La dissipazione di un amplificatore

INDICE

1. INTRODUZIONE

La dissipazione della potenza di un amplificatore, durante il normale funzionamento, è certamente un fattore di cui tenere conto.
Non solo per gli amplificatori audio, ma anche per i buffer, in molti casi occorre conoscere il surriscaldamento anche dei semplici operazionali.

2. LA STADIO FINALE

Gli amplificatori più diffusi sono certamente quelli in classe AB, per intendersi come quello rappresentato in figura:

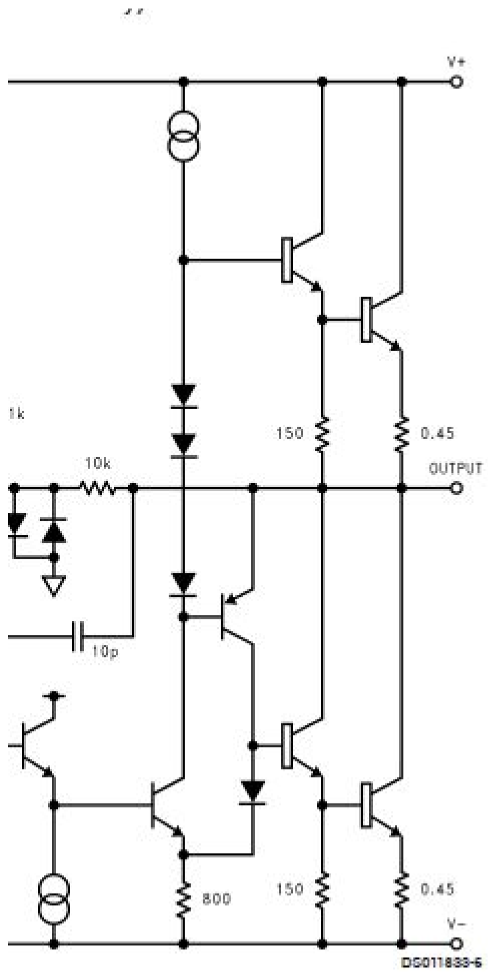

Figura 1

L' immagine è estratta dal datasheet del LM3886 NATIONAL.
In questo tipo di struttura i due transistor finali lavorano uno per ogni semionda.

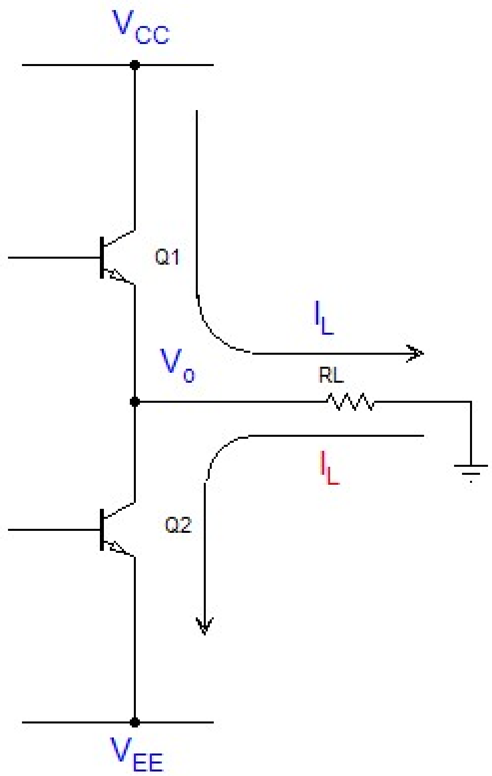

Figura 2

Come si vede durante la semionda positiva, si ha un passaggio di corrente da V_{CC} verso la massa (attraverso la resistenza di carico R_L e il transistor Q_1), durante la semionda negativa la corrente andrà dalla massa verso V_{EE} (attraverso la resistenza di carico R_L e il transistor Q_2).
La dissipazione per ogni transistor dipende quindi dalla differenza tra, nel caso di funzionamento di Q_1:

$$P_{Q1} = [V_{CC} - (I_L \cdot R_L)] \cdot I_L$$

Durante il funzionamento di Q_2, la V_{EE} sostituisce la V_{CC}, e la potenza complessiva che se ne va in calore è la media delle potenze dissipate dai due transistor.

3. Potenza dissipata in regime sinusoidale

L' esempio di sopra vale per il funzionamento in continua, per valutare la dissipazione in alternata, come nel caso di un amplificatore audio, occorre valutarne il comportamento in regime sinusoidale.

Normalmente in regime sinusoidale viene usata la variabile ω, che altro non è che:

$$\omega = 2\pi f$$

Dove f rappresenta la frequenza.
Essendo $f=1/T$ la formula diventa:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Se si assume che $T=1s$, allora $\omega=2\pi$.
Non è un trucco, non cambierebbe nulla se $f=1kHz$ semplicemente facilita i calcoli.

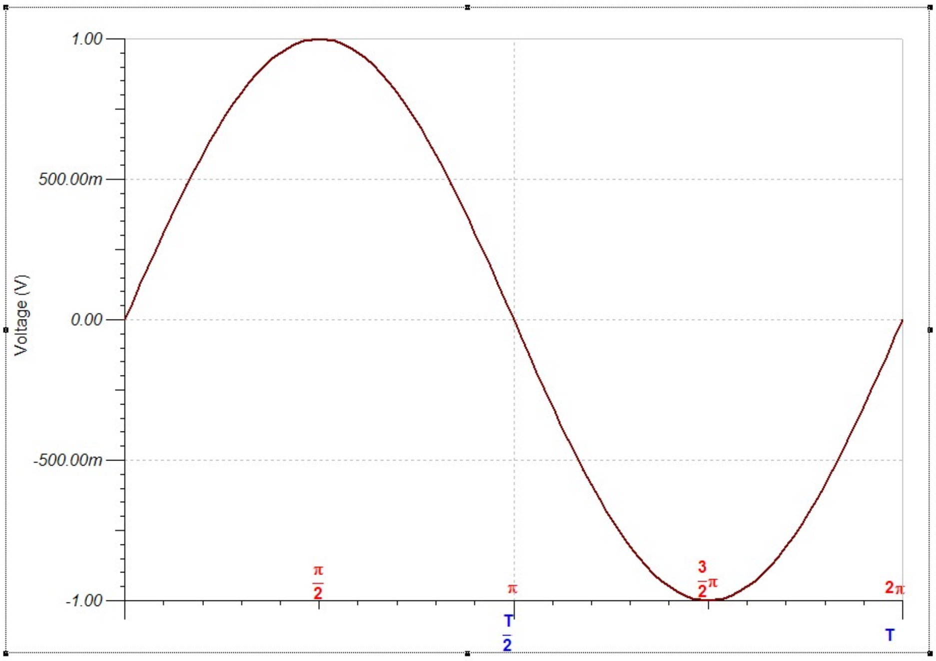

Figura 3

La figura 3 illustra come si può considerare che:

- $T=2\pi$
- $T/2=\pi$

E così via per gli altri valori.

3.1. Calcolo della potenza dissipata

La potenza viene espressa come:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

Occorre sostituire con le nostre variabili, tenendo presente che il valore assoluto di V_{CC} è uguale al valore assoluto di V_{EE}, quindi:

$$V_{AL} = |V_{CC}| + |V_{EE}|$$

La tensione di uscita è rappresentata dalla tensione massima raggiungibile per la funzione seno:

$$V_{omax} \cdot \sin \omega t$$

Occorre ancora considerare che T corrisponde al periodo della sinusoide (l' inverso della frequenza) quindi:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Se si considera la dissipazione di uno dei due transistor, si nota che sarà data dalla caduta di tensione collettore-emettitore, V_{CE} per la corrente che attraversa il carico:

$$V_{CE} = \frac{V_{AL}}{2} - (V_{omax} \cdot \sin \omega t)$$

Quindi riconducendo alla formula della potenza, un transistor dissipa:

$$P_{diss} = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \left(\frac{V_{AL}}{2} - V_{omax} \cdot \sin \omega t\right) \cdot (I_{Lmax} \cdot \sin \omega t) \cdot dt \qquad (1)$$

Moltiplicando:

$$P_{diss} = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_{AL}}{2} \cdot I_{Lmax} \cdot \sin \omega t - V_{omax} \cdot I_{Lmax} \cdot \sin(\omega t)^2 \cdot dt \quad (1.1)$$

Per facilitare conviene spezzare in due integrali e risolverne uno per volta:

$$P_{diss} = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_{AL}}{2} \cdot I_{Lmax} \cdot \sin \omega t \cdot dt - \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} V_{omax} \cdot I_{Lmax} \cdot \sin(\omega t)^2 \cdot dt \qquad (2)$$

A questo punto per valutare ogni integrale basta fare ricorso alle tavole, si trovano anche in rete ad esempio:

http://it.wikipedia.org/wiki/Tavola_degli_integrali_indefiniti_di_funzioni_trigonometriche

3.1.1. Prima parte

Il primo integrale della (2) è:

$$\frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_{AL}}{2} \cdot I_{Lmax} \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

Quindi portando le costanti fuori:

$$\frac{1}{T} \cdot \frac{V_{AL}}{2} \cdot I_{Lmax} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t \cdot dt \qquad (3)$$

L' integrale è:

$$\left[-\frac{1}{\omega} \cdot \cos \omega t\right]_0^{\frac{T}{2}} \qquad (3.1)$$

1/ω è una costante e si può tirare fuori, rimane:

$$[-\cos \omega t]_0^{\frac{T}{2}} = \left[-\cos \frac{2\pi}{T} t\right]_0^{\frac{T}{2}} \qquad (3.2)$$

Come illustrato in Fig 3, $T=2\pi$ per cui i termini dello stesso colore si annullano, rimane:

$$[-\cos t]_0^{\frac{T}{2}} \qquad (3.3)$$

Per *t* che va da *0 a T/2* cioè π. La soluzione è la differenza tra il valore finale e il valore iniziale:

- Il coseno di *π è -1*, essendo negato *cos π = 1*
- Il coseno di *0 è 1*, essendo negato *cos0=-1*

Quindi: *1-(-1) = 2*
Ricostruendo la formula (3):

$$\frac{1}{T} \cdot \frac{V_{AL}}{2} \cdot I_{Lmax} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot 2 \qquad (3.4)$$

Come si è detto: $\omega=2\pi/T$ quindi la formula (3.4) diventa:

$$\frac{1}{T}\cdot\frac{V_{AL}}{2}\cdot I_{Lmax}\cdot\frac{T}{2\pi}\cdot 2 \qquad (3.5)$$

I termini con lo stesso colore si annullano e il risultato finale è:

$$\frac{V_{AL}\cdot I_{Lmax}}{2\pi} \qquad (4)$$

3.1.2. Seconda parte

Il secondo integrale della (2) è:

$$\frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} V_{omax}\cdot I_{Lmax}\cdot \sin(\omega t)^2\cdot dt$$

Anche in questo caso si portano fuori le costanti:

$$\frac{1}{T}\cdot V_{omax}\cdot I_{Lmax}\int_0^{\frac{T}{2}} \sin(\omega t)^2\cdot dt \qquad (5)$$

L' integrale vale:

$$-\frac{\sin(\omega t)^{2-1}\cdot\cos(\omega t)}{2\omega}+\frac{2-1}{2}\cdot\int \sin(\omega t)^{2-2}\cdot dt \qquad (5.1)$$

E salta fuori un altro integrale, risolvendo gli esponenti:

$$-\frac{\sin(\omega t)^{1}\cdot\cos(\omega t)}{2\omega}+\frac{1}{2}\cdot\int \sin(\omega t)^{0}\cdot dt \qquad (5.2)$$

Alla fine, essendo l' integrale di $dt = t$:

$$-\frac{\sin(\omega t)\cdot\cos(\omega t)}{2\omega}+\frac{1}{2}\cdot\int dt = -\frac{\sin(\omega t)\cdot\cos(\omega t)}{2\omega}+\frac{t}{2} \qquad (5.3)$$

Quindi:

$$\left[-\frac{\sin(\omega t)\cdot\cos(\omega t)}{2\omega}+\frac{t}{2}\right]_0^{\frac{T}{2}} \qquad (5.4)$$

La soluzione è la differenza tra il valore finale ($t=T/2$) e il valore iniziale ($t=0$).

- Nel caso di *t=T/2*, ricordando che *ω=2π/T*:

$$-\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{T}\cdot\frac{T}{2}\right)\cdot\cos\left(\frac{2\pi}{T}\cdot\frac{T}{2}\right)}{\frac{2\pi}{T}}+\frac{\frac{T}{2}}{2} \qquad (5.5)$$

I termini con lo stesso colore si annullano e rimane:

$$-\frac{\sin\pi\cdot\cos\pi}{\frac{T}{2}}+\frac{T}{4}=-\frac{0\cdot-1}{\frac{T}{2}}+\frac{T}{4}=\frac{T}{4} \qquad (5.6)$$

- Nel caso di *t=0* è facile vedere che tutti i termini si annullano

Quindi il valore finale della (5) è:

$$\frac{1}{T}\cdot V_{omax}\cdot I_{Lmax}\cdot\frac{T}{4} \qquad (5.7)$$

Semplificando i termini con lo stesso colore:

$$\frac{V_{omax}\cdot I_{Lmax}}{4} \qquad (6)$$

3.2. Calcolo della potenza massima dissipata

La potenza dissipata da uno dei due transistor è quindi la differenza tra la formula (4) e la (6):

$$P_{diss}=\frac{V_{AL}\cdot I_{Lmax}}{2\pi}-\frac{V_{omax}\cdot I_{Lmax}}{4} \qquad (7)$$

I transistor sono due, quindi moltiplicando il tutto per 2:

$$P_{diss}=\frac{V_{AL}\cdot I_{Lmax}}{\pi}-\frac{V_{omax}\cdot I_{Lmax}}{2} \qquad (7.1)$$

Ci sono ancora troppe variabili, sapendo che:

$$I_{Lmax}=\frac{V_{omax}}{R_L}$$

Sostituendo questo nella formula (7.1):

$$P_{diss}=\frac{V_{AL}\cdot\frac{V_{omax}}{R_L}}{\pi}-\frac{V_{omax}\cdot\frac{V_{omax}}{R_L}}{2}$$

Semplificando:

$$P_{diss} = \frac{V_{AL} \cdot V_{omax}}{\pi R_L} - \frac{V_{omax}^{\ 2}}{2R_L} \qquad (8)$$

La formula (8) mostra l' andamento della Potenza dissipata in funzione della tensione di uscita.
Tracciando un grafico con Excel (con V_{AL} = 12V, R_L = 8Ω) si ottiene:

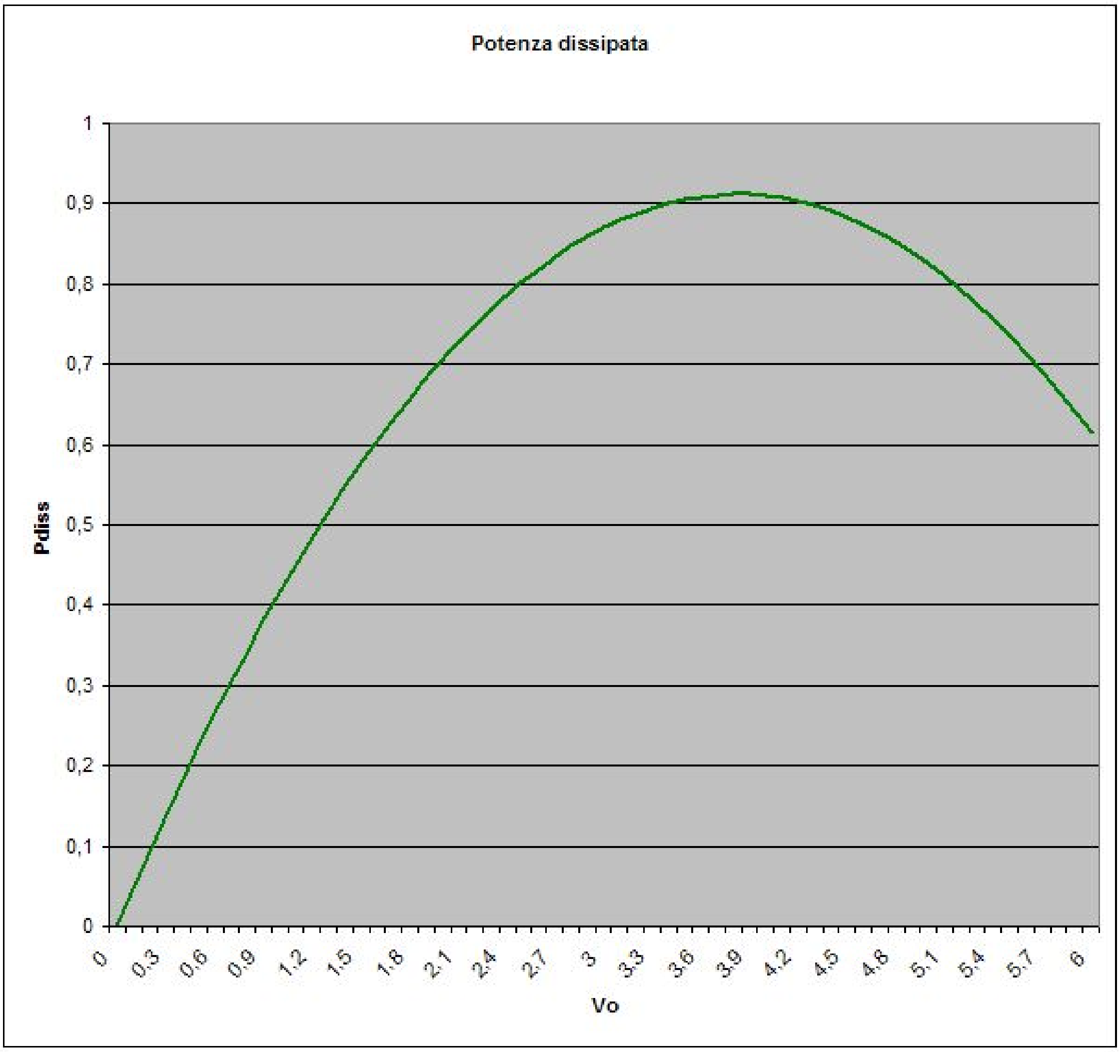

Figura 4

Che mostra come la potenza dissipata dipenda dalla tensione di uscita, e che ha un punto di massimo.

Per trovare il valore massimo occorre derivare la formula (8) rispetto a V_{omax} :

$$\frac{dP_{diss}}{dV_{omax}} = \frac{V_{AL}}{\pi R_L} - \frac{V_{omax}}{R_L} \qquad (9)$$

La figura di seguito mostra l' andamento della funzione derivata:

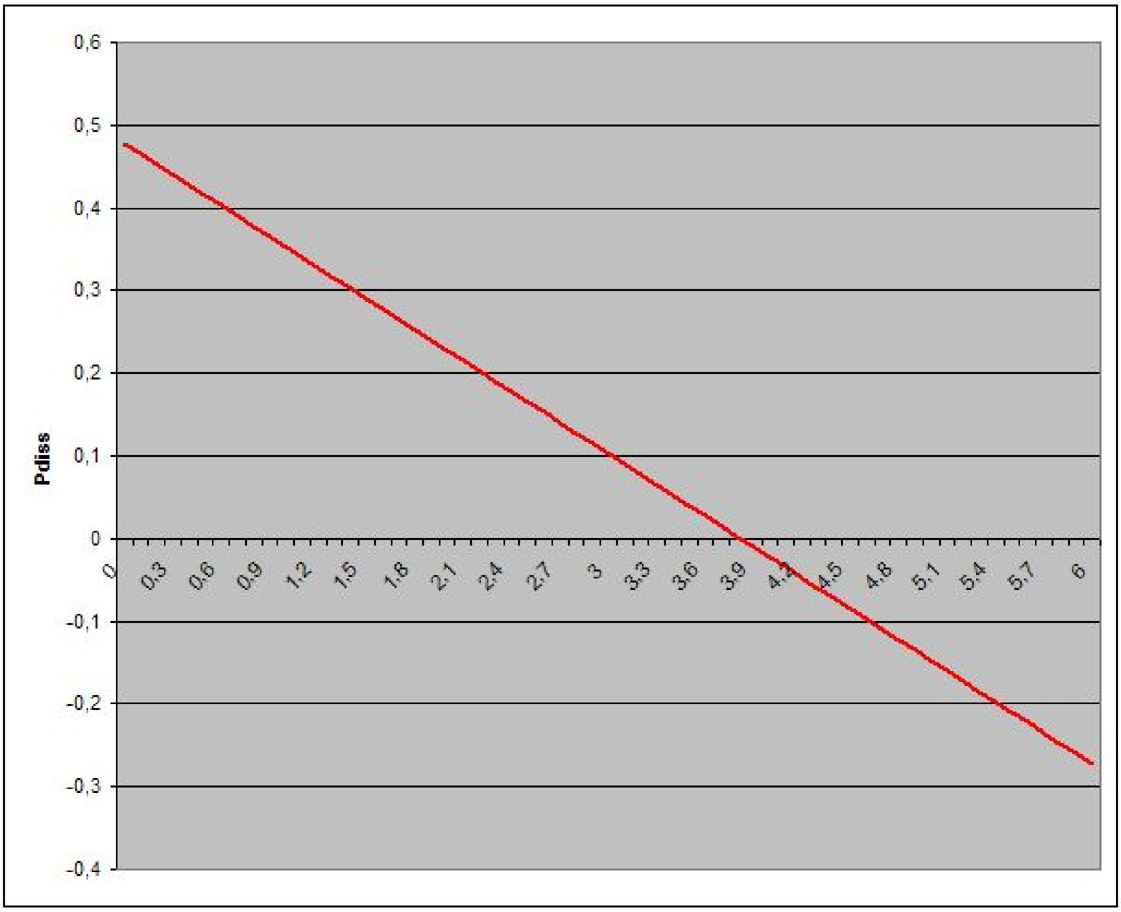

Figura 5

Chiaramente il punto massimo della formula (8) si raggiungerà quando la sua derivata (9), vale 0, quindi:

$$\frac{V_{AL}}{\pi R_L} - \frac{V_{omax}}{R_L} = 0 \qquad (10)$$

$$\frac{V_{AL}}{\pi R_L} = \frac{V_{omax}}{R_L} \qquad (10.1)$$

$$\frac{V_{AL}}{\pi} = \frac{V_{omax}}{R_L} \cdot R_L \qquad (10.2)$$

Semplificando, la massima potenza dissipata si avrà per:

$$V_{omax} = \frac{V_{AL}}{\pi} \qquad (11)$$

Questo dato è importante perché indica il valore a cui viene sottoposto al maggiore stress il dispositivo, ed è importante tenerne conto durante il dimensionamento ma anche durante il test di un amplificatore.

Sapendo il valore di V_{omax} alla quale si ha la massima dissipazione, basta sostituirlo nella formula (8) per conoscere la massima potenza che dissiperà l' amplificatore.

$$P_{dissmax} = \frac{V_{AL} \cdot \frac{V_{AL}}{\pi}}{\pi R_L} - \frac{\left(\frac{V_{AL}}{\pi}\right)^2}{2R_L} \qquad (12)$$

$$P_{dissmax} = \frac{{V_{AL}}^2}{\pi^2 R_L} - \frac{{V_{AL}}^2}{2\pi^2 R_L} \qquad (12.1)$$

$$P_{dissmax} = \frac{2{V_{AL}}^2 - {V_{AL}}^2}{2\pi^2 R_L} \qquad (12.2)$$

E infine:

$$P_{dissmax} = \frac{{V_{AL}}^2}{2\pi^2 R_L} \qquad (13)$$

Questa è la formula da considerare nel calcolo della dissipazione.

4. La dissipazione del calore

Perché il dispositivo non si danneggi, non si deve raggiungere, e comunque superare la temperatura di giunzione massima indicata dal costruttore.
Normalmente la temperatura di giunzione massima (T_{jmax}) è di 150°C, e può arrivare fino a 175°C.
La temperatura della giunzione dipende dalla potenza dissipata, dalla temperatura ambiente e dalla capacità del dispositivo a trasferire il calore nell' aria.
Rapportando il tutto a una sorta di schema elettrico, si può immaginare il “circuito” di dissipazione come indicato nella figura di seguito:

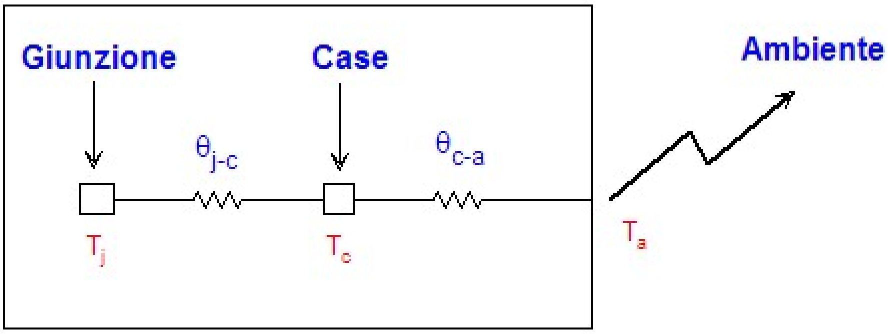

Figura 6

Tra la giunzione e il case del dispositivo, c' è una resistenza termica θ_{j-c} (espressa in *°C/W)*, in serie a questa c' è quella tra il case e l' ambiente θ_{c-a}.
E' evidente che quanto minori sono queste resistenze termiche, maggiore è la capacità di fare defluire verso l' ambiente il calore della giunzione.
La resistenza θ_{j-c} non si può cambiare, è un fatto costruttivo, quella tra il case e l' ambiente si inserendo un dissipatore.

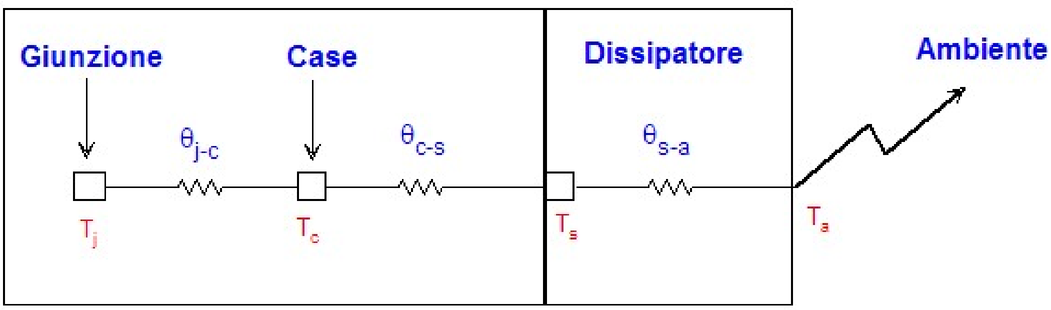

Figura 7

In questo modo la resistenza θ_{c-s} (resistenza termica tra il case e il dissipatore), prende il posto della θ_{c-a}, ed il suo valore si abbassa drasticamente, dipende in sostanza da come viene fatto l' accoppiamento tra il dispositivo e il dissipatore, se si utilizzano paste termoconduttive, la pulizia eccetera.

Tradotto in formule:

$$P_{dissmax} = \frac{T_{jmax} - T_a}{\theta_{j-c} + \theta_{c-s} + \theta_{s-a}} \qquad (14)$$

Quindi la resistenza termica del dissipatore da utilizzare:

$$\theta_{s-a} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_{dissmax}} - \theta_{j-c} - \theta_{c-s} \qquad (15)$$

E questo è tutto, spero.