

Disipación de potencia en semiconductores

Todos los dispositivos semiconductores disipan potencia internamente no sólo cuando están en estado de conducción sino también durante la transición de conducción al estado de corte. Por lo tanto, un parámetro muy importante que puede afectar el rendimiento del dispositivo es su capacidad de disipación del calor. La máxima potencia que puede ser disipada sin provocar problemas térmicos depende de la eficiencia con la cual el calor generado en el interior del dispositivo es evacuado al exterior.

La disipación de la potencia máxima admisible en cualquier dispositivo de estado sólido está limitada por la temperatura de la pastilla semiconductora (Temperatura de juntura, T_J). Para un buen funcionamiento debe asegurarse que la temperatura de juntura (T_J) esté siempre por debajo del valor máximo especificado por el fabricante ($T_{J\text{máx}}$).

Cuando el dispositivo se calienta y se enfría alternativamente se producen esfuerzos mecánicos cíclicos internos, como consecuencia de las dilataciones térmicas sufridas por la pastilla semiconductora y por los materiales mecánicos a los que ella está sujeta. Estos esfuerzos cíclicos inducidos térmicamente pueden provocar un tipo de falla por desgaste conocida como "fatiga térmica" que limita la vida útil del dispositivo.

Cuando por un semiconductor circula una corriente I se disipa una potencia $P_d = V.I$, donde V es la tensión aplicada a la juntura. Se produce un aumento de la temperatura que depende del nivel de potencia y de la rapidez con que el calor generado puede escapar de la juntura al ambiente a través de la carcasa del dispositivo. Cuando la cantidad de calor generada es igual a la cantidad de calor evacuada por la juntura se alcanza el equilibrio térmico.

Disipación de potencia continua

En cualquier dispositivo semiconductor el flujo de calor que sale de la región activa es proporcional a la diferencia de las temperaturas existentes entre el área o región activa y la cápsula o carcasa, figura 1. Debido a esta proporcionalidad entre el flujo de calor y la diferencia de temperatura interna, la temperatura de la juntura, T_J , presenta una relación lineal con la temperatura de la cápsula, T_c , y con la potencia interna disipada P , que puede representarse por la siguiente ecuación:

$$T_J - T_c = R\theta P$$

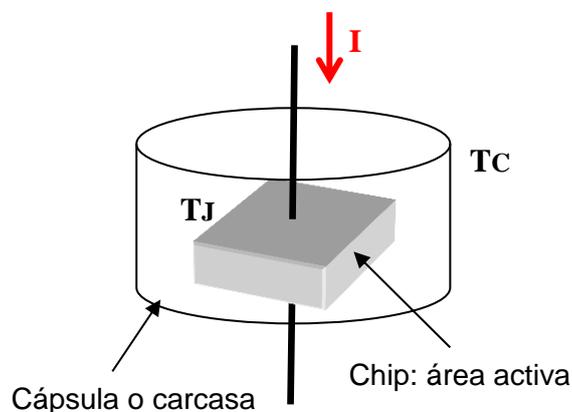


Figura 1

El parámetro $R\theta$ recibe el nombre de resistencia térmica, por analogía a la ley de Ohm aplicada a un circuito térmico.

La resistencia térmica puede definirse como la relación entre la 'caída' o diferencia de temperatura ($T_J - T_c$) y el calor generado por la disipación de potencia interna en condiciones de estado permanente:

$$R\theta = \frac{T_J - T_c}{P}$$

La resistencia térmica ($R\theta$) puede asemejarse a la resistencia eléctrica: **es la medida en que un material se opone a la circulación del calor**. Un material con baja resistencia térmica es un buen conductor del calor.

La resistencia térmica total se expresa como la elevación de la temperatura de la juntura por encima de la temperatura de la carcasa por unidad de potencia disipada en el dispositivo, es decir, [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]. El conocimiento del valor de la resistencia térmica junto con el régimen de máxima temperatura de juntura permite determinar el nivel de potencia máxima con que el dispositivo puede ser operado sin riesgos, para una determinada temperatura de carcasa.

La potencia P está limitada por la máxima temperatura de la juntura $T_{J\text{máx}}$ que es un dato dado por el fabricante, aproximadamente $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ para silicio. Si la carcasa se encuentra a la temperatura ambiente ($T_C = T_A$) generalmente $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, la potencia máxima que puede ser disipada por el dispositivo queda limitada por:

$$P_{\text{máx}} = \frac{T_{\text{máx}} - T_A}{R\theta_{JA}}$$

$R\theta_{JA}$ es la resistencia térmica entre la juntura y el ambiente. Si el dispositivo trabaja a otra temperatura ambiente mayor que $T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, la potencia debe reducirse para que el dispositivo trabaje en condiciones seguras, es decir $P < P_{\text{máx}}$.

Los fabricantes de dispositivos presentan una curva de reducción de la disipación de potencia P con la temperatura, como la que se muestra en la figura 2, en la cual se ha considerado que la temperatura de la cápsula es igual a la temperatura ambiente.

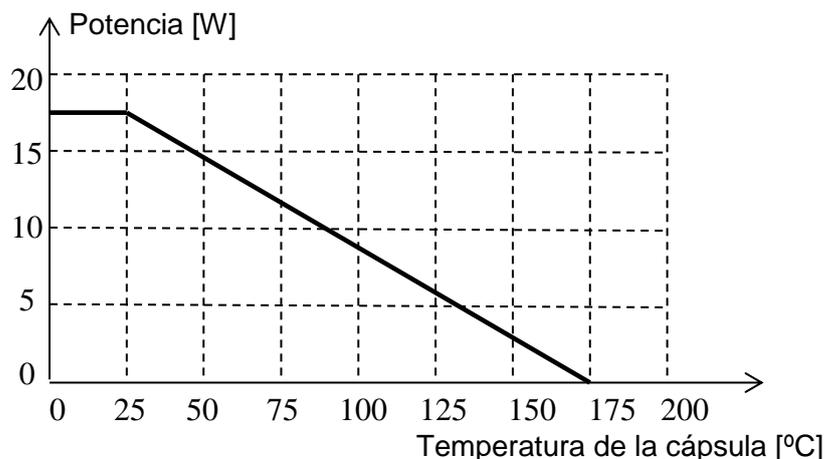
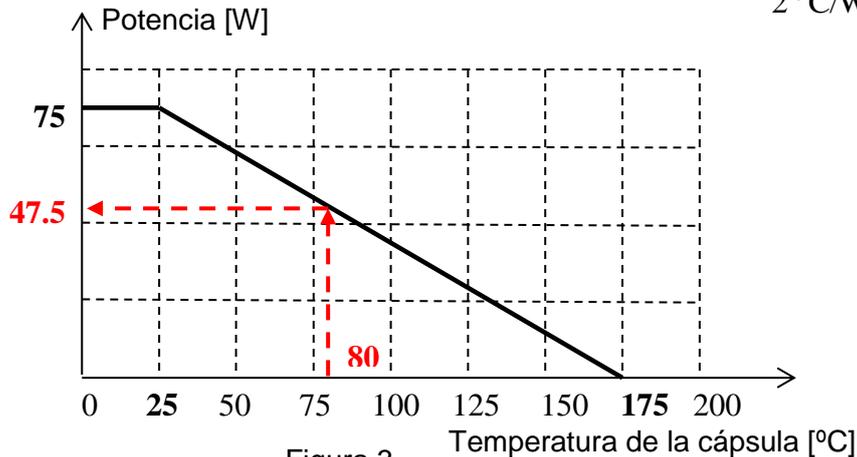


Figura 2

El punto de corte con el eje horizontal representa la temperatura máxima permitida. La pendiente de la curva es $-1/R_{\theta JC}$, que corresponde a la pendiente de la recta representada por la ecuación anterior.

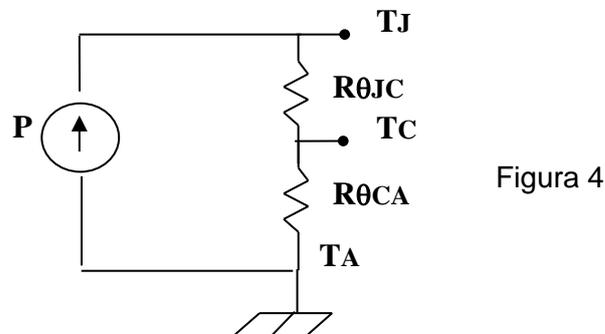
Como ejemplo supongamos que $P_{m\acute{a}x} = 75 \text{ W}$, $T_{j m\acute{a}x} = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ y $R_{\theta JA} = 2 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Para que el dispositivo pueda operar a una temperatura $T_A = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ la potencia máxima quedará limitada a:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{175 \text{ }^\circ\text{C} - 80 \text{ }^\circ\text{C}}{2 \text{ }^\circ\text{C/W}} = 47.5 \text{ W}$$



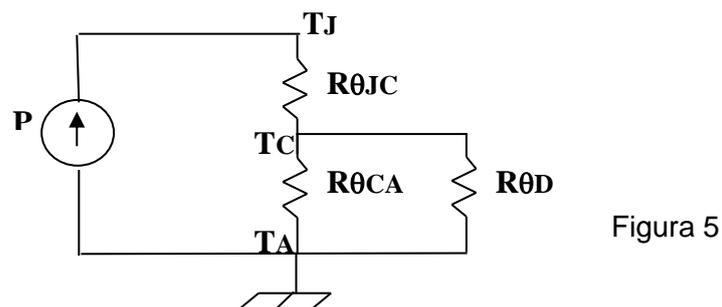
Disipador térmico

Puede hacerse un circuito eléctrico análogo que represente al camino seguido por la disipación del calor en su camino desde la juntura al ambiente, Figura 4.



Se puede mejorar la disipación de potencia utilizando un dispositivo auxiliar, el disipador térmico, para aumentar la superficie efectiva de disipación del calor. El efecto del disipador es proporcionar un camino adicional de baja resistencia térmica de la carcasa al ambiente.

El circuito análogo se modifica como muestra la figura 5.



La resistencia térmica del disipador $R_{\theta D}$ se elige mucho menor que la resistencia térmica carcasa-ambiente $R_{\theta CA}$, de modo que como si fueran resistencia en paralelo resulta como resistencia equivalente la $R_{\theta D}$.

Como ejemplo consideremos un diodo de silicio cuya temperatura máxima de juntura dada en las hojas de datos por el fabricante es $T_{j\text{máx}} = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se conoce $R_{\theta JC} = 7\text{ }^{\circ}\text{C/W}$, $V_d = 1\text{ V}$ e $I_d = 10\text{ A}$. Se pretende que para una temperatura ambiente de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura de juntura no pase de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuál será el valor del disipador a colocar ($R_{\theta D}$).

$$P = V_d \cdot I_d = 1\text{ V} \cdot 10\text{ A} = 10\text{ W}$$

$$P = \frac{T_j - T_A}{R_{\theta JC} + R_{\theta D}}$$

$$R_{\theta D} = \frac{T_j - T_A}{P} - R_{\theta JC}$$

$$R_{\theta D} = \frac{150^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}}{10\text{ W}} - 7^{\circ}\text{C/W} = 2^{\circ}\text{C/W}$$

La mayoría de los disipadores térmicos transfieren el calor extraído del dispositivo semiconductor al ambiente mediante una combinación de: conducción, convección y radiación. Son realizados en diversos materiales y formas. Según su forma se pueden agrupar en tres tipos básicos:

- **disipadores con aletas verticales planas**

Son realizados en aluminio con o sin acabado negro. Son muy buenos desde el punto de vista de enfriamiento por convección natural y tienen una buena resistencia térmica por convección forzada por circulación de aire.

- **disipadores con aletas verticales cilíndricas o radiales**

Se hacen de aluminio con acabado negro. Usan convección natural.

- **disipadores con aletas horizontales cilíndricas**

Fabricados con anillos de chapa y acabado negro mate. Se utilizan en espacios reducidos para obtener máximo enfriamiento con mínimo volumen.

En la figura 6 se muestran algunos diseños típicos.

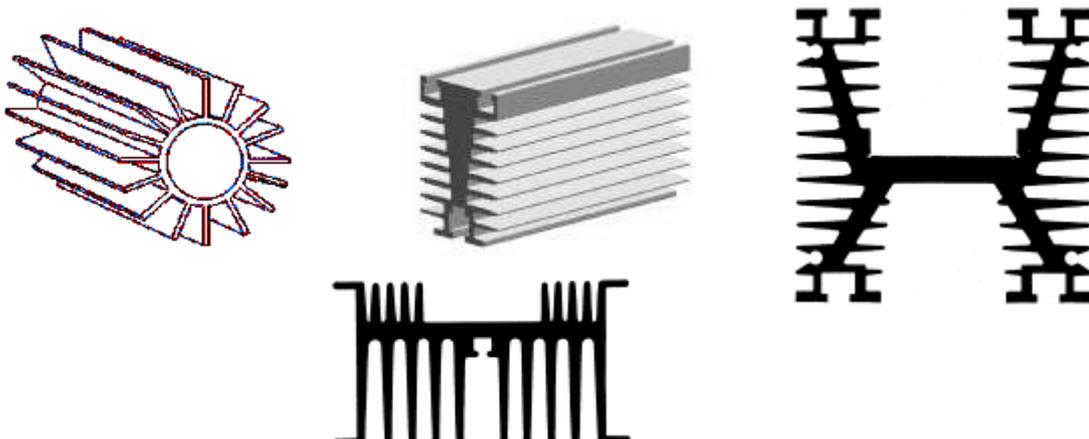


Figura 6

Los dispositivos de potencia suelen tener encapsulados metálicos o cerámicos que facilitan la evacuación del calor. La Figura 7 muestra distintos encapsulados para diodos de potencia.

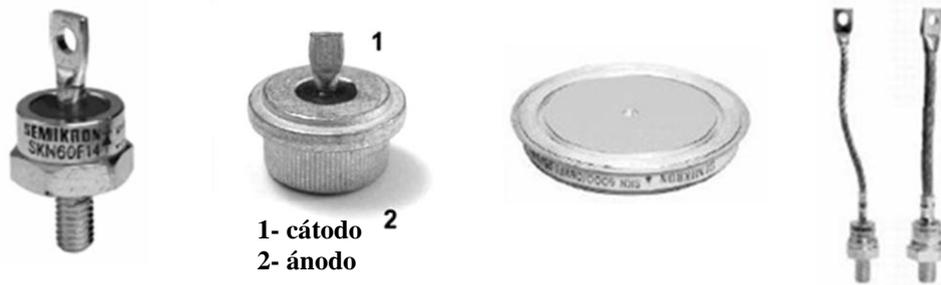
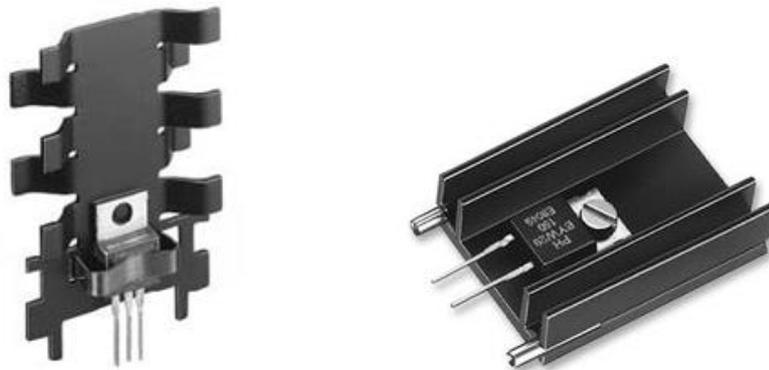


Figura 7

Si bien no existen fórmulas fijas de diseño, pueden establecerse algunas reglas:

- ✓ la superficie del disipador deberá ser lo más grande posible para permitir una máxima transferencia de calor
- ✓ se tratará que el disipador tenga un valor de emisividad próximo a uno para obtener una óptima radiación. Por ello generalmente se lo pinta de negro mate.
- ✓ la conductividad térmica del material del disipador deberá ser tal que no se produzcan gradientes térmicos excesivos.

Montaje del dispositivo sobre un disipador



Regímenes máximos indicados en hojas de datos

Los fabricantes de dispositivos semiconductores determinan entre otras especificaciones los regímenes máximos de temperatura y potencia soportables por el dispositivo. La figura hace referencia a las características de la familia de diodos 1N4001-1N4007.

T_{stg}	Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +175	°C

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation	3.0	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	50	°C/W

Se especifican como datos típicos:

- ✓ temperatura de almacenamiento
- ✓ temperatura de trabajo de la juntura
- ✓ disipación de potencia máxima
- ✓ resistencia térmica juntura ambiente (sin disipador)

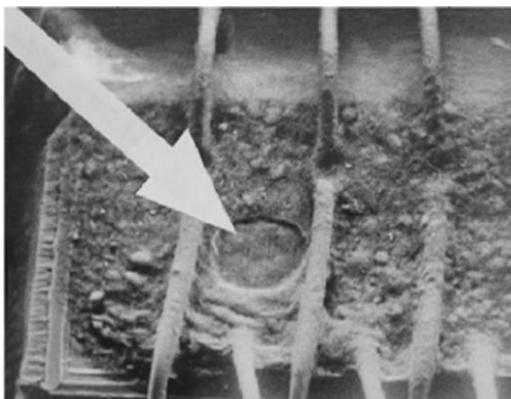
La **temperatura de almacenamiento** indica la temperatura a la que se puede mantener al dispositivo cuando no se le aplica potencia.

La **temperatura de trabajo de la juntura** indica el rango de temperaturas donde se podría operar al dispositivo sin sobrepasar sus límites térmicos. El límite máximo de temperatura si es sobrepasado puede destruir al dispositivo. En la práctica, para un diseño conservativo la temperatura de la unión TJ se considera menor que $T_{Jm\acute{a}x}$.

Estos límites se imponen para evitar daños mecánicos ocasionados por las contracciones térmicas.

En ciertas condiciones de trabajo, la temperatura de la unión y la potencia disipada por el dispositivo semiconductor pueden resultar inestables. Ambas comienzan a aumentar hasta un punto en que el dispositivo queda destruido por el fenómeno de **embalamiento térmico**. Un aumento de temperatura produce un aumento de la corriente por generación de portadores aumentando la potencia que debe ser disipada. Al circular más corriente aumenta la temperatura y se produce un ciclo regenerativo que puede llevar a la destrucción del dispositivo.

Una falla en los materiales semiconductores es el agrupamiento de portadores en una pequeña porción de la región activa. Una consecuencia de este agrupamiento es la aparición de **puntos calientes**. Este mecanismo produce un aumento de la potencia disipada localmente lo que a su vez provoca otro aumento local de temperatura y así sucesivamente. Este mecanismo de realimentación puede llevar a una situación inestable en la que la corriente se agrupa en zonas muy pequeñas de la región activa que resultarán extremadamente calientes y pueden llevar a una fusión local del material semiconductor, figura 8.



Microfotografía de un punto caliente en un semiconductor

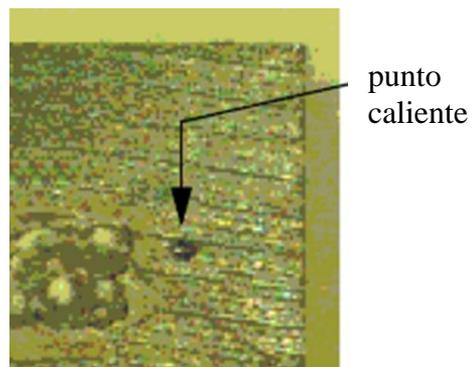


Figura 8

Operación de potencia por pulsos

Cuando un dispositivo está sometido a un pulso de carga puede soportar mayor disipación de potencia. Los materiales semiconductores poseen una determinada capacidad térmica,

por lo tanto no pueden responder en forma instantánea a los cambios de la temperatura. Es por esto que cuando un dispositivo opera en forma intermitente la disipación de potencia podrá extenderse dependiendo de la duración del pulso aplicado y la frecuencia con la cual ocurre la operación ("duty factor" o factor de actividad). Al aplicar el pulso el dispositivo comenzará a calentarse. Si la potencia se mantiene en el tiempo se llegará a un balance entre la generación y evacuación del calor, estabilizando la temperatura en la junta, figura 9 a). La capacidad térmica del dispositivo $C\theta$ almacena energía calórica, de modo que, la condición de estabilidad quedará determinada por la asociación de esta capacidad térmica con la resistencia térmica por medio de la constante de tiempo térmica $\tau = R\theta C\theta$. Si la excitación termina antes que el dispositivo alcance el régimen de temperatura de estado estacionario el valor alcanzado por la temperatura de junta será menor que el correspondiente al estado estacionario, Figura 9 b).

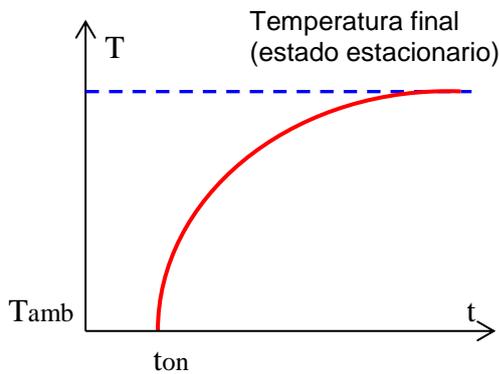


Figura 9 a)

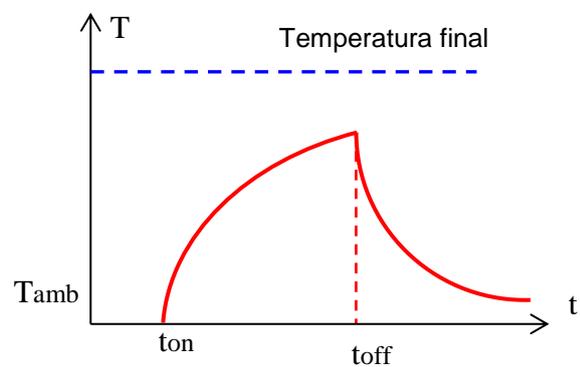


Figura 9 b)

Si en lugar de un solo pulso, el dispositivo está sometido a un régimen continuo de pulsos de período T_t y duración t_p , el pico de temperatura alcanzada por el primer pulso será la temperatura inicial para el segundo, Figura 10. Luego de algunos pulsos se llegará a una situación de estabilidad.

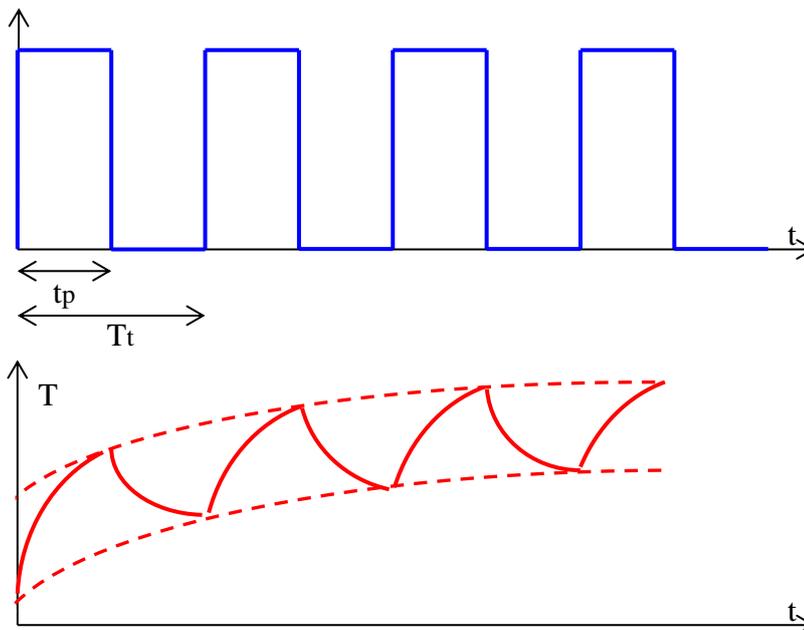


Figura 10

La potencia total puede calcularse como:

$$P_{tot} = \frac{T_j - T_{amb}}{Z_{\theta JA}}$$

$Z_{\theta JA}$ es la impedancia térmica transitoria entre la juntura y el ambiente. Depende de la duración t_p del pulso y del "duty factor" (factor de actividad) definido como $\delta = t_p/T_t$.

El máximo pulso estará limitado por la máxima temperatura de juntura:

$$P_{totm\acute{a}x} = \frac{T_{jm\acute{a}x} - T_{amb}}{Z_{\theta JA}}$$

En las hojas de datos de los dispositivos de potencia se especifica la variación de la impedancia térmica en función del tiempo y del pulso utilizado, Figura 11.

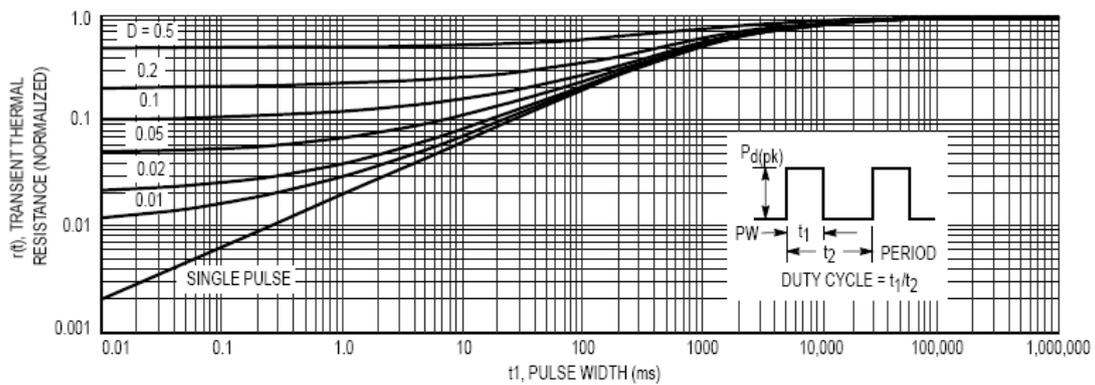


Figura 11

Bibliografía

- Basic semiconductor thermal measurement- Semic. App. Note AN1570/D, Motorola
- Basic thermal management of power semiconductors- Tech. Data AN1083, Motorola
- Thermal considerations for power semiconductors, Philips Semiconductors