DISIPACIÓN DE CALOR

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

0. OBJETIVO

En este tema se pretende abordar toda la materia relacionada con la cuestión tan importante del calor, su disipación, su evacuación y su influencia en el correcto o inadecuado funcionamiento de los circuitos integrados y de los semiconductores que los conforman, puesto que en electrónica, la refrigeración juega un papel muy importante en la optimización del funcionamiento y vida útil de los semiconductores y circuitos.

De esta forma, este capítulo describe las pérdidas que tienen lugar en los semiconductores de potencia, sus características térmicas y las técnicas que se utilizan para enfriar los componentes.

1. INTRODUCCIÓN

El parámetro con mayor impacto en el diseño de componentes semiconductores de potencia es la potencia que se genera y que se tiene que disipar. Esta disipación de potencia comporta subidas de temperatura y fractura de uniones, debido a la desigual expansión entre el sustrato de silicio y sus uniones con el encapsulado. Deben tomarse especiales precauciones para disipar este calor al ambiente con el objeto de evitar excesivas subidas de temperatura en el componente.

Por lo tanto, el estudio térmico de los dispositivos semiconductores es fundamental para un rendimiento óptimo de los mismos. Siempre que por un elemento conductor circula una corriente eléctrica, se generan unas pérdidas de energía y potencia (efecto Joule) que se transforman en calor elevando la temperatura, haciendo peligrar la vida del dispositivo y provocando una reducción de la vida útil del mismo.

El calor que se produce en el interior del dispositivo semiconductor debe ser disipado rápidamente, con el fin de evitar que la temperatura interna llegue al límite máximo permitido. Si este incremento de temperatura es excesivo e incontrolado, puede llegar a destruir al elemento en cuestión.

2. PÉRDIDAS DE POTENCIA EN SEMICONDUCTORES

Hay cuatro fuentes principales de pérdida de potencia en un semiconductor:

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

- **Pérdida de potencia durante la conducción directa**. Para un diodo, por ejemplo, es el producto entre la corriente que atraviesa el componente y la caída de tensión directa en sus bornes. Lo mismo se aplica para el tiristor, pero ya que el ángulo de conducción puede variar, normalmente en las hojas de datos se dan curvas de pérdida de potencia como en la figura 1, donde se utiliza la corriente promedio sobre todo el ciclo de conducción. Para un transistor, la pérdida de conducción directa está dada por el producto entre la corriente y la tensión de colector, a la que se añade la disipación de base, igual al producto entre la corriente y la tensión de base. Normalmente las pérdidas de base son pequeñas comparadas con las pérdidas de colector.

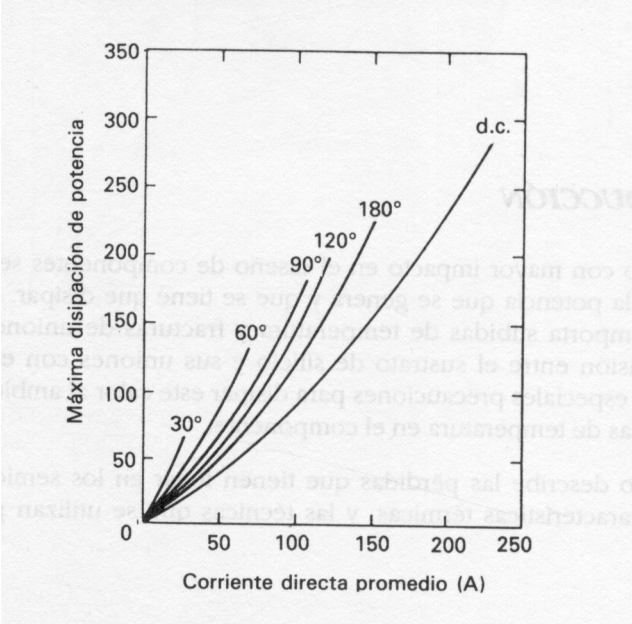


Figura 1: Curvas de pérdida de potencia de un tiristor

- **Pérdidas por fugas**, producidas cuando el semiconductor de potencia está bloqueando tensión en dirección directa o inversa. Esto puede ocurrir cuando un diodo o tiristor está polarizado en inversa, o cuando un transistor o tiristor está polarizado en directa pero no conectado. Estas pérdidas normalmente son pequeñas en comparación con las pérdidas de conducción directa.

- **Pérdidas de conmutación durante la conexión o desconexión** del semiconductor de potencia. Aunque relativamente pequeñas, estas pérdidas pueden ser apreciables cuando el componente está trabajando a altas frecuencias.

Estas pérdidas pueden ocurrir debido a los procesos graduales de conexión y desconexión, que permiten que fluyan grandes cantidades de corriente mientras la tensión en bornes del componente todavía es alta. Estas pérdidas de conexión y desconexión dan lugar a

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

picos de potencia en la curva de disipación de potencia total, aunque esta pérdida de potencia debido a la conmutación es relativamente pequeña a bajas frecuencias.

- **Pérdidas en el terminal de control del semiconductor de potencia**. La pérdida en la base de un transistor ya se ha considerado como parte de la pérdida de conducción directa en el primer caso, ya que siempre está presente mientras el componente está conduciendo. Sin embargo, los componentes como los tiristores pueden activarse sólo por pulso, por lo que la pérdida de potencia de puerta se puede separar de la pérdida por conducción directa. Normalmente se definen cuatro parámetros: la potencia de pico de puerta, P_{GM}, es decir, el valor máximo del producto entre la corriente de puerta directa y la tensión permisible; la potencia promedio de puerta $P_{G(AV)}$, que es el valor máximo de la corriente de puerta directa y la tensión promediados sobre un ciclo; la potencia pico inversa de puerta P_{GMR}; y la potencia inversa promedio de puerta $P_{GR(AV)}$, valores estos dos últimos que son los correspondientes valores inversos.

3. PROPAGACIÓN DEL CALOR

En todo semiconductor el flujo de la corriente eléctrica produce una pérdida de energía que se transforma en calor, debido al movimiento desordenado en la estructura interna de la unión. Este calor eleva la energía cinética de las moléculas dando lugar a un aumento de temperatura en el dispositivo; si este aumento es excesivo e incontrolado provocará una reducción de la vida útil del dispositivo y en el peor de los casos su destrucción. Es por ello que la evacuación del calor generado en el semiconductor es una cuestión de gran importancia para asegurar el correcto funcionamiento y duración del dispositivo.

La capacidad de evacuación del calor al medio ambiente puede variar según el tipo de encapsulado pero es, en cualquier caso, demasiado pequeña, por lo que es necesario facilitar la transferencia de calor generado al ambiente mediante alguna ayuda adicional consistente en un dispositivo de mayor volumen y superficie conocido como radiador o disipador de calor, el cual hace de puente para evacuar el calor del encapsualdo al medio ambiente.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

4. FORMAS DE TRANSMISIÓN DEL CALOR

La experiencia demuestra que el calor producido por un foco calorífico se propaga por todo el espacio que lo rodea. Esta transmisión de calor puede producirse de tres formas:

- **Conducción**: es el principal medio de propagación del calor en un cuerpo sólido. Se realiza por la transferencia de energía cinética de moléculas, es decir, se transmite por el interior del cuerpo estableciéndose una circulación de calor. La máxima cantidad de calor que puede atravesar un cuerpo es aquella para la cual se consigue una temperatura estable en todos los puntos del cuerpo. En este tipo de transmisión se debe tener en cuenta la conductividad térmica de las sustancias (cantidad de calor transmitido por unidad de tiempo, superficie, gradiente de temperatura, etc.).

- **Convección**: el calor de un sólido se transmite mediante la circulación de un fluido que lo rodea y éste lo transporta a otro lugar; a este proceso se le llama convección natural. Si la circulación del fluido está provocada por un medio externo se denomina convección forzada.

- **Radiación**: el calor se transfiere mediante emisiones electromagnéticas que son irradiadas por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 ºK. El estado de la superficie influye en gran medida en la cantidad de calor radiado. Las superficies mates son más favorables que las pulidas y los cuerpos negros son los de mayor poder de radiación; por este motivo se efectúa un ennegrecimiento de la superficie radiante. La transferencia de calor por radiación no se tiene en cuenta puesto que a las temperaturas a las que se trabaja, ésta es prácticamente despreciable.

5. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE LOS SEMICONDUCTORES

Un semiconductor de potencia montado en un disipador puede analizarse con analogía a los circuitos eléctricos, de forma que el flujo de corriente se reemplaza por transferencia de calor y las impedancias eléctricas por resistencias térmicas. La unidad de transferencia de calor se mide en J/s o W, y la unidad de resistencia térmica en ºC/W. Por lo tanto, si Q es la potencia térmica que se está disipando en un componente, en vatios, y dT es la diferencia de temperatura en el componente de grados centígrados, entonces la resistencia térmica R_{th} del componente está dada por R_{th}=dT/Q (ºC/W).

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Para que un semiconductor disipe la potencia adecuada, es necesario mantener la temperatura de la unión por debajo del máximo indicado por el fabricante.

El paso de la corriente eléctrica produce un aumento de la temperatura de la unión (T_j). Si ésta se quiere mantener a un nivel seguro, debemos evacuar al exterior la energía calorífica generada por la unión. Para que se produzca un flujo de energía calorífica de un punto a otro, debe existir una diferencia de temperatura. El calor pasará del punto más caliente al más frío, pero aparecen factores que dificultan este paso, llamados resistencias térmicas y que vienen a indicar el grado de dificultad para evacuar el calor de un dispositivo (ºC/W).

Por lo tanto, aprovechando la ley de Ohm se realiza la siguiente comparación eléctrica mostrada en la figura 2. En dicho símil, se asemeja las temperaturas a tensiones, las resistencias térmicas a las resistencias óhmicas y el flujo de calor o potencia disipada a una corriente eléctrica.

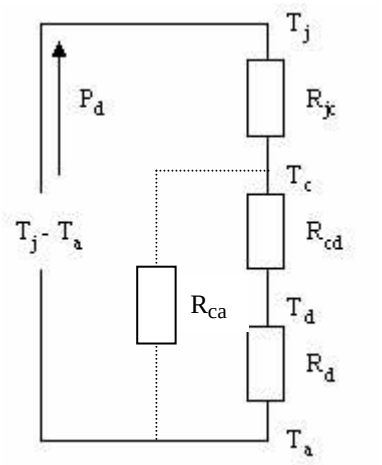


Figura 2: Equivalente circuital ley de Ohm eléctrica/térmica

Inicialmente, cuando no se tiene elemento refrigerador, radiador o disipador, R_d en la figura 2, la resistencia es $R_{jc} + R_{ca} = R_{ja}$ que nos dará la máxima potencia que es capaz de disipar el dispositivo cuando no se coloca ningún elemento refrigerador. Como R_{ca} es elevada, se introduce un elemento disipador que reducirá la resistencia final: $R_{ca} >> R_{cd} + R_d$.

Al igual que en un circuito eléctrico, se puede decir que:

$$T_j - T_a = P \cdot R_{ja} \qquad (1)$$

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

ecuación que corresponde a la formulación matemática de la llamada Ley de Ohm térmica y donde

T_j = temperatura de la unión del semiconductor

T_a = temperatura ambiente

P_d = potencia que disipa el dispositivo

R_{ja} = resistencia térmica entre la unión y el ambiente

De la figura 2 se obtiene la expresión para cuando existe elemento disipador:

$$P_d = \frac{T_j - T_a}{R_{jc} + R_{cd} + R_d} \quad (2)$$

y la expresión para cuando no existe elemento disipador:

$$P_d = \frac{T_j - T_a}{R_{jc} + R_{ca}} \quad (3)$$

La nomenclatura y el significado de cada uno de los parámetros que intervendrán de aquí en adelante para el cálculo de disipación de calor, potencia disipada, etc., es el que a continuación se muestra:

$T_{jmáx}$: temperatura máxima que puede soportar la unión del semiconductor sin fundirse

T_j: temperatura alcanzada por la unión del dispositivo durante su funcionamiento

$R_{jc} = R_{\theta JC} = R_{th\ j\text{-}c} = R_{th\ j\text{-}mb}$: resistencia térmica unión - encapsulado

$R_{cd} = R_{\theta CHS} = R_{th\ mb\text{-}h}$: resistencia térmica encapsulado - disipador

R_d: resistencia térmica disipador - ambiente

$R_{ja} = R_{\theta JA} = R_{th\ j\text{-}a}$ = resistencia térmica unión - ambiente

R_{ca}: resistencia térmica encapsulado - ambiente

R_{dv}: resistencia térmica del disipador, con ventilador

P_d: potencia que se desea hacer disipar al dispositivo semiconductor

Wat: potencia máxima que el elemento puede disipar siendo la temperatura del encapsulado de 25ºC

T_c: temperatura del encapsulado

T_d: temperatura del disipador

T_a: temperatura ambiente

F: factor de corrección cuando se utiliza ventilador

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

K: factor de corrección para fijar el valor de la T_j, conocida la $T_{jmáx}$

$C_{\theta C}$: capacidad térmica del encapsulado

El origen de estos datos es muy diverso. Algunos vendrán dados en tablas y manuales; otros deberán ser establecidos por nosotros mismos; y otros representan las incógnitas del problema y se obtendrán de los cálculos efectuados.

6. RESISTENCIAS TÉRMICAS

En la figura 3 se muestra la igualdad entre el circuito equivalente de resistencias térmicas y los elementos en un montaje real.

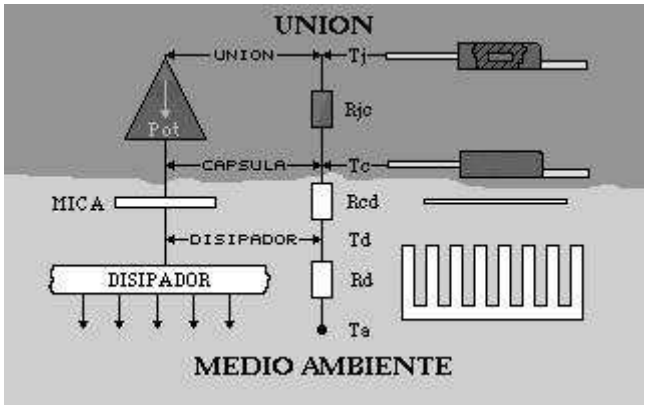


Figura 3: Comparativa con los elementos de un montaje real

6.1. Resistencia unión - encapsulado (R_{jc})

En este caso el foco calorífico se genera en la unión del propio cristal semiconductor, de tal forma que el calor debe pasar desde este punto al exterior del encapsulado.

Generalmente este dato lo suministra el fabricante y dependerá del tipo de encapsulado del dispositivo. Puede venir dado bien directamente o bien indirectamente en forma de curva de reducción de potencia (potencia máxima capaz de disipar (pérdidas) en función de la temperatura del encapsulado). En la figura 4 se muestra un ejemplo de este tipo de curva.

Dicha figura muestra la potencia en función de la temperatura del encapsulado. En ella la pendiente de la recta dada es la resistencia unión - encapsulado. La fórmula que se utiliza para el cálculo de esta resistencia es:

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

$$R_{jc} = \frac{T_{jmax} - T_c}{P_d} \quad (4)$$

donde normalmente T_c vale 25 ºC.

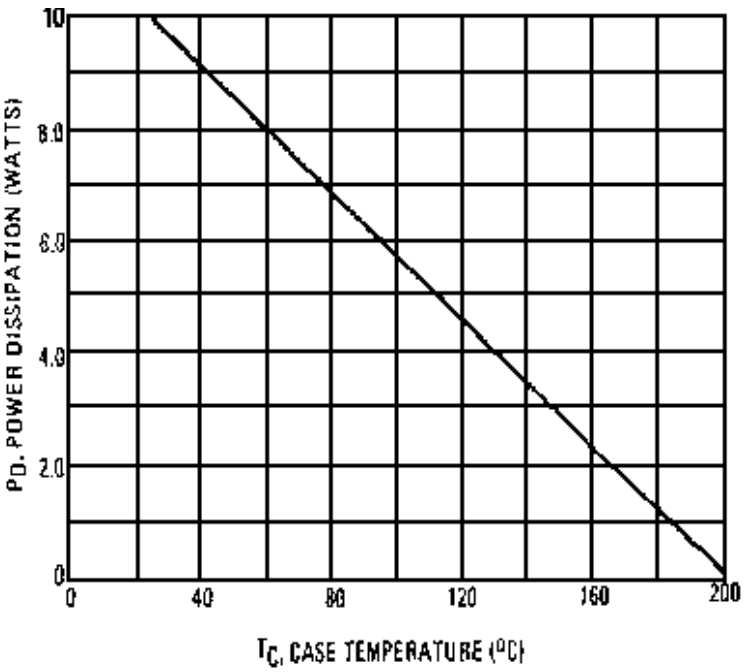


Figura 4: Curva de reducción de potencia

Estos datos se obtienen de la curva de reducción de potencia, que será propia de cada dispositivo. Deberemos de tener en cuenta que P_d es la dada por el fabricante y no la que disipará el dispositivo en el circuito.

6.2. Resistencia encapsulado - disipador (R_{cd})

Es la resistencia térmica entre el semiconductor y el disipador. Este valor depende del sistema de fijación entre el disipador y el componente y del estado de planitud y paralelismo de las superficies de contacto, puesto que a nivel microscópico, solo contactan por unos puntos, quedando huecos de aire que entorpecen la transmisión del calor.

También depende del tipo de material que se interponga entre ambas superficies de contacto. Para mejorar este contacto y/o aislar eléctricamente las dos superficies, se suelen interponer materiales, entre el encapsulado y el disipador, que suelen ser de dos tipos:

- Pastas conductoras de calor, que pueden ser o no ser conductoras de la electricidad.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

- Láminas aislantes eléctricas que se pueden emplear conjuntamente con pastas de siliconas conductoras de calor como mica, kelafilm, etc. También las hay conductoras de calor que no precisan pasta de silicona.

El tipo de contacto entre encapsulado y disipador puede ser:

- Directo (A)
- Directo con pasta de silicona (B)
- Directo con mica aislante (C)
- Directo con mica aislante y pasta de silicona (D)

resultando $R_B < R_A < R_D < R_C$.

El valor de esta resistencia térmica influye notablemente en el cálculo de la superficie y longitud que debe disponer la aleta que aplicaremos al dispositivo a refrigerar. Cuanto más baja es R_{cd} menor será la longitud y superficie de la aleta requerida.

Por lo tanto, se puede decir que cuando no sea necesario aislar el dispositivo, el tipo de contacto que más interesa es el directo con pasta de silicona, ya que da el menor valor de R_{cd} y si hubiese que aislar con mica interesa montar mica y pasta de silicona ya que la R_{cd} es menor que si se monta solo con mica. Por ello, se puede obtener la siguiente conclusión: la mica aumenta la R_{cd} mientras que la pasta de silicona la disminuye y, como se ha dicho, cuanto más pequeña sea la R_{cd} menor superficie de aleta refrigeradora.

6.3. Resistencia del disipador (R_d)

Representa la oposición al paso por convección del flujo calorífico al aire a través del elemento disipador. Este dato será, en la práctica, la incógnita principal del problema, puesto que según el valor que resulte del cálculo, así será el tipo de aleta que se empleará. Depende de muchos factores como son la potencia a disipar, las condiciones de la superficie, la posición de montaje y en el caso de disipadores planos factores como el grosor del material y el tipo de encapsulado. Para el cálculo de la resistencia se pueden utilizar las siguientes fórmulas (según la figura 2):

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

$$R_d = \frac{T_j - T_a}{P_d} - (R_{jc} + R_{cd})$$

$$R_d = \frac{T_d - T_a}{P_d} \qquad (5)$$

$$R_d = R_{ja} - (R_{jc} + R_{cd})$$

Este valor de R_{ja} no es el que da el fabricante ya que éste la suministra sin disipador, y la que hay que utilizar es con disipador. El fabricante la facilita como suma de R_{jc} y R_{ca} puesto que ignora el tipo de disipador que se utilizará.

Una vez calculada la R_d se pasa a elegir la aleta refrigeradora. Para la elección de la aleta, habrá que tener en cuenta que el tipo de encapsulado del dispositivo a refrigerar sea el adecuado para su montaje en la aleta disipadora que se haya elegido así como la longitud y superficie necesaria del disipador.

Después de cumplir la condición anterior hay que calcular la longitud o la superficie del disipador elegido. Para ello es necesario disponer de uno de los dos tipos de gráficas que ofrecen los fabricantes de disipadores: R_d-longitud y R_d-superficie.

Según la gráfica de que se disponga se obtendrá un valor de longitud o un valor de superficie de disipador que hay que montar para refrigerar adecuadamente el dispositivo semiconductor.

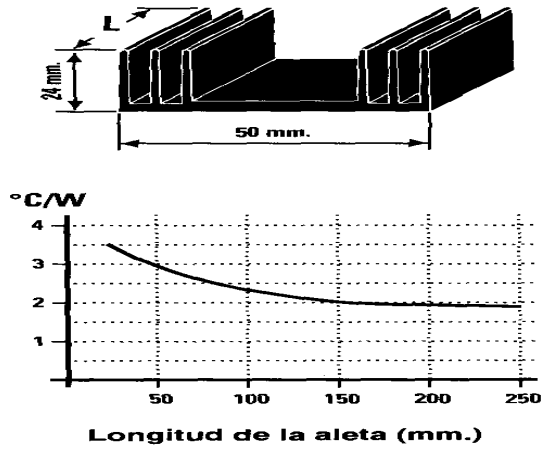


Figura 5: Ejemplos de disipador y de curva para el cálculo de la longitud de la aleta

En la figura 5 se muestra un ejemplo de posible disipador así como la curva facilitada por el fabricante para el cálculo de las dimensiones necesarias de la aleta en función del calor que se desea disipar.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

6.4. Resistencia unión - ambiente (R_{ja})

Como su nombre indica es la resistencia que existe entre la unión del semiconductor y el ambiente. Con esta resistencia deberemos de distinguir dos casos, el de resistencia unión-ambiente con disipador y sin disipador. Cuando se habla de resistencia unión-ambiente sin disipador, nos referimos a la resistencia unión-encapsulado junto con la resistencia encapsulado-ambiente (figura 6b):

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{ca} \tag{6}$$

Dicho valor lo suministra el fabricante en función del tipo de encapsulado.

Cuando se habla de la resistencia unión-ambiente con disipador se hace referencia a la suma de la resistencia unión-encapsulado (R_{jc}), la resistencia encapsulado-disipador (R_{cd}) y la resistencia disipador-ambiente (R_d) (figura 6a):

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{cd} + R_d \tag{7}$$

Este valor no es conocido ya que varía según el tipo de disipador que se utilice. El valor de R_{ja} dependerá de los valores de R_d y de R_{cd}. Como no es un valor fijo, no existe una tabla de valores típicos.

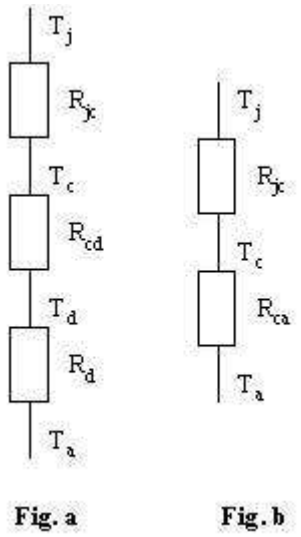


Figura 6: R_{ja} con y sin disipador

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

7. TEMPERATURAS

Dentro de este apartado se van a estudiar las temperaturas de la unión, del encapsulado, del elemento disipador y, por último, la del ambiente.

7.1. Temperatura de la unión (T_j)

La temperatura máxima de la unión representa el límite superior de temperatura a la que no se debe llegar y, por supuesto, no sobrepasar si queremos evitar la destrucción de la unión o del dispositivo. Este dato es un valor que se suele suministrar, normalmente, en los manuales de los fabricantes de semiconductores.

Si este valor no se refleja en dichos manuales o, simplemente, no se encuentra, se pueden adoptar unos valores típicos en función del dispositivo a refrigerar como los mostrados en la tabla 1.

Dispositivo	Rango de $T_{jmáx}$
De unión de germanio	Entre 100 ºC y 125 ºC
De unión de silicio	Entre 150 ºC y 200 ºC
JFET	Entre 150 ºC y 175 ºC
MOSFET	Entre 175 ºC y 200 ºC
Tiristores	Entre 100 ºC y 125 ºC
Transistores uniunión	Entre 100 ºC y 125 ºC
Diodos de silicio	Entre 150 ºC y 200 ºC
Diodos Zener	Entre 150 ºC y 175 ºC

Tabla 1: Valores típicos de variación de T_j

Se debe distinguir entre la temperatura máxima de la unión permitida para cada dispositivo y la temperatura real de la unión a la que se pretende que trabaje dicho elemento o dispositivo que, lógicamente, siempre será menor que la máxima permitida.

El objetivo del diseñador será mantener la temperatura de la unión por debajo de la máxima. Para ello se utiliza un coeficiente de seguridad, K, cuyo valor dará una temperatura de la unión comprendida entre el 50 % y el 70 % de la máxima (K = 0'5 ... 0'7). Se le asigna el valor según el margen de seguridad que se desea que tenga el dispositivo. La temperatura de la unión que se utilizará en los cálculos será: $T_j = K \cdot T_{jmáx}$.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Las condiciones de funcionamiento en función de K serán:

- Para valores de K = 0'5: dispositivo poco caliente. Máximo margen de seguridad, pero el tamaño de la aleta refrigeradora será mayor.
- Para valores de K = 0'6: dimensión menor de la aleta refrigeradora sin que el dispositivo se caliente demasiado.
- Para valores de K = 0'7: máximo riesgo para el dispositivo, máxima economía en el tamaño de la aleta refrigeradora. Este coeficiente de seguridad exige que la aleta se sitúe en el exterior.

7.2. Temperatura del encapsulado (T_c)

Este dato no se suministra en los manuales ya que depende del valor de la potencia que disipa el dispositivo, de la resistencia del disipador y de la temperatura ambiente. Por lo tanto sólo se puede calcular cuando se conozcan todos los datos reflejados en alguna de las siguientes expresiones (según figura 2):

$$\begin{aligned} T_c &= P_d \cdot (R_{cd} + R_d) + T_a \\ T_c &= T_j - (P_d \cdot R_{jc}) \end{aligned} \qquad (8)$$

7.3. Temperatura del disipador (T_d)

Este valor se obtiene a partir de la potencia disipada, P_d, de la resistencia térmica del disipador, R_d, y, finalmente, de la temperatura ambiente, T_a. Se calculará con cualquiera de estas expresiones (según figura 2):

$$\begin{aligned} T_d &= (P_d \cdot R_d) + T_a \\ T_d &= T_c - (P_d \cdot R_{cd}) \end{aligned} \qquad (9)$$

La temperatura obtenida será siempre inferior a la temperatura del encapsulado aunque será lo suficientemente alta en la mayoría de los casos como para no poder tocar el disipador con las manos.

Esto no es motivo de preocupación ya que se han tomado las medidas necesarias como para que la temperatura de la unión disponga de un margen de seguridad dentro de los márgenes ya explicados.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Puede suceder que la temperatura de la aleta sea bastante elevada, tanto que si se toca con un dedo notaríamos que quema. Pero en todo momento la temperatura de la unión estará con cierto margen dentro de los límites permitidos. No obstante, si se quiere disminuir esta temperatura, sólo hay que calcular de nuevo la resistencia térmica R_d de la aleta, poniendo esta vez 0'5 como factor K, necesario para determinar T_j. Ello llevará a adoptar una aleta más grande, pero tanto la T_c como la T_d disminuirán como se desea.

7.4. Temperatura ambiente (T_a)

En la interpretación de este dato puede haber alguna confusión ya que se puede tomar su valor como la temperatura del medio ambiente cuando en realidad es la temperatura existente en el entorno donde está ubicado el disipador.

8. POTENCIA DISIPADA

La potencia máxima es un dato que nos dará el fabricante. Este dato es para las mejores condiciones de funcionamiento del dispositivo, es decir, para una temperatura del encapsulado de 25 ºC y un disipador adecuado.

Resumiendo, es importante saber interpretar adecuadamente los datos suministrados por el fabricante, de lo contrario pueden aparecer sorpresas desagradables. La máxima potencia que puede disipar un semiconductor sin disipador viene dada por el cociente entre el incremento de la temperatura y la resistencia térmica unión ambiente:

$$P_{dmáx} = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{ja}} \qquad (10)$$

Donde R_{ja} es la que nos suministra el fabricante que no incluye R_d. Cuando se utiliza un disipador, la resistencia térmica se divide en tres parámetros, como ya se ha visto: la resistencia entre la unión y el encapsulado (R_{jc}), entre el encapsulado y el disipador (R_{cd}) y entre el disipador y el ambiente (R_d):

$$P_{dmáx} = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{jc} + R_{cd} + R_d} \qquad (11)$$

con $R_{ja\ sd} >> R_{ja\ cd} = R_{jc} + R_{cd} + R_d$.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

9. IMPEDANCIA TÉRMICA

Si se trabaja en régimen transitorio, por ejemplo en régimen de impulsos, el modelo térmico debe ser modificado para contar con la capacidad térmica introducida por la unión, el encapsulado, el aislante y el disipador; ya que la temperatura de la unión puede sobrepasar los valores que permite calcular la expresión (según figura 2)

$$T_j = T_c + (P_d \cdot R_{jc}) \qquad (12)$$

Donde R_{jc} es la resistencia térmica unión-encapsulado en régimen estable o permanente (transcurrido un tiempo suficientemente grande). Es necesario entonces recurrir al concepto de impedancia térmica.

Como ya se ha comentado, para estas aplicaciones, el modelo térmico debe ser modificado para contar con la capacidad térmica introducida por la unión, el encapsulado, el aislante y el disipador. Un modelo térmico que contempla la operación pulsatoria es el mostrado en la figura 7 donde cada componente lleva asociada su capacidad térmica correspondiente.

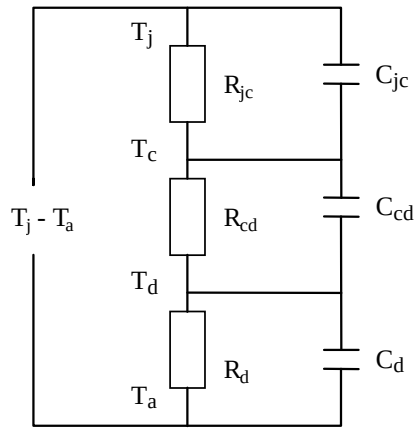


Figura 7: Circuito equivalente eléctrico con el modelo de impedancia térmica

La impedancia térmica total de un dispositivo puede ser modelada combinando dos partes: la resistencia térmica y la capacidad térmica. La resistencia térmica cuantifica la capacidad de un camino dado para la transferencia de calor hacia el medio ambiente. La capacidad térmica, C_t, es una medida de la capacidad de acumulación de calor, al igual que un condensador acumula carga eléctrica.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Para un elemento estructural dado, C_t depende del calor específico, c, del volumen, V y de la densidad, d, de acuerdo con la expresión $C_t = c \cdot d \cdot V$, donde únicamente se considerará el volumen que se calienta cuando se disipa la potencia.

En el circuito eléctrico de la figura 7 que representa la analogía con el comportamiento térmico se pueden ver una serie de grupos R_t - C_t cada uno con su correspondiente constante de tiempo característica $\tau = R_t \times C_t$. El valor de esta constante de tiempo determina si cada uno de los grupos R_t - C_t alcanzan el equilibrio rápida o lentamente. Cada grupo produce un incremento de temperatura que viene dado por la expresión:

$$\Delta T = t_2 - t_1 = R_t \cdot P_d \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R_t \cdot C_t}} \right) \qquad (13)$$

donde R_t es la resistencia térmica del grupo R_t - C_t y C_t es la capacidad térmica del grupo R_t - C_t y se mide en J/ºC.

Cuando se aplica un pulso de potencia, la temperatura va aumentando de valor con la consiguiente carga de las capacidades térmicas. A partir de este momento el valor alcanzado en régimen estable depende solamente de las resistencias térmicas. Si a esta red se aplica un pulso de potencia, el valor de pico para T_j depende de la amplitud del pulso de potencia y de la anchura del pulso de potencia, t_{on}.

En la figura 8 se muestra la respuesta de T_j a dos pulsos de diferente anchura pero del mismo valor de pico. De dicha figura se puede observar que si se aplica un pulso lo suficientemente ancho, la temperatura de la unión alcanzará el régimen estable. Si la duración del pulso aplicado no permite a T_j llegar al régimen permanente, la impedancia térmica cobra importancia relevante.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

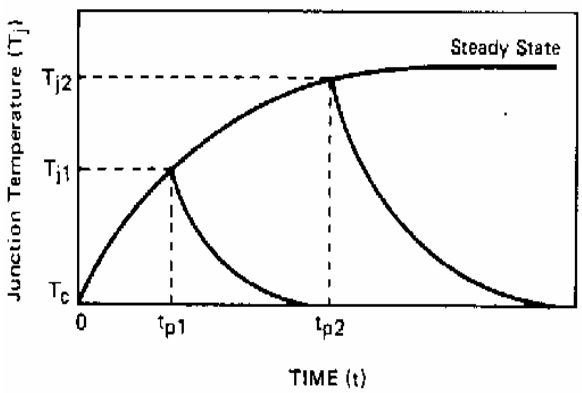


Figura 8: Respuesta a dos pulsos de temperatura

La variación de la impedancia térmica, $Z_{jc}(t)$, con la anchura del pulso la puede proporcionar el fabricante directamente, pero lo normal es que suministre una curva como la mostrada en la figura 9.

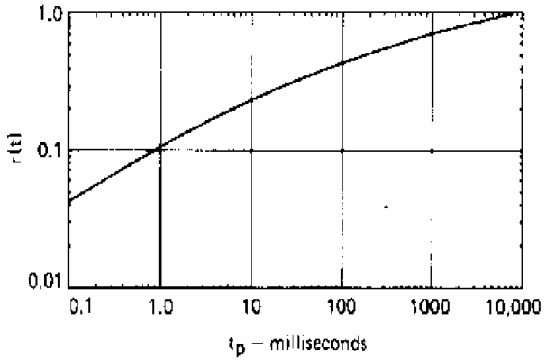


Figura 9: Curva del fabricante para el cálculo de $Z_{jc}(t)$

En dicha figura se utiliza r(t) que es el resultado de normalizar la impedancia térmica transitoria $Z_{jc}(t)$ con la resistencia térmica R_{jc} (en régimen estable) de la siguiente forma:

$$r(t) = \frac{Z_{jc}(t)}{R_{jc}} \tag{14}$$

donde $Z_{jc}(t)$ es la impedancia térmica transitoria, R_{jc} es la resistencia térmica en régimen estable y r(t) es la resistencia térmica normalizada (inferior a la unidad).

Para pulsos de corta duración, r(t) es bastante pequeño pero al incrementarse t_{on}, r(t) se aproxima a la unidad. Esto quiere decir que para pulsos de larga duración la impedancia transitoria $Z_{jc}(t)$ se aproxima a la resistencia R_{jc} en régimen estable.

Conociendo t_{on}, es posible obtener r(t) a partir de la figura 9 y la impedancia térmica se obtiene utilizando la expresión $Z_{jc}(t) = r(t) \cdot R_{jc}$. (15)

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

En algunas ocasiones el fabricante suministra las curvas de la resistencia térmica transitoria para trenes de pulsos en función del ciclo de trabajo (D), tal y como se puede observar en la figura 10.

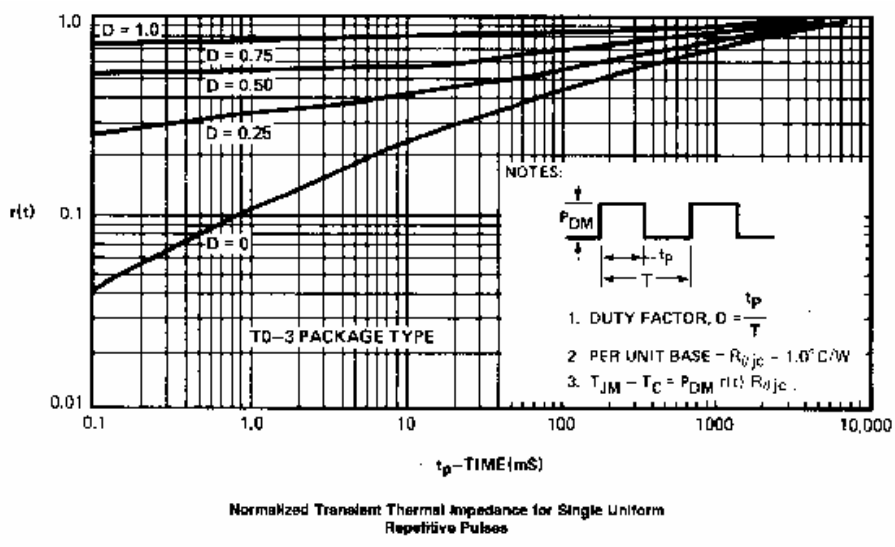


Figura 10: Resistencia térmica para un tren de pulsos

Para dicha curva, hay que recordar que el ciclo de trabajo se define como $D = \frac{t_{on}}{T}$ donde t_{on} es la anchura del pulso aplicado y T es el periodo del tren de impulsos.

Por último, se va a estudiar cómo se utilizan las curvas de la impedancia térmica que suministra el fabricante y se aplicarán al cálculo de la temperatura que alcanzará la unión según sea aplicado un pulso de potencia o un tren de pulsos.

9.1. Respuesta ante un único pulso de potencia

Algunas veces el fabricante nos suministra en una sola gráfica la curva para un único pulso de potencia y para trenes de impulsos con diferentes ciclos de trabajo (D). En este caso la curva con D = 0 es la correspondiente a un pulso único de potencia (t_{on} = T).

Ante la aplicación de un pulso de potencia como el que se puede observar en la figura 11, se puede calcular T_j mediante la curva $r(t)/t_{on}$ (figura 9) si se conocen P_d, R_{jc} en régimen estable y T_c (temperatura del encapsulado), utilizando la siguiente expresión:

$$T_{j1} = P_d \cdot Z_{jc}(t_1) + T_c = P_d \cdot r(t_1) \cdot R_{jc} + T_c \qquad (16)$$

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

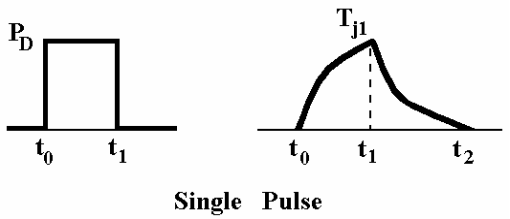


Figura 11: Respuesta de la temperatura de la unión ante un pulso de potencia

Las curvas de resistencia térmica transitoria que suministra el fabricante son útiles para pulsos rectangulares de potencia. Los pulsos de potencia no rectangulares deben ser convertidos en sus equivalentes rectangulares (mediante análisis de Fourier) antes de aplicar las curvas transitorias de respuesta térmica.

Para formas de onda simples como la senoidal o la triangular pueden utilizarse expresiones matemáticas para convertirlas en sus equivalentes rectangulares pero en cualquier caso, suele dar buenos resultados un análisis gráfico haciendo que las energías almacenadas en ambas formas de onda sean las mismas (en la original y en la equivalente rectangular).

9.2. Respuesta ante una serie de impulsos

A su vez, este estudio para varios impulsos se debe dividir en una serie de impulsos al azar, una serie de impulsos de larga duración y una serie uniforme de impulsos de corta duración.

9.2.1. Serie de impulsos al azar

En una serie de impulsos de potencia al azar cada impulso tiene valores diferentes de anchura y altura. Para calcular el valor de la resistencia térmica se debe aplicar el principio de superposición.

En la utilización de este principio cada intervalo de potencia (produce calor) es considerado positivo en valor y cada intervalo de refrigeración (extinción del pulso) es considerado negativo. Un intervalo de calentamiento comienza al mismo tiempo de la aplicación del impulso y se extiende al infinito. Un intervalo de refrigeración comienza al finalizar el impulso de potencia y también se extiende al infinito.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

En la figura 12 puede verse como se aplica el principio de superposición para el caso de una serie de impulsos de potencia al azar.

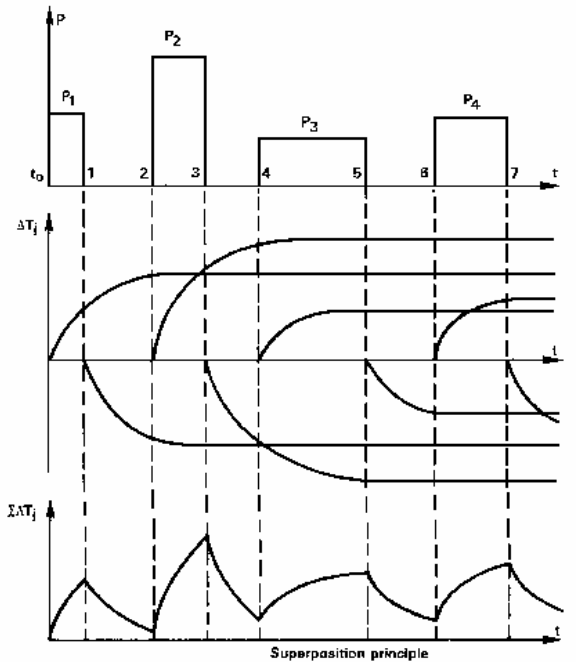


Figura 12: Evolución de la temperatura ante la aplicación de una serie de impulsos de potencia al azar

Este método también se puede aplicar cuando el tiempo total de calentamiento es más pequeño que el tiempo necesario para alcanzar el régimen permanente. Si llamamos $\Delta T_j = T_j - T_c$, se cumplirá que:

$$\begin{aligned} \Delta T_{j1} &= P_1 \cdot r(t_1) \cdot R_{jc} \\ \Delta T_{j3} &= \left[P_1 \cdot r(t_3) - P_1 \cdot r(t_3 - t_1) + P_2 \cdot r(t_3 - t_2)\right] \cdot R_{jc} \\ \Delta T_{j5} &= \left[P_1 \cdot r(t_5) - P_1 \cdot r(t_5 - t_1) + P_2 \cdot r(t_5 - t_2) - P_2 \cdot r(t_5 - t_3) + P_3 \cdot r(t_5 - t_4)\right] \cdot R_{jc} \end{aligned} \quad (17)$$

Como se puede observar, se hace un sumatorio (con el signo adecuado, según se trate de calentamiento o de refrigeración) de los efectos que tiene cada impulso sobre el instante en el que se desea saber la temperatura que alcanzará la unión T_j.

9.2.2. Serie de impulsos de larga duración

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Al ser el tren de impulsos de larga duración, éste permitirá alcanzar el equilibrio a la temperatura de la unión tal y como puede observarse en la figura 13.

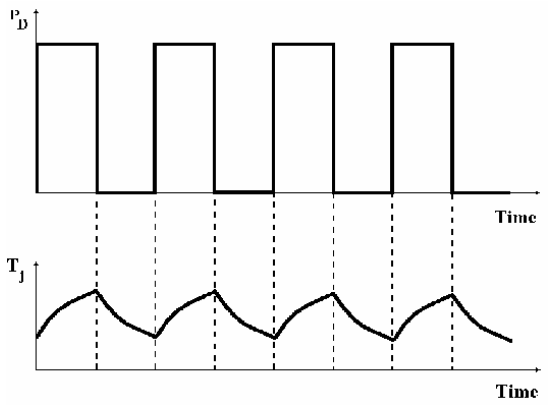


Figura 13: Evolución de la temperatura en función de la aplicación de una serie de impulsos de larga duración

Al final del primer impulso los cálculos son iguales que para un único impulso. Al final de un impulso en un estado estable se cumple la expresión $\Delta T_j = P_d \cdot R_{jc} \cdot r(t_{on}, D)$ donde $r(t_{on}, D)$ se obtiene de la gráfica (figura 9) de la impedancia térmica normalizada suministrada por el fabricante.

Al calcular el ciclo de trabajo (D), es importante que el producto del número de pulsos, n, y el periodo sea al menos equivalente al tiempo necesitado por el semiconductor para alcanzar el equilibrio térmico. Sólo en este caso podrá utilizarse la curva de r(t) en función de varios ciclos de trabajo.

Se puede utilizar el principio de superposición pero los cálculos son largos. No habrá más remedio que aplicarlo si el fabricante sólo proporciona la curva de $r(t)/t_{on}$ para un solo pulso de potencia correspondiente a D = 0.

9.2.3. Serie uniforme de impulsos de corta duración

Al tratarse ahora de un tren de corta duración, éste no permite alcanzar el equilibrio térmico.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Las curvas para trenes de pulsos repetitivos y varios ciclos de trabajo únicamente pueden ser utilizadas para trenes de pulsos de larga duración que permitan alcanzar el equilibrio térmico.

Para trenes de pulsos de corta duración, como los que podemos observar en la figura 14, se utilizará la expresión

$$\Delta T_{n+1} = \left[\frac{t_{on}}{T} \cdot r(t_{2n-1}) + (1 - \frac{t_{on}}{T}) \cdot r(t_{on} + t) + r(t_{on}) - r(t) \right] \cdot P_d \cdot R_{jc} \qquad (18)$$

donde:

- Como $\Delta T_{n+1} = T_j - T_c$, conocidos T_c y ΔT_{n+1} se podrá calcular T_j
- t_{2n-1} es el instante con respecto al origen en el que se pretende determinar T_j
- n+1 es el pulso en el que se desea calcular la temperatura

También se puede utilizar el principio de superposición pero será necesario realizar más cálculos.

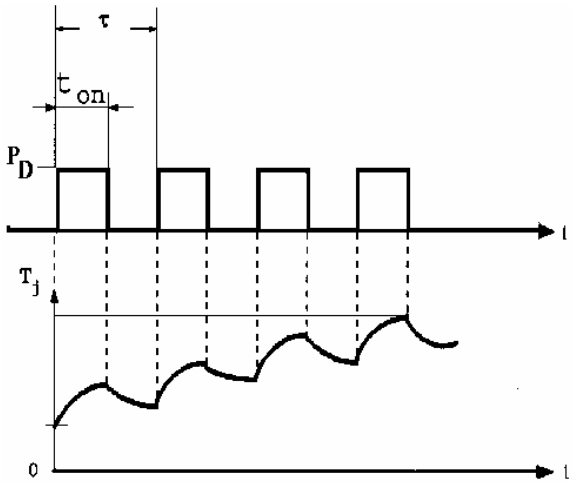


Figura 14: Evolución de la temperatura en función de la aplicación de una serie de impulsos de corta duración

10. DISIPADORES

La capacidad térmica (C_{th}) de un componente, que proporciona una medida de su ritmo de cambio de energía térmica en temperatura está dado por $C_{th} = c \times m$, donde *m* es la masa del componente y *c* es el calor específico.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Los disipadores, normalmente, se utilizan para mejorar la capacidad térmica de los semiconductores de potencia y, por lo tanto, les permite disipar el calor generado cuando están en funcionamiento. Esta sección considera primero las ecuaciones térmicas que dan una guía para los distintos métodos de enfriar componentes de potencia, y luego describe los métodos de disipación que se pueden utilizar.

10.1. Ecuaciones térmicas

Como ya se ha comentado, existen tres métodos para eliminar calor de un semiconductor de potencia: conducción, convección y radiación y se describen mediante ecuaciones térmicas:

- **Conducción**: la velocidad del flujo de calor a través de un disipador, con un área *a* en sección transversal, un grosor *d* y una conductividad térmica k_T, está dada por la siguiente ecuación en la que dT es la diferencia de temperatura en el disipador y P_c es la velocidad de flujo de calor en vatios: $P_c = \frac{k_T a dT}{d}$ y en donde la resistencia térmica del disipador, R_{th}, viene dada por $R_{th} = \frac{dT}{P_c} = \frac{d}{k_T a}$. (19)

- **Convección**: la convección puede ser por flujo de aire natural o forzado. La convección forzada depende más del flujo de aire si es laminar o turbulento. A bajas velocidades de aire, el flujo es laminar y se vuelve turbulento a mayores velocidades. El punto de cambio depende del diseño del disipador.

El flujo de calor de un disipador que tenga un área *a* de sección transversal, una longitud vertical *l* y una diferencia de temperatura por encima del ambiente, dT, empíricamente es $P_n = K_n a \frac{(dT)^{1'25}}{l^{0'25}}$ donde la constante K_n tiene un valor alrededor de 1’37. (20)

Si el disipador se enfría mediante aire forzado, con una velocidad v_a, entonces el flujo de calor para los flujos de aire laminar y turbulento están dados por las siguientes ecuaciones respectivamente, donde las constantes tienen los valores aproximados de K_{fl}=3’9 y K_{ft}=6’0:

$$P_{fl} = K_{fl} a dT \left(\frac{v_a}{l} \right)^{1/2}$$
$$P_{ft} = K_{ft} a dT \frac{v_a^{0'8}}{l^{0'2}} \quad (21)$$

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

- **Radiación**: la pérdida de calor debido a la radiación depende de la emisividad del disipador (ε) y su diferencia de temperatura sobre el ambiente. El valor máximo de emisividad es la unidad, que es la de un radiador de cuerpo negro. Si T_1 y T_2 son las temperaturas de la superficie del disipador y la del aire que lo rodea, entonces la pérdida de calor en vatios debido a la radiación está dada por $P_r = K_r a\varepsilon\left(T_1^4 - T_2^4\right)$, donde la constante K_r es aproximadamente $5'7 \cdot 10^{-8}$.

El análisis térmico utilizando las ecuaciones anteriores puede dar errores de más del 25 %, ya que son muchos los factores que afectan a las propiedades de la disipación de calor en los disipadores. Estos errores se deben a:

- La mezcla de los modos de transferencia de calor y la dificultad de predecir el camino de transferencia de calor. El calor radiado por los cuerpos adyacentes también afecta en gran medida al resultado final.
- La variación de la disipación de potencia entre semiconductores del mismo tipo, incluso aunque sean de la misma partida. La disipación de potencia variará debido a las diferencias de la presión de fijación entre el componente y su disipador, lo cual es difícil de predecir.
- Muchas de las constantes utilizadas en las ecuaciones térmicas son actualmente variables de orden bajo y a menudo se necesita juicio y experiencia para elegir el valor adecuado.

El análisis de los sistemas por aire enfriado forzado da resultados menos precisos que el análisis por aire enfriado de forma natural porque,

- hay diferencias de flujo entre las superficies interiores y exteriores;
- no es posible calcular la velocidad del aire en cada punto del camino de flujo; y
- el análisis térmico normalmente supone formas simétricas, por ejemplo cilindros y esferas, y en la práctica estas formas raramente existen.

El funcionamiento puede mejorarse montando los disipadores verticalmente en un recinto con aperturas en el fondo y en la parte superior, para crear un efecto chimenea. Algunos componentes también pueden montarse en un disipador común, ya que esto daría como resultado un mayor diferencial de temperatura entre el disipador y el ambiente y, por lo tanto, mejora su eficiencia, aunque los componentes funcionen a una mayor temperatura y los componentes superiores estén trabajando con una mayor temperatura de encapsulado. La

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

ventaja de montar componentes sobre el mismo disipador es que hay un buen acoplamiento térmico como el que se necesita cuando funcionan en paralelo.

10.2. Construcción de disipadores

Los disipadores están disponibles en una gran variedad de formas y tamaños, para acoplarse a los distintos tipos existentes de encapsulados de semiconductores de potencia. Por ejemplo, la figura 15 (a) muestra un disipador para una construcción "disco de hockey" refrigerado por aire, mientras que la figura 15 (b) es una colocación para el mismo componente refrigerado por líquido, como se describe en la sección 12 sobre refrigeración mediante líquidos.

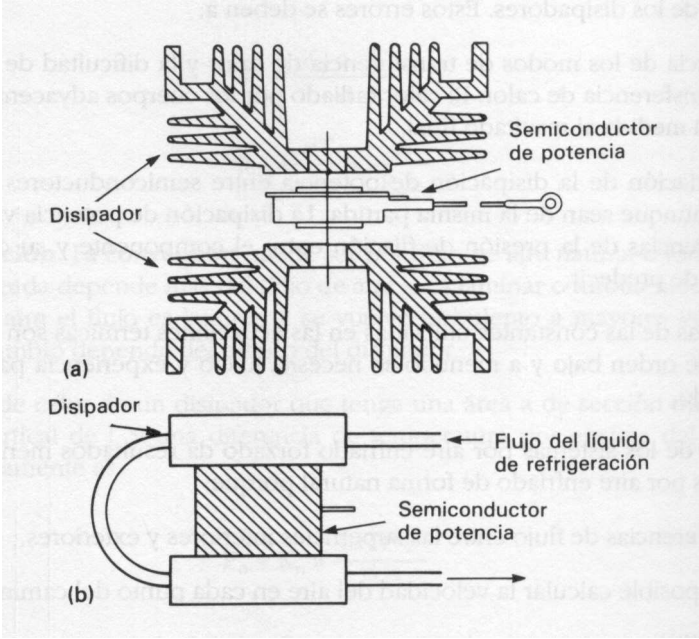


Figura 15: Ejemplos de disipadores: (a) refrigeración por aire; (b) refrigeración por líquido

Los disipadores normalmente están hechos de extrusión de una aleación de aluminio, ya que el aluminio es un buen conductor del calor, fácilmente maleable, de extrusionar y con un acabado de superficie suave. El aluminio proporciona un disipador inferior al construido de cobre, pero es mucho más barato. Los disipadores están diseñados con una gran área superficial, para la radiación y conducción de calor, y con un peso minimizado. Los disipadores pueden dejarse brillantes, pero son más eficientes las superficies mates coloreadas. El negro no es necesariamente el mejor color, ya que a las temperaturas que se están considerando tiene lugar la radiación de calor en la región infrarroja, y todos los esmaltes, superficies anodizadas, barnices y pinturas oleosas tienen altas emisividades sin tener en cuenta el color.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Los disipadores normalmente se diseñan con aletas, y cuanto mayor sea el número de aletas, mayor es el área de enfriamiento por convección, pero si las aletas están demasiado juntas entre sí, se produce menos radiación de calor, por lo que existe un compromiso. Los disipadores de aire frío forzado son de tres a cuatro veces más eficientes que los sistemas refrigerados de forma natural. Los efectos por radiación son ahora despreciables, y ya que la velocidad del flujo de aire es menos dependiente de la temperatura, la resistencia térmica es menos variable, por lo que se puede suponer que el sistema térmico es lineal. El flujo de aire también es más independiente del espaciado de las aletas del disipador para crear turbulencia sobre su superficie y romper cualquier capa de aire estática.

A menudo se precisa aislamiento eléctrico al montar un componente sobre un disipador, y puede conseguirse mediante arandelas de aislamiento. Pueden utilizarse varios materiales para estas arandelas: la glucina es el más caro pero tiene la mayor conductividad térmica y rigidez dieléctrica, seguida de las arandelas de aluminio anodizado templado con una buena conductividad térmica y rigidez dieléctrica. Las arandelas de mica fueron muy populares, pero se pueden resquebrajar y desescamar, y debido a su transparencia, es fácil que se peguen dos entre sí, lo cual provocaría un incremento de la resistencia térmica. Los plásticos de alta temperatura tales como el kapton y el mylar tienen una rigidez dieléctrica menor que la mica pero son más baratos, y ya que son coloreados, su sombreado proporciona una indicación visual si dos están pegados entre sí. Una alternativa a la utilización de arandelas de aislamiento es rociar el disipado durante la fabricación con un material de aislamiento eléctrico.

El enlace entre la carcasa del componente por refrigerar y el disipador tiene una resistencia térmica relativamente pequeña comparada con otras partes del sistema. Sin embargo, la resistencia puede incrementarse durante el montaje en un factor de diez veces si no se tiene cuidado. Esto se realiza manteniendo limpias las superficies de unión aplicando una presión adecuada de acoplamiento y utilizando grasa térmica entre ellas. Esta grasa, o compuesto disipador, es un material de silicona lleno de óxidos metálicos conductores de calor. Esta grasa no debe secarse, fundir o endurecer incluso después de trabajar durantes largos periodos a altas temperaturas tales como 200 ºC. La figura 16 ilustra como la grasa ayuda a igualar las temperaturas del encapsulado del semiconductor. Sin la grasa, una ligera protuberancia, arqueado o partícula de polvo hace que la temperatura en el punto A sea mayor que en el punto B. La grasa térmica reemplaza al aire y tiene mucha menor resistencia

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

térmica, por lo que la temperatura en la fijación de cobre es más uniforme y, por lo tanto, también en el semiconductor.

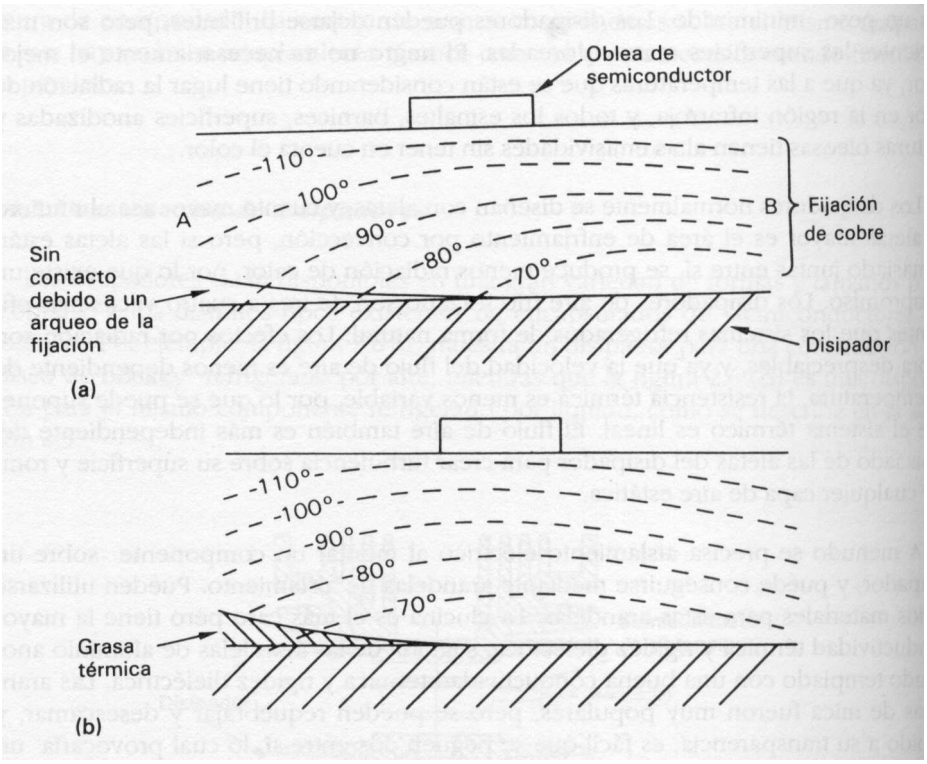


Figura 16: Contornos de temperatura en la unión disipador-componente de potencia: (a) sin grasa térmica; (b) con grasa térmica

La tabla 2 compara la resistencia térmica de algunos componentes utilizados normalmente; el diamante se utilizar para refrigerar algunos componentes especializados que funcionan a alta frecuencia.

Material	Resistencia térmica (˚C/W)
Diamante	0’02 a 0’1
Cobre	0’3
Aluminio	0’5
Estaño	2’0
Grasa térmica	130
Mica	150
Mylar	400
Aire en calma	3000

Tabla 2: Comparación de las resistencias térmicas de algunos materiales típicos

La figura 17 ilustra las curvas que se pueden utilizar para determinar la resistencia térmica de un disipador en cualquier aplicación. La serie de curvas de la izquierda dan la disipación de potencia a través del semiconductor de potencia, y son similares a la figura 1, mientras que las curvas de la derecha son del disipador y dan su resistencia térmica.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

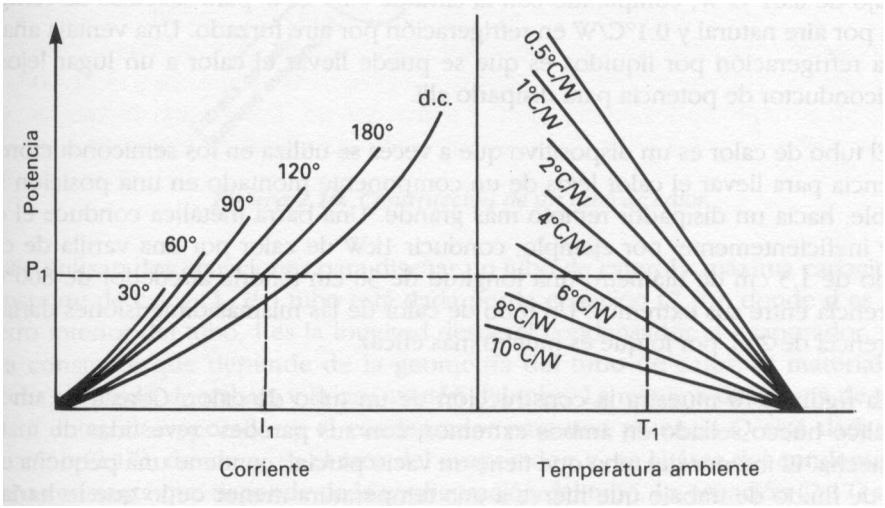


Figura 17: Curvas utilizadas para calcular la resistencia térmica del disipador

Esta serie de curvas podría obtenerse, por ejemplo, de un disipador de aire refrigerado forzado funcionando con una serie de velocidades de aire. Si I_1 es la corriente a través del semiconductor de potencia, entonces P_1 es la potencia disipada a su través, y para una temperatura ambiente T_1, el disipador debe tener una resistencia térmica de 4 ˚C/W.

11. VENTILACIÓN FORZADA

Cuando la resistencia térmica obtenida en el cálculo es muy baja, se puede elegir entre pocos radiadores, puesto que son pocos los que hay en el mercado que ofrecen una resistencia térmica inferior a 0'5 – 0'6 ºC/W. Estos son los casos en los que se utiliza un ventilador, el cual es capaz de reducir la resistencia térmica equivalente.

Los sistemas de convección forzada por aire pueden aumentar diez veces la evacuación de calor respecto a la convección natural y los sistemas de refrigeración líquida podrán evacuar hasta diez veces más calor que los de aire forzado, como se verá por último en el apartado 12. La mejora de la refrigeración tiene los inconvenientes de aumento del coste, potencia, ruido y complejidad. Como un sistema sencillo es en general un sistema más fiable, la evacuación de calor por convección natural y radiación (mediante disipador) debe utilizarse siempre que sea posible.

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

Para la convección forzada se dispone de ventiladores axiales de baja presión o soplantes centrífugos de alta presión diseñados especialmente para su acoplo mecánico a los perfiles de los disipadores.

Para valorar en términos numéricos la reducción de la resistencia térmica es absolutamente necesario conocer un dato que nos proporciona el fabricante del ventilador; este es el aire que es capaz de mover el ventilador por unidad de tiempo (litros/segundo).

12. REFRIGERACIÓN MEDIANTE LÍQUIDOS

Se pueden utilizar líquidos para enfriar semiconductores de potencia, siendo este método más efectivo que por aire. Existen varios métodos para la refrigeración por líquidos:

- Interconexión de una serie de disipadores individuales especialmente diseñados, cada uno de ellos con un solo componente. Todos ellos se enlazan entre sí mediante tuberías a través de las cuales fluye el líquido de refrigeración.
- Montando los componentes de potencia en una estructura común refrigerada por líquido, tal como un bus de barra hueca, aislando eléctricamente los componentes unos de otros.
- Sumergiendo los componentes de potencia en el líquido de refrigeración, a veces con pequeños disipadores puestos en sus cuerpos.

El líquido utilizado puede ser agua o aceite. El agua tiene una mayor velocidad de flujo pero puede causar corrosión electrolítica y también se puede congelar. Al agua desionizada que normalmente se utiliza se le añade un agente anticongelante adecuado. El aceite es más viscoso que el agua y puede ser inflamable. Sin embargo, no permite el flujo de corriente de electrólisis y los componentes pueden sumergirse directamente en él.

Los sistemas refrigerados por líquidos pueden tener una resistencia térmica por debajo de 0’01 ºC/W, comparado con la cifra de 0’25 ºC/W para sistemas de refrigeración por aire natural y 0’1 ºC/W en refrigeración por aire forzado. Una ventaja añadida de la refrigeración por líquidos es que se puede llevar el calor a un lugar lejos del semiconductor de potencia para disiparlo allí.

El tubo de calor es un dispositivo que a veces se utiliza en los semiconductores de potencia para llevar el calor lejos de un componente montado en una posición inaccesible, hacia un disipador remoto más grande. Una barra metálica conduce el calor muy

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

ineficientemente: por ejemplo, conducir 1 kW de calor por una varilla de cobre sólido de 105 cm. de diámetro una longitud de 30 cm. tendría alrededor de 800 ºC de diferencia entre sus extremos. Un tubo de calor de las mismas dimensiones daría una diferencia de 2 ºC, por lo que es mucho más eficaz.

La figura 18 muestra la construcción de un tubo de calor. Consta de un tubo metálico hueco sellado en ambos extremos, con sus paredes revestidas de material de mecha. El interior del tubo que tiene un vacío parcial, contiene una pequeña cantidad de fluido de trabajo que hierve a una temperatura menor de lo que lo haría a la presión atmosférica. El componente a refrigerar se adjunta al extremo evaporador del tubo. El fluido de trabajo se vaporiza y se absorbe el calor al convertir el líquido en vapor. El vapor viaja hacia el extremo condensador del tubo y en este extremo se enfría externamente mediante un disipador. El vapor entrega su calor a este extremo como calor latente y se condensa. El fluido condensado vuelve a través de la mecha por acción capilar al extremo evaporador. Cuando el vapor se condensa tiende a incrementar el vacío, por lo que se alimenta más vapor del extremo evaporador. Un tubo de calor típico tiene 0'3 – 1 cm. de diámetro y hasta 50 cm. de largo, con una variedad de formas para adecuarse al trazado del equipo, trabajando en el rango de +20 ºC hasta +200 ºC, aunque si es necesario se puede cubrir el rango de –200 ºC hasta +600 ºC.

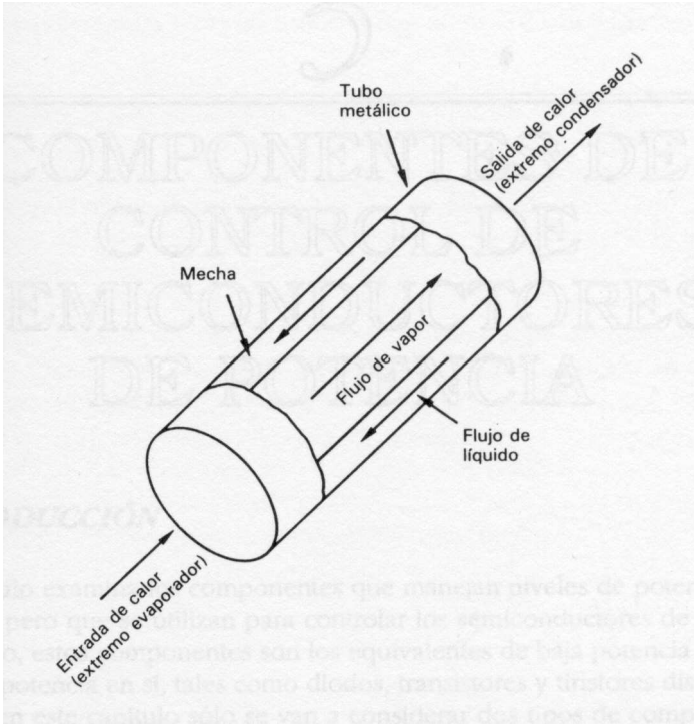


Figura 18: Construcción de un tubo de calor

Se utilizan dos ecuaciones para diseñar un tubo de calor. La máxima capacidad de transporte de calor, Q_M, del tubo está dada por la primera de las ecuaciones, donde *d* es el diámetro interior del tubo; *l* es la longitud desde el condensador al evaporador; y K es una

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike

constante que depende de la geometría del tubo de calor, el material de la mecha, el fluido de trabajo y la orientación del tubo. La máxima diferencia de temperatura entre el evaporador y el condensador para una potencia Q está dada por la segunda de las ecuaciones, donde a_E es el área del evaporador; a_C es el área del condensador; y *b* es una constante que depende de la configuración del tubo. Esta ecuación se utiliza para obtener un diseño aproximado para un tubo de calor que entonces se debe comprobar y modificar:

$$Q_M = \frac{Kd^2}{l}$$
$$dT = \frac{Q}{b}\left[\frac{1}{a_E} + \frac{1}{a_C}\right] \qquad (22)$$

OCW- Universidad de Málaga http://ocw.uma.es Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, A (2011) Electrónica de Potencia.
Bajo licencia Creative Commons Attribution-Non-Comercial-ShareAlike