

Dissipazione di potenza e dimensionamento dei dissipatori

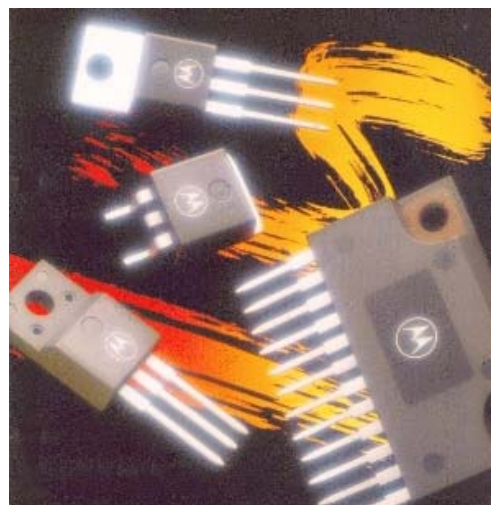
Con particolare riferimento ai dispositivi a semiconduttore

Relazione fra temperatura e potenza

Nei componenti passivi (resistori) e a semiconduttore (sia discreti che integrati) il passaggio della corrente elettrica provoca - per effetto Joule - un innalzamento della temperatura dei dispositivi, che può essere calcolato attraverso la seguente relazione:

$$(1) \quad T_w - T_a = P_d \cdot R_{th}$$

dove T_w è la temperatura raggiunta dal dispositivo a causa della dissipazione della potenza applicata P_d , T_a è la temperatura dell'ambiente circostante ed R_{th} è una costante che viene chiamata "resistenza termica", che rappresenta la difficoltà di smaltimento del calore verso l'ambiente circostante ed è l'inverso della "conduttanza termica" dei materiali e dei fluidi che smaltiscono il calore prodotto. Dalla (1) si ricava che l'unità di misura della resistenza termica è il grado/Watt ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).



Poiché il costruttore del dispositivo indica nel foglio tecnico una temperatura massima di funzionamento T_{max} , è possibile calcolare la massima potenza P_{max} dissipabile dal dispositivo stesso ad una temperatura ambiente T_{amax} sfruttando la relazione (1), e riscrivendola nel modo seguente:

$$(2) \quad T_{max} - T_{amax} = P_{max} \cdot R_{th}$$

La relazione ora vista ci spiega inoltre perché, una volta raggiunta la massima temperatura specificata, un'ulteriore incremento della potenza applicata porterebbe ad un ulteriore aumento della temperatura, con conseguente possibile danneggiamento del dispositivo. Dovrebbe essere chiaro, quindi, che i limiti di potenza specificati per un certo dispositivo dipendono strettamente dai limiti di temperatura dello stesso.

La "curva di derating"

Nel foglio tecnico di un resistore viene riportato un grafico detto "curva di derating", mostrato in **Figura 1**:

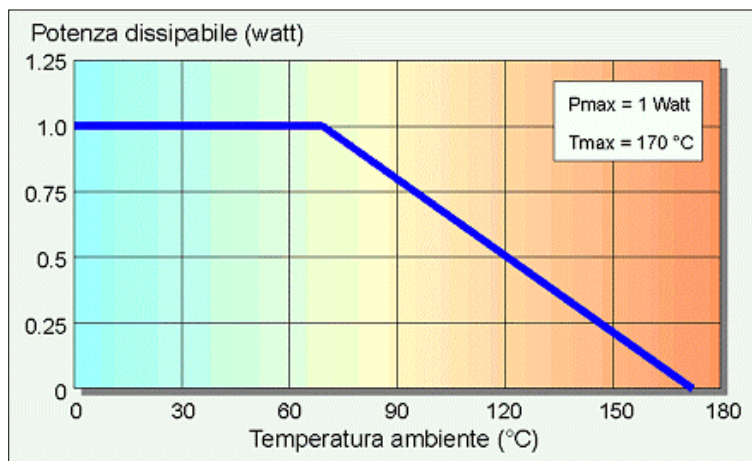


Fig. 1 - Curva di derating di un elemento resistivo da 1 Watt.

Come si vede dalla curva di derating, è possibile dissipare la potenza nominale fino ad una temperatura ambiente di 70 °C, superata la quale è necessario ridurre progressivamente la potenza dissipata fino a che - raggiunta la temperatura massima di lavoro di 170 °C - la potenza dissipabile diviene nulla come già osservato a proposito della relazione (2).

Vi è da notare però che la rappresentazione grafica della relazione (2) in un piano di coordinate Pd/Ta è quella di una retta di coefficiente angolare $-1/R_{th}$, e non quello di una spezzata come quella riportata in Figura 1. Perché mai?

La risposta è che il costruttore, per problemi legati alle caratteristiche dei materiali utilizzati nella costruzione del dispositivo, indica una potenza massima dissipabile "di sicurezza" fino ad una determinata temperatura ambiente, che nella figura riportata è ad esempio di 70 °C. Secondo la relazione (2) avremmo invece che a temperature inferiori allo zero potremmo in teoria dissipare potenze progressivamente crescenti, ciò che il costruttore ci sconsiglia di fare.

I dissipatori e i meccanismi di propagazione del calore

Visti i limiti di temperatura - e quindi di potenza - imposti dal costruttore (e utili alla corretta "sopravvivenza" del dispositivo!) come è possibile smaltire adeguatamente il calore prodotto o addirittura estendere i limiti indicati dalla curva di derating?

Per i dispositivi di potenza la risposta è semplice: l'impiego del "dissipatore di calore", ovvero di un elemento che sia un buon conduttore di calore (tipicamente un metallo o un materiale ceramico) che, posto a contatto con il nostro dispositivo (incollato o fissato a vite), permetta un migliore smaltimento del calore.

Come opera un dissipatore? In pratica esso "estende" le dimensioni fisiche del dispositivo, permettendo quindi un miglior smaltimento del calore, in quanto "sottrae" il calore prodotto per effetto Joule e lo trasferisce all'ambiente circostante, e impedisce il superamento della temperatura limite.

Che cosa cambia nella formula (2)? Semplice: poiché la presenza del dissipatore serve per aumentare la conduttanza termica fra il nostro dispositivo e l'ambiente, si può affermare che la presenza del dissipatore porta ad una riduzione della resistenza termica, che è appunto l'inverso della conduttanza termica. La riduzione della R_{th} nella formula (2) permette quindi di diminuire la temperatura raggiunta dal dispositivo oppure - volendo sfruttare comunque la massima temperatura di lavoro - disporre di una potenza dissipabile più elevata.

Per meglio comprendere non solo il meccanismo di smaltimento del calore ma anche come ottimizzare i vantaggi derivabili dall'impiego di un dissipatore, analizziamo brevemente le tre modalità di propagazione del calore.

- **Conduzione:** è quella che avviene all'interno di un corpo o fra due corpi in contatto fra di loro a causa dell'agitazione termica degli atomi, ed è il meccanismo più efficiente di trasmissione del calore. Per tale motivo il dispositivo che produce calore va fissato saldamente a contatto con il dissipatore, che deve essere costituito da un materiale con una elevata conducibilità termica; il materiale più utilizzato grazie al costo contenuto e alla facilità di produrre profilati ottenuti per estrusione è l'alluminio.
- **Convezione:** la convezione è il moto all'interno di un fluido, per cui si sfrutta questo fenomeno ad esempio per asportare il calore del dissipatore (o del componente stesso) attraverso il movimento dell'aria, che può essere naturale (dovuto al fenomeno di espansione termica) oppure forzato (tramite ventole). Per le elevate potenze, il fluido refrigerante può essere anche un liquido, che scorre in un condotto all'interno del dissipatore e viene poi raffreddato o per sostituzione (acqua corrente) o tramite un opportuno radiatore.
- **Irraggiamento:** il dissipatore e lo stesso componente irradiano calore nell'ambiente circostante per mezzo della radiazione infrarossa, ed anche questo fenomeno contribuisce allo smaltimento del calore, anche se alle basse temperature rappresenta una frazione trascurabile del totale.

Una esemplificazione visiva dei tre meccanismi è mostrata in **Figura 2**.

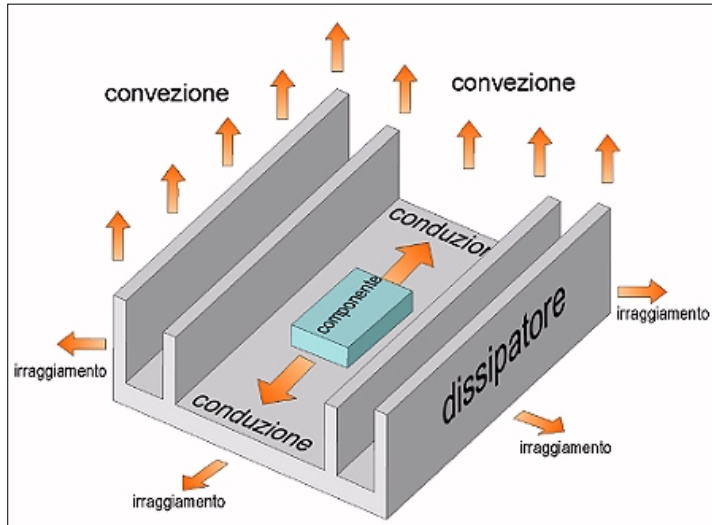


Fig. 2 - Ecco i tre meccanismi di propagazione del calore nel caso di un dispositivo elettronico fissato ad un dissipatore

Va inoltre precisato che l'efficienza di un dissipatore dipende da parametri quali ad esempio il materiale utilizzato (conduttività termica), le sue dimensioni (valore della resistenza termica), la forma (efficacia della convezione dell'aria), il colore (effetto "corpo nero" e quindi efficienza nell'irraggiamento), la finitura superficiale (resistenza di contatto con il componente elettronico e valore dell'irraggiamento), le condizioni di ventilazione (anche se interno o esterno all'apparecchiatura), la posizione di montaggio (verticale ad alette verticali per una migliore convezione dell'aria) e infine la posizione di montaggio del carico sul dissipatore stesso (centrale oppure verso il bordo).

Detto ciò, il parametro che caratterizza l'efficienza di un dissipatore e che riassume gli altri parametri ora visti è la sua **resistenza termica $R_{th(d-a)}$** , ovvero fra dissipatore e ambiente, che viene specificata dal costruttore sul relativo foglio tecnico, e che viene definita come l'incremento di temperatura subito a causa dell'applicazione di una potenza elettrica (attiva) di 1 Watt, concordemente con quanto si può dedurre dalla relazione (1).

La scelta del dissipatore

Per scegliere un dissipatore occorre conoscere i seguenti parametri:

- Potenza massima dissipata dal dispositivo
- Temperatura massima consentita per il dispositivo e sua resistenza termica
- Massima temperatura ambiente
- Tipo di flusso di aria in corrispondenza del dissipatore

Per tener conto di questi parametri, la formula (2) può essere riscritta nel modo seguente, facendo riferimento ad un dispositivo a semiconduttore:

$$(3) \quad T_{jmax} - T_{amax} = P_{dmax} \cdot (R_{thjc} + R_{thcd} + R_{thda})$$

dove T_{jmax} è la massima temperatura di giunzione specificata dal costruttore, T_{amax} è la massima temperatura ambiente raggiungibile, P_{dmax} è la potenza massima dissipabile, R_{thjc} è la resistenza termica fra giunzione e contenitore (indicata dal costruttore sul foglio tecnico del dispositivo), R_{thcd} è la resistenza termica fra contenitore e dissipatore (dovuta al tipo di contatto fra i due e alla eventuale presenza di fogli isolanti o di grasso) ed R_{thda} è la resistenza termica dissipatore-ambiente ricavata dal catalogo dei dissipatori. La localizzazione delle tre resistenze termiche è mostrata in **Figura 3**.



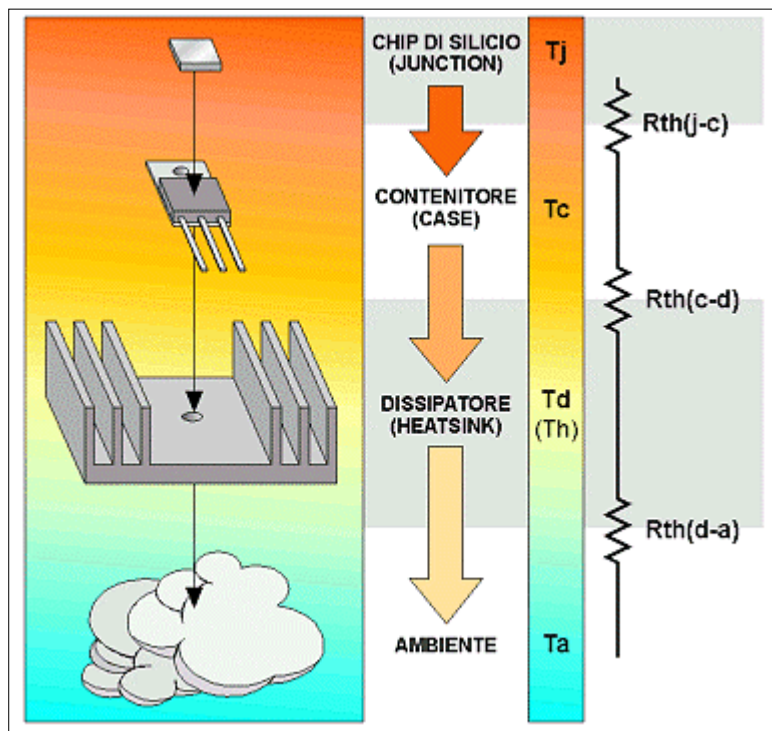


Fig. 3 - Le tre resistenze termiche corrispondono alla successione: semiconduttore-contenitore-dissipatore-ambiente con i relativi salti termici

Nel caso invece in cui si intenda utilizzare il componente senza dissipatore, è necessario utilizzare la formula seguente, che rappresenta nient'altro che una riscrittura della (2):

$$(4) \quad T_{j\max} - T_{a\max} = P_{d\max} \cdot R_{thja}$$

nella quale si utilizza la sola resistenza termica giunzione-ambiente R_{thja} fornita anch'essa nel foglio tecnico del componente.

Nella **Figura 4** sono riportati i valori di resistenza termica R_{thjc} ed R_{thja} per alcuni dei più comuni contenitori impiegati in elettronica per i dispositivi a semiconduttore.

Un esempio numerico

Un dispositivo a semiconduttore in grado di operare ad una temperatura massima di giunzione di 150 °C ha la necessità di dissipare una potenza di 5 Watt, ed è incapsulato in un contenitore TO3. La massima temperatura ambiente prevista è di 50 °C e si intende raffreddare il dissipatore a convezione naturale in aria libera. Supponendo di fissare il dispositivo in modo da sfruttare una resistenza contenitore-dissipatore pari a 0.3 °C/W.

Dovendo scegliere il tipo di dissipatore necessario, l'incognita è la R_{thda} , che può essere ricavata dalla (3) tramite la relazione:

$$(5) \quad R_{thda} = (T_{j\max} - T_{a\max}) / P_{d\max} - R_{thjc} - R_{thcd}$$

dove, inserendo i valori numerici, si ottiene:

$$R_{thda} = (150 - 50) / 5 - 0.7 - 0.3 = 19 \text{ °C/W}$$

Essendo questo il valore massimo ammesso, occorre scegliere sul catalogo un dissipatore con una resistenza termica inferiore ai 19 °C/W.

package	Rth(j-a) (°C/W)	Pdmax Ta =25°C	Rth(j-c) (°C/W)	Pdmax Tc =25°C	Icmax DC
TO-92 TO-18	200	0.6 W	80	1.6 W	1 A
TO-5	160	0.9 W	80	1.6 W	1 A
TO-126 TO-127	90 80	1.4 W 1.6 W	2.8 1.3	45 W 100 W	6 A 15 A
TO-220	65	2 W	1.2	125 W	35 A
TO-3	50	3 W	0.7	175 W	60 A
TO-3 spesso	38	3.3 W	0.5	350 W	70 A
TO-3P TO-218 SOT-93 TO-247	50	2.5 W	1	150 W	75 A

Fig. 4 - Valori di resistenza termica giunzione-ambiente e giunzione-contenitore per alcuni dei contenitori più utilizzati per i semiconduttori. Si notino i differenti valori di potenza massima dissipabile nei due casi specificati: con Ta (ambiente) = 25 °C e con Tc (contenitore) = 25 °C, ovvero con dissipatore di area infinita!

Si tenga inoltre conto che il valore della resistenza termica ottenuta per il dissipatore può essere ridotta con un'opportuna ventilazione, che permette di ridurre il valore della Rthda come in **Figura 5**.

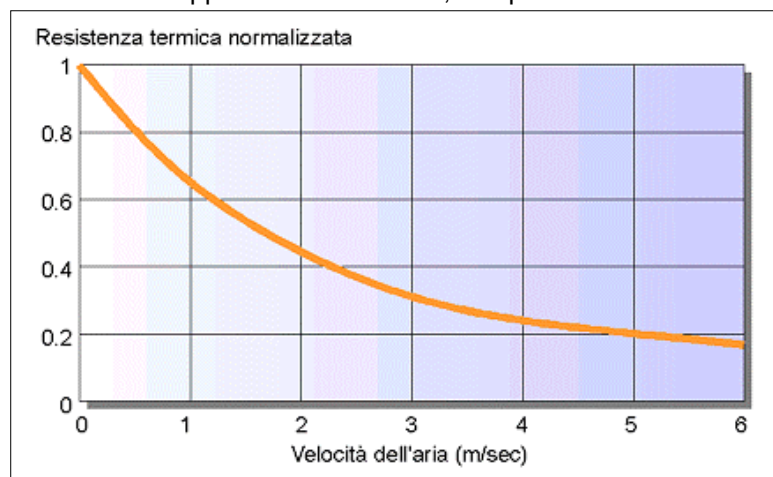


Fig. 5 - La ventilazione forzata permette di ridurre sensibilmente il valore della resistenza termica fra dissipatore e ambiente, a tutto vantaggio della dissipazione e della temperatura raggiunta

Tab. 1 - A seconda delle condizioni di contatto, si vedano alcuni esempi di valori di Rthcd

contenitori	senza isolante		con isolante		unità
	a secco	con grasso	a secco	con grasso	
TO-220	1.2	1.0	3.4	1.6	°C/W
TO-3	0.5	0.1	1.3	0.4	°C/W

Nel grafico a pagina seguente (**Figura 6**) vengono messi a confronto i valori di potenza massima dissipabile con Tc = 25 °C e con Ta = 25 °C per i contenitori usati per i transistor, nonché le relative correnti massime ottenibili.

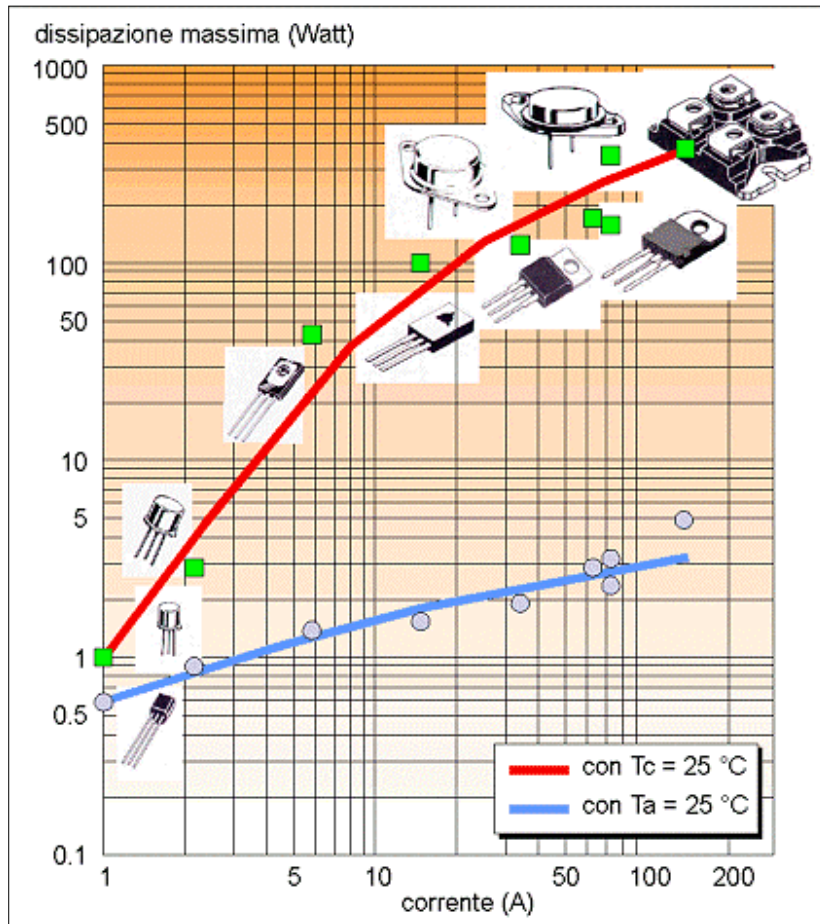


Fig. 6 - Potenze e correnti ottenibili per i transistor

Come si è detto, la scelta del tipo di dissipatore va fatta in base al valore della sua resistenza termica, che viene indicata dal costruttore assieme alle dimensioni. In **Figura 7** è riportato un esempio di foglio tecnico di alcuni dissipatori di uso comune.

Si noti il progressivo calo del valore della resistenza termica all'aumentare delle dimensioni, e inoltre l'andamento della resistenza termica all'aumentare della lunghezza del profilato, con un andamento pressoché iperbolico. Si noti infatti che, al di sopra di una certa lunghezza del dissipatore (ad esempio sopra i 20 centimetri) il valore di R_{thda} cala solo

leggermente, in quanto l'eccessiva distanza dal punto di fissaggio del componente che produce il calore provoca un calo della temperatura dell'elemento metallico al punto da rendere meno efficiente lo scambio termico con l'ambiente.

I fogli tecnici dei dissipatori precisano inoltre che il grado di finitura superficiale dei profilati si rivela in grado di influenzare la dissipazione per irraggiamento. I dissipatori sono normalmente in alluminio anodizzato nero opaco. Nel caso di superfici lucide o grezze l'efficienza del dissipatore si riduce e la resistenza termica aumenta di circa il 10 %.

Si tenga inoltre conto che i valori di R_{thda} vengono specificati per un montaggio verticale del dissipatore ed alette anch'esse verticali. Ogni altro tipo di montaggio porta ad un peggioramento della resistenza termica. In particolare, per il montaggio orizzontale si deve considerare un aumento di R_{th} pari al 20 %.

Nel caso di dissipatore rettangolare è consigliabile il montaggio col lato minore in verticale, in modo da evitare un effetto di eccessivo riscaldamento della porzione di metallo sovrastante il punto di fissaggio del componente che produce calore.

Inoltre, nel caso di più dispositivi su di uno stesso dissipatore è consigliabile distribuire i dispositivi verso il basso e non in modo simmetrico.

Infine, dissipatori con rapporto lunghezza/base maggiore di 4 vanno controllati praticamente perché possono verificarsi fenomeni di turbolenza che possono alterare il normale scambio termico.

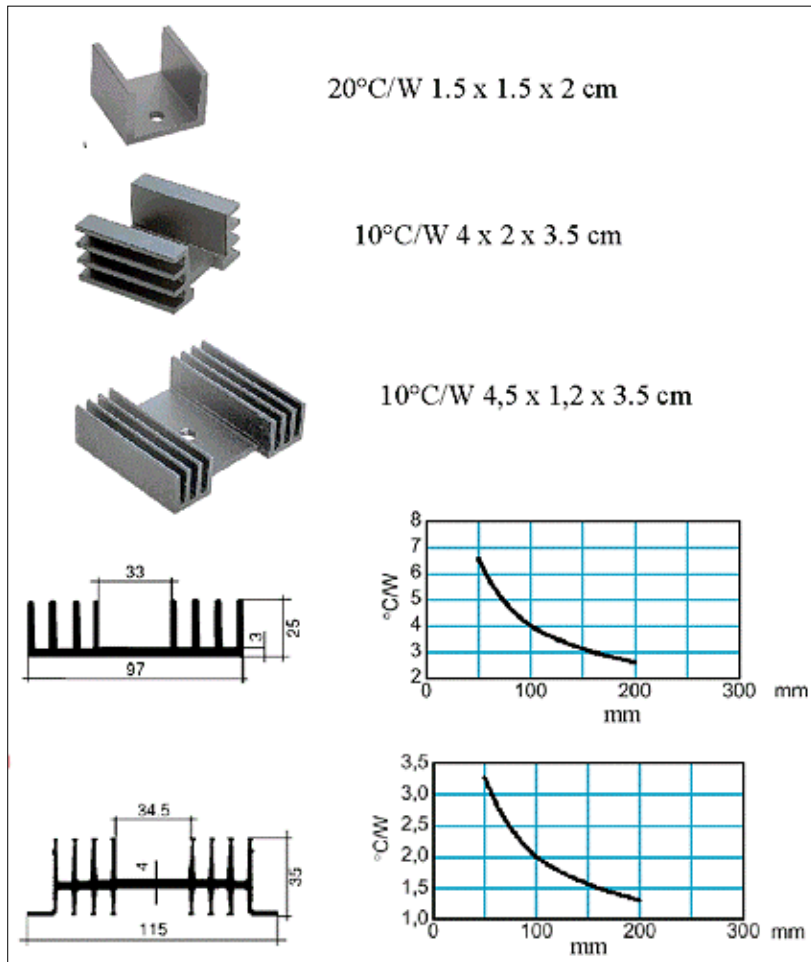


Fig. 7 - Esempio di foglio tecnico di alcuni dissipatori

Spesso può capitare di dover commutare per brevi istanti correnti che richiedono il ricorso a contenitori in grado di ospitare chip di elevata area, e dover quindi utilizzare package TO-220, TO-247 o TO-3 senza però dover dissipare una potenza tale da richiedere necessariamente un dissipatore. In tal caso è sufficiente utilizzare il contenitore direttamente sul circuito stampato, senza aletta di raffreddamento. Oppure, può essere sufficiente fissare il package alla lamiera del contenitore dell'apparato in cui va inserito, caso per il quale si può utilizzare il grafico di **figura 8** per calcolare la resistenza termica.

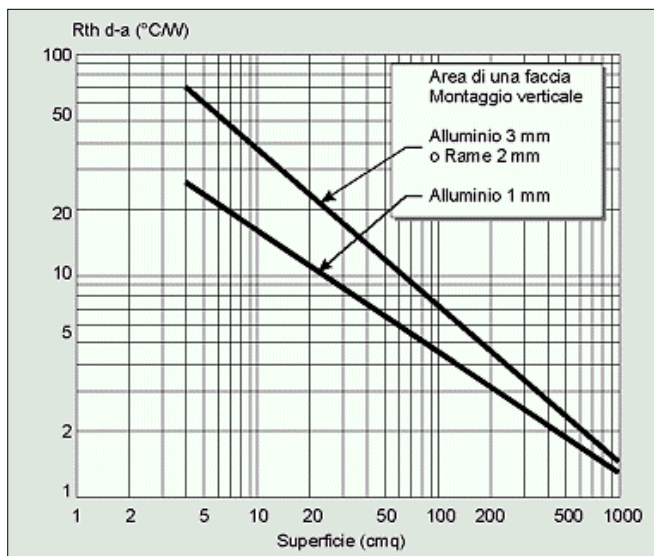


Fig. 8 - Anche delle semplici superfici metalliche piane possono fungere da dissipatori

In **Figura 9** sono riportati i dati di resistenza termica, potenza e corrente massima dei contenitori utilizzati per incapsulare i semiconduttori di forte potenza quali ad esempio diodi, tiristori e moduli ibridi. Per le elevate potenze è d'obbligo il ricorso alla ventilazione forzata o addirittura al raffreddamento a liquido.









	package	Rth(j-c) (°C/W)	Pdmax Tc =25°C	Rth(c-d) (°C/W)	I _{max} (Arms)
	DO-4	2.0		0.55	25 A
	DO-5	1.0		0.25	80 A
	DO-8	0.20		0.08	250 A
	disco	0.02	3600 W	0.03	630 A
	hockey puk	0.007	10 KW	0.0044	9600 A
	modulo ibrido	0.015	8300 W	0.012	1200 A
	ISOTOP	0.4	375 W	0.1	140 A
	modulo ibrido	0.18	1200 W	0.1	250 A

Fig. 9 - Valori di resistenza termica, potenza e corrente massime per alcuni contenitori di elevata potenza.

Si tenga però conto che, nel frequente caso in cui la potenza applicata al dispositivo non è continua bensì a impulsi, il calcolo della potenza da dissipare è differente, in quanto si deve tener conto del fatto che, dopo ciascun impulso applicato, la giunzione ha modo di raffreddarsi con un calo che dipende dalla durata del periodo T_{off} nonché dal duty-cycle della serie di impulsi. Come si può vedere nell'esempio di **Figura 10**,

infatti, se un impulso da 10 Watt viene applicato per 10 millisecondi produce un innalzamento termico da 25 °C a 60 °C con un successivo raffreddamento, mentre se la durata supera i 50 msec la temperatura di giunzione sale oltre gli 80 °C.

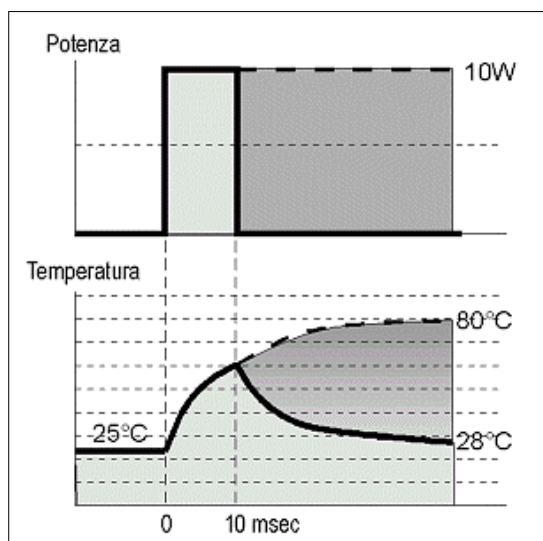


Fig.10 - Andamento della temperatura di un elemento sottoposto ad un impulso della durata di 10 msec confrontato con l'andamento ottenibile applicando un gradino di potenza

Proprio per tener conto di questo fenomeno, molti costruttori forniscono un grafico che evidenzia la variazione della resistenza termica al variare della durata degli impulsi applicati, in funzione di vari valori di duty-cycle, come si può vedere in **Figura 11**.

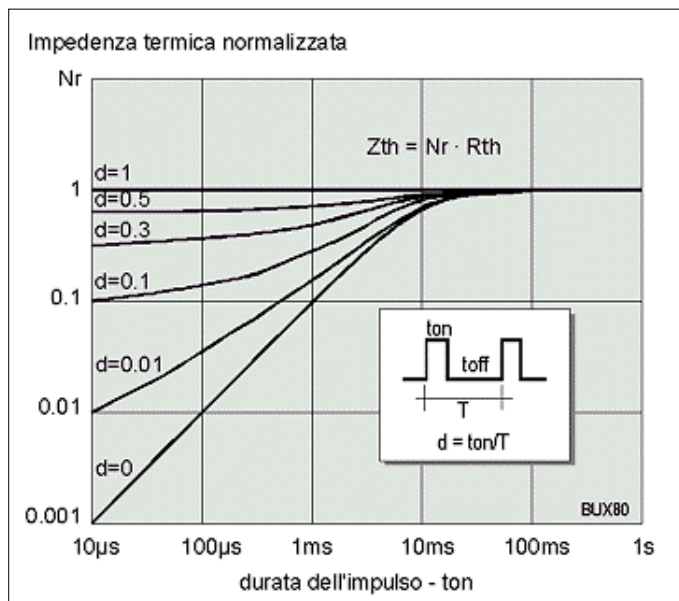


Fig. 11 - Impedenza termica normalizzata in funzione della durata degli impulsi e del duty-cycle; si noti che, per durate degli impulsi superiori a qualche decina di millisecondi, si tende al caso statico. Questa soglia è funzione della capacità termica del componente, che condiziona la sua costante di tempo termica. Il grafico qui riportato si riferisce ad un transistor in package TO-220.

Equivalenza dei modelli termico ed elettrico

Ragionando più a fondo su quanto finora detto si può affermare che il modello “termico” di elemento che dissipa potenza per effetto Joule presenta strette analogie con l’equivalente elettrico, al punto che si può fornire una descrizione in termini circuitali del fenomeno di scambio termico fra elemento che produce dissipazione, le resistenze termiche, le varie temperature ed il flusso di calore. Tale modello è rappresentato nello schema di **Figura 12**.

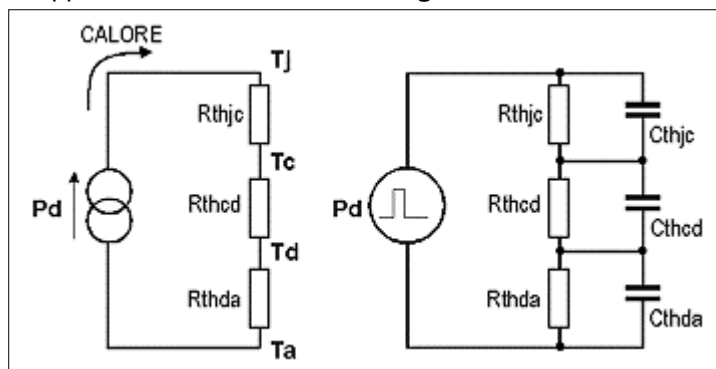


Fig. 12 - Equivalente elettrico del modello termico relativo alla dissipazione di potenza

Nel caso di potenza continua applicata (figura 12, a sinistra) la “corrente” che fluisce nel circuito è costituita dal flusso di calore, il quale provoca, ai capi delle “resistenze termiche” una “differenza di temperatura” (anziché di tensione); nella pratica, quindi, più elevata è la resistenza termica del dissipatore, tanto più elevata sarà la temperatura del dissipatore, che non permetterà un sufficiente raffreddamento del componente.

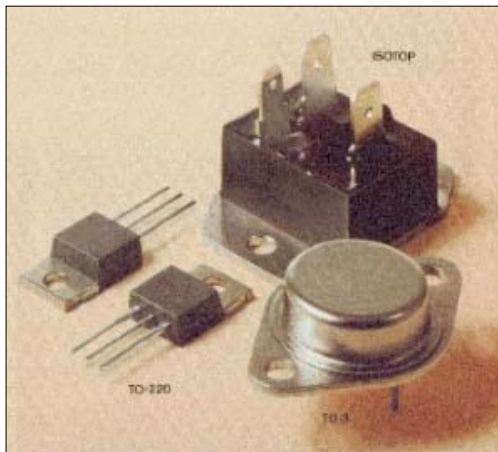
Nel caso invece in cui la potenza applicata sia del tipo a impulsi (figura 12, a destra) entrano in gioco anche le “capacità termiche” (l’unità di misura è il Joule/°C) che sono connesse in parallelo alle rispettive resistenze termiche. E’ quindi evidente il motivo per cui se la potenza applicata varia nel tempo la “reattanza” delle capacità termiche essendo in parallelo alle resistenze termiche ne riduce il valore, in maniera proporzionale alla riduzione della durata degli impulsi, così come evidenziato nel grafico di figura 11.

Alcuni esempi pratici

Facciamo ora un esempio pratico di calcolo utilizzando le formule ora viste. Il foglio tecnico del transistor 2N1711 - che ha un contenitore TO-5 come quello della pagina precedente - indica che può dissipare una potenza massima di 1 watt, che possiede una resistenza termica $R_{t(j-a)}$ di $220 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ed ammette una temperatura massima di giunzione di 195°C . Se supponiamo ad esempio che in un certo circuito esso dissipi una potenza di 0.8 W , la temperatura raggiunta dal chip di silicio potrà essere ricavata dalla formula (2), e sarà di:

$$T_j - 25 = 0.8 \cdot 220$$

da cui si ricava una T_j di ben 151°C .



E' ovvio che nella (2) l'incognita non sarà necessariamente sempre e solo T_j , ma sarà possibile anche ricavare la massima potenza dissipabile conoscendo la temperatura massima e la resistenza termica, e viceversa.

Ad esempio, se il nostro transistor si trova su di un circuito stampato collocato all'interno di un contenitore in cui la temperatura a regime è di 75°C a causa degli altri componenti presenti, nella formula (2) la "temperatura ambiente" per il transistor sarà di 75°C , e non di 25°C , e ciò limiterà la massima potenza dissipabile.

E infatti in questo caso la formula (2) diverrà:

$$2b) \quad T_{j\max} - T_{\text{amb}} = P_{d\max} \cdot R_t(j-a)$$

e quindi, sostituendo i valori noti:

$$200 - 75 = P_d \cdot 220$$

da cui si ricava una potenza massima dissipabile di 570 mW , e non più di 1 watt ! Per dissipare una potenza maggiore si impone quindi l'uso di un dissipatore.

I componenti senza dissipatore possono infatti dissipare potenze modeste, tipicamente non più di qualche watt. Per potenze maggiori, sarà necessario fissarli a un dissipatore, in grado di smaltire il calore in eccesso. Non tutti i componenti però permettono il fissaggio a un dissipatore, per cui - per potenze superiori al watt - è necessario utilizzare componenti appositi, provvisti di flange metalliche forate, come ad esempio quelli mostrati nella figura qui a lato, che riporta alcuni contenitori di potenza quali ad esempio i comuni TO-220 e TO-3.

Varie resistenze termiche

Vi è però da tener conto che, nel caso in cui il componente elettronico sia incapsulato in un contenitore che consenta il fissaggio a un dissipatore, la formula (2) va scritta in un modo più complesso, in quanto dovrà tener conto delle differenti resistenze termiche che il flusso di calore incontra nel suo propagarsi dal chip di silicio al contenitore, da questo al dissipatore, e da questo all'ambiente, proprio come illustrato in modo schematico in figura 3.

In sostanza, nel caso in cui si usi il dissipatore, la sequenza di ciò che il calore incontra nel suo propagarsi dal chip (dove esso si origina per effetto Joule) e l'ambiente (che si trova a più bassa temperatura e quindi in grado di "assorbire" il calore) può essere rappresentata come nella figura 3, dove sono appunto indicate le tre resistenze termiche, e precisamente:

$R_{t(j-c)}$ [resistenza termica fra giunzione e contenitore] fornita dal costruttore e che dipende dalle modalità costruttiva del dispositivo e dai materiali utilizzati, **$R_{t(c-d)}$** [resistenza termica fra contenitore e dissipatore] che dipende dal modo di fissaggio del componente al dissipatore ed **$R_{t(d-a)}$** [resistenza termica fra dissipatore e ambiente] detta anche semplicemente "resistenza termica del dissipatore" che dipende dalla forma, dimensione, posizione ed eventuale ventilazione del dissipatore.

Si tenga conto che, mentre la resistenza termica del dissipatore $R_{th(d-a)}$ può essere derivata dai

manuali forniti dai costruttori dei dissipatori stessi, il valore della $R_{t(c-d)}$ dipende dal tipo di fissaggio fra componente e dissipatore. Il valore di questa resistenza può variare in maniera significativa, e negli esempi che seguono utilizzeremo valori medi per fissaggi senza isolante su dissipatori con superfici lisce.

A causa di quanto detto, la resistenza termica totale che il calore incontra nel suo propagarsi dalla giunzione all'ambiente è quindi costituita dalla somma delle tre resistenze suddette, ovvero:

$$3) \quad R_{(j-a)} = R_{t(j-c)} + R_{t(c-d)} + R_{t(d-a)}$$

quindi la (2), nel caso di impiego del dissipatore, deve essere riscritta nel modo seguente:

$$4) \quad T_j - T_{amb} = P_d \cdot [R_{t(j-c)} + R_{t(c-d)} + R_{t(d-a)}]$$

e in essa andranno messi i relativi valori di R_t

Quale dissipatore? (un esempio di calcolo)

Facciamo un esempio. Supponiamo di utilizzare il transistor TIP131, ospitato nel contenitore TO-220, riportato qui a lato. Il costruttore dichiara sul foglio tecnico che esso può dissipare una potenza massima di 40W (a patto che il contenitore non superi i 25°C), ammette una T_j massima di 150°C ed è caratterizzato da una $R_{t(j-c)}$ paria a 3.1 °C/W.

La precisazione "a patto che il contenitore non superi i 25°C" ci fa immaginare che, per poter garantire tale condizione, dobbiamo raffreddare per bene il nostro transistor (il dissipatore è quindi indispensabile), altrimenti il contenitore si scalderebbe sicuramente e addio potenza di 40 watt!

Supponiamo invece che il nostro transistor si trovi in un circuito in cui debba dissipare una potenza di soli 5 W racchiuso in un contenitore (il suo "ambiente") con una temperatura di 40°C. Ci vorrà il dissipatore? Se sì, come dovrà essere?

Per scoprirlo è sufficiente utilizzare la (4), in cui supponiamo di fissare il contenitore al dissipatore con una $R_{t(c-d)}$ di 0.9 °C/W e decidendo di sfruttare al massimo la giunzione di silicio, facendogli raggiungere i suoi 150 °C massimi. La formula diverrà quindi:

$$5) \quad 150 - 40 = 5 \cdot [3.1 + 0.9 + R_{t(d-a)}]$$

da cui si ricava una resistenza termica dissipatore-ambiente di 18 °C/W. Dai fogli tecnici del costruttore di dissipatori si possono scegliere vari tipi di alette di raffreddamento, a seconda dell'ingombro voluto.

Immaginiamo di scegliere un semplice tipo a "C", visibile qui a lato. Esso misura 2 x 2 x 3 cm, è sufficiente per il TO-220 e presenta una resistenza termica di 14 °C/W, quindi inferiore ai 18 richiesti. Si noti che è preferibile che sia inferiore, e non maggiore: in tal modo conduce il calore meglio del dovuto, altrimenti si rischia il surriscaldamento del transistor! Si parla in questo caso di dissipatore "sovradimensionato".

Grazie ai 14 °C/W di resistenza termica, il dissipatore scelto può permetterci di dissipare un po' più dei 5 watt suddetti; inserendo infatti questo valore nella (5) si ha:

$$150 - 40 = P_d \cdot [3.1 + 0.9 + 14]$$

da cui si ottiene una potenza massima dissipabile di 6.1 W, ciò che ci fa ritenere che i nostri 5 W siano dissipabili in tutta sicurezza!

Non solo, ma a ben pensarci, possiamo anche intuire che dissipando solo 5 W anziché i 6.1 ammissibili il transistor lavorerà ad una temperatura inferiore ai 150 °C massimi. Sì, ma a quanto? Lo possiamo scoprire sempre usando opportunamente la (5), e utilizzando come incognita proprio T_j , nel modo seguente:

$$T_j - 40 = 5 \cdot [3.1 + 0.9 + 14]$$

ricavando che, grazie al dissipatore leggermente sovradimensionato, la temperatura interna del transistor raggiungerà i 130 °C anziché i 150 massimi, a tutto vantaggio della sicurezza di funzionamento e quindi della durata del componente.

Sapendo sfruttare per bene la formula (4) si possono ottenere anche altre informazioni utili, come ad esempio calcolare la temperatura assunta dal dissipatore. Come si fa? E' semplice, basta riscrivere la formula relativamente al solo salto termico fra ambiente e dissipatore, in modo da trasformarla nella seguente:

$$6) \quad T_d - T_{amb} = P_d \cdot R_t(d-a)$$

e sostituire i valori noti, con incognita proprio T_d , e precisamente:

$$T_d - 40 = 5 \cdot 14$$

dalla quale si ricava che il dissipatore raggiungerà i 110 °C, utile ad esempio se si intende monitorare la temperatura raggiunta dal dissipatore tramite dei sensori termici, spesso impiegati al fine di limitare la potenza dissipata (e quindi la temperatura raggiunta) ad esempio con dei contatti bimetallici o con dei termistori collegati a dei relè i quali, superata la soglia voluta, spengono il circuito.

Si noti che lo stesso risultato può essere ottenuto anche effettuando il percorso inverso, ovvero partendo dalla temperatura del chip e dalla somma delle resistenze termiche per raggiungere il dissipatore, ovvero:

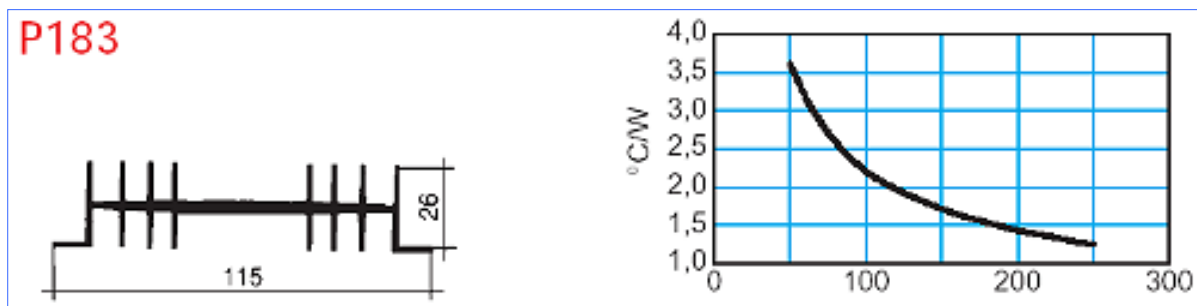
$$7) \quad T_j - T_d = P_d \cdot [R_t(j-c) + R_t(c-d)]$$

dove, sostituendo i valori, si ottiene:

$$130 - T_d = 5 \cdot [3.1 + 0.9]$$

ottenendo comunque i 110 °C di prima.

Se il nostro transistor avesse dovuto invece dissipare una potenza più elevata, avremmo dovuto utilizzare un dissipatore più grande, il quale viene però caratterizzato non già tramite un valore di resistenza termica definito, bensì tramite un grafico, quale ad esempio quello sottostante. Il motivo è che dissipatori di questo tipo vengono venduti in barre estruse, che possono essere tagliate in modo da ottenere il valore di resistenza termica voluto.



Per quello riportato in figura, ad esempio (un dissipatore alettato estruso da 115 x 26 mm) la resistenza termica va dagli 1.2 ai 3.6 °C/W a seconda che la lunghezza scenda dai 25 ai 5 centimetri. E' ovvio infatti che, più ridotte sono le dimensioni, più difficoltoso sarà lo smaltimento del calore, e quindi più elevata la resistenza termica.

Domanda: se avessimo utilizzato questo dissipatore a tutta lunghezza per il nostro transistor dell'esempio precedente, che potenza avremmo potuto dissipare? Semplice, inseriamo nella (4) il valore di $R_t(d-a)$ pari a 1.2 °C/W, in modo da ottenere:

$$150 - 40 = P_d \cdot [3.1 + 0.9 + 1.2]$$

dalla quale si ricava una potenza dissipabile di 21.1 watt contro i 5 W consentiti dal dissipatore a C.

Ma allora quando si potranno raggiungere i 40 W massimi dichiarati?

Osserviamo innanzitutto che nell'esempio scelto l'ipotesi di partenza era che il nostro transistor si trovasse purtroppo ad operare in un contenitore a 40 °C e non in aria libera. In questo secondo caso la (4) fornirebbe una potenza dissipabile di:

$$150 - 25 = P_d \cdot [3.1 + 0.9 + 1.2]$$

ovvero di 24 watt, ma ancora ben lontani dai 40 dichiarati. Come mai?

La risposta va trovata proprio nella precisazione del foglio tecnico: "potenza massima solo se il contenitore si trova a 25 °C". Certo, ma se ci pensiamo, quando mai il package sarà esattamente alla temperatura ambiente? In pratica mai, in quanto proprio la (4) ci spiega che, per garantire ciò,

sarebbe necessario usare un dissipatore di resistenza termica nulla, ovvero di area infinita, per cui possiamo dedurre che i 40 W rappresentano un limite teorico.

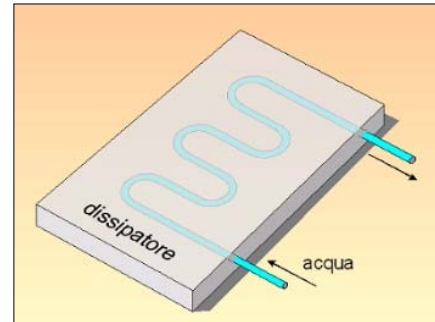
Non solo, ma per azzerare la somma $[R_{t(c-d)} + R_{t(d-a)}]$ occorre anche che la resistenza termica contenitore-dissipatore sia nulla, contro i nostri $0.9 \text{ }^\circ\text{C/W}$, che di fatto ci "mangiano", a conti fatti, ben 5W! Infatti, se poniamo a zero la $R_{t(c-d)}$ otteniamo una P_d di 29 W, ovvero 5 W in più.

Per ottenere i 40 W teorici, dobbiamo quindi azzerare sia la resistenza termica del dissipatore sia quella del contatto fra contenitore e dissipatore, in modo che la relazione divenga:

$$150 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C} = 40 \text{ W} \cdot 3.1 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

dove ci accorgiamo che i valori sono stati leggermente arrotondati.

Non vuol dire però che ciò non sia possibile raggiungere la potenza nominale, e che i 40 W siano solo ipotetici. Nella pratica, infatti, è possibile - sempre riflettendo sulla formula (2) - aumentare la potenza dissipabile a patto di aumentare anche la differenza $T_j - T_{amb}$; ad esempio ricorrendo ad un dissipatore raffreddato ad acqua, in modo da ridurre la "sua" T_{amb} di riferimento dai 25°C (in realtà all'interno dei contenitori si hanno dai 40 ai 60°C) fino ai 15°C o anche meno dell'acqua nelle condutture. Ciò significa poter dissipare anche il 25% della potenza in più!



Un dubbio

Consultando meglio il foglio tecnico dei dispositivi di potenza incapsulati in contenitori da fissare al dissipatore, ci accorgiamo che spesso il costruttore indica non solo la resistenza termica giunzione-contenitore, ma anche quella giunzione-ambiente. Perché mai?

Il motivo non è difficile da intuire, se pensiamo che la $R_{t(j-a)}$ l'abbiamo utilizzata nel primo esempio proprio per il transistor incapsulato in TO-5. Vuol dire allora che ci può servire per calcolare quale potrà essere la dissipazione del nostro transistor di potenza se verrà saldato sul circuito stampato senza alcun dissipatore!

Ma quando mai si usa un dispositivo di potenza senza dissipatore? Non è un controsenso?

No. Supponiamo ad esempio di aver bisogno di far erogare al nostro transistor la sua massima corrente ma mantenendolo in saturazione (ad esempio per pilotare un motore in continua), quindi con bassa tensione ai suoi capi. In questo caso la potenza dissipata sarà bassa, e sarà sufficiente sfruttare la massa metallica del contenitore stesso, per dissipare qualche watt. Il TIP31 del nostro esempio può dissipare 2 W senza dissipatore, con una $R_{t(j-a)}$ di $62.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Per verificare tali valori, basta inserirli nella (2) per ottenere:

$$150 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C} = 2 \text{ W} \cdot 62.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

e verificare perfettamente l'uguaglianza!

Guardando i dati del nostro transistor, si legge che la corrente massima di collettore è di 3A, e che la tensione di saturazione a 3A è di 1.2 V; se però operiamo con una I_c di 2A, la $V_{ce(sat)}$ è di soli 0.8V, quindi la dissipazione è inferiore ai 2W che il TIP31 può dissipare anche senza alcun dissipatore.

Conoscere meglio i dissipatori

Oltre alla forma e alle dimensioni, un altro importante parametro che influisce sulla trasmissione del calore in un dissipatore è la conducibilità termica del materiale di cui è costituito. Tenendo conto del rapporto prestazioni-prezzo il materiale più conveniente è l'alluminio.

Più in generale, le prestazioni termiche di un dissipatore dipendono dai seguenti parametri:

materiale, dimensioni, forma, colore, finitura superficiale (Irraggiamento), condizioni di ventilazione (vedi figura qui a lato), posizione di montaggio, posizione di fissaggio dei componenti elettronici

La resistenza termica con cui viene caratterizzato un dissipatore rappresenta, in base alla formula (1), l'incremento di temperatura causato dall'applicazione della potenza di un Watt. Poiché non esistono norme specifiche per la determinazione della R_t , i valori riportati a catalogo derivano da prove di

laboratorio effettuate in condizioni simili a quelle che si presentano nell'uso pratico.

Si tenga inoltre conto che i valori della resistenza termica dei dissipatori indicati dal costruttore sono ricavati attraverso prove di laboratorio effettuate nelle seguenti condizioni:

- 1- dissipatore anodizzato nero opaco
- 2- montaggio verticale in aria libera con convezione naturale
- 3- componente da raffreddare posizionato in un'area centrale del dissipatore
- 4- contatto diretto tra componente e dissipatore, con interposizione di grasso termico

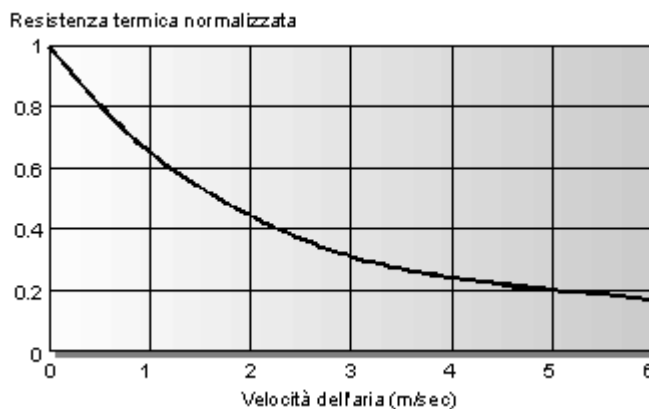
Teniamo conto che queste sono le condizioni migliori per il corretto impiego del dissipatore, per cui sarebbe consigliabile rispettare i medesimi criteri anche per l'impiego reale degli stessi nelle apparecchiature elettroniche. Proprio al fine di comprendere meglio l'importanza di tali condizioni, analizziamo più in dettaglio i parametri sopra indicati.

1- La finitura superficiale del dissipatore influenza principalmente la dissipazione per irraggiamento. I dati riportati dai costruttori si riferiscono - ove non diversamente specificato - a dissipatori ossidati neri opachi. Nel caso di superfici lucide o grezze l'efficienza del dissipatore si riduce e la resistenza termica aumenta anche del 10 %. Importante è anche il colore: più è scuro e più elevata è l'efficienza di scambio del calore (proprietà del "corpo nero").

2- Il montaggio del dissipatore è molto importante, in quanto i moti convettivi dell'aria sono determinanti per l'asportazione del calore. Per tale motivo il dissipatore deve essere montato in posizione verticale e con le alette verticali, proprio come si montano i termosifoni! In caso contrario la resistenza termica fra dissipatore e ambiente cresce sensibilmente. In particolare, per il montaggio orizzontale si deve considerare un aumento di R_t del 20%.

Si è misurato che la resistenza termica del dissipatore cala con l'aumentare della sopraelevazione di temperatura rispetto all'ambiente esterno. Durante i test di laboratorio si considerano sopraelevazioni di 60 °C con una temperatura ambiente di 25 °C. Poiché però la variabilità di R_t con la sopraelevazione di temperatura varia da un profilo all'altro, non è possibile dare indicazioni precise circa l'influenza di questo parametro.

Nel caso di dissipazioni elevate si può ricorrere alla ventilazione forzata la quale, asportando più rapidamente il calore dal dissipatore, di fatto riduce la sua resistenza termica, come si può vedere dal grafico qui a lato.



3- La collocazione del componente sul dissipatore è altrettanto importante, in quanto esso va posizionato al centro del dissipatore, e non ad un estremo, proprio per sfruttare al massimo la conducibilità termica del metallo e rendere più uniforme possibile la sua temperatura in modo da garantire una dissipazione ottimale.

4- Al fine di garantire la minima resistenza termica fra componente e dissipatore si deve garantire la massima superficie di contatto possibile, e ciò significa che occorre far sì che la superficie di contatto sia la più levigata possibile, onde massimizzarne l'area effettiva. Poiché però non è possibile garantire la totale assenza di aria interposta (la quale aumenta la resistenza termica) si può usare del grasso al silicone (a bassa resistenza termica) meglio se riempito con ossido di zinco.

Nel caso del montaggio di più dispositivi sullo stesso dissipatore, se essi non sono in parallelo sorge il problema dell'isolamento elettrico reciproco, ciò che impone il ricorso a fogli di isolamento (in mica, in poliestere o similari) e rondelle isolanti per le viti di fissaggio, ciò che aumenta considerevolmente la resistenza di contatto.

Resistenza e resistività termica

Su alcuni libri tecnici non compaiono le resistenze termiche dei materiali, bensì le loro resistività termiche (si veda tabella a pagina seguente), e quindi indipendentemente dalle loro dimensioni.

Tabella 1: Resistività termica di alcuni materiali:

materiale	Resistività (°C·cm/W)
Rame	0.25
Alluminio	0.48
Nitrato di alluminio	0.64
Ossido di Berillio	1.0
Silicio	1.2
Ossido di Alluminio	6.0
Grasso siliconico con ZnO	130
Mica	150
Grasso siliconico	520
Mylar	635
Aria ferma	3050

Per ottenere la resistenza termica partendo dalla resistività termica occorre utilizzare una formula analoga alla seconda legge di Ohm, ovvero:

$$R = r \cdot l / S$$

dove r è la resistività termica, l la lunghezza del materiale ed S la sezione.

Ad esempio, disponendo di un foglio di Mica con un'area di 5 cm^2 (TO-3) e spesso $50 \mu\text{m}$, si ottiene:
 $R_t = 150 \cdot 0.005 / 5 = 0.15 \text{ °C/W}$

Analogamente, un dissipatore in Alluminio da $6 \times 4 \text{ cm}$ e spesso 3 mm avrà una resistenza termica pari a:
 $R_t = 0.48 \cdot 24 / 0.3 = 38.4 \text{ °C/W}$

Indice degli argomenti

argomento	pagina
Relazione fra temperatura e potenza	1
La "curva di derating"	1
I dissipatori e i meccanismi di propagazione del calore	2
La scelta del dissipatore	3
Un esempio numerico	4
I parametri dei package utilizzati per i semiconduttori	5
Potenze dissipabili con i contenitori più comuni	6
Il foglio tecnico di un dissipatore	7
I parametri dei package di forte potenza	8
Impedenza e resistenza termica	9
Equivalenza dei modelli termico ed elettrico	9
Alcuni esempi pratici	10
Varie resistenze termiche	10
Quale dissipatore? (un esempio di calcolo)	11
Un dubbio	13
Conoscere meglio i dissipatori	14
Resistenza e resistività termica	15