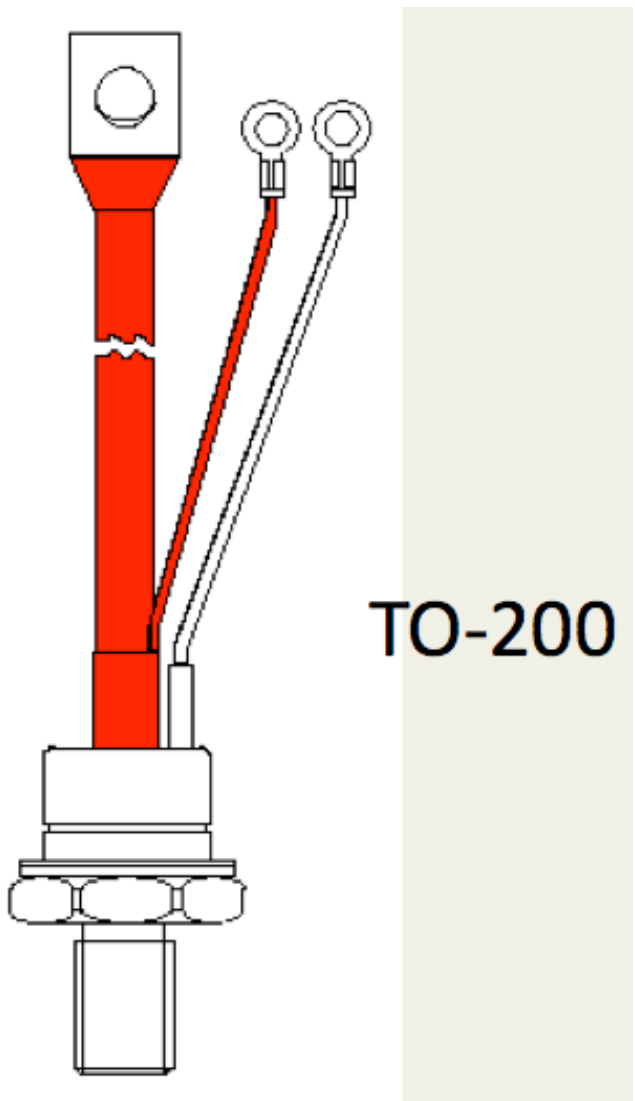


Tipos de encapsulado.

I.- Tipo perno: el dispositivo se monta sobre en contacto eléctrico sobre una base metálica con forma de perno, que se atornilla a presión al disipador para asegurar el contacto térmico y el eléctrico de uno de los dos terminales de potencia, y la parte superior se cubre con un casquete de cerámica hermético, del cual sale el otro terminal de potencia y los de control en el caso de un tiristor.

Este encapsulado permite disipación de calor por un solo lado, por lo que es aplicable a dispositivos de potencia media, y se emplea para dispositivos individuales.



Encapsulado tipo perno. El cable rojo delgado es una conexión auxiliar para el común del circuito de disparo.

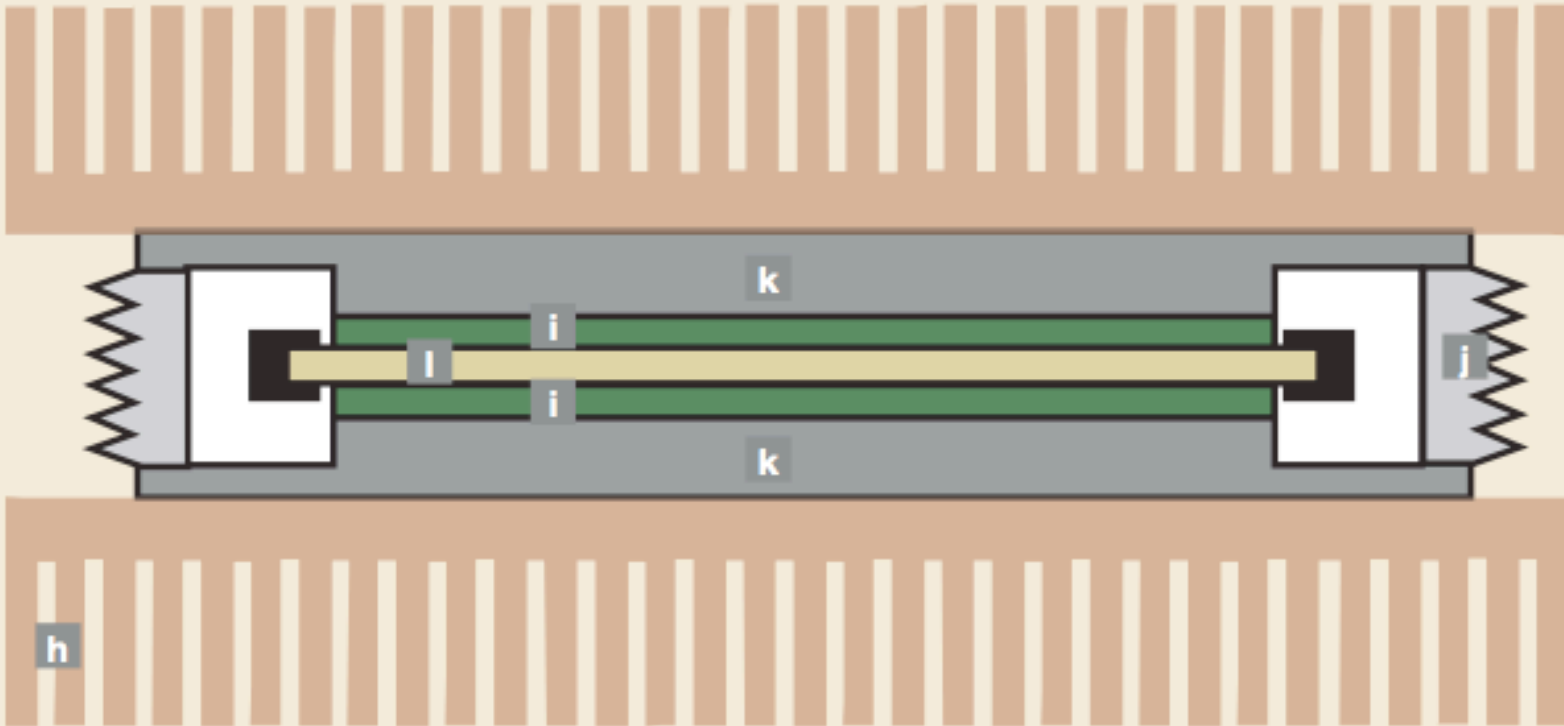
II.- Tipo "hockey puck": El dispositivo se monta dentro de un cilindro de cerámica mucho más ancho que largo, que se cierra herméticamente en sus extremos con dos placas metálicas que hacen contacto con las dos caras del dispositivo de potencia, asegurando contacto térmico y eléctrico con los dos terminales principales del dispositivo.

De ser el caso, el terminal de control se conecta mediante dos cables auxiliares que salen por uno de los extremos del encapsulado.

Es posible operar con enfriamiento por los dos lados, por lo que este encapsulado se emplea en los dispositivos de alta y muy alta potencia.

Este encapsulado se emplea para dispositivos individuales.

- h Disipador de calor
- i Caja (cerámica)
- l Semiconductor
- i Compensación CTE (Mo)
- k Cobre



Diodo de potencia montado en un encapsulado tipo "hockey puck"

III.- Encapsulado tipo "modulo": El dispositivo se monta sobre una capa de metal que permite hacer contacto eléctrico con el terminal principal inferior del dispositivo.

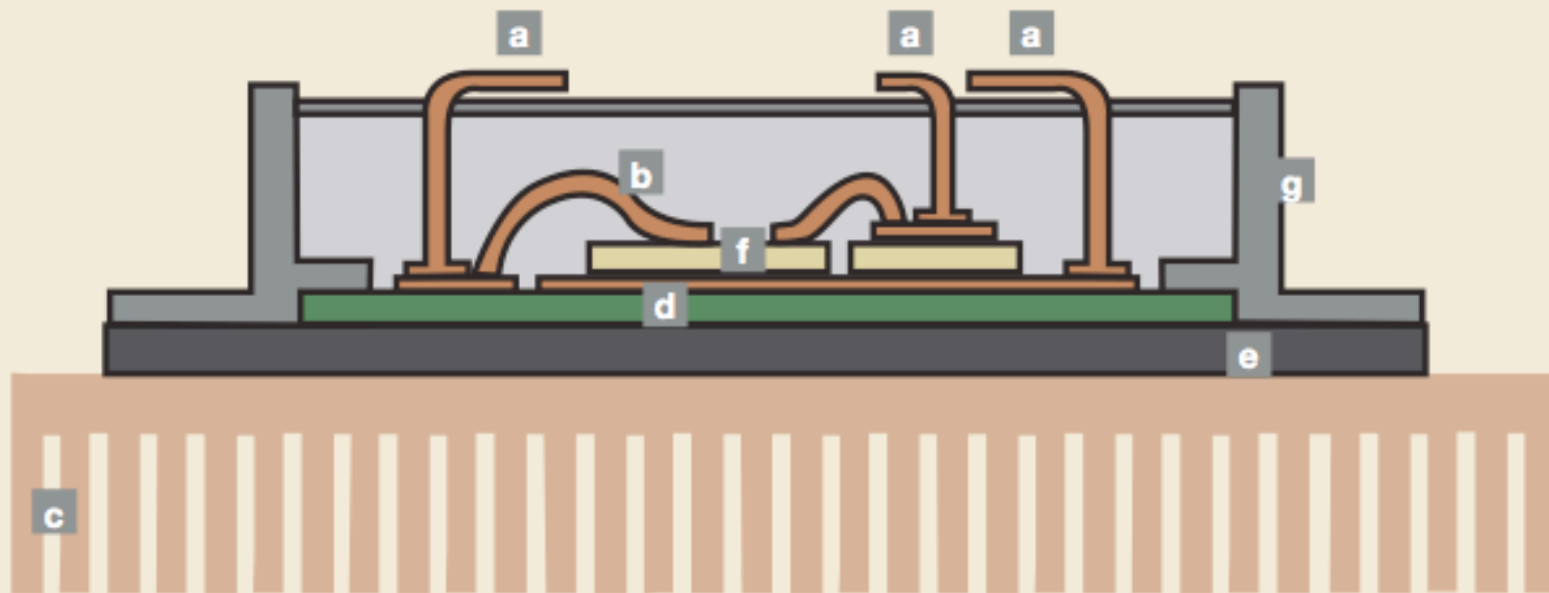
La placa de metal se monta sobre una cerámica que ofrece alta conductividad térmica pero que aísla eléctricamente, y la cerámica se monta sobre una placa de metal que asegura el contacto térmico con el disipador de calor.

La parte superior del módulo se cierra con un casquete de plástico, sobre el que se montan todos los terminales de contacto, tanto de potencia como de control.

El encapsulado tipo módulo es capaz de soportar dispositivos de media y alta potencia, y puede contener varios dispositivos individuales preconectados en una configuración circuital conversora de potencia, por ejemplo un puente rectificador trifásico, formado por seis dispositivos individuales.

Es el tipo de encapsulado más moderno, y tiende a ser empleado cada vez en mayor número de aplicaciones.

- a** Conexiones de Energía y de control
- b** Hilo de conexión
- c** Disipador de calor
- d** Cerámica (normalmente AlN)
- e** Placa base (norm. AISIC)
- f** Semiconductor
- g** Caja



Encapsulado tipo "módulo de potencia", en una aplicación que contiene dos dispositivos semiconductores (rectángulos amarillos).

Especificaciones de montaje

(encapsulados tipo “perno” y “hockey puck”)

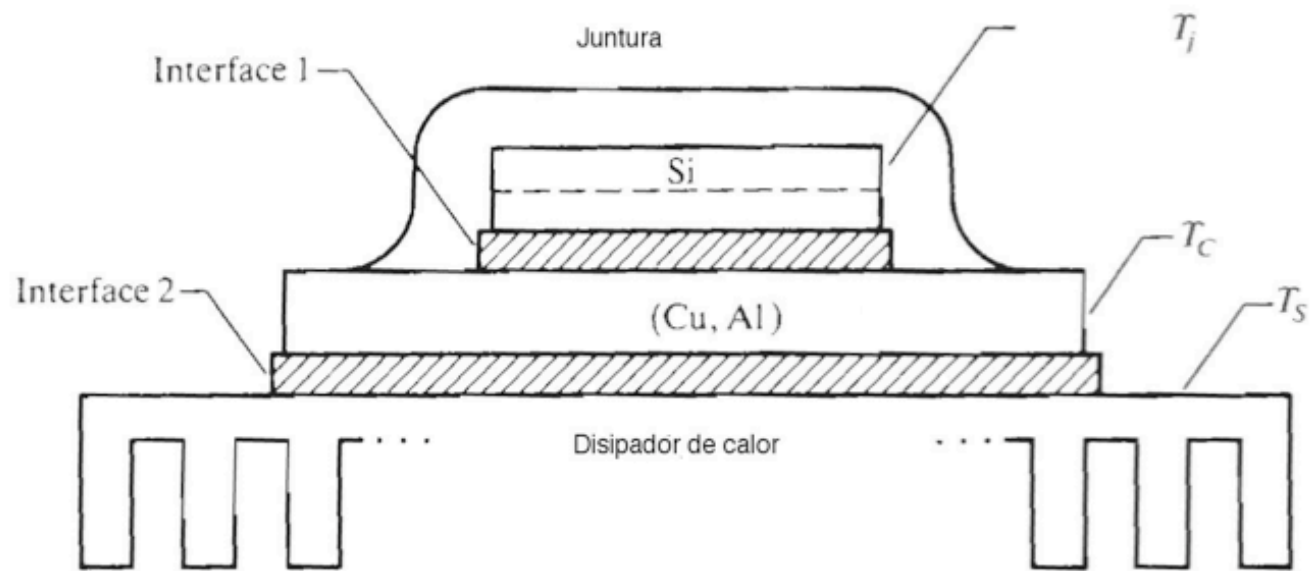
Tor_{min} = Par de apretado mínimo para asegurar contacto térmico y eléctrico adecuados

Tor_{max} = Par de apretado máximo para evitar daños mecánicos a la carcasa del componente

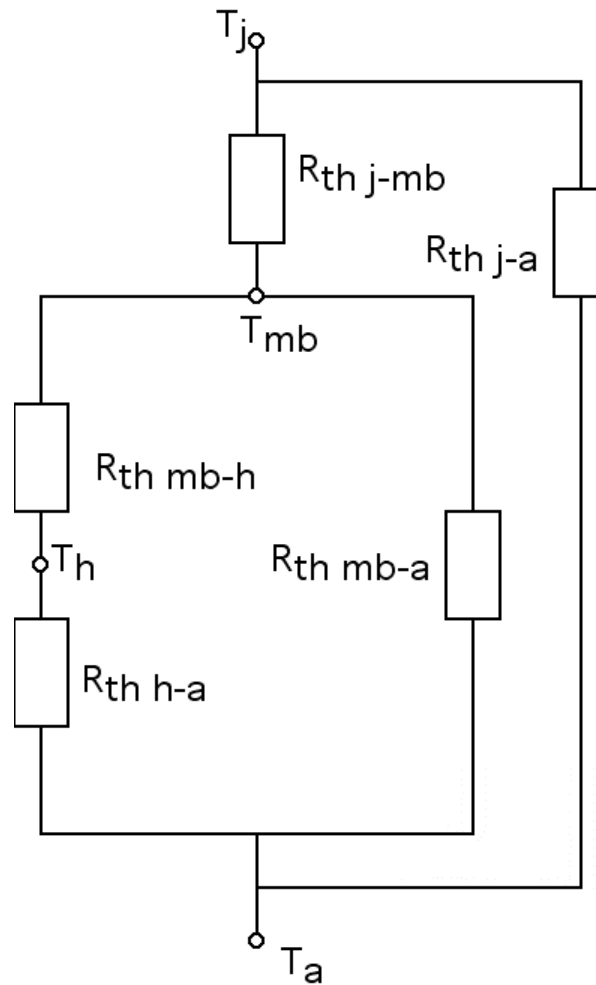
Cálculos del sistema de disipación de calor.

Los cálculos presentados a continuación se basan en el modelo eléctrico unidimensional del flujo térmico originado por la energía disipada en la junta de un dispositivo electrónico de potencia que se asume es la única fuente de calor en la zona de interés, por lo que los resultados son aproximaciones de primer orden y deben ser usados incluyendo márgenes de seguridad adecuados.

Si se desean resultados más precisos debe emplearse un método de cálculo más exacto, que use un modelo de flujo de calor tridimensional calculado por el método de elementos finitos. Así mismo, en el caso de circuitos complejos, con múltiples componentes disipando calor, debe tomarse en cuenta la influencia de todas las fuentes de calor que existen en las proximidades de cada uno de los dispositivos.



Corte esquemático de un dispositivo electrónico de control de potencia encapsulado para operar con disipación de calor en un solo lado.



Modelo térmico resistivo equivalente unidimensional del arreglo dispositivo-disipador

Especificaciones térmicas

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

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

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

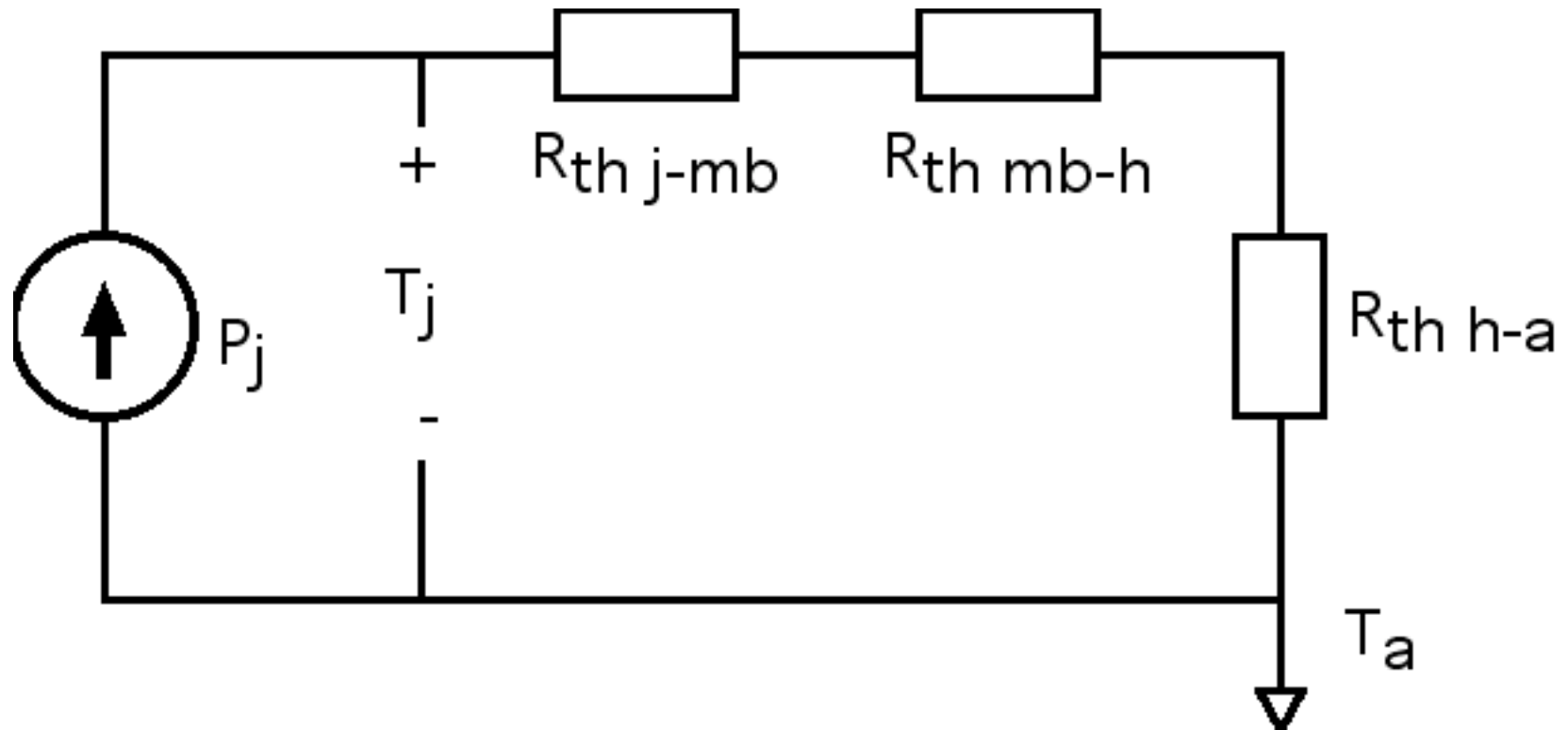
$R_{th\ mb-a}$ = Resistencia térmica carcasa-ambiente

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)



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

El valor de la resistencia térmica de contacto carcasa-disipador ($R_{th\ mb-h}$) en el caso ideal de contacto perfecto entre ambos cuerpos metálicos debería de ser cero.

Este valor no se alcanza en la práctica debido a las imperfecciones inevitables en el acabado de las superficies, por lo que es práctica usual aplicar una "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.

Adicionalmente 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 $R_{th\ mb-h}$.

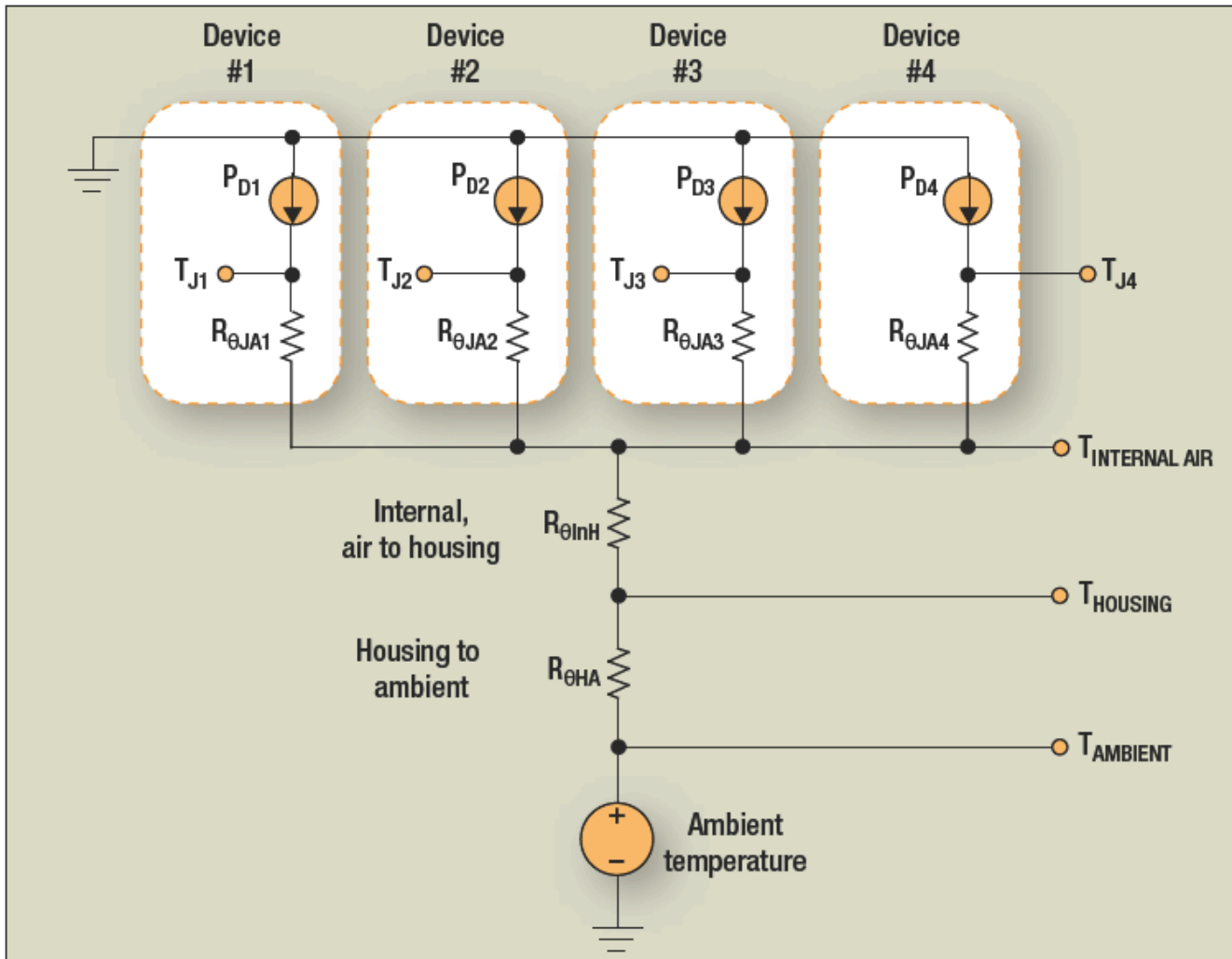
En general tanto los fabricantes de los elementos aislantes como los de la grasa térmica indica la resistencia térmica de la misma en condiciones de uso razonable (capas no muy gruesas, con apretado dispositivo-disipador de acuerdo con las normas del fabricante).

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

<i>Package</i>	<i>Insulating washer</i>	$R_{\theta_{c-s}}$ (K/W)	
		<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

Tabla de valores típicos para la resistencia térmica de contacto carcasa-disipador

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 múltiples 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.

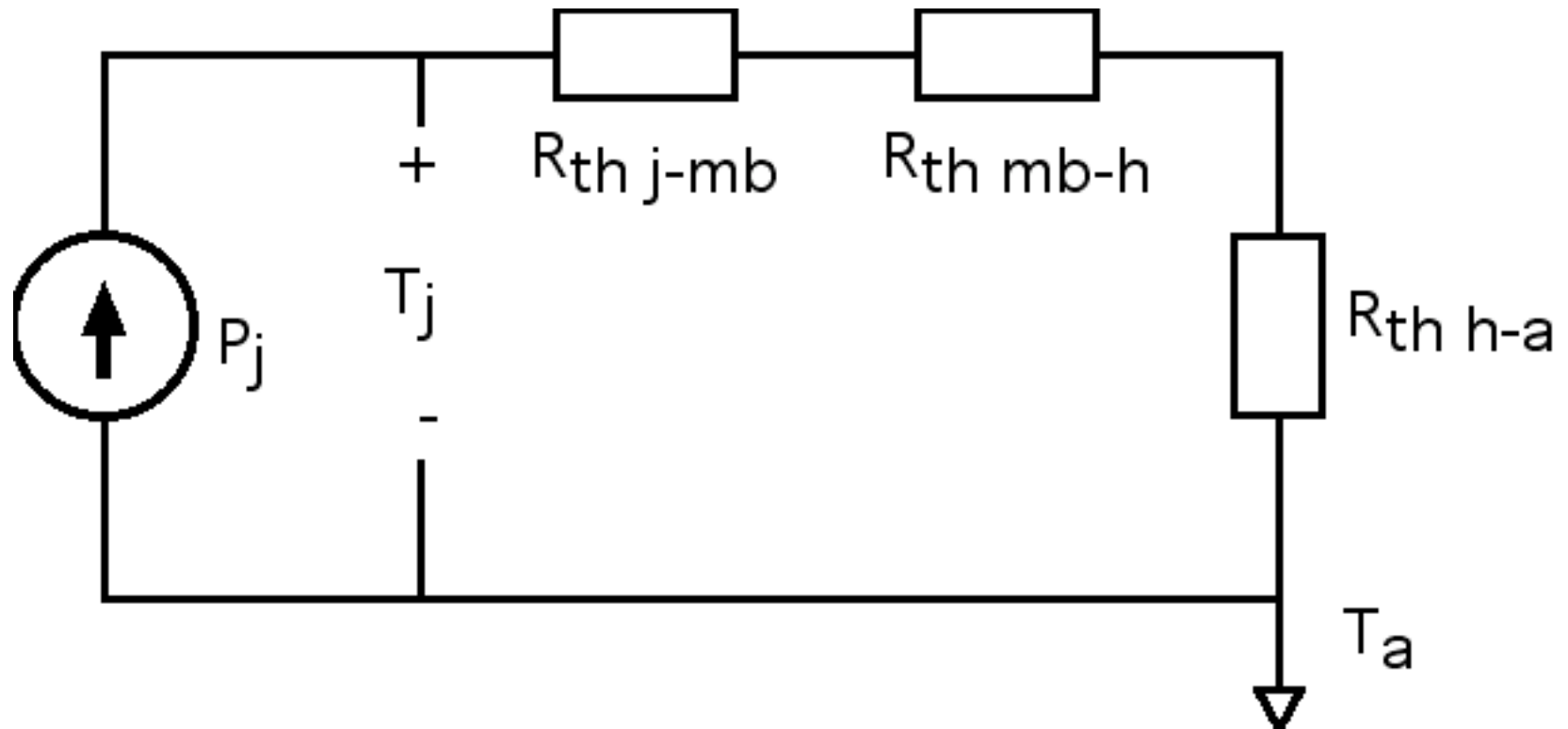
En este caso el primer punto de referencia común a los cuatro es la temperatura del aire en el gabinete cerrado, que es común a los cuatro dispositivos una vez que se alcanza equilibrio térmico.

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, $R_{\Theta HA}$.

Nótese que 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.

Un caso equivalente ocurre cuando varios dispositivos están conectados a un disipador de calor común. En este caso la temperatura de referencia común será la temperatura del disipador, que en primera aproximación se considera igual en toda la superficie de contacto con los dispositivos.

Cálculo de la resistencia térmica máxima posible del disipador de calor para asegurar que no se supere la temperatura máxima en la junta, caso simple con un solo dispositivo.



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

Cálculo del disipador de calor.

Del circuito equivalente térmico:

$$T_{jM} = T_a + P_{av} (R_{thj-mb} + R_{thmb-h} + R_{thh-a})$$

$$R_{thh-a} = \frac{T_{jM} - T_a}{P_{av}} - (R_{thj-mb} + R_{thmb-h})$$

Donde:

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

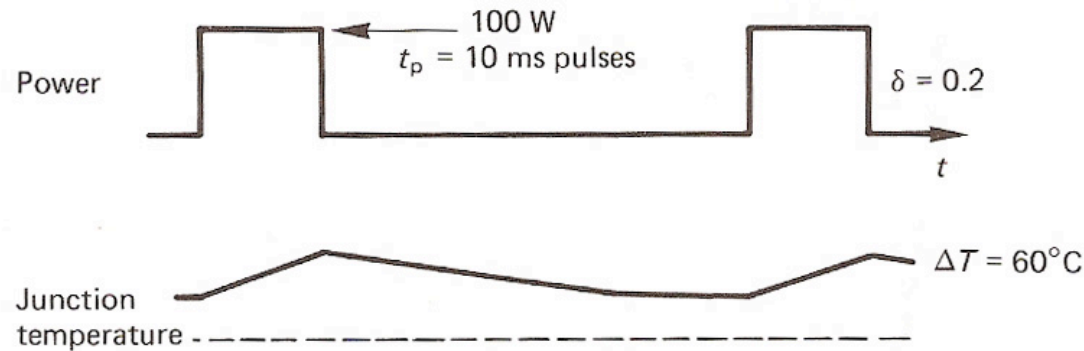
T_{aM} es la máxima temperatura ambiente esperada en el diseño.

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

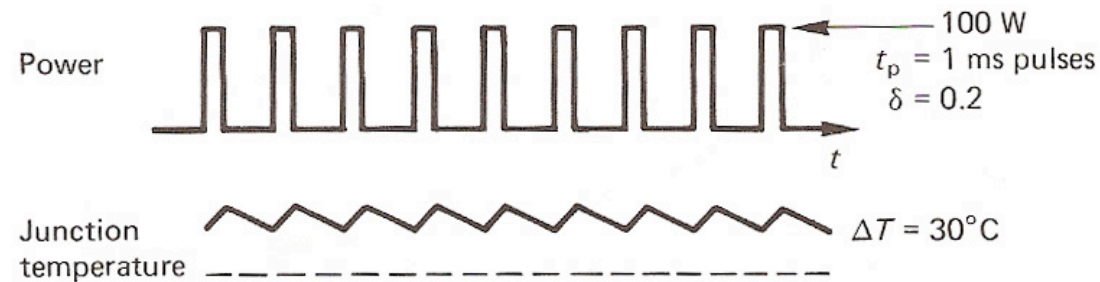
Tanto T_{aM} como P_{avM} deben calcularse incluyendo el factor de seguridad que se desee incluir en el diseño.

La ecuación anterior, totalmente estática, considera que el ciclo de trabajo del dispositivo es lo suficientemente corto en relación con la inercia térmica del sistema físico como para esta actúe como un filtro pasa-bajo, de forma que la temperatura del sistema no pueda responder a los cambios rápidos en la potencia disipada en la juntura que se producen en los diferentes intervalos de conducción (encendido, apagado, conmutación de encendido y conmutación de apagado) y sea en todo tiempo prácticamente igual a la calculada en base al valor promedio de la energía disipada.

Sin embargo, como se observa en la figura, si se aumentan proporcionalmente tanto el tiempo de encendido (t_{on}) como la duración del ciclo completo, (T), manteniendo el ciclo de trabajo constante, aunque la potencia promedio entregada permanece constante, la variación de temperatura instantánea en la junta (ΔT) aumenta y, si la inercia térmica del sistema lo permite, la temperatura pico máxima puede llegar a superar la máxima permitida en la junta, aunque la temperatura promedio sea aceptable.



(a)



(b)

Efecto de la duración de los pulsos en las oscilaciones de temperatura en la junta.

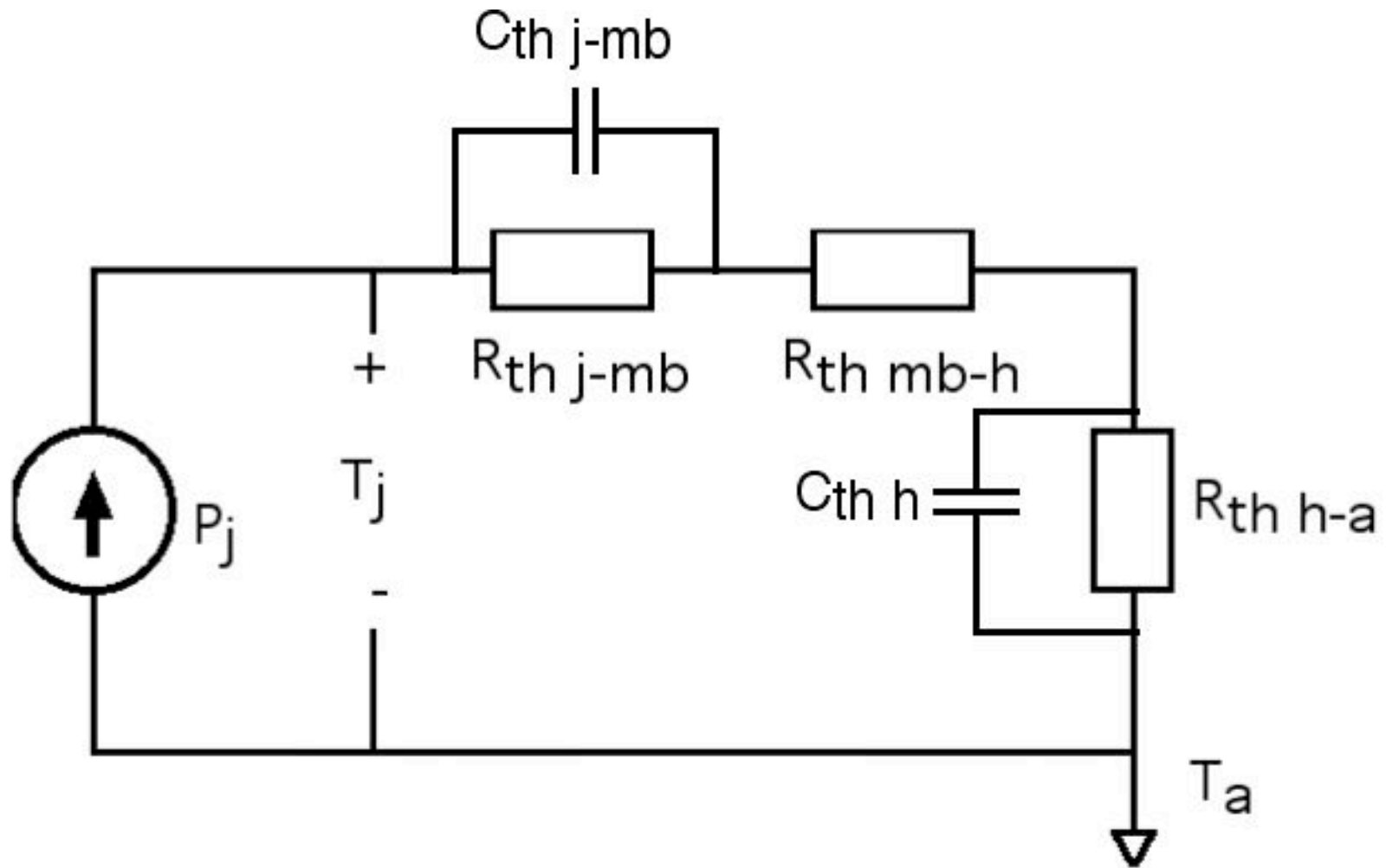
(a): tren de pulsos de baja frecuencia.

(b): tren de pulsos de alta frecuencia.

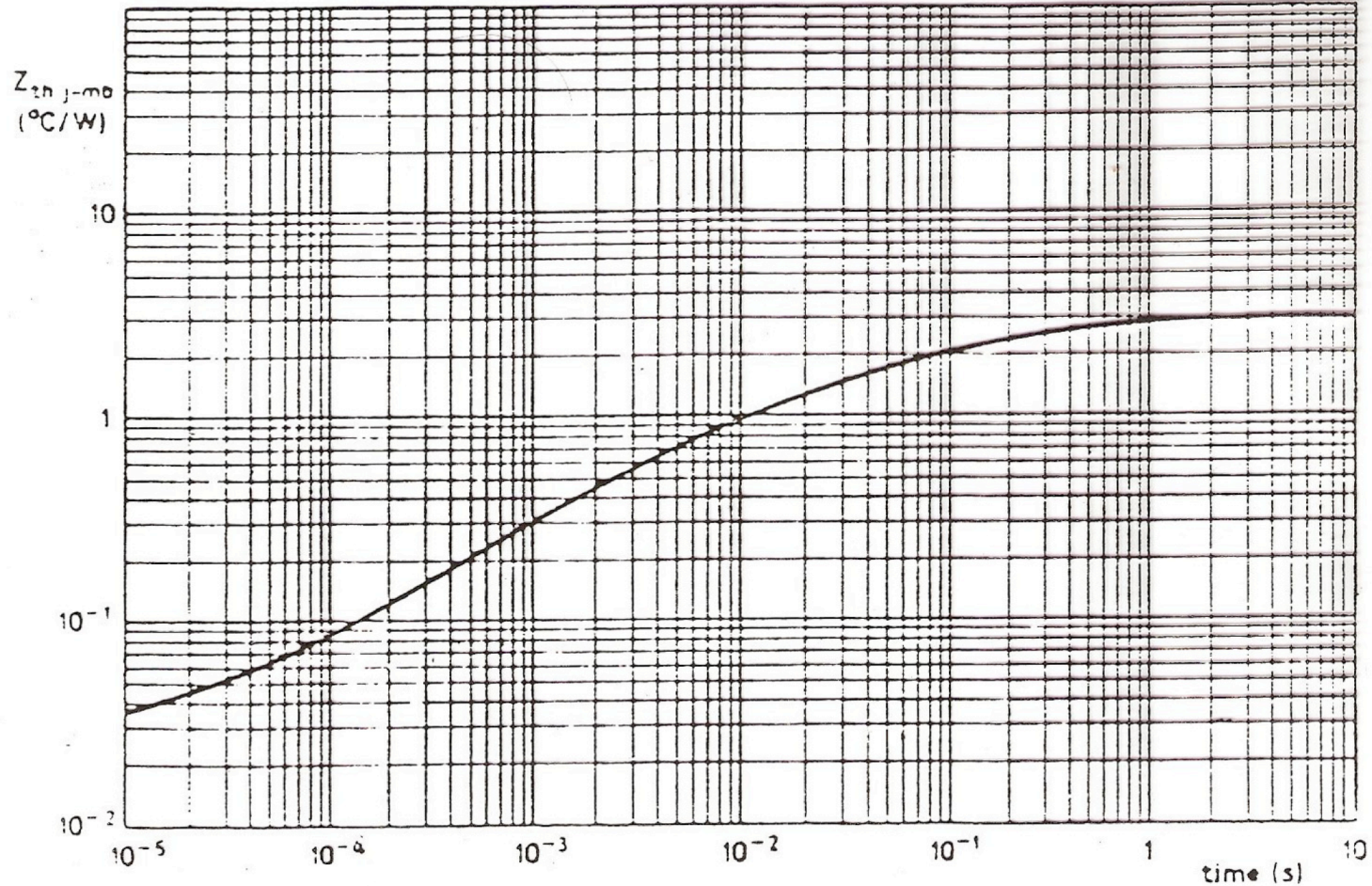
Es por lo tanto necesario, una vez que se conoce la temperatura promedio, determinar el valor del ΔT posible durante el intervalo de conducción t_{onM} posible en el sistema teniendo en cuenta la dinámica del proceso.

Para realizar este cálculo es preciso reemplazar los valores de resistencia térmica por los de impedancia térmica dados por el fabricante, que tienen en cuenta la capacidad térmica de los elementos materiales.

La impedancia térmica debe ser determinada de la curva dada por el fabricante en función de la duración del intervalo de interés.



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



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

En caso de que resulte necesario realizar un cálculo del equilibrio térmico dinámico del sistema, es necesario modificar el modelo térmico unidimensional equivalente incluyendo las capacidades térmicas de los elementos físicos: C_{thjc} (capacidad térmica del conjunto dispositivo-carcasa) y C_{thh} (capacidad térmica del disipador de calor), que quedarían conectadas en paralelo con las correspondientes resistencias térmicas.

Así mismo hay que recordar que los procesos de calentamiento y enfriamiento no son simétricos, puesto que la temperatura final en un intervalo de calentamiento puede ser potencialmente muy elevada, mientras que el enfriamiento se detiene una vez que la temperatura de la junta llega a la temperatura ambiente, y la temperatura sigue estabilizada en ese valor incluso si continúa el intervalo de baja o nula disipación de potencia en la junta.

Selección del disipador de calor.

Una vez calculado el valor de la resistencia térmica máxima, R_{thh-aM} , se pueden presentar dos situaciones:

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

Principios de cálculo de disipadores pasivos.

Resistencia térmica disipador-ambiente, R_{thh-a} ,
en K°/W de un disipador de calor metálico
rectangular plano

$$R_{thh-a} \approx \left(\frac{3,3}{\sqrt{\lambda w}} C_f^{0,25} \right) + \left(\frac{650}{A} C_f \right)$$

donde: λ es la conductancia térmica del
material en W/K°

w es el espesor del material

A es el área de la lámina

C_f factor empírico que considera la orientación
y la emisividad superficial de la lámina.

<i>Material</i>	λ (W/K cm)
aluminium	2.08
copper	3.85
brass	1.1
steel	0.46
mica	0.006
beryllium oxide	2.10

Tabla de conductancias térmicas (W/K°) de distintos materiales.

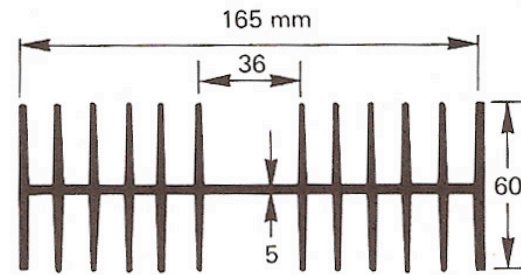
<i>Surface position</i>	<i>C_f</i>	<i>Shiny</i>	<i>Blackened</i>
vertical		0.85	0.43
horizontal		1.0	0.50

Tabla del factor C_f para dos orientaciones y dos acabados superficiales de la lámina

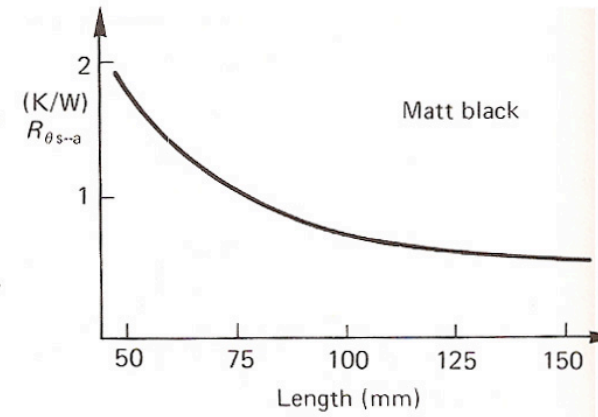
En la práctica el diseño de disipadores efectivos es un trabajo especializado que suele quedar fuera del área de expertise del ing. electrónico de potencia, así que la mejor solución es buscar en los catálogos de los proveedores especializados un disipador que ofrezca una resistencia térmica menor o igual a la calculada para la aplicación.

Las alternativas de enfriamiento son:

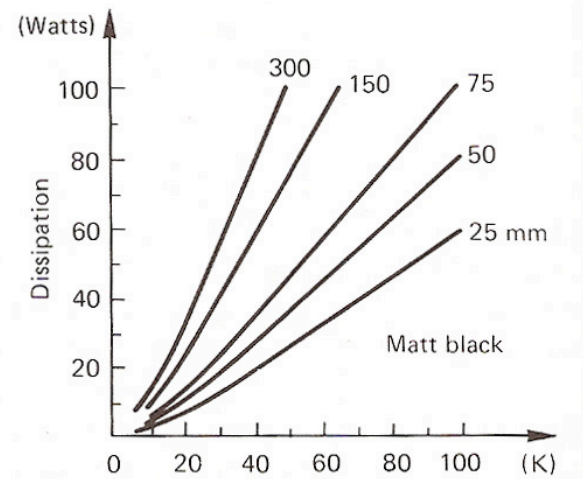
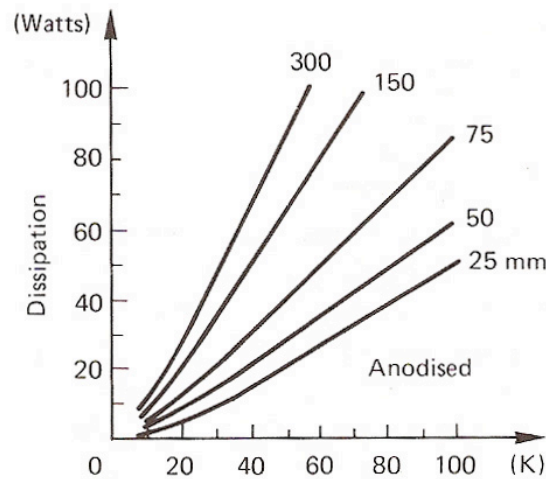
- 1.- Disipador con enfriamiento por convección natural en aire quieto (disipación pasiva).
- 2.- Disipador con enfriamiento por ventilación forzada.
- 3.- Disipador con enfriamiento por evaporación.
- 4.- Disipador con enfriamiento por circulación de líquido.



(a)



(b)

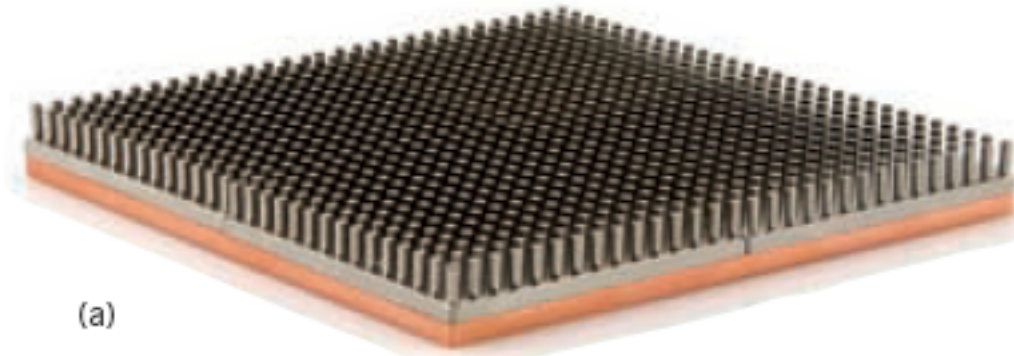


Curvas características de un disipador de calor típico de baja potencia para enfriamiento por convección natural.

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.



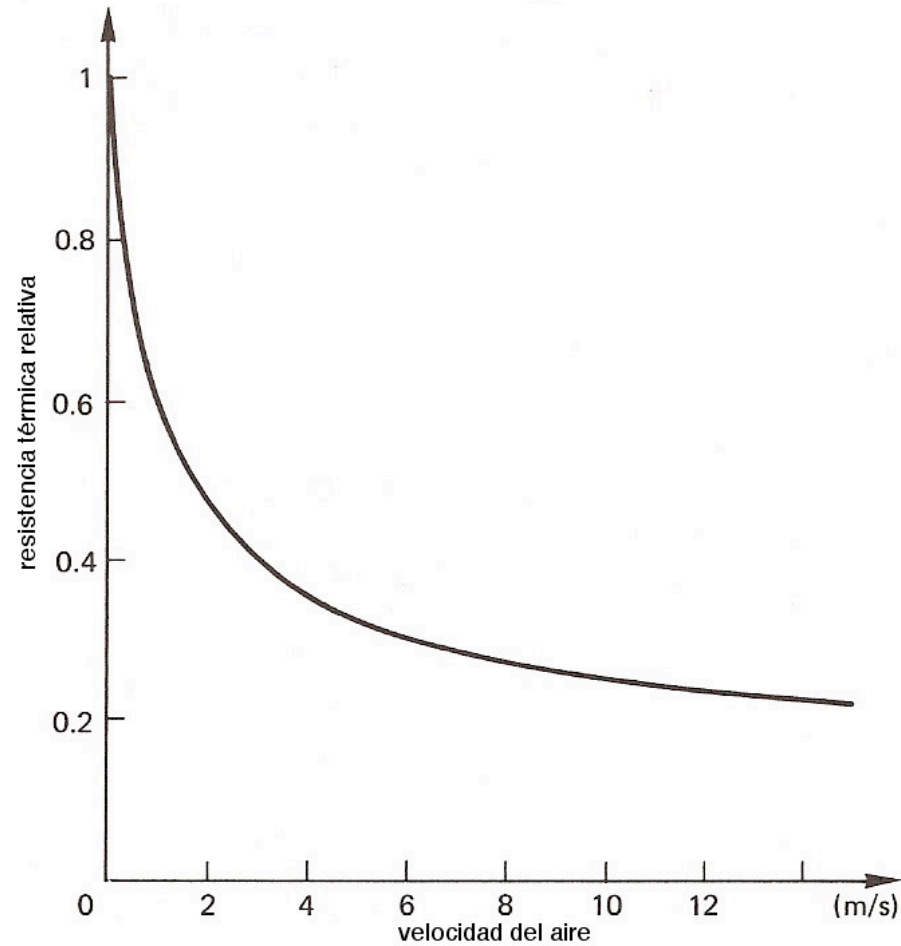
Disipador bimetálico. Base de contacto con el componente de cobre (color rojizo), cuerpo y aletas de aluminio (color gris).

Disipador para enfriamiento de dispositivos de montaje superficial en encapsulado plano.

La placa de cobre hace contacto con la parte superior del dispositivo.

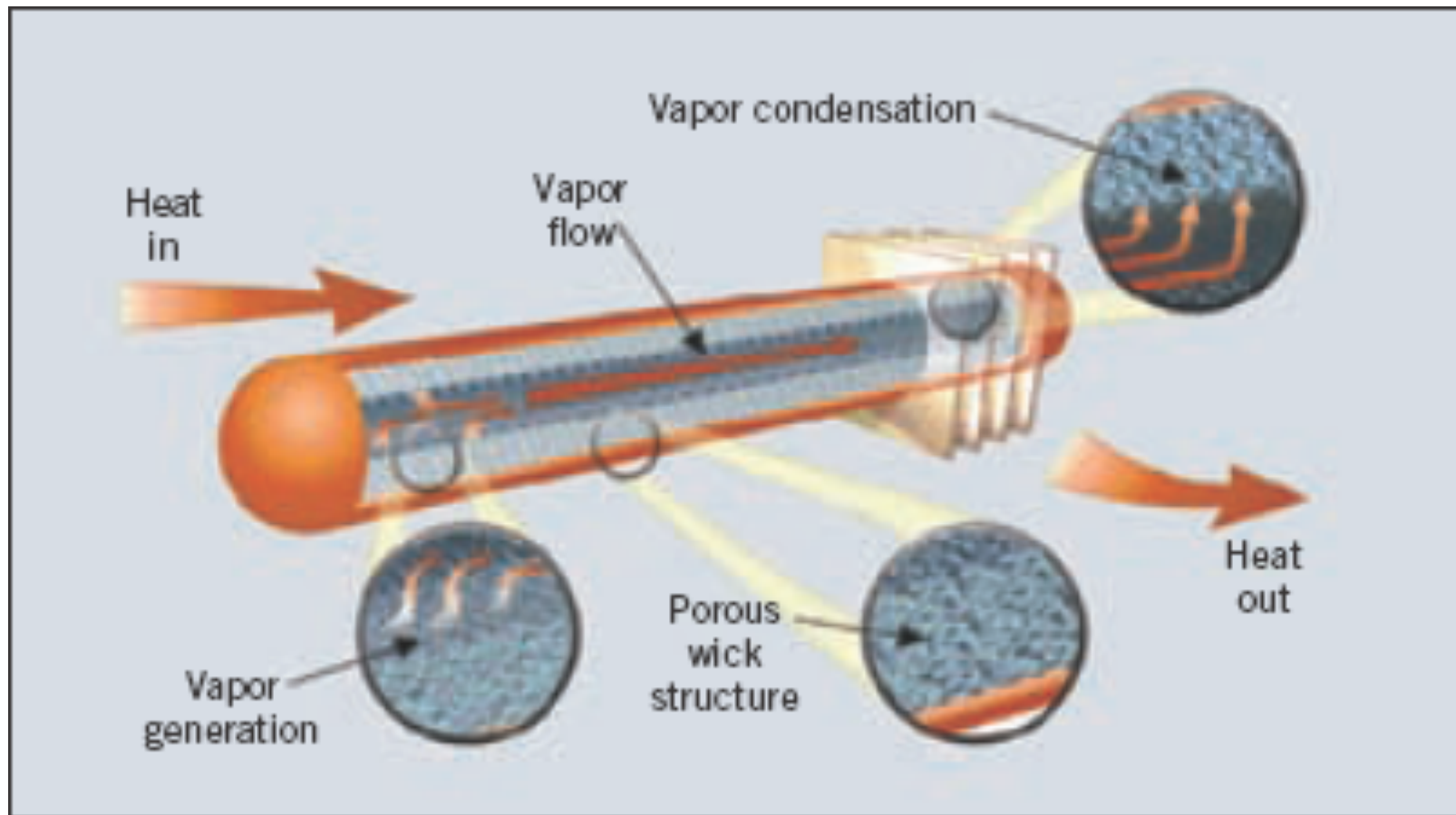
Si no se encuentra un disipador de calor cuya resistencia térmica en "aire quieto" sea la adecuada para el diseño considerado, se puede intentar resolver el problema aplicando ventilación forzada (disipación activa), lo que reduce la resistencia térmica del disipador por debajo de los valores calculados 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 se observa en la curva, la resistencia térmica del disipador se reduce al aumentar la velocidad del aire, pero la reducción es asintótica a un valor límite que usualmente es del orden del 20% del valor de la resistencia térmica del disipador en aire quieto (disipación pasiva).



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

Enfriamiento por cambio de fase líquido/gas con tubo de calor ("heat pipe").



En esta alternativa el dispositivo esta conectado a un tubo de calor (heat pipe) sellado, en cuyo interior hay un líquido cuyo punto de ebullición se calcula para que se evapore a la temperatura que existe en el "lado caliente", extremo del tubo en contacto con el dispositivo, lo que remueve de ese lado el "calor de evaporación".

El vapor sube por conductos internos en el tubo, trasladando el calor hasta el lado frío, el extremo del tubo conectado a un conjunto de aletas para disipar calor, donde se enfría y condensa.

El líquido frío, más pesado, cae por gravedad hasta el lado caliente, cerrando el ciclo que opera de manera continua mientras exista una diferencia de temperatura adecuada entre el lado caliente y el ambiente (lado frío).

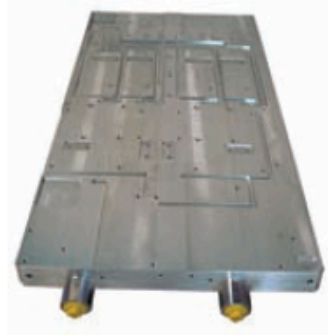
El sistema de transporte de calor es eficiente, ofreciendo resistencias térmicas equivalentes muy bajas, pero por supuesto su capacidad de transporte de energía depende de las características termodinámicas y de la cantidad del líquido presente en el tubo de calor, y de que la diferencia de temperatura 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.

Enfriamiento por circulación de líquido refrigerante.

Si se dispone del caudal de líquido refrigerante necesario, este método permite disipar grandes cantidades de energía térmica, pero tiene la inconveniencia del coste, de requerir de un sistema de tuberías en lazo cerrado para que el líquido fluya del dispositivo a enfriar hasta un intercambiador de calor con el medio ambiente ("radiador") y, una vez enfriado, del radiador al dispositivo.

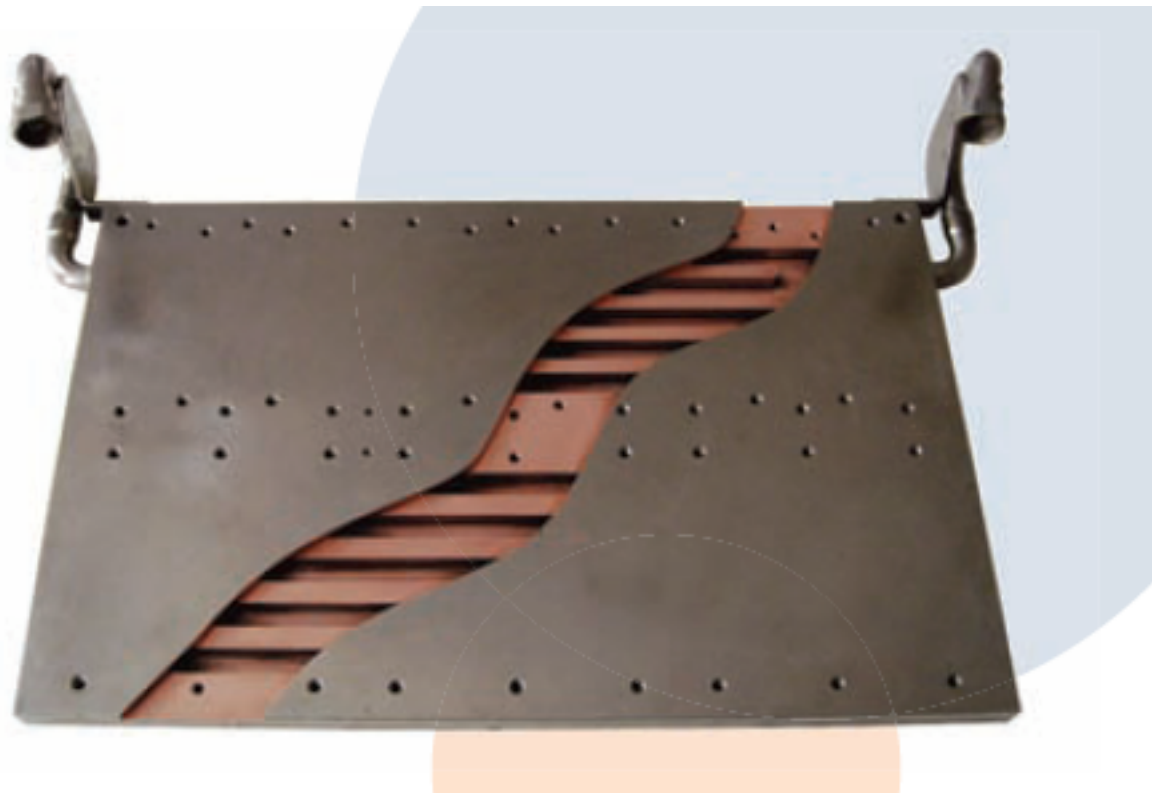
Si la cantidad de energía térmica a disipar es considerable, es necesario aumentar la velocidad de flujo del líquido enfriador mediante una bomba mecánica, y el enfriamiento del radiador requiere ventilación forzada adicional, lo que incluye por lo menos dos motores en el sistema, aumentando adicionalmente el costo, la complejidad y la posibilidad de fallas.

Si la potencia a disipar justifica esta solución, lo más aconsejable es dejar el diseño del sistema térmico en manos de un experto.



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 encapsulados tipo "hokey pucks". Aquí el enfriamiento puede ser bilateral, con el dispositivo colocado entre dos placas de base.



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.