superficie efectiva de contacto entre las dos superficies sea menor que la esperada, y que los huecos queden llenos de aire, totalmente inmóvil, que se comporta como un buen aislante térmico, introduciendo una resistencia térmica adicional de valor impredecible.

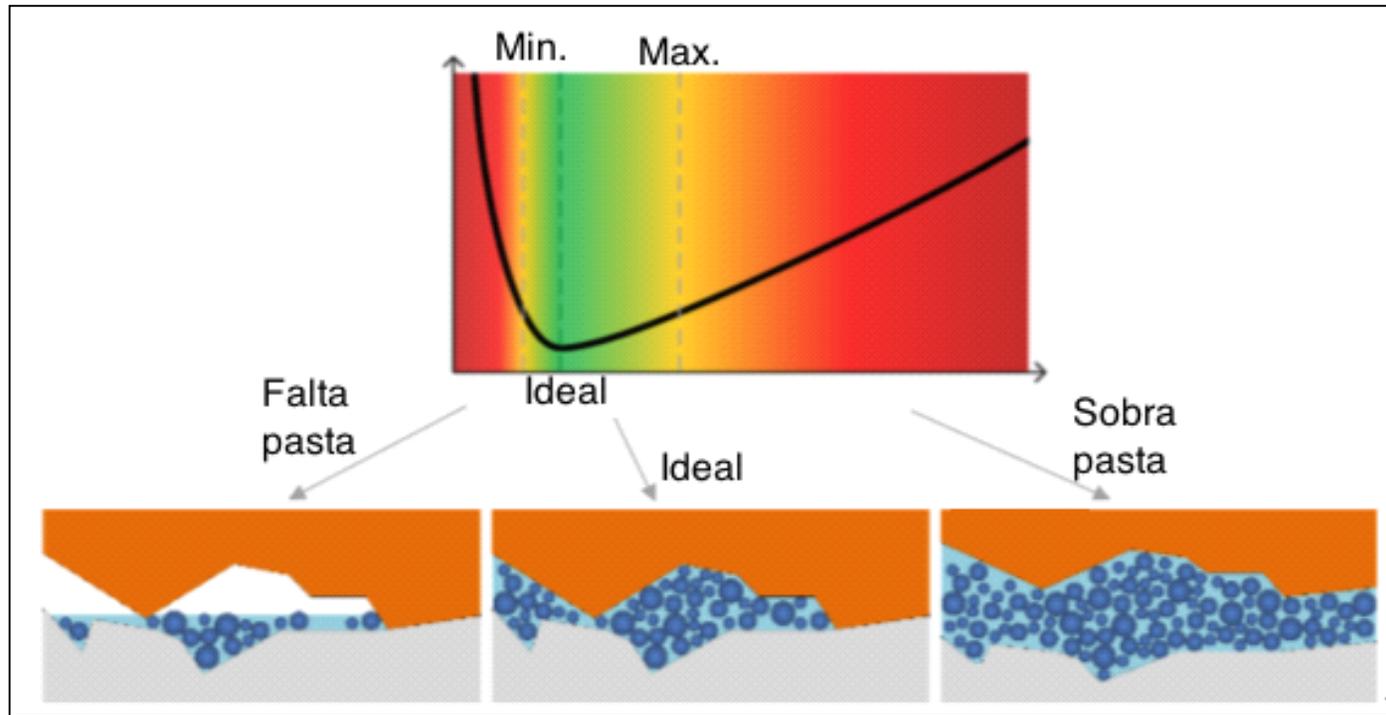


Esquema microscópico de parte de la zona de contacto base de montaje-disipador (cortesía SEMIKRON).

Para mitigar este problema es necesario tener el mayor cuidado con el acabado superficial de los componentes que intervienen en el intercambio de calor y es además conveniente incluir una capa muy delgada de grasa térmica (pasta conductora del calor) entre ambas superficies para que al apretarlas entre si la grasa rellene todos los espacios vacíos que puedan existir.



Esquema microscópico de parte de la zona de contacto base de montaje-disipador con grasa térmica llenando los espacios sin contacto metálico directo, y sin grasa en las zonas de contacto metal-metal efectivo (cortesía SEMIKRON).

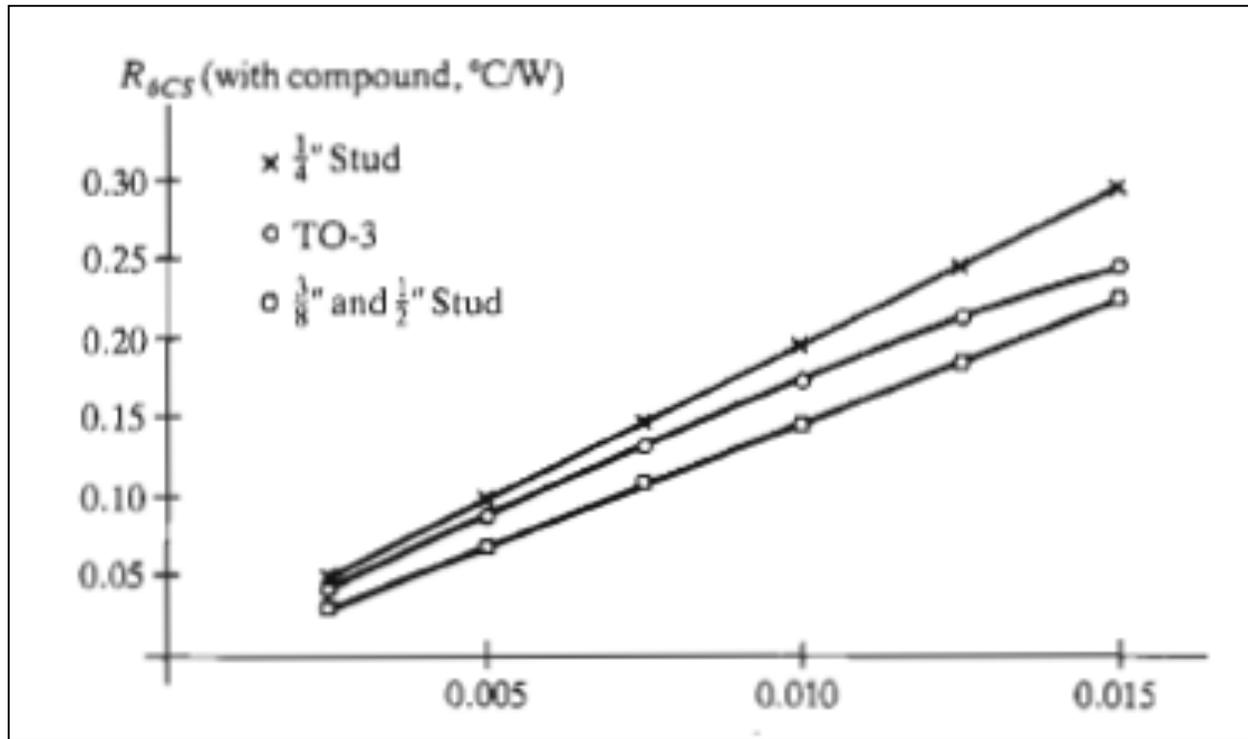


Termografía de la interfase base-disipador con diversos espesores de grasa: rojo, exceso de temperatura; amarillo, temperatura tolerable; verde, temperatura deseada (cortesía SEMIKRON).

La aplicación de la grasa térmica debe hacerse con cuidado, buscando una cobertura completa, para que no

queden espacios vacíos sin grasa, pero la capa no debe ser tan espesa que evite el contacto directo metal-metal donde sea posible.

El exceso de pasta es tan dañino como la falta de pasta ya que las conductividades térmica de las grasas térmicas son significativamente menores que las de los metales, de allí la necesidad de que la capa sea lo mas delgada posible.



Efecto del run-out en la resistencia térmica, interfaz entre cuatro tipos de encapsulado y un disipador de calor, con grasa térmica.

En muchos casos no es aceptable que exista contacto eléctrico entre la carcasa metálica del dispositivo y el disipador de calor, lo que obliga a insertar una pieza de aislante eléctrico entre ambos, lo que incrementa adicionalmente la resistencia térmica $R_{th\ mb-h}$, ya que además obliga a aplicar dos capas de grasa térmica: entre la cápsula y la lámina aislante, y entre esta y el disipador de calor.

De ser posible debe preferirse siempre el uso de encapsulados que no requieran de aislamiento eléctrico entre la carcasa y el disipador para minimizar el valor de $R_{th\ mb-h}$.

Tabla de valores típicos para la resistencia térmica de contacto carcasa-disipador, encapsulados para dispositivos de baja/media potencia, y diferentes interfaces de contacto.

<i>Package</i>	<i>Insulating washer</i>	<i>R_{θc-s} (K/W)</i>	
		<i>Silicone grease present</i>	<i>Silicone grease absent</i>
TO-3	No insulating washer	0.10	0.3
	Teflon	0.70-0.80	1.25-1.45
	Mica (50-100 μm)	0.5-0.7	1.2-1.5
TO-66	No insulating washer	0.15-0.2	0.4-0.5
	Mica (50-100 μm)	0.6-0.8	1.5-2.0
	Mylar (50-100 μm)	0.6-0.8	1.2-1.4
TO-220AB	No insulating washer	0.3-0.5	1.5-2.0
	Mica (50-100 μm)	2.0-2.5	4.0-6.0
TO-3P(L)	No insulating washer	0.1-0.2	0.4-1.0
	Mica (50-100 μm)	0.5-0.7	1.2-1.5

VI.-Consideraciones sobre la potencia disipada.

Para el cálculo de la disipación de calor hay que considerar dos casos:

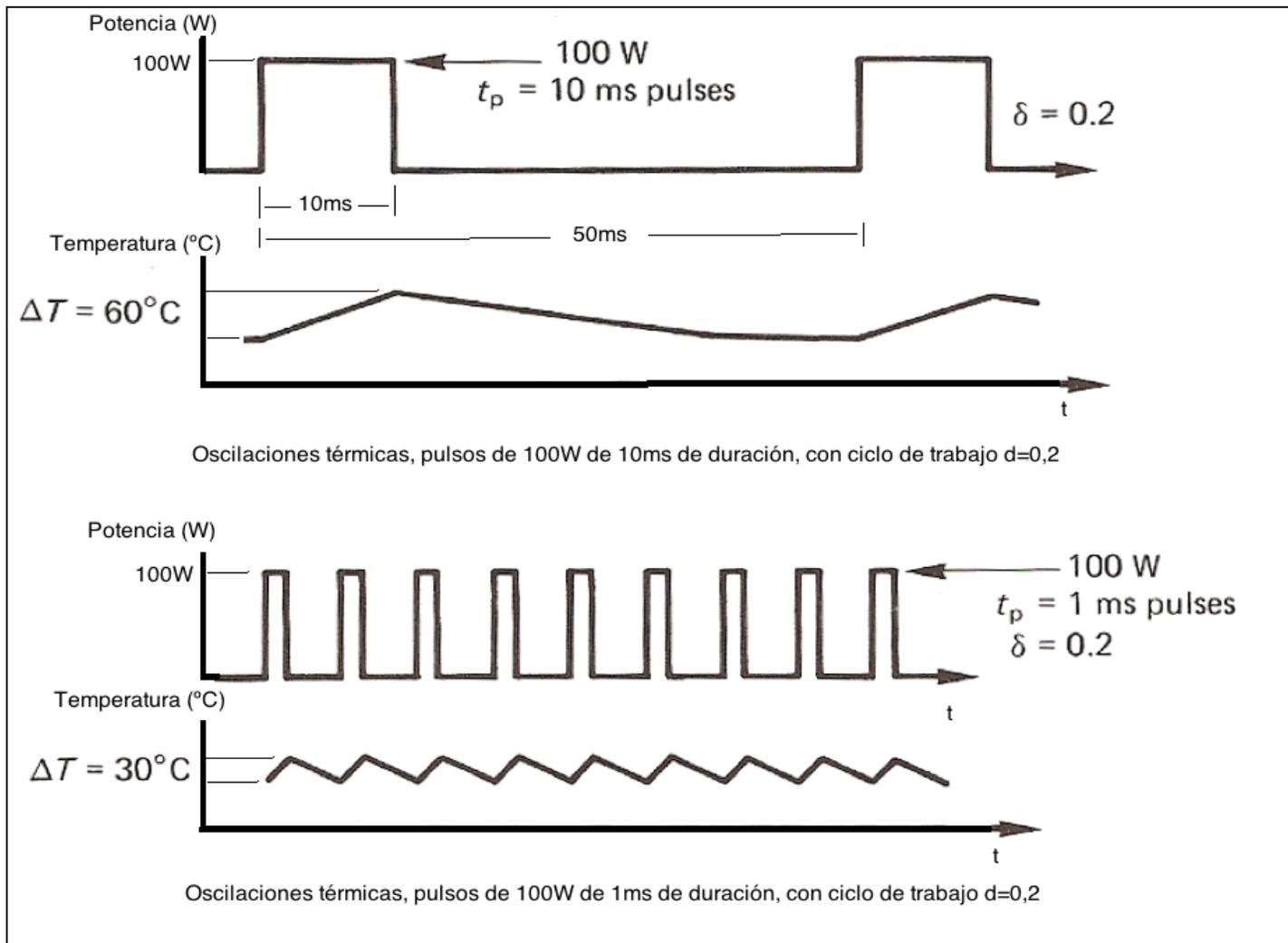
1.- El sistema opera en una condición estacionaria durante periodos suficientemente largos en relación con la constante de tiempo térmica del sistema, de forma que las temperaturas se consideran estabilizadas a su valor estacionario de operación después de la transitoria de cambio de estado, y solo interesa el peor caso, cuando el sistema alcanza equilibrio térmico a máxima temperatura operando con la máxima potencia considerada en el diseño.

En este caso se puede trabajar considerando solo las resistencias térmicas.

2.- El sistema opera en un régimen pulsante, en el cual la potencia disipada cambia cíclicamente entre dos o mas valores en intervalos de tiempo relativamente cortos, por lo que las temperaturas oscilan siguiendo con el correspondiente retraso los cambios en la potencia disipada.

En este caso la temperatura tendrá variaciones cíclicas, subiendo durante lo intervalos donde aumente la disipación de calor y bajando durante los intervalos donde la potencia se reduzca.

Como muestra la figura, los procesos de calentamiento y enfriamiento no son simétricos, y si el tiempo de enfriamiento es suficientemente largo, la temperatura de juntura se estabilizará al llegar a la temperatura ambiente.

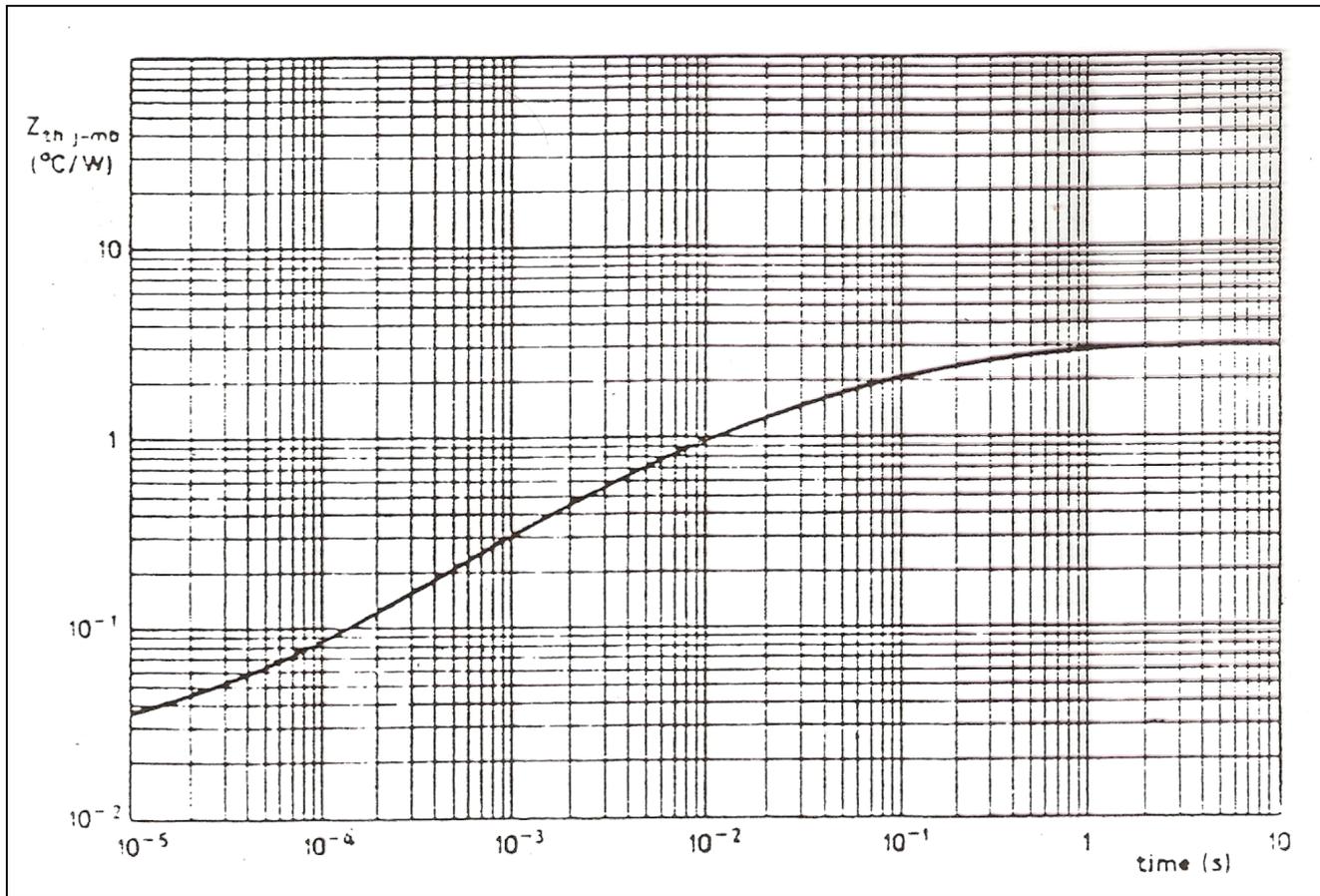


Ciclos térmicos producidos por la aplicación de trenes de pulsos de potencia.

En estas condiciones el cálculo de la temperatura de junta debe hacerse en dos etapas:

- 1.- La temperatura promedio del dispositivo se calcula tomando en cuenta la potencia promedio del tren de pulsos, y el modelo térmico resistivo.
- 2.- Las variaciones cíclicas de temperatura (el rizado térmico) se calcula usando el modelo de impedancia térmica en cada sub-intervalo del ciclo general.

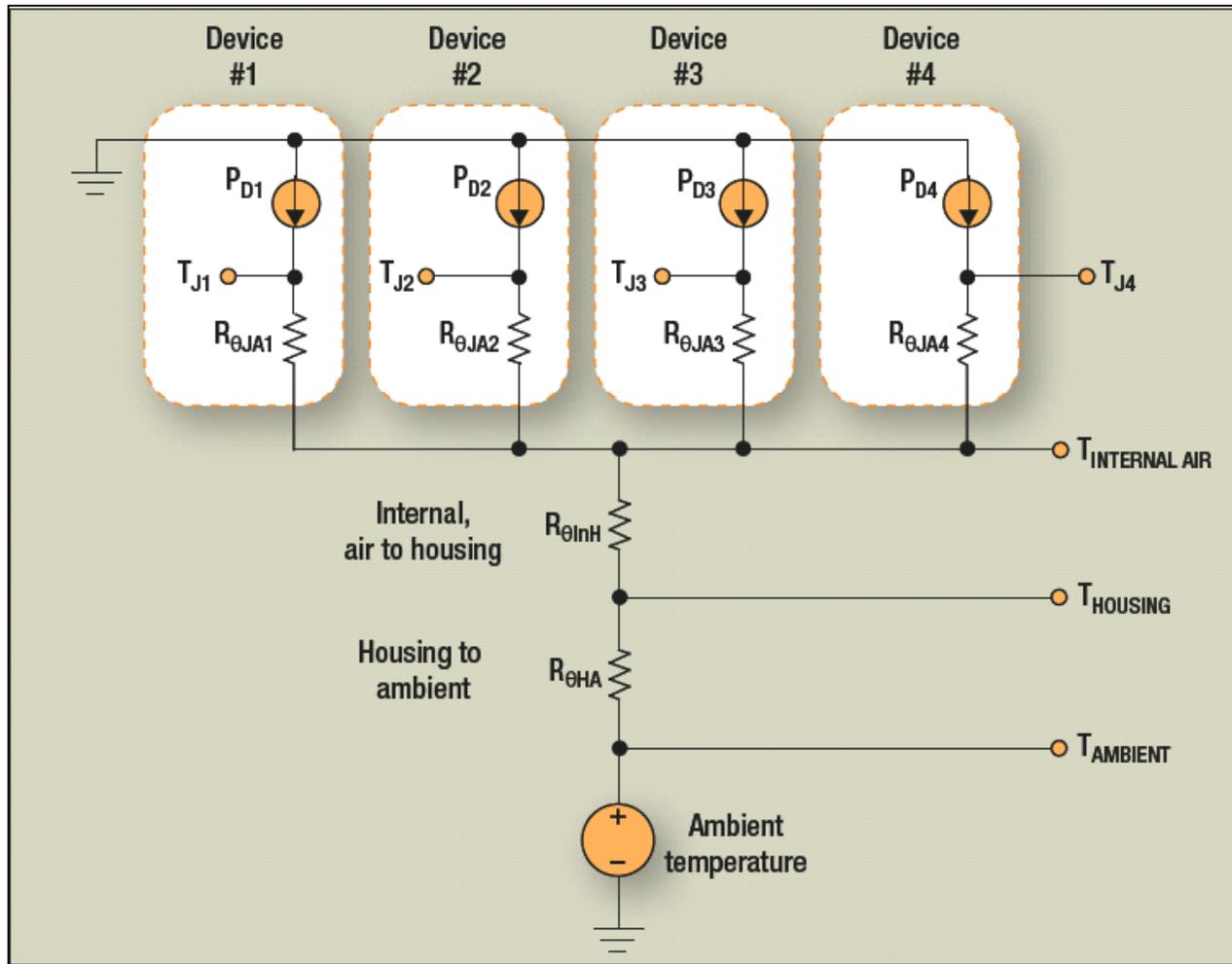
En general la impedancia térmica depende de la duración de los pulsos, y el fabricante la especifica en una gráfica en la hoja de datos del dispositivo.



Impedancia térmica (en grados centígrados sobre vatio)
vs. duración (en segundos) del pulso de energía.

VII-SISTEMAS CON MÚLTIPLES FUENTES DE CALOR.

Si existen múltiples dispositivos disipando energía térmica en un ambiente común, es preciso definir el camino por el cual la emisión combinada puede llegar al medio ambiente de referencia, estableciendo el valor de las resistencias térmicas que son comunes a los diferentes flujos, para poder calcular efectivamente cual será la temperatura de juntura de cada dispositivo.



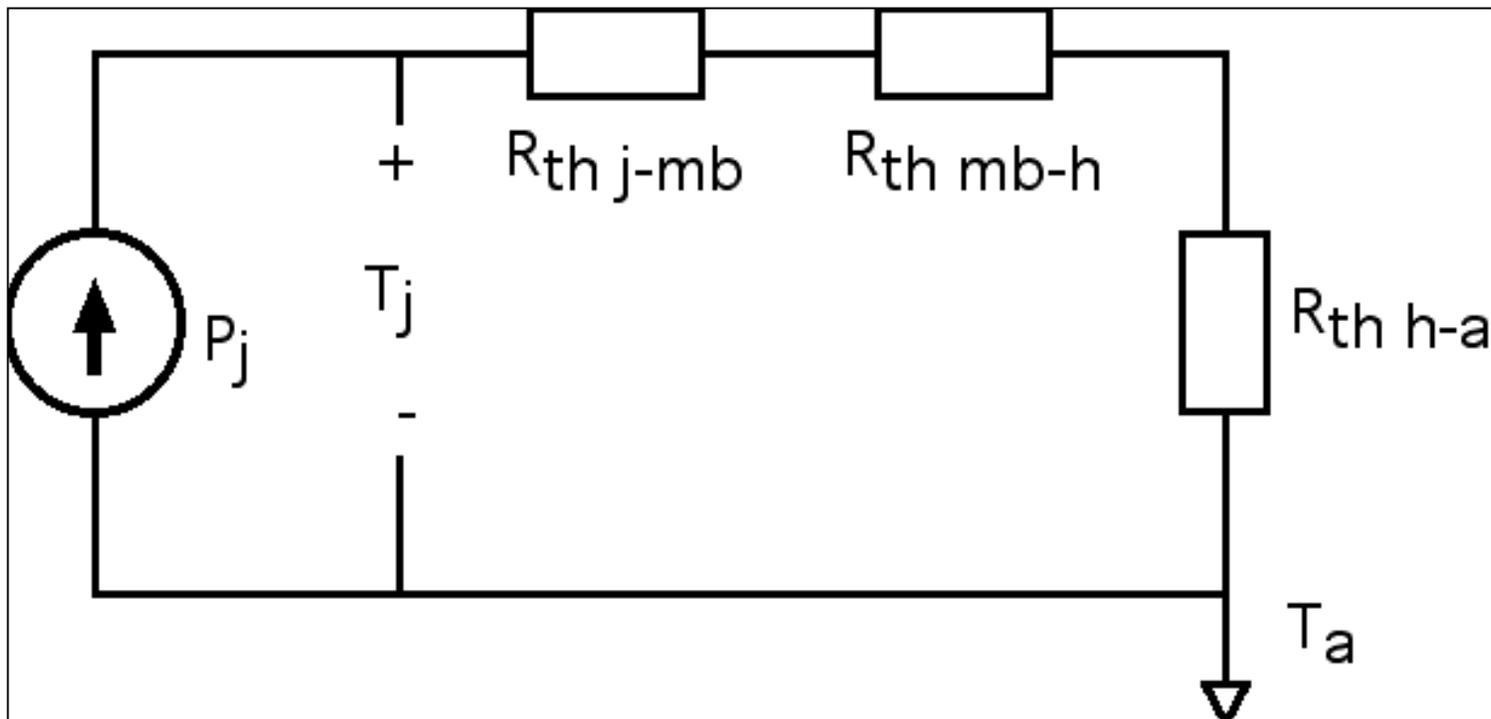
Sistema con cuatro fuentes de calor en un gabinete común.

En la gráfica se considera el caso en el que cuatro componentes están encerrados en un gabinete de equipos. El primer punto de referencia común a los cuatro es la temperatura del aire en el gabinete cerrado, que es común a los cuatro dispositivos una vez que se alcanza equilibrio térmico.

El camino común en el flujo térmico esta formado por la resistencia de transferencia de calor aire interno-paredes del gabinete, $R_{\Theta InH}$, en serie con la resistencia térmica de transferencia paredes del gabinete-medio ambiente externo, $R_{\Theta HA}$.

En primera aproximación se ha ignorado la resistencia térmica de transferencia del calor a través de la pared del gabinete, dado que al ser metálico se asume que será despreciable en comparación con las de transferencia aire-metal.

VIII.- CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TÉRMICA MÁXIMA POSIBLE DEL DISIPADOR DE CALOR PARA ASEGURAR QUE NO SE SUPERE LA TEMPERATURA MÁXIMA EN LA JUNTURA, CASO SIMPLE CON UN SOLO DISPOSITIVO OPERANDO EN ESTADO ESTACIONARIO DC.



Modelo térmico unidimensional estacionario simplificado para calcular la temperatura de junta en primera aproximación.

Del circuito equivalente térmico:

$$T_{jM} = T_{aM} + P_{jM} \left(R_{Thj-mb} + R_{Thmb-h} + R_{Thh-aM} \right)$$

$$R_{Thh-aM} = \frac{T_{jM} - T_{aM}}{P_{jM}} - \left(R_{Thj-mb} + R_{Thmb-h} \right)$$

T_{jM} es la máxima temperatura en la junta aceptada en el diseño; debe ser menor o igual al indicado en las especificaciones técnicas del dispositivo tomando en cuenta el factor de seguridad que incluido en el diseño.

T_{aM} es la máxima temperatura ambiente esperada en el diseño.

P_{avM} es la máxima potencia promedio considerada en el diseño.

La ecuación anterior considera solo la potencia promedio para calcular las temperaturas promedio en cada punto.

Si el sistema opera con variaciones cíclicas de la potencia, una vez calculado los valores promedio de la temperatura, es preciso emplear el modelo térmico con impedancias para determinar los valores pico.

Si se trabaja con múltiples fuentes de calor, debe establecerse el modelo combinado, y proceder a calcular las resistencias de interés para cada fuente.

IX.- Selección del disipador de calor.

Una vez calculado el valor de la resistencia térmica máxima del disipador de calor, $R_{th\ h-aM}$, se pueden presentar dos situaciones:

I.- $R_{th\ h-aM} > 0$: El diseño con un disipador pasivo que opere con la temperatura ambiente de referencia es factible en principio, si se encuentra o construye un disipador con esta característica térmica, lo que no siempre es económica o técnicamente posible.

II.- $R_{th\ h-aM} \leq 0$: El diseño con un disipador pasivo que opere con la temperatura ambiente de referencia no es factible dentro de las condiciones consideradas, se requiere del uso de un sistema de enfriamiento activo que opere con una temperatura de referencia inferior a la del ambiente.

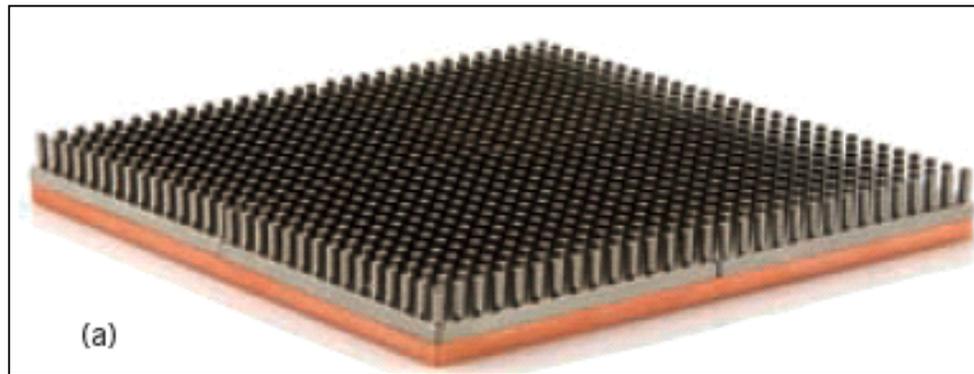
I.- Caso 1: $R_{th\ h-aM} > 0$

1.- El primer paso es determinar si existe un disipador de calor con el valor de resistencia térmica calculada operando en aire quieto, esto es sin ventilación forzada.

Como se observó en la tabla de conductancias térmicas, idealmente el disipador debería construirse en cobre, el metal común que ofrece la mejor conductancia; por razones de precio esto no es usualmente posible en las aplicaciones industriales comunes, por lo que el material más ofertado es el aluminio.

Algunos proveedores ofrecen disipadores híbridos, en los que la placa base de contacto es de cobre, y el resto del cuerpo y las aletas son de aluminio, para tratar de optimizar la relación costo/rendimiento térmico.

Estos disipadores se usan especialmente para aplicaciones de enfriamiento de dispositivos de montaje superficial en encapsulado plano conectados en circuitos impresos de alta densidad.

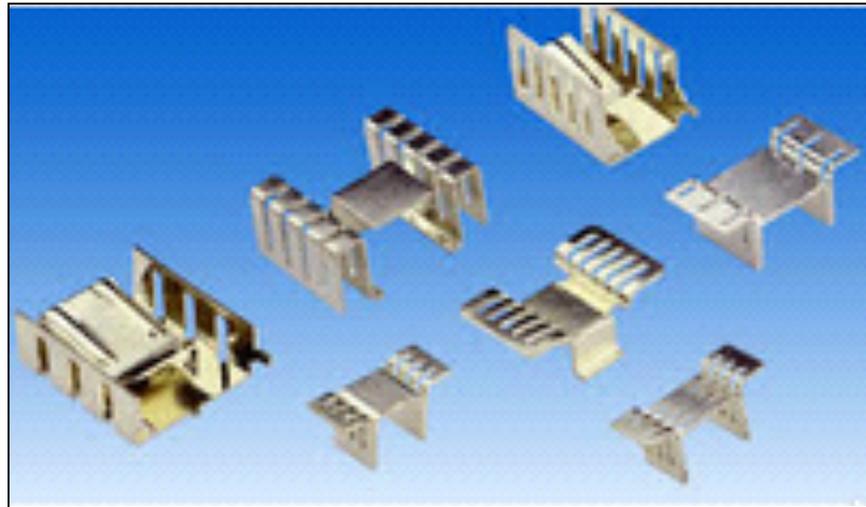


Disipador bimetálico. Base de contacto con el componente de cobre (color rojizo), cuerpo y aletas de aluminio (color gris).

En general los fabricantes de disipadores ofrecen sus productos en catálogos que indican la resistencia térmica.

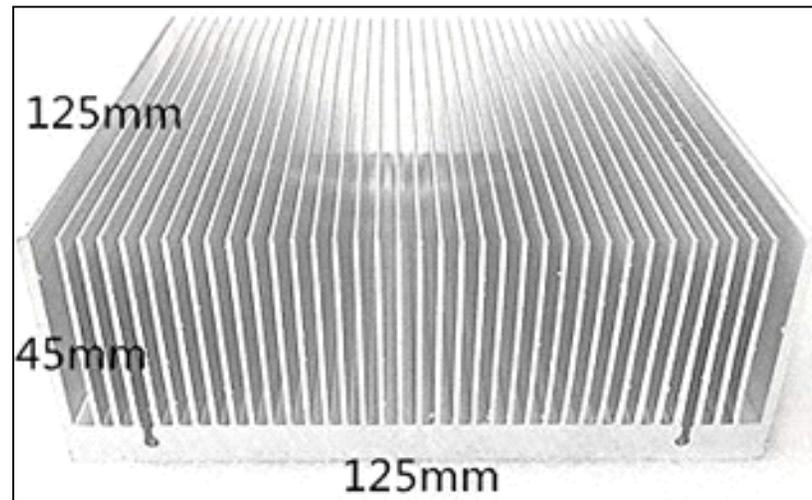
Usualmente existen las siguientes alternativas.

a.- Disipadores "pequeños" completamente terminados, que usualmente están limitados en capacidad térmica a aplicaciones de baja potencia con un solo dispositivo.



Diversos modelos de disipadores individuales (tomado de INTERNET).

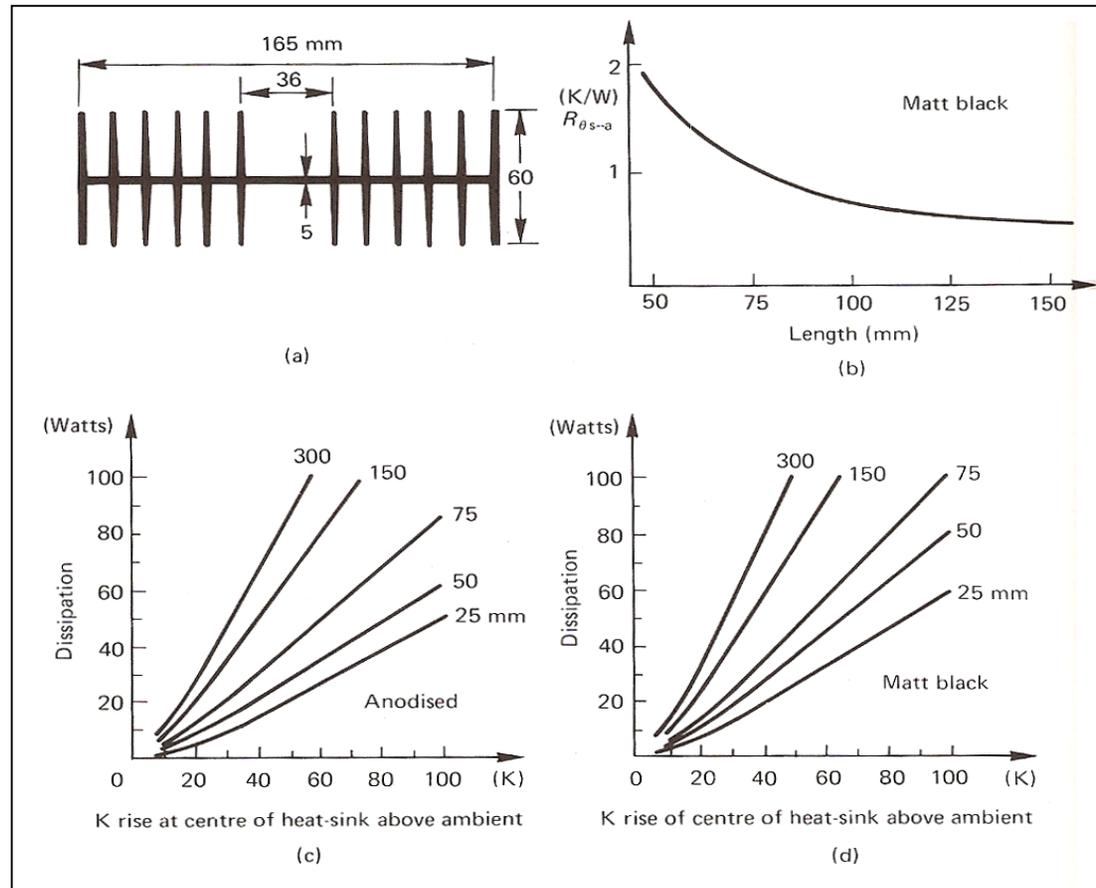
b.- Disipadores pre-formados para potencias medias:



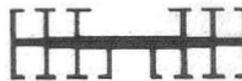
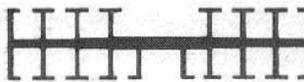
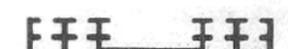
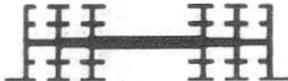
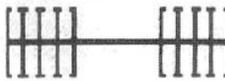
Disipador de calor para 100W, cortesía ASTRODYNE.

El dato de catálogo "100W" no da información si no se indica específicamente cual es la temperatura ambiente de referencia; la información necesaria y suficiente es el valor de la resistencia térmica.

c.- Disipadores de calor en forma de barras largas cortables a la medida según la resistencia térmica deseada. En principio a mayor longitud del disipador menor resistencia térmica, hasta que se alcanza un valor asintótico, positivo y mayor que cero, alcanzado el cual la resistencia térmica ya no se puede reducir por el simple procedimiento de aumentar la longitud del disipador; un efecto similar ocurre si en vez de cambiar la longitud se trata de cambiar la anchura o, en general, la superficie; aumentar el número y la superficie de las aletas auxiliares también reduce la resistencia, pero también se presenta el efecto de límite asintótico.



Curvas características resistencia térmica/longitud de un disipador en calor tipo barra, cortesía ASTRODYNE.

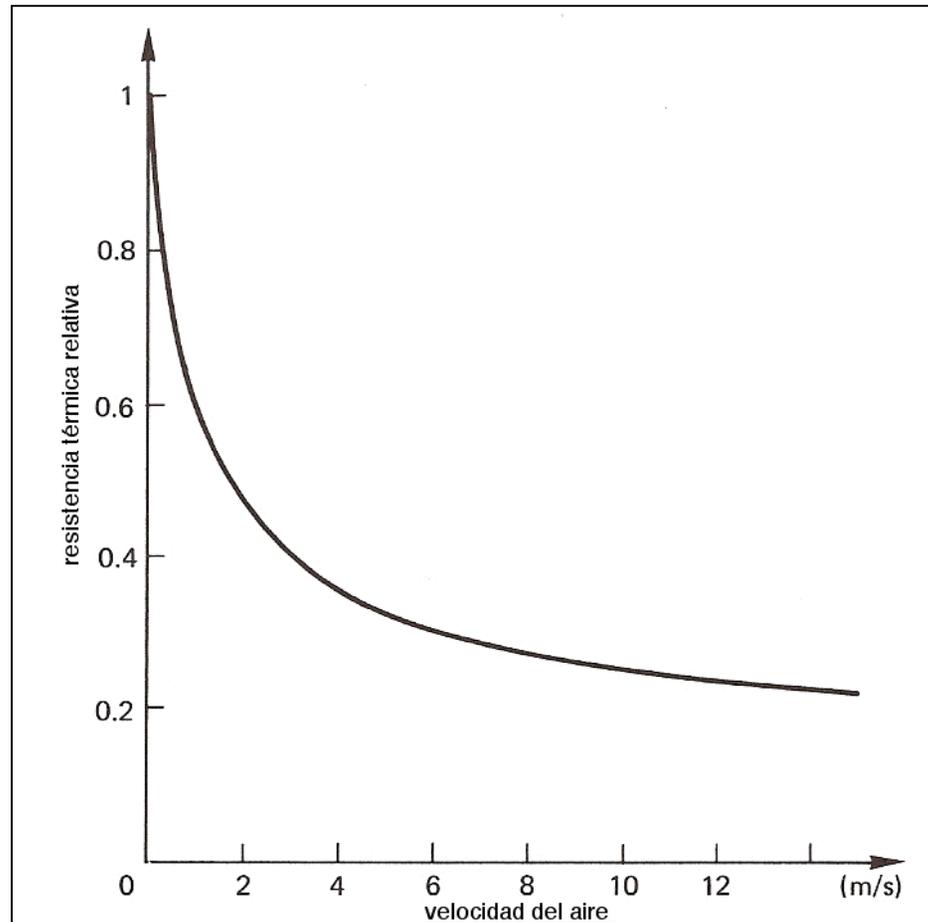
EXTRUSION TYPE		SURFACE AREA PER IN. OF LENGTH	OVERALL WIDTH	OVERALL DEPTH	WEIGHT PER IN. OF LENGTH
2501		20.7 sq in.	4 in.	1-1/16 in.	0.10 lb
2502		33.3 sq in.	4 in.	1-9/32 in.	0.13 lb
2503		42.3 sq in.	5-1/8 in.	1-1/4 in.	0.19 lb
2504		18.3 sq in.	4 in.		0.08 lb
2505		28.6 sq in.	4 in.	1-1/4 in.	0.12 lb
2506		39.1 sq in.	5-1/8 in.	1-1/4 in.	0.13 lb
2508		15.6 sq in.	4-3/4 in.	7/16 in.	0.08 lb
2509		22.8 sq in.	4-3/4 in.	11/16 in.	0.11 lb
2510		10.9 sq in.	2-7/8 in.	11/16 in.	0.06 lb
2517		36.3 sq in.	4-3/4 in.	1-1/4 in.	0.14 lb
2518		54.6 sq in.	6-1/4 in.	2 in.	0.27 lb

Perfiles típicos de disipadores, cortesía ASTRODYNE

2.- Si no se encuentra un disipador de calor cuya resistencia térmica en "aire quieto" sea la adecuada para el diseño considerado, se puede intentar resolver el problema aplicando ventilación forzada, lo que reduce la resistencia térmica del disipador por debajo de los valores calculados para el caso de "aire quieto", pero por supuesto aumenta el costo del equipo e introduce una nueva posibilidad de falla: el equipo se sobrecalentará si falla el ventilador, o si el flujo de aire que este emite queda bloqueado por alguna obstrucción accidental.

Como primer paso se debe determinar de las características de los disipadores cual es la velocidad del viento necesaria para reducir la resistencia térmica del disipador deseado, y luego es necesario buscar un ventilador capaz de producir el soplo necesario.

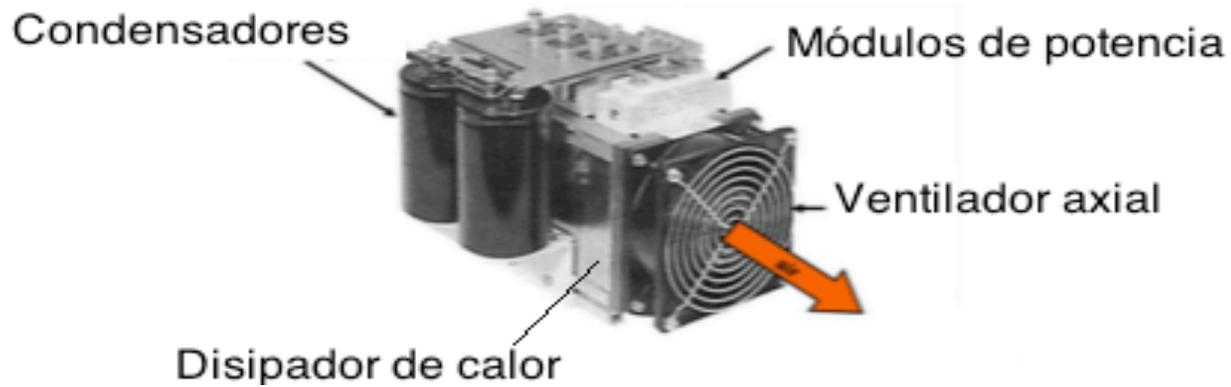
El problema, tal como se observa en la curva típica, es que efectivamente la resistencia térmica se reduce al aumentar la velocidad del aire soplado, pero la reducción es asintótica a un valor límite que usualmente es del orden del 20% del valor en aire quieto.



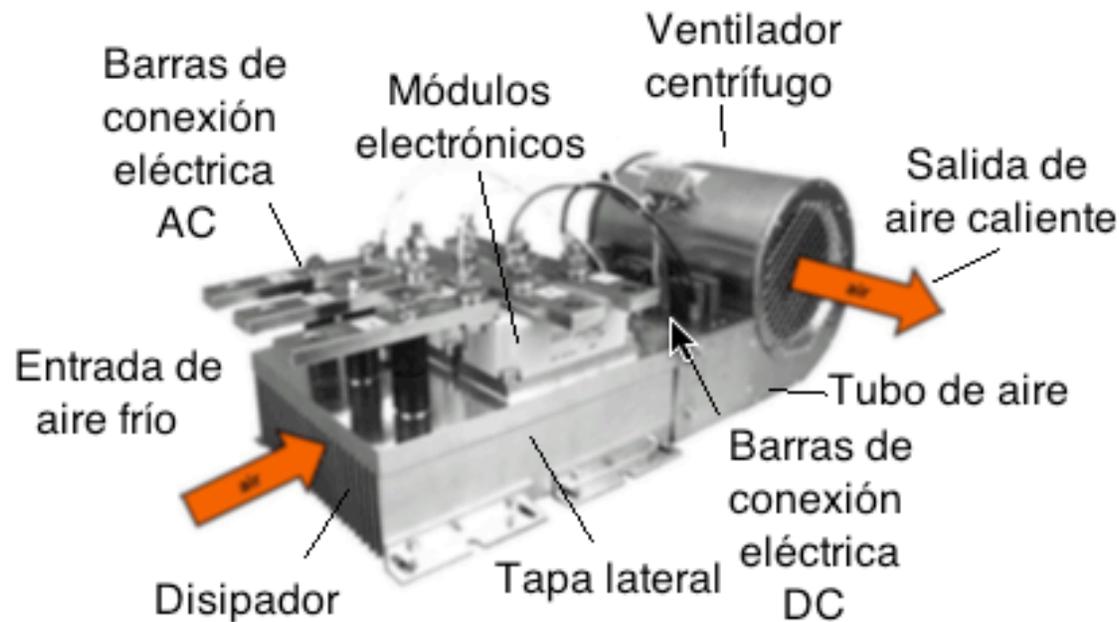
Disipación forzada: Variación de la resistencia térmica de un disipador de calor en función de la velocidad de soplado del aire.

Otro punto a considerar es que efectividad del enfriamiento por aire depende fundamentalmente de concentrar el soplo forzado en el área efectiva del disipador de calor, esto requiere un montaje especial que integre el conjunto circuito de potencia-disipador de calor-ventilador.

Una manera altamente eficiente de lograr esto es montar el circuito directamente sobre el disipador, cerrar los laterales con láminas para formar una chimenea y evitar pérdidas de aire, enfocando todo el flujo del ventilador sobre el disipador.



Arreglo del circuito de potencia y sus componentes auxiliares sobre un disipador con ventilador de flujo axial.



Módulo de potencia enfriado por ventilador centrífugo.

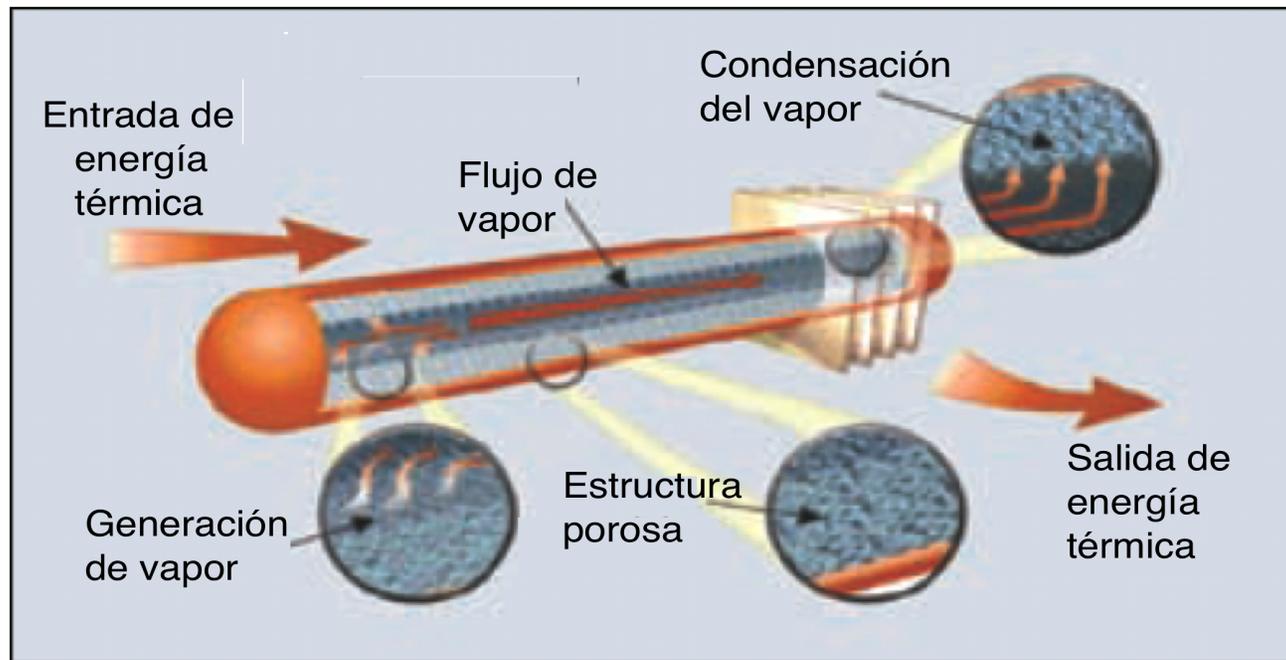
El enfriamiento por ventilación forzada tiene tres factores limitantes, el primero, ya indicado, es el rendimiento decreciente obtenido al aumentar la velocidad del aire, el segundo es que el aire no es el medio ideal para transferir energía térmica, ya que su conductividad térmica es del orden de $0,02 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, mientras que la del aluminio del disipador de calor es del orden de $237 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, y el tercero es que la temperatura del fluido de enfriamiento es la temperatura ambiente, sobre la cual no se tiene en principio control.

3.- Enfriamiento por evaporación.

Si se requiere un sistema de disipación de calor de capaz de mover mas energía térmica, pero referido siempre a la temperatura ambiente, es necesario buscar un medio de intercambio de calor mas poderoso, empleando en el intercambio de calor un proceso de evaporación/condensación, que puede ser en lazo abierto o en lazo cerrado.

3.1.-Sistemas en lazo cerrado.

a.-"Tubo de calor" ("Heat pipe").



Esquema de un "tubo de calor" ("heat pipe")

El tubo de calor o "heat pipe" es un tubo cerrado que contiene una cierta cantidad de un compuesto que es líquido a la temperatura ambiente (posiblemente amoníaco), pero que tiene una temperatura de vaporización relativamente baja.

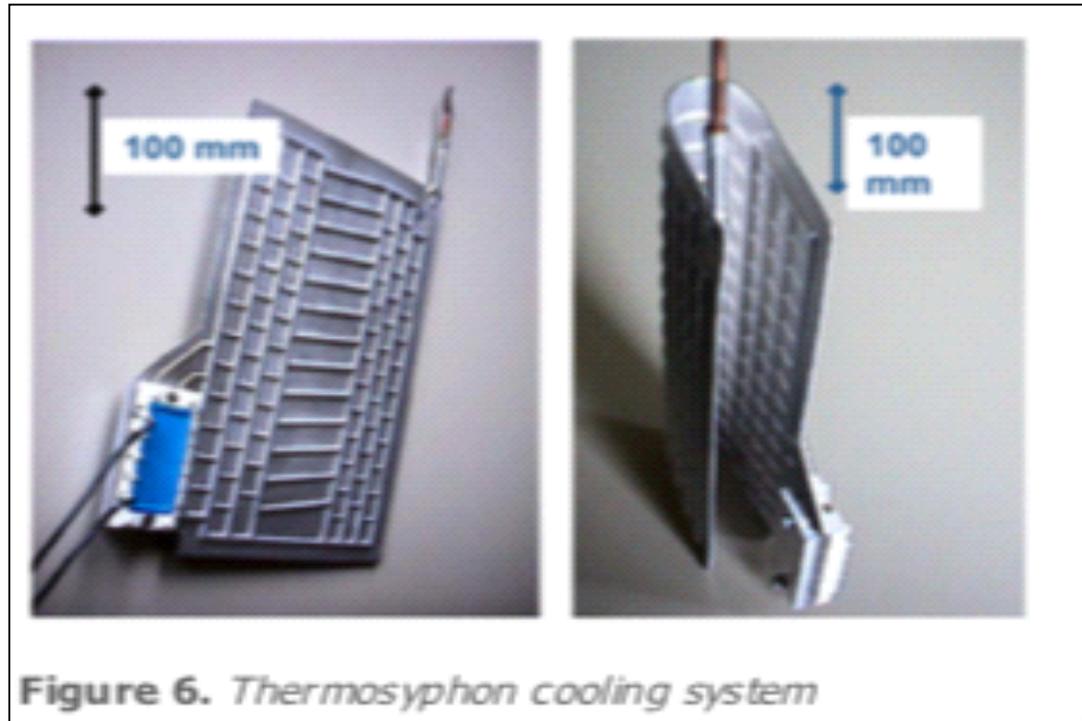
El dispositivo se monta en vertical, con el extremo con las aletas disipadoras arriba en aire libre y el extremo inferior adosado térmica y mecánicamente al disipador de calor.

El extremo inferior se calienta a una temperatura superior a la de evaporación del líquido de enfriamiento, este se evapora, extrayendo el calor de evaporación del disipador, y sube por la estructura interna del tubo hasta la zona de las aletas de enfriamiento, que esta a temperatura ambiente.

En el extremo superior (frío) del tubo de calor el vapor se enfría, el fluido enfriador se condensa y cede el calor de condensación a las aletas de enfriamiento desde donde se disipa en el aire; ya líquido, el fluido cae por gravedad al fondo del tubo (extremo caliente) y el ciclo de operación se repite y es auto sostenido.

b.- "Termosifón"

Es similar al anterior, pero la forma del intercambiador de calor es mas parecida a una superficie plana y es flexible.

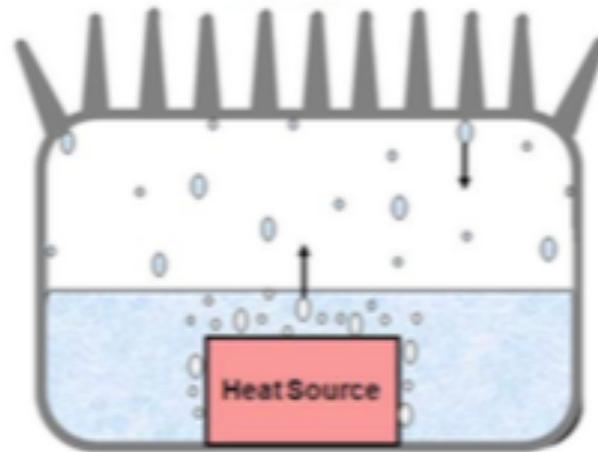


En ambos casos el sistema de transporte de calor es eficiente, ofreciendo resistencias térmicas equivalentes muy bajas, pero por supuesto su capacidad de transporte de energía depende de las características termodinámicas y de la cantidad del líquido presente en el tubo de calor, y de que la diferencia de temperatura de operación entre los lados caliente (esencialmente a la temperatura de carcasa del dispositivo a enfriar) y frío (esencialmente a la temperatura ambiente) sea adecuada para la aplicación considerada.

3.2- Por ebullición.

Es la forma de enfriamiento empleada en equipos móviles militares de radio frecuencia de muy alta potencia ("electronic warfare") con un tiempo de operación limitado.

La ebullición puede hacerse en un sistema cerrado, en el cual el vapor se condensa al entrar en contacto con la cara superior del recipiente, enfriada con un sistema de aletas; normalmente el líquido debe ser de bajo punto de ebullición, similar al empleado en los sistemas de "heat pipe".



Enfriamiento por ebullición en lazo cerrado.

El caso mas extremo es el de ebullición en lazo abierto, en la cual el equipo completo se sumerge en un líquido enfriador de muy alta capacidad térmica, usualmente agua ultra destilada, y como el equipo opera a una temperatura superior a la de ebullición, el agua se evapora y el vapor es ventilado a la atmósfera.

La capacidad de extracción de calor es muy elevada, pero por supuesto el sistema consume continuamente líquido enfriador y debe detenerse cuando se acaba el líquido disponible.

Este sistema no parece tener aplicación en la industria.

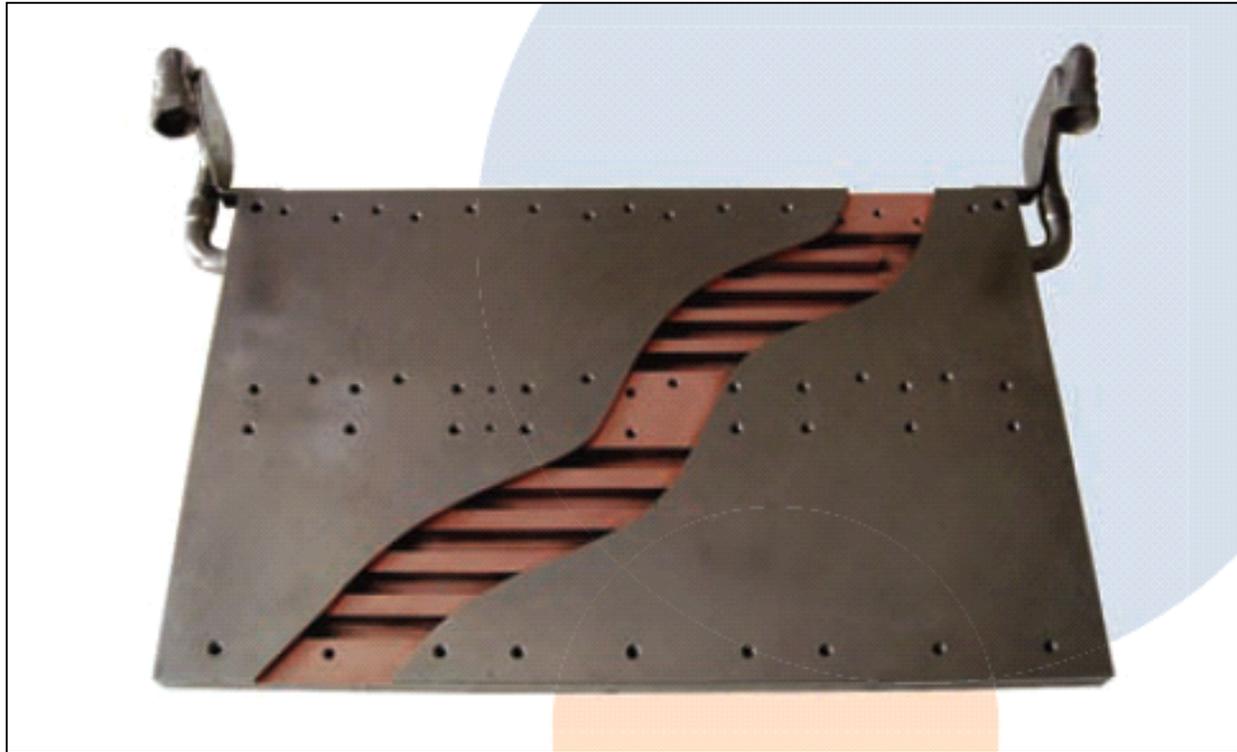
II.- Caso $R_{th\ h-aM} \leq 0$

El signo negativo de la resistencia indica que no existe solución para la temperatura ambiente que se está considerando, por lo que se requiere emplear una "fuente de frío", esto es, un sistema de refrigeración que proporcione en el disipador de calor una referencia de temperatura inferior a la temperatura ambiente.

Hay dos alternativas posible.

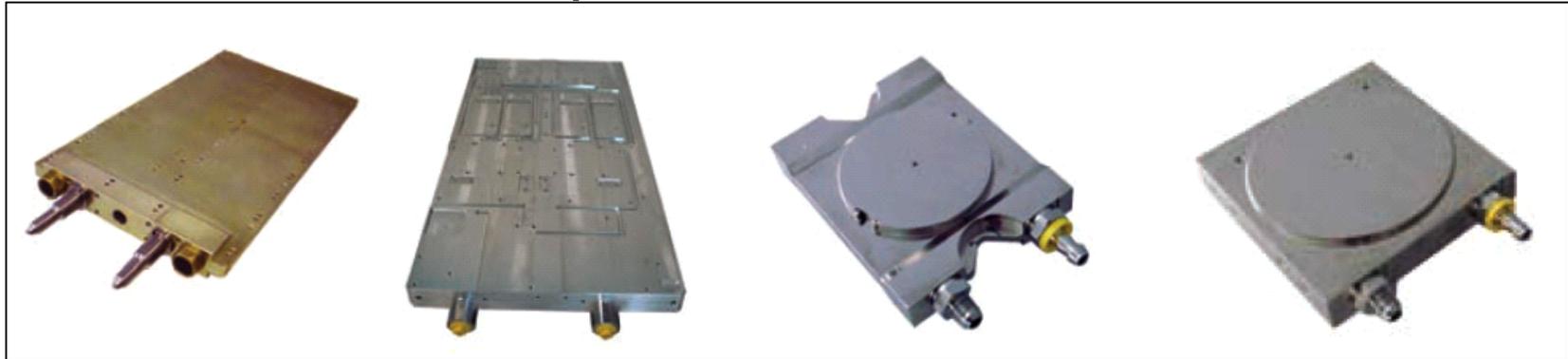
1.- Enfriamiento por fluido refrigerado.

Se requiere de una fuente ("chiller") de fluido refrigerado a una temperatura menor que la del ambiente; el fluido puede ser agua destilada o algún aceite mineral.



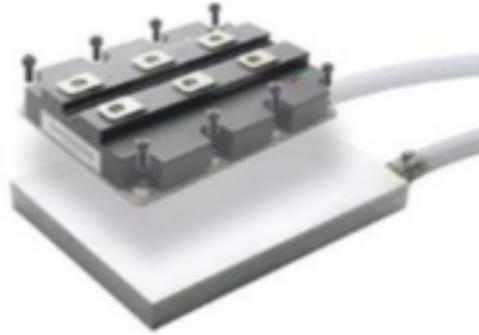
Corte de una placa de montaje de dispositivos para enfriamiento por circulación de líquido refrigerante mostrando los canales internos de circulación del líquido refrigerante y las conexiones al sistema de tuberías de transporte del líquido.

El fluido se hace circular por una red de canales en el interior de la placa sobre la que se monta el o los dispositivos a enfriar



Placas de base para colocar los dispositivos a enfriar en un sistema de enfriamiento por circulación de líquido refrigerante.

Las dos de la izquierda son para montar dispositivos encapsulados en módulos planos enfriados por la base, las dos de la derecha para dispositivos encapsulados en envases tipo "hokey pucks". Aquí el enfriamiento puede ser bilateral, con el dispositivo colocado entre dos placas de base.



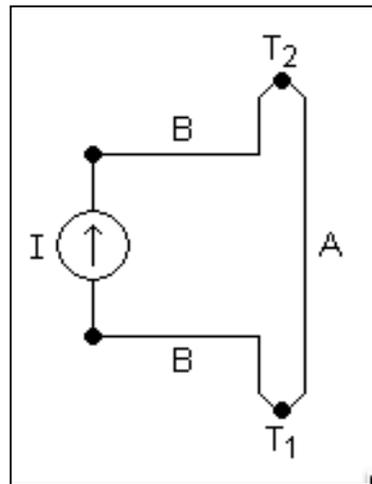
Esquema de montaje de un módulo de potencia sobre una placa de enfriamiento por líquido.

Si se dispone del caudal de líquido refrigerante necesario, este método permite disipar grandes cantidades de energía térmica, pero tiene la inconveniencia del costo, posiblemente considerable, del enfriador ("chiller"), la bomba que impulsa el fluido y el sistema de tuberías en lazo cerrado requerido para que el líquido fluya del enfriador al dispositivo a enfriar y de regreso, con la posibilidad de fugas de fluido.

Dado que el equipo electrónico depende del flujo continuo de fluido refrigerante frío, es preciso incluir en el diseño un sistema de control y supervisión del enfriamiento, con la autoridad suficiente para apagar el equipo electrónico si se detectan fallas en el sistema de enfriamiento. Para lograr redundancia usualmente se mide la temperatura del disipador de calor y se tiene además un detector de flujo del líquido refrigerante. Como los componentes electrónicos tienen constantes de tiempo térmicas muy cortas, en comparación con las de operación del sistema de enfriamiento, es también necesario que el sistema enfriador se active previamente, y que el sistema controlador de potencia solo se pueda activar una vez que el sistema de enfriamiento haya alcanzado su temperatura nominal de trabajo. El sistema es costoso, pero es imprescindible en aplicaciones electrónicas de altas y muy altas potencias.

2.- Enfriamiento por efecto Peltier (enfriamiento de estado sólido).

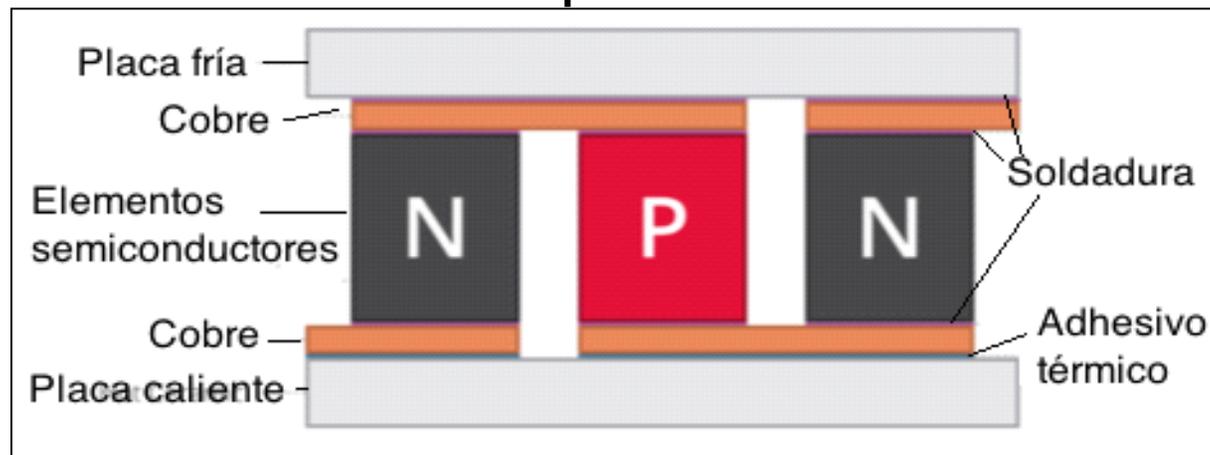
El efecto Peltier es una variante del efecto termoeléctrico generalizado que caracteriza los procesos de conversión directa de energía térmica y viceversa.



Circuito Peltier, A, B metales distintos, T1, T2 juntas.

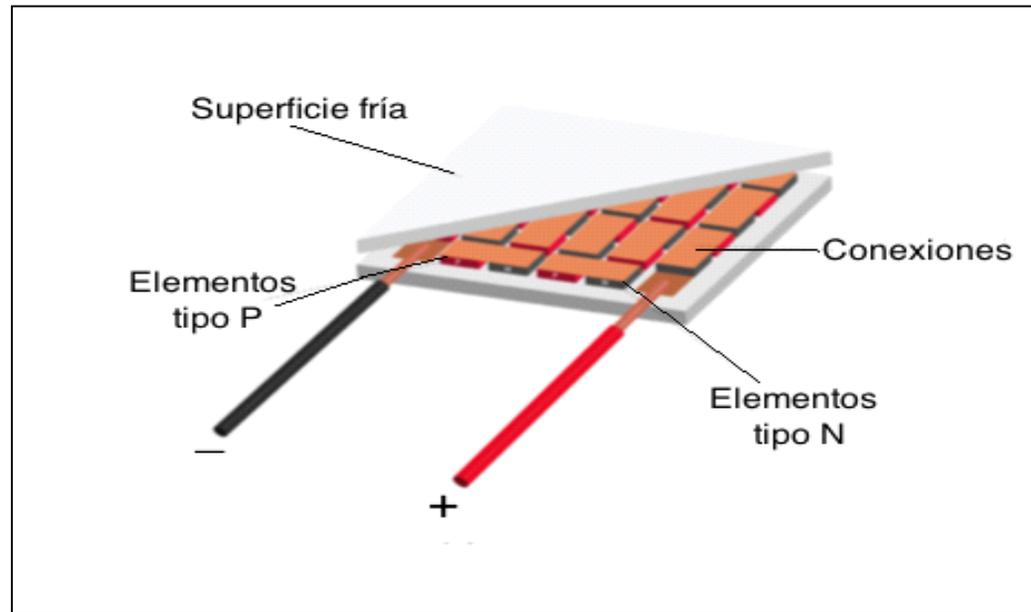
En 1834 Jean Peltier descubrió que si se hace pasar una corriente eléctrica por un circuito formado por dos materiales distintos (A y B en el esquema), una de las dos junturas se calienta con respecto a la temperatura ambiente y la otra se enfría.

El efecto también ocurre cuando uno de los materiales es un semiconductor tipo P y el otro un semiconductor tipo N.

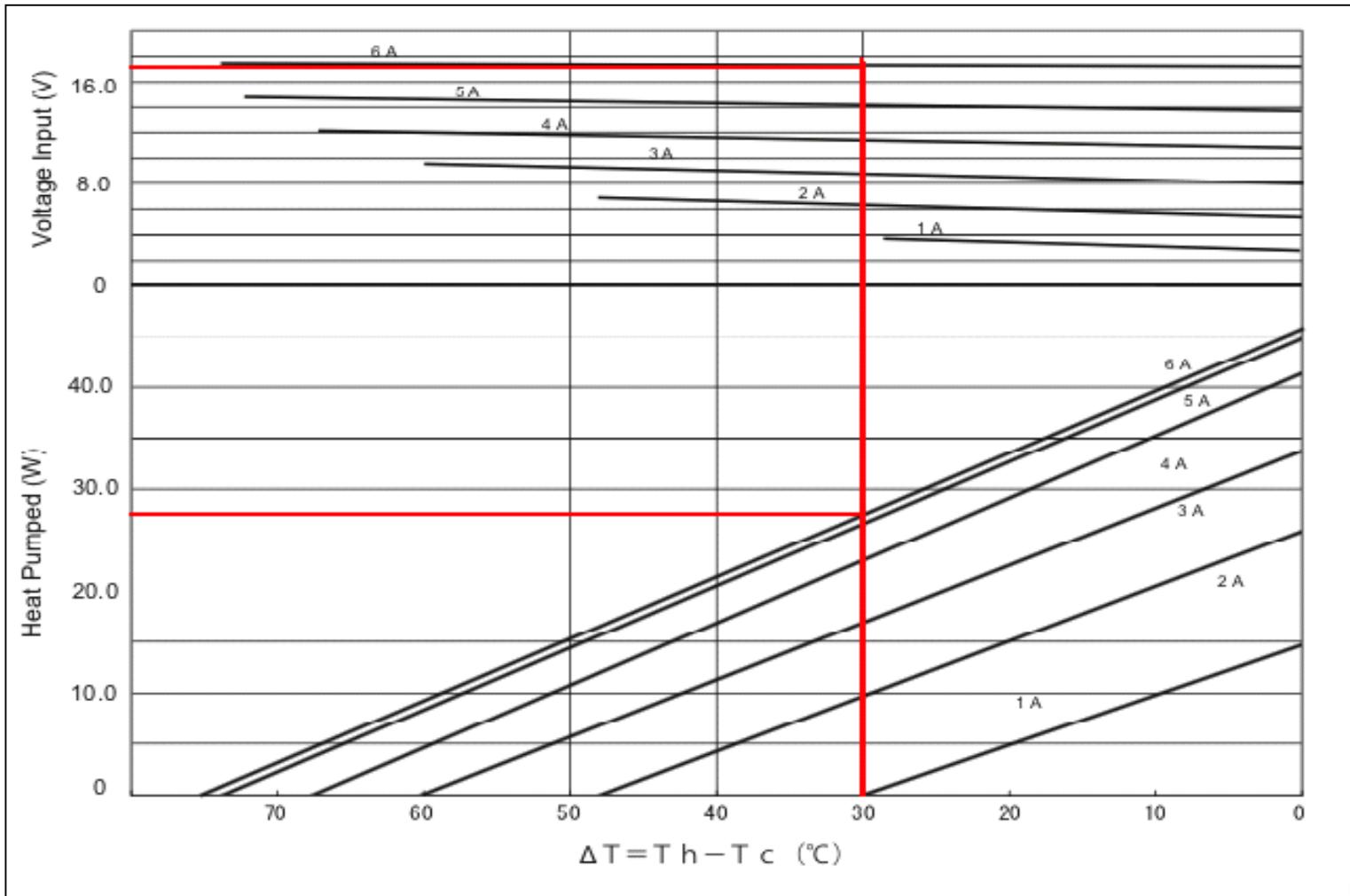


Corte de un módulo Peltier moderno implementado con semiconductores.

Un módulo comercial de enfriamiento Peltier moderno esta formado por una serie de elementos P y N formando una cascada de elementos Peltier básicos.



Módulo Peltier moderno (cortesía CUI Inc)



Curvas características de operación del módulo Peltier.

Ejemplo de uso de un enfriador Peltier.

Una vez calculado el sistema térmico se llegó a la conclusión de que es preciso que la temperatura de referencia esté 30°C por debajo de la temperatura ambiente y que se debe remover unos 28W de energía térmica; 30°C es el valor DT de entrada que se busca en el eje horizontal: desde el punto de 30°C se traza la línea recta vertical (rojo).

Se busca en el eje vertical el valor de la potencia a remover y se lanza una línea horizontal (rojo).

Las dos líneas se cortan en la recta de 6A , lo que indica que el módulo es capaz de realizar el enfriamiento deseado consumiendo su máxima corriente nominal.

A continuación se prolonga la línea vertical hacia el extremo superior de la gráfica, hasta cortar a la línea de 6A, y se traza una línea horizontal hasta el eje vertical donde, en la escala superior (voltios) se lee que la tensión de alimentación en esas condiciones debe ser del orden de 17V.

El módulo consume 107W para remover 28W, con una eficiencia de conversión del orden de 27,5%; la operación es totalmente silenciosa, sin partes móviles y sin fluidos contaminantes.

Como en todos los casos de enfriamiento activo, el equipo no puede funcionar si no el sistema Peltier no esta operativo; es necesario incluir un circuito de supervisión que determine si en sistema enfriador opera correctamente, y con la autoridad suficiente para interrumpir la operación en caso de falla de enfriamiento.

Dado que los componentes electrónicos tienen constantes de tiempo térmicas muy cortas, puede ser también necesario que el sistema enfriador se active previamente, y que el sistema controlador de potencia solo se pueda activar una vez que el sistema de enfriamiento haya alcanzado su temperatura nominal de trabajo.