

TECNOLOGIE
ELETTRONICHE
DISEGNO
PROGETTAZIONE

APPUNTI dalle LEZIONI

per le classi TERZE

QUESTA DISPENSA È STATA SCRITTA E IMPAGINATA USANDO

StarOffice e OpenOffice
per LINUX



EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO

Generalità

Molti dei processi vitali alla base del buon funzionamento del nostro corpo sono controllati da impulsi elettrici, si pensi, ad esempio, alla percezione delle sensazioni (tattili, termiche, visive, uditive) oppure alla contrazione di tutte le fibre muscolari ed in particolare del muscolo cardiaco.

Quando il corpo o una sua parte è attraversato da una corrente elettrica proveniente dall'esterno gli effetti possono andare da una sensazione appena percepibile fino ad interferenze pericolose con i processi cellulari o con la funzione cardiaca, rappresentando anche un pericolo grave.

Dopo studi accurati, in parte ancora in corso, si è visto che gli effetti dipendono da molti fattori, i principali sono:

- l'intensità e la durata della corrente
- la forma d'onda (alternata, continua, impulsiva) e la frequenza
- la risposta individuale

L'argomento è evidentemente di grande interesse per tutti quelli che lavorano con apparecchiature elettriche ed elettroniche ed è trattato in dettaglio nel fascicolo n°1335P del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano). Qui saranno richiamati i punti essenziali, con particolare riferimento alla situazione più frequente per un elettronico.

In particolare faremo riferimento alla tipica struttura di un dispositivo elettronico di bassa potenza, alimentato da rete, in cui la tensione di rete di 230 V viene convertita in una tensione continua, di solito inferiore a 30 V. In questo caso la parte più pericolosa, potenzialmente letale, è quella a tensione di rete, mentre la tensione continua non rappresenta un pericolo. Per questa ragione saranno analizzati principalmente gli effetti della corrente alternata a 50 Hz mentre per la corrente continua si faranno solo alcune considerazioni generali.

Abbiamo già detto che la corrente elettrica normalmente presente nel corpo umano serve a trasmettere informazioni e comandi perciò è abbastanza intuitivo che una corrente indotta dall'esterno possa avere effetti analoghi. Inoltre gli effetti aumentano con l'aumentare dell'intensità e della durata della corrente, in altre parole una corrente relativamente alta che passa per un tempo breve può dare gli stessi effetti di una corrente più bassa che scorre per più tempo.

Molto schematicamente possiamo raggruppare gli effetti in quattro categorie:

- Correnti molto basse passeranno del tutto inosservate, basta provare a toccare con due dita i poli opposti di una batteria per convincersene, la corrente che ci attraversa è talmente bassa da non essere avvertibile.
- Correnti di maggiore intensità provocheranno sensazioni via via più forti, man mano che aumenta l'intensità della corrente. Un esempio è la sensazione che si ha toccando con la lingua i due poli di una batteria quadra da 9 V.
- Aumentando l'intensità e il tempo si arriverà a stimolare le fibre muscolari provocando contrazioni involontarie dei muscoli seguite da rilassamento e quindi movimenti degli arti non controllati. Se l'intensità dello stimolo aumenta il muscolo può anche non tornare allo stato di riposo e restare sempre contratto finché non cessa la corrente. In questo caso si parla di contrazione tetanica o tetanizzazione del muscolo.

Questa è già una situazione potenzialmente pericolosa perché perdendo il controllo dell'arto percorso da corrente può essere impossibile interrompere il contatto con la sorgente elettrica.

- Se aumenta ancora l'intensità oppure il tempo possono essere compromesse la funzionalità cardiaca e respiratoria.

I disturbi respiratori possono arrivare al blocco dell'attività respiratoria che, se si protrae, può portare a morte per asfissia.

L'alterazione più importante dell'attività cardiaca è la fibrillazione atriale e ventricolare. La fibrillazione è un movimento scoordinato delle fibre muscolari che rende inefficace la contrazione e impedisce al cuore di pompare il sangue in modo efficace.

In particolare la fibrillazione ventricolare sembra la principale causa di morte per contatto elettrico perché riduce molto la pressione sanguigna e quindi il trasporto di ossigeno.

Alle ultime tre categorie si possono associare delle soglie:

soglia di percezione	È il valore minimo di corrente che provoca una sensazione avvertibile dalla persona attraversata da corrente. In altre parole con correnti al disotto di questo valore la persona non si accorge di essere percorsa da corrente proveniente dall'esterno, da cui il nome.
soglia di rilascio o tetanizzazione	Valore indicativo di corrente per cui una persona riesce ancora a lasciare gli elettrodi con i quali è a contatto. Le correnti superiori alla soglia di percezione ma inferiori a questo valore sono relativamente basse, hanno effetti avvertibili e possono arrivare a provocare movimenti non controllati. Se questi movimenti disturbano quelli volontari possono impedire anche azioni semplici, come quelle che permettono di staccarsi dalla fonte di corrente. È chiamata anche soglia di tetanizzazione.
soglia di fibrillazione	Valore minimo di corrente da superare per provocare la fibrillazione ventricolare. Correnti vicine alla soglia innescano la fibrillazione in una percentuale ridotta di persone che aumenta all'aumentare della corrente e del tempo.

Queste soglie corrispondono a valori diversi di corrente a seconda che si tratti di corrente sinusoidale a 50 Hz, corrente continua o corrente a frequenze più alte. Per dare qualche indicazione si può dire che la soglia in continua è più alta di quella a 50 Hz anche di 3 o 4 volte, che in continua varia sensibilmente a seconda che la corrente scorra da una mano verso i piedi (corrente discendente) o viceversa (corrente ascendente).

Infine all'aumentare della frequenza le soglie aumentano.

Nella tabella 1 sono riportati valori indicativi per alcune delle soglie.

	Alternata 50 Hz	Continua (ascendente)	Alte frequenza 1 ÷ 10 kHz
soglia di percezione	0,5 mA	2 mA	2 – 10 volte rispetto al valore a 50 Hz
soglia di rilascio	10 mA	300 mA	2 – 10 volte rispetto al valore a 50 Hz
soglia di fibrillazione	vedi grafico		

Tabella 1 – valori di corrente di soglia

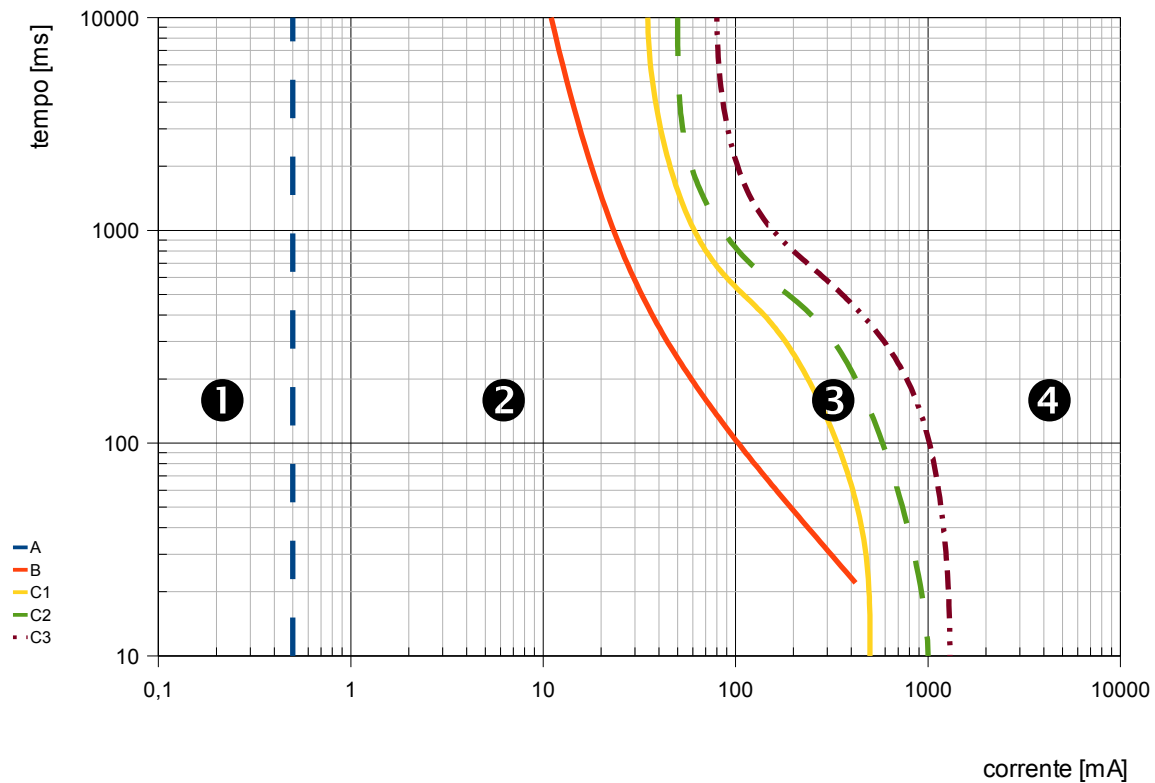
Per la soglia di fibrillazione con corrente alternata a 50 Hz non è possibile trascurare la durata del passaggio di corrente perciò conviene far riferimento al grafico di Figura 1 .

L'area del grafico di è suddivisa in zone che corrispondono agli effetti già descritti. Ad esempio sono evidenti le correnti corrispondenti alle soglie di percezione e di rilascio.

Per valori di corrente superiori, ad esempio in zona 2, si può vedere che una corrente di 10 mA per 5 secondi provoca effetti simili ad una di 200 mA per 20 millisecondi.

Infine va sottolineato che il grafico dà indicazioni medie, ricavate da indagini statistiche fatte su un numero elevato di persone diverse. La reazione soggettiva perciò può discostarsi anche significativamente dalle indicazioni del grafico.

Figura 2: Zone tempo-corrente relative agli effetti della corrente alternata (15 - 100 Hz) sul corpo umano



Zona 1	Abitualmente nessuna reazione. È la zona a sinistra della soglia di percezione.
Zona 2	Abitualmente nessun effetto fisiologicamente pericoloso. È la zona compresa tra la retta verticale della soglia di percezione e la curva b.
Zona 3	Abitualmente nessun danno organico. Probabilità di contrazioni muscolari e difficoltà respiratoria; disturbi reversibili della formazione e conduzione di impulsi nel cuore, inclusi fibrillazione atriale e arresto cardiaco provvisorio senza fibrillazione ventricolare, che aumentano con l'intensità della corrente e il tempo.
Zona 4	In aggiunta agli effetti della zona 3 la probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta fino al 5% (curva 2), fino al 50% (curva 3), oltre il 50% al di là della curva 3. Effetti patofisiologici come arresto cardiaco, arresto respiratorio, gravi ustioni possono presentarsi con l'aumentare dell'intensità della corrente e del tempo.

IMPIANTI A BASSISSIMA TENSIONE

Finora abbiamo sempre fatto riferimento alla corrente e non alla tensione perché, come è noto dalla legge di Ohm, la corrente e la tensione sono legate dall'impedenza, che dipende sia dal singolo soggetto che dalle condizioni ambientali (superficie di contatto, umidità). Perciò la tensione, da sola, di solito non fornisce informazioni sufficienti.

C'è una eccezione significativa: per differenze di potenziale inferiori a 50 V non ci sono notizie di incidenti perciò queste tensioni sono considerate intrinsecamente sicure e sono denominate "bassissime tensioni". Ad esempio gli impianti industriali di solito hanno le parti a contatto con gli operatori alimentate a 24 V, cioè a bassissima tensione, proprio per ragioni di sicurezza.

Nella gran parte degli apparati elettronici la parte elettronica vera e propria è alimentata a tensione inferiore a 50 V ed è perciò intrinsecamente sicura. Fa eccezione la parte che genera la tensione di alimentazione, in cui entra la tensione di rete, e cioè filo con spina, fusibile e trasformatore. Questa zona è facilmente individuabile e da non toccare.

TENSIONI POTENZIALMENTE PERICOLOSE

Abbiamo appena visto come le tensioni al di sotto di 50 V siano considerate intrinsecamente sicure. Se la tensione supera questo valore la corrente che attraversa il corpo può provocare gli effetti illustrati in precedenza.

Il legame tra tensione ed effetti sul corpo umano non è così stretto come con la corrente, perché dipende anche dall'impedenza che è una caratteristica molto variabile: cambia molto da un soggetto all'altro, dipende dalla tensione applicata e perfino dalla situazione del soggetto nel momento della misura. Ad esempio uno stato di intensa concentrazione mentale aumenta significativamente l'impedenza.

Un'idea dell'ordine di grandezza dell'impedenza del corpo umano la può dare la tabella 2 che mette in evidenza la variabilità soggettiva dell'impedenza e la dipendenza dalla tensione applicata.

Nonostante questa grande variabilità è comunque interessante individuare un legame tra tensione ed effetti sul corpo umano, perché nella quasi totalità degli impianti elettrici è la tensione che ha un valore fisso e non la corrente, che dipende dalla tensione e dall'impedenza.

Questo legame è richiamato dalla figura 2 che mette in relazione la tensione e il tempo massimo per cui è sopportabile.

Si vede che tensioni inferiori a 50 V possono essere sopportate per un tempo indefinito e la tensione di 50 V è definita anche Tensione di contatto limite.

Tensione di Contatto (V)	valori dell'impedenza totale del corpo umano (Ω) che non sono oltrepassati dal		
	5% della popolazione	50% della popolazione	95% della popolazione
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
valore asintotico	650	750	850

Tabella 2: Impedenza totale del corpo umano per un percorso mano – mano o mano - piede

Se la tensione supera questo valore il tempo per il quale può essere sopportata si riduce con l'aumentare della tensione, ad esempio la tensione di rete di 230 V non può essere sopportata per più di 30 ms circa.

Le curve tratteggiate indicano limiti più bassi che sono tuttora allo studio e non sono ancora stati adottati ufficialmente.

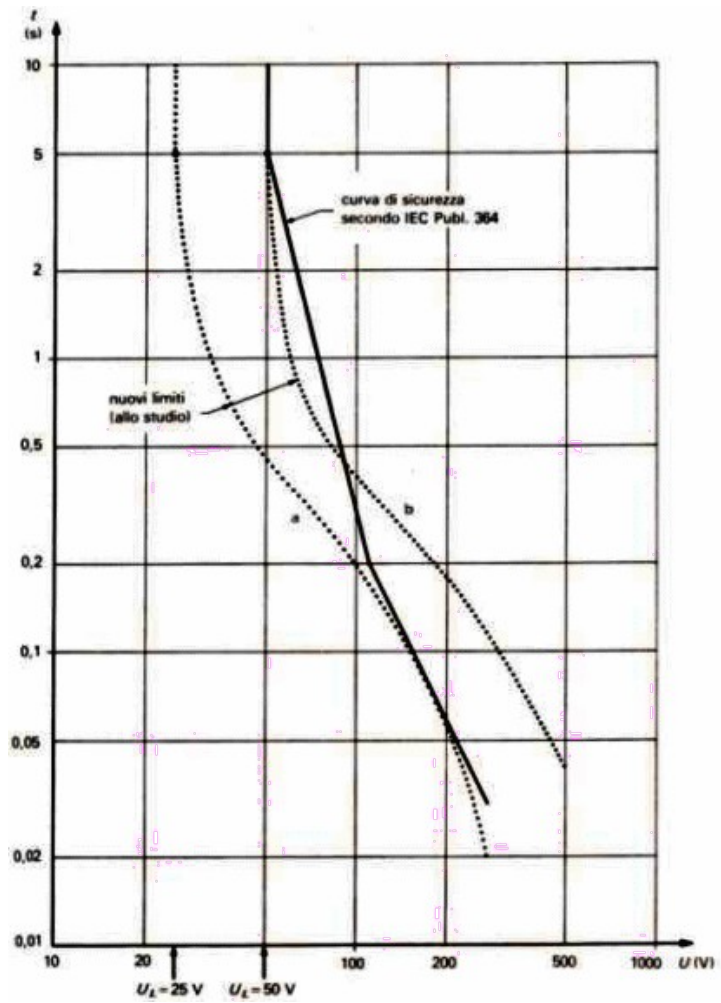


Figura 3: curva di sicurezza IEC 364

CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEI MATERIALI

Suddivisione materiali.

Gli elementi presenti in natura si possono suddividere in:

- metalli o conduttori;
- non metalli o isolanti;
- semimetalli o semiconduttori.

I metalli sono tutti allo stato solido, esclusi il mercurio e il cesio che si trovano allo stato liquido; hanno struttura compatta e in genere hanno un elevato grado di duttilità e malleabilità, cioè possono essere ridotti in fili e in fogli sottilissimi.

I metalli in genere sono ottimi **conduttori** sia del calore che della corrente elettrica.

Esempi di metalli: rame, argento, oro, alluminio, ferro.

I non metalli invece sono cattivi conduttori sia del calore che dell'elettricità, cioè sono **isolanti**.

Tra i metalli e i non metalli, si trovano alcuni elementi, come il silicio, il germanio, il gallio, l'arsenico, che hanno delle proprietà intermedie sia ai primi, che ai secondi. Essi prendono il nome di semimetalli o, come si usa dire in elettronica, di **semiconduttori**.

Materiali usati in elettronica.

I materiali usati in Elettronica ed in elettrotecnica si distinguono in:

- Conduttori $\sigma = 10^4 \div 10^8 \quad \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
- Isolanti $\sigma = 10^{-13} \div 10^{-18} \quad \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
- Semiconduttori $\sigma = 10^{-8} \div 10^3 \quad \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
- Materiali ferrosi e loro leghe: proprietà magnetiche

I conduttori hanno una elevata conduttività elettrica σ (sigma). Sono usati in molte applicazioni tra le quali: fili e piste di collegamento, resistori, reofori e terminali, elettrodi e contatti, armature di condensatori, cavi, leghe saldanti.

Gli isolanti hanno una bassa conduttività elettrica σ (sigma) e servono per impedire il passaggio della corrente elettrica. Gli isolanti sono in grado di accumulare energia elettrostatica nel loro interno e per questo vengono usati come dielettrici nei condensatori.

I semiconduttori hanno conduttività elettrica σ intermedia fra quella dei conduttori e quella degli isolanti. Vengono usati per realizzare giunzioni raddrizzanti, cioè componenti, come diodi, transistori, che opportunamente polarizzati possono lasciare passare o impedire il passaggio della corrente elettrica.

I materiali ferrosi e le loro leghe presentano elevate proprietà magnetiche, cioè sono facilmente magnetizzabili e possono accumulare energia elettromagnetica. Trovano impiego nelle macchine elettriche (motori elettrici, generatori, trasformatori), bobine, relè, strumenti di misura, altoparlanti.

Struttura dei metalli.

I metalli hanno in generale una struttura monoatomica, si possono combinare con i non metalli e si uniscono fra di loro per formare leghe metalliche.

I metalli difficilmente si trovano in natura allo stato puro, vengono ottenuti dai loro composti minerali mediante procedimento di fusione; nella fase di solidificazione (raffreddamento) gli atomi si raggruppano in modo ordinato, formando tanti cristalli.

I metalli sono quindi sostanze cristalline, cioè sono costituiti da un grandissimo numero di cristalli saldati fra loro e orientati in diversi modi.

Ogni cristallo è caratterizzato da un reticolo spaziale di solito di forma geometrica regolare, nei cui nodi sono collocati gli atomi. Dalla forma di questo reticolo dipendono le proprietà meccaniche ed elettriche dei metalli stessi.

Leghe metalliche.

Per lega metallica si intende il prodotto di solidificazione di un metallo fuso insieme ad uno o più altri elementi, in diverse percentuali, siano essi metalli o non metalli.

Quando i componenti non si combinano chimicamente tra loro, si ottiene un semplice aggregato di cristalli puri.

Le caratteristiche delle leghe, compreso il loro punto di fusione, dipendono dalle percentuali dei suoi componenti.

Si definisce **lega eutettica**, la lega con il più basso punto di fusione fra tutte le leghe che si possono ottenere con tutte le possibili combinazioni delle percentuali dei suoi elementi componenti.

Proprietà principali dei materiali:

- proprietà elettriche;
- proprietà meccaniche: elasticità, durezza, resilienza, compressione, flessione ...;
- proprietà termiche: conducibilità e capacità termica.

Legami chimici tra atomi dei materiali.

Le proprietà generali di un materiale sono strettamente legate alla sua struttura interna ed in particolare al legame chimico esistente fra i suoi atomi.

Legame metallico

Gli atomi dei metalli, a causa del debole legame che unisce gli elettroni esterni al proprio nucleo, formano una struttura cristallina con carica positiva in cui gli elettroni si muovono da un atomo all'altro liberamente e formano una nube elettronica; presentano conducibilità elettrica e termica elevata ==> **conduttori**.

Legame ionico

Gli atomi che formano il legame acquistano o cedono elettroni diventando ioni negativi o positivi; la forza che li tiene uniti è di natura elettrostatica; gli elettroni sono fortemente trattenuti nelle orbite dei singoli ioni; presentano conducibilità elettrica e termica basse ==> **isolanti**.

Legame covalente

Gli atomi interessati al legame mettono in comune uno o più dei loro elettroni di valenza a formare delle coppie che si dispongono su un orbitale comune; presentano conducibilità elettrica più elevata rispetto agli isolanti, ma meno dei conduttori ==> **semiconduttori**.

Materiali isolanti

I materiali isolanti possono essere suddivisi in diverse categorie a seconda della loro struttura e delle loro proprietà. Innanzitutto essi possono trovarsi nello stato gassoso, liquido o solido.

Gli isolanti più usati, i solidi, si distinguono in inorganici e organici. I primi comprendono materiali come la mica, il vetro, le ceramiche. Agli isolanti organici appartengono materiali naturali come la carta, il legno, il caucciù, il cotone, e artificiali o di sintesi come le materie plastiche e gli elastomeri.

Le *materie plastiche* rappresentano una categoria molto importante di isolanti. Sono sostanze organiche costituite da macromolecole formate dall'unione in lunghe catene (*polimerizzazione*) di unità strutturali semplici, i *monomeri*. In questi materiali sono sempre presenti sostanze additive, riempitivi, plastificanti, coloranti, che conferiscono loro proprietà particolari.

Le materie plastiche, dette anche *resine sintetiche*, si suddividono in *termoindurenti* e *termoplastiche*. Le prime, una volta raggiunta la forma definitiva per azione combinata della temperatura e della pressione, perdono ogni plasticità, diventano rigide e non possono essere fuse o sciolte con solventi. Le resine termoplastiche viceversa, con l'aumento della temperatura divengono plastiche e quindi lavorabili (ad esempio per stampaggio); a freddo riassumono poi le caratteristiche meccaniche iniziali.

Caratteristiche elettriche di alcune resine termoindurenti con riempitivi in fibra di vetro

	<i>Resistività di volume</i> ($\Omega \cdot \text{cm}$)	<i>Rigidità dielettrica</i> (kV / mm)	<i>Costante dielettrica</i> <i>relativa</i>
Resine epossidiche	$> 10^{14}$	12 ÷ 16	3,5 ÷ 5,0
Resine fenoliche	$10^{10} \div 10^{13}$	5,6 ÷ 16	5,0 ÷ 7,1
Resine siliconiche	$10^{10} \div 10^{14}$	8 ÷ 16	3,3 ÷ 5,2
Resine poliestere	$10^{12} \div 10^{15}$	13,8 ÷ 16,8	5,3 ÷ 7,3

Caratteristiche elettriche di alcuni materiali isolanti

Materiale	Rigidità dielettrica [kV/cm]	Resistività di massa [$\Omega \cdot \text{cm}$]	Resistività superficiale [Ω]	Costante dielettrica ϵ_r
Aria a pressione atmosferica	30	10^3	-	≈ 1
Acqua distillata	50 ÷ 100	10^9	10^{12}	81
Bakelite	100 ÷ 300	-	-	
Carta	50 ÷ 100	10^9	-	2
Carta impregnata di olio	350 ÷ 400	-	-	
Ceramica	150	10^{12}	10^{11}	6 ÷ 14000
Gomma	160 ÷ 500	10^{13}	10^{13}	2,5
Mica	400 ÷ 1800	10^{13}	-	6
Micanite	200 ÷ 300	-	-	
Olio minerale	150	10^{11}	-	2,2
Resine epossidiche	120 ÷ 160	10^{12}	-	
Resine fenoliche	80 ÷ 160	-	-	
Gomme al silicone	120 ÷ 280	-	-	
Polistirene	200 ÷ 280	-	-	
Polietilene	200 ÷ 300	-	-	
Nylon	200 ÷ 350	-	-	
Teflon	160	10^{12}	-	
Vetro	1000	-	-	

Proprietà elettriche dei materiali.

Resistività elettrica (di volume) ρ

Indica l'attitudine del materiale ad opporsi al passaggio della corrente e rappresenta la resistenza elettrica tra due facce opposte di un cubo del materiale avente lo spigolo di grandezza unitaria.

La resistività elettrica di un materiale, indicata con ρ (pronuncia ro), si può esprimere con la seguente relazione:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad [\Omega \cdot m]$$

R resistenza conduttore espressa in Ω
 l lunghezza del materiale espressa in m
 S superficie del materiale espressa in m^2

Unità di misure alternative usate nella pratica:

[$\Omega \cdot \text{cm}$]; [$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$]; [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]

Ordine di grandezza:

materiale	resistività [$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$];	esempi
conduttori	0,01 - 1	P_{Cu} a 20 °C 0,0172
semiconduttori	Ge Si	$45 \cdot 10^4$ (60 ÷ 230) 10^7
isolanti	$10^{12} \div 10^{22}$	

Dipendenza della resistività dalla temperatura.

In generale il valore della resistività di un materiale a una certa temperatura è definito dalla relazione:

$$\rho(T) = \rho_{20}(1 + \alpha \Delta T) = \rho_{20}[1 + \alpha(T - T_{20})]$$

in cui:

α è il coefficiente di temperatura a 20 °C

ρ_{20} è il valore della resistività a 20 °C

ΔT è la differenza fra la temperatura T e la temperatura di riferimento (20 °C)

Se un conduttore presenta una resistenza R alla temperatura di riferimento di 20 °C, alla generica temperatura T presenterà una resistenza pari a:

$$R(T) = R_{20}(1 + \alpha \Delta T) = R_{20}[1 + \alpha(T - T_{20})]$$

OSSERVAZIONE: La resistività dei semiconduttori puri e degli isolanti aumenta al diminuire della temperatura. In particolare negli isolanti la resistività dipende anche dall'umidità.

Resistività elettrica di superficie.

Nell'uso di un materiale isolante dal punto di vista elettrico, oltre alla resistività di volume, è necessario considerare anche la resistività di superficie. Essa è definita come la resistenza fra due lati opposti di una pellicola superficiale del materiale isolante avente un'area di 1 cm².

Per determinarne il valore si misura la resistenza R tra due elettrodi a coltello, lunghi 10 cm e appoggiati sulla superficie del dielettrico parallelamente tra loro e posti alla distanza di 1 cm. Il valore di R misurato, diviso per 10 (essendo $S = 10 \text{ cm} \cdot 1 \text{ cm} = 10 \text{ cm}^2$), dà la misura della resistività di superficie.

L'unità di misura di questo tipo di resistività è l'ohm ma, al fine di evitare equivoci, si indica con Ω/\square (ohm/quadrato).

Materiale	Resistività elettrica a 20 °C ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	Coefficiente di temperatura α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Temperatura di fusione ($^{\circ}\text{C}$)
Alluminio (99,5 %) ricotto	0,0278	0,0040	660
Argento (99,5 %)	0,0164	0,0038	961
Rame campione ricotto	0,0172	0,0039	1084
Bronzo fosforoso	0,018	0,0040	
Oro	0,0244	0,0034	1064
Ferro	0,10	5,0	
Ferro al silicio	0,5	1,0	
Argentana (60% Cu - 25 % Zn - 15 % Ni)	0,35	0,0001	
Costantana (60% Cu - 40 % Ni)	0,5	0,00002 o 20 ppm	
Manganina (84 % Cu - 12 % Mn - 4 % Ni)	0,5	0,00002 o 20 ppm	
Nichel-Cromo	1,1	0,1	
Mercurio	0,958	0,00089	
Platino	0,099	0,0036	1773
Stagno	0,11	0,0043	232
Piombo	0,21	0,004	327
Lega Sn-Pb (63 % Sn e 37 % Pb)	0,16		183
Germanio puro	$45 \cdot 10^4$	-0,048	
Germanio drogato ($5 \cdot 10^{-6}$ % As)			
Silicio puro	$(60 \div 230) \cdot 10^7$	-0,075	
Silicio drogato (10^{-4} % As)			
Carta	10^{14}		
Vetro	10^{15}		
Olio minerale	10^{17}		
Polistirolo	10^{22}		
Quarzo fuso	$7,5 \cdot 10^{17}$		

Rigidità dielettrica.

La rigidità dielettrica è definita come il massimo valore del campo elettrico che il materiale può sopportare, senza perdere le proprie capacità isolanti.

La perdita delle proprietà isolanti (cioè può diventare simile ad un conduttore) avviene in modo istantaneo e violento: questo fenomeno è detto *scarica elettrica* e risulta tale da produrre effetti termici notevoli e, se protratto per un tempo sufficientemente a lungo, la perforazione del materiale stesso. Questa scarica elettrica porta alla perdita temporanea delle caratteristiche elettriche.

La rigidità elettrica è solo un parametro indicativo in quanto il suo valore dipende da molte caratteristiche del materiale quali:

- omogeneità e purezza;
- spessore;
- umidità e temperatura;
- durata e forma della sollecitazione elettrica

Unità di misura:

Essendo la rigidità elettrica un campo elettrico, la sua unità di misura è il [V/m]. Comunque nella pratica si usano multipli più comodi quali il [kV/cm] o il [kV/mm].

Ordine di grandezza: 50 ÷ 1800 kV/cm.

Costante dielettrica relativa.

È il rapporto fra la capacità C di un condensatore avente per dielettrico il materiale in esame e la capacità C_0 dello stesso condensatore che abbia come dielettrico il vuoto (o l'aria). Questo parametro, espresso dalla relazione

$$\epsilon_r = C/C_0$$

è sempre maggiore o uguale ad 1 ed indica l'attitudine del materiale ad immagazzinare energia.

La costante dielettrica ϵ_r della maggior parte dei materiali isolanti commerciali varia da 2 a 10, assumendo uguale a 1 (precisamente 1,00054) quella dell'aria. Comunque per alcuni materiali, quali le ceramiche al titanato di bario (BaTiO_3) ϵ_r è dell'ordine di 9000.

Nelle applicazioni in alta frequenza sono preferibili isolanti con basso valore di ϵ_r per minimizzare le perdite di potenza elettrica.

Le proprietà elettriche degli isolanti sono influenzate dalle condizioni di misura, dall'umidità e, in particolar modo, dalla temperatura. I valori della resistività e della rigidità dielettrica decrescono con la temperatura mentre aumenta in genere la costante dielettrica.

Enti di normalizzazione nazionali e internazionali (CEI, IEC, IEEE) hanno definito il raggruppamento dei materiali in *classi di isolamento* indicando, per ciascuna di esse, la temperatura massima di esercizio continuativo. Si va dalla classe più bassa, cui appartengono carta, legno, seta, gomma, con una temperatura massima di esercizio di 90 °C; alla classe più alta, che comprende mica, porcellana e vetro e arriva a temperature di lavoro di oltre 180 °C.

Effetto pelle.

È chiamato così perché all'aumentare della frequenza la corrente tende ad addensarsi sulla parte più esterna del conduttore. Si può pensare a una conduzione di corrente attraverso tanti filetti elementari, uniformemente distribuiti, ognuno dei quali è dotato di una sua resistenza (costante) e di una induttanza che diminuisce all'aumentare della distanza dal centro.

Se le dimensioni della sezione del conduttore sono molto grandi, la densità di corrente, per effetto pelle, varia esponenzialmente diminuendo dalla superficie verso l'interno secondo la relazione:

$$J = J_0 e^{-r/\delta}$$

dove J_0 è la densità della corrente alla superficie;

δ (delta) è detto *profondità di penetrazione* e rappresenta la distanza dalla superficie a cui la densità di corrente diventa J_0/e cioè si riduce a circa il 36 % della densità di corrente sulla superficie esterna del conduttore.

Per le proprietà degli esponenziali essa rappresenta lo spessore in cui dovrebbe circolare una densità di corrente costante J_0 per ottenere la corrente totale che scorre nel conduttore. In altre parole si può semplificare pensando che la corrente non si distribuisca su tutta la sezione ma scorra solo su una corona circolare di spessore pari a δ .

Tale valore dipende dalla frequenza della corrente e dalla resistività e dalla permeabilità del materiale, secondo la relazione seguente:

$$\delta (m) = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}}$$

Per avere un'idea dei valori che assume la si può calcolare per il conduttore più usato, il rame. Ricordando che:

$$\mu_{Cu} \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

$$\rho_{Cu} \approx 0,0172 \div 0,0178 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$$

sostituendo questi valori nella precedente relazione e adattata la formula per calcolare la profondità di penetrazione in millimetri, lo spessore di penetrazione nel rame diventa:

$$\delta_{Cu} (mm) = \frac{66,01 \div 67,15}{\sqrt{f}}$$

Da questa relazione si vede che la profondità di penetrazione per il rame è circa 9,5 mm per correnti a frequenza industriale di 50 Hz, e di circa 67 μm per correnti a frequenza di 1 Mhz.

In alcune applicazioni industriali, ad esempio forni a microonde e riscaldamento ad induzione, in cui la frequenza di lavoro è molto elevata la corrente si concentra sullo strato esterno. Per ridurre la resistenza si usano conduttori di rame ricoperti con un sottile strato di argento, che ha una resistività molto bassa, e diventa sede di corrente con modesti valori di resistenza.

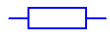
Se oltre alla frequenza è elevata anche la corrente è necessario avere una grande sezione ma è inutile usare cavi di grande diametro poiché la parte interna non sarebbe comunque interessata da corrente. Si ricorre allora a conduttori cavi, in altre parole a tubi di materiale conduttore, tipicamente rame. Il tubo è privo della parte interna, che non serve alla conduzione della corrente ma rappresenterebbe un costo e un peso aggiuntivi.

RESISTORI.

Proprietà.

I resistori sono componenti elettrici passivi che trasformano energia elettrica in energia termica (effetto Joule), servono ad introdurre un valore prefissato di resistenza in un circuito elettrico.

Il **simbolo** normalizzato, cioè adottato ufficialmente in Europa per rappresentare un resistore è quello della figura a lato: un rettangolo con il lato maggiore lungo tre volte il lato minore.



Succede molto frequentemente di trovare negli schemi elettrici anche quest'altro simbolo, una specie di zig-zag, che è adottato dalla normativa nord americana. Fino a qualche anno fa era previsto anche dalla normativa europea.



La **gamma dei valori** disponibili in commercio va da frazioni di Ω al $M\Omega$ e oltre. Il comportamento elettrico è definito dalla legge di Ohm: $V = R I$

Parametri principali.

I **principali parametri** di un resistore sono:

- valore nominale** è il valore di resistenza dichiarato dal costruttore, ovvero il valore che il componente dovrebbe avere a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$); si misura in Ω (ohm);
- tolleranza** espressa in %, indica il massimo scostamento del valore della resistenza misurata rispetto a quello nominale

Le tolleranze dei processi di lavorazione danno una produzione di resistori con valori diversi da quello voluto e il risultato è che la resistenza vera, cioè quella che potremmo misurare con un ohmetro, varia intorno al valore nominale. Il modo più semplice per dare un'idea della variabilità della resistenza reale è associare al valore nominale (quello che si vorrebbe avere) un altro numero che permetta di calcolare i valori massimo e minimo che si possono trovare.

Esempio: $R = 220\ \Omega$ tolleranza $\pm 10\%$ equivale a dire che il valore nominale (cioè quello che vorremmo avere) è 220, la tolleranza del 10 % di 220 indica che il valore reale della resistenza si può discostare al massimo del 10 % da quello nominale, cioè di $22\ \Omega$. Quindi il valore vero di resistenza è compreso tra $220 - 22$ e $220 + 22$ cioè la resistenza reale R è $198\ \Omega \leq R \leq 242\ \Omega$.

Potenza nominale

La **potenza nominale** P_n è la **massima potenza dissipabile** dal resistore, **in ambiente a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$** , senza che il riscaldamento provochi nel componente alterazioni non reversibili che ne impediscano il regolare funzionamento.

In qualche caso la potenza nominale può essere determinata a temperatura ambiente diversa dal valore classico di $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, ad esempio a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Di solito il costruttore lo specifica in modo chiaro ed evidente.

Potenza dissipata e temperatura del resistore.

Quando un resistore inserito in un circuito elettrico è percorso da corrente, assorbe una potenza elettrica, data dalla relazione:

$$1) \quad P_a = V \cdot I = \frac{V^2}{R} = R \cdot I^2$$

Questa potenza (equivalente all'energia assorbita ogni secondo) viene trasformata in calore con conseguente aumento della temperatura interna. Ma quando la temperatura interna risulta maggiore di quella

dell'ambiente si innesca un flusso di calore che dall'interno del resistore (a temperatura più alta) si propaga verso l'esterno (a temperatura più bassa).

All'inizio, quando il resistore è poco più caldo della temperatura ambiente, la potenza trasferita all'ambiente è bassa, minore di quella elettrica assorbita e convertita in calore ($P_a > P_d$). La differenza tra quella elettrica e quella dissipata nell'ambiente rimane nel resistore e ne aumenta l'energia interna e quindi la temperatura.

Man mano che la temperatura aumenta la potenza dissipata (trasferita all'ambiente) aumenta, fino ad uguagliare quella elettrica ($P_d = P_a$). In questa situazione la potenza interna del resistore non aumenta più e la sua temperatura rimane stabile. In altre parole il sistema composto da resistore e ambiente è in equilibrio termico.

Quando si interrompe il flusso di corrente la potenza assorbita è nulla. D'altra parte il resistore è ancora caldo, più caldo dell'ambiente, e continua a dissipare calore (traferirlo all'ambiente). La sua energia interna diminuisce e così la temperatura, fino a quando avrà la stessa temperatura dell'ambiente che lo circonda e ritornerà in equilibrio termico.

Passando da una descrizione qualitativa ad una analisi quantitativa conviene ricordare che il trasferimento di energia termica dal resistore all'ambiente avviene in tre modi diversi: conduzione, convezione ed irraggiamento.

La **CONDUZIONE** avviene tra solidi a contatto: il resistore trasferisce calore ai suoi terminali e quindi al circuito stampato su cui è montato.

La **CONVEZIONE** è il meccanismo di trasferimento del calore tra solidi e fluidi: il resistore caldo cede calore all'aria che lo circonda.

L'**IRRAGGIAMENTO**, a differenza degli altri modi, non ha bisogno di nessun materiale attraverso cui far passare il calore, infatti sfrutta le onde elettromagnetiche che viaggiano anche nel vuoto. Il sole invia calore sulla terra proprio con questo meccanismo.

L'irraggiamento dipende dalla temperatura assoluta del corpo e dà un contributo trascurabile alla dissipazione. Fanno eccezione i resistori di potenza che possono raggiungere e superare i 300 °C (573 K).

La potenza dissipata per l'insieme dei due meccanismi di conduzione e convezione dipende dal salto di temperatura, cioè dalla differenza tra la temperatura del resistore e quella dell'ambiente in cui è immerso.

In particolare la potenza dissipata nell'ambiente P_D è proporzionale al salto di temperatura ΔT come si vede dalla formula seguente:

$$P_D = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_r - T_a}{R_T} \quad T_r \quad \text{temperatura interna del resistore}$$

$$1) \quad T_a \quad \text{temperatura ambiente}$$

$$R_T \quad \text{resistenza termica che si misura in °C/W o K/W}$$

In cui la resistenza termica dipende dalla forma e dal materiale di cui è costituito il resistore. Il fattore che influenza di più la resistenza termica è la superficie di contatto con l'ambiente, più è estesa più facile è il trasferimento di calore all'ambiente e quindi più bassa è la resistenza termica.

La formula precedente si può riscrivere sotto altra forma che rende evidente la somiglianza con la legge di Ohm:

$$2) \quad \begin{aligned} \Delta T &= R_T \cdot P_D \\ V &= R \cdot I \end{aligned}$$

in cui la resistenza termica rende conto della difficoltà di passaggio del calore.

La potenza dissipata, che può essere vista come un flusso di energia nell'unità di tempo, occupa un posto analogo alla corrente, che è un flusso di cariche nell'unità di tempo.

E, infine, il salto (differenza) di temperatura è analogo alla differenza di potenziale.

Riprendendo il concetto di potenza nominale, nelle formule precedenti si nota che se aumenta la potenza elettrica dovrà aumentare la potenza dissipata e ciò si può ottenere solo aumentando il salto di temperatura, dato che la forma del resistore e quindi la sua R_T non cambiano.

Per aumentare il salto di temperatura dovrà aumentare la temperatura del resistore. Se la temperatura aumenta troppo il resistore può subire delle modifiche irreversibili che ne pregiudicano il funzionamento.

Per questo il costruttore indica il massimo valore della potenza che il resistore può dissipare (*potenza nominale*) cioè il valore di potenza che porta la temperatura interna al valore massimo sopportabile.

La potenza nominale di solito è determinata in ambiente a 25 °C, per alcuni tipi di resistori di buona qualità può essere determinata in ambiente a 70 °C.

Volendo si può vedere la cosa da un altro punto di vista: se si impiega il resistore in ambiente a 25 °C non si può fargli assorbire una potenza superiore a quella nominale altrimenti il resistore supera la temperatura massima che è in grado di sopportare.

I resistori possono essere classificati in base alla potenza nominale. Una suddivisione comunemente accettata per le applicazioni elettroniche è

	1W	piccola potenza
P_d fino a	10W	media potenza
	100W	alta potenza

Curva di DERATING

La potenza nominale è determinata a 25 °C ma quasi sempre i resistori lavorano in ambiente a temperatura superiore, ad esempio quando il resistore è montato in un circuito utilizzato per controllare una caldaia per il riscaldamento oppure è montato all'interno del vano motore di un'automobile. Questo determina una riduzione consistente della potenza dissipabile dal resistore come mostra l'esempio seguente.

Prendiamo un resistore di tipo economico, a strato di carbone, da 1 W di potenza nominale e temperatura massima di funzionamento 125 °C. Che potenza potrà dissipare se lavora in ambiente a 75 °C ?

La potenza nominale è la potenza massima dissipabile in ambiente a 25 °C. poiché la P_D dipende dal salto di temperatura questo dovrà essere al massimo e quindi la temperatura del resistore dovrà essere 125 °C.

Il salto di temperatura tra il resistore e l'ambiente è quindi 100 °C.

Volendo si può calcolare la resistenza termica che è di 100 °C/W.

Quando il resistore lavora in ambiente a 75 °C il salto termico si riduce, infatti il resistore non può superare 125 °C per cui il salto termico massimo si riduce a 50 °C che è la metà di quello relativo alla potenza nominale. Dato che la resistenza termica non cambia si riduce a metà anche la potenza dissipabile. In altre parole la potenza massima dissipabile dal resistore in ambiente a 75 °C è 0,5 W.

Se portiamo all'estremo il ragionamento lo stesso resistore in ambiente a 125 °C non potrà dissipare potenza perché è già alla temperatura massima. Qualsiasi ulteriore riscaldamento dovuto alla dissipazione di potenza lo porterebbe a danneggiarsi.

Si intuisce che tanto più alta è la temperatura ambiente tanto più bassa è la potenza massima dissipabile.

Si pone quindi il problema di determinare la potenza massima dissipabile dal resistore al variare della temperatura ambiente.

Partendo dalla formula 1 opportunamente riscritta per mettere in evidenza la dipendenza dalla temperatura ambiente

$$3) \quad P_D = \frac{\Delta T}{R_T} = \frac{T_r - T_a}{R_T} = \frac{T_r}{R_T} - \frac{T_a}{R_T}$$

con pochi passaggi si può mettere in evidenza la somiglianza con l'equazione esplicita di una retta

$$4) \quad P_D = -\frac{1}{R_T} T_a + \frac{T_r}{R_T}$$

$$y = m \cdot x + q$$

in cui il coefficiente negativo ($-1/R_T$) rende evidente che la P_D (potenza dissipata) diminuisce con l'aumentare della T_a (temperatura ambiente), in accordo con l'esempio precedente.

Ricordando che la potenza massima si ha quando il resistore raggiunge la massima temperatura ammissibile si può riscrivere la 4 per ricavare la massima potenza dissipabile dal resistore in funzione della temperatura ambiente:

$$5) \quad P_{D \max} = -\frac{1}{R_T} T_a + \frac{T_{r \max}}{R_T}$$

Alla formula 5 corrisponde la retta tratteggiata del grafico. Infatti per $T_a = T_{r \max}$ (nel nostro caso 125°C) la $P_{D \max}$ si annulla.

Per $T_a = 25^\circ\text{C}$ per definizione la $P_{D \max} = P_n$ che supponiamo sia pari a 100.

DA notare un aspetto particolarmente importante: non tutta la retta è utilizzabile per determinare la potenza massima dissipabile. Ad esempio la semiretta a destra della $T_a = 125^\circ\text{C}$ che corrisponde a potenza negativa non ha senso dal punto di vista fisico, infatti il resistore non può lavorare a temperature superiori alla temperatura massima.

Inoltre il costruttore di solito garantisce il funzionamento per potenze dissipate non superiori a quella nominale e quindi è opportuno escludere il tratto a sinistra di 25°C .

Con queste limitazioni la curva che mette in relazione la $P_{D \max}$ e la T_a è la spezzata di fig. 3 che è chiamata curva di **DERATING**.

Per determinare la potenza massima dissipabile al variare della temperatura ambiente abbiamo quindi due possibilità: la formula oppure uno strumento grafico la curva di derating, meno preciso ma più veloce.

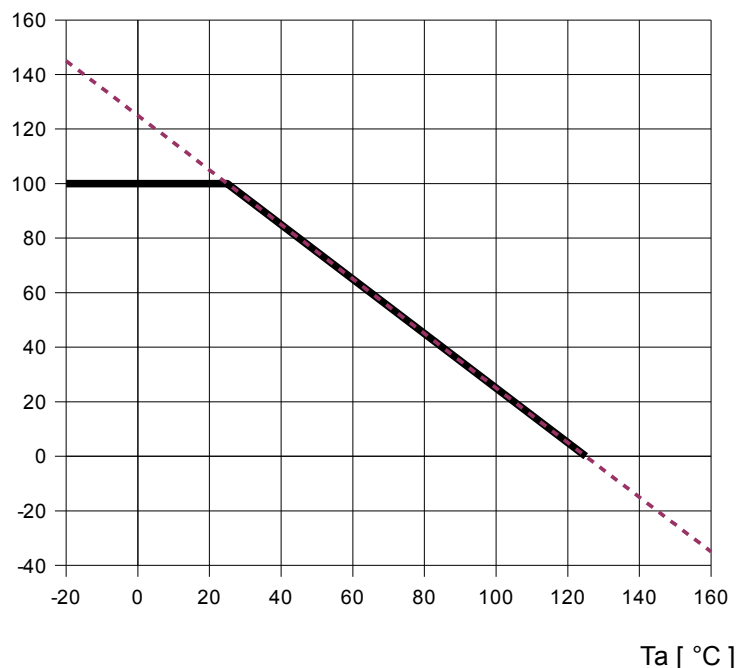


Figura 4: curva di DERATING

Parametri secondari.

Altri parametri di importanza secondaria sono:

- coefficiente di temperatura
- coefficiente di tensione
- stabilità
- rumore

Coefficiente di temperatura

Per variazioni di temperatura non molto grandi la variazione della resistenza con la temperatura può essere considerata lineare e quindi si può rappresentare con l'espressione seguente

$$(1) \quad R(T) = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$\Delta T = T - T_0$ Salto di temperatura

$R(T)$ = resistenza alla temperatura T

R_0 = resistenza alla temperatura T_0 di riferimento

α = coefficiente di temperatura $\Omega/^\circ\text{C}$

Dalla (1) si ricava l'espressione di α

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\Delta T}$$

ed è chiaro anche il suo significato fisico. Al denominatore il rapporto tra la variazione assoluta di resistenza ΔR e la resistenza stessa dà la variazione relativa di resistenza. Dividendo la variazione relativa di resistenza per la variazione di temperatura ΔT che l'ha prodotta si ottiene

la variazione relativa di resistenza dovuta all'aumento di temperatura di un grado

che è proprio il significato fisico di α .

In genere α viene indicato con TC (Temperature Coefficient) e le unità di misura sono [ppm/ $^\circ\text{C}$] o [$^\circ\text{K}^{-1}$]

TC: $\pm 250 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{K}$ equivalente a $\pm 250 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

TC \Rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \text{NTC} = \text{Negative Temperature Coefficient} \\ \rightarrow \text{PTC} = \text{Positive Temperature Coefficient} \\ \text{(termistori se TC è elevato)} \end{array} \right.$

Coefficiente di tensione

Il coefficiente di tensione non sempre è fornito. È una misura della variazione della resistenza dovuta alla variazione della tensione.

$$R = R_0 (1 + k_v \Delta V) \quad k_v \text{ è espresso in } \text{V}^{-1} \text{ o in ppm/V}$$

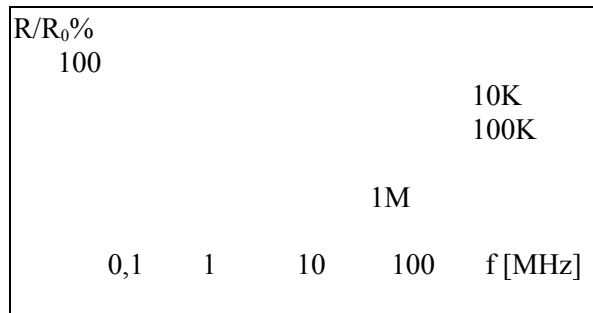
Se k_v è elevato \Rightarrow varistori (Resistenza che varia con la tensione)

Stabilità

Serve a dare un'idea della variazione della resistenza dovuta a lunghi periodi di funzionamento. Di solito viene determinata calcolando la variazione relativa di resistenza dopo un periodo di lavoro a pieno carico (potenza massima), in ambiente a 70 °C e con umidità elevata.

$$S(\%) = \frac{\Delta R}{R} 100 = \frac{R_f - R_i}{R} 100 \quad \text{valori tipici di } S \quad 0,1 \div 0,3 \%$$

Caratteristiche R-f. Alle alte frequenze (oltre MHz) intervengono le componenti induttiva e capacitiva.



Tecnologie costruttive.

Parti che costituiscono un resistore

Da un punto di vista costruttivo, un resistore è formato dalle seguenti parti:

- *supporto isolante*: cilindretto di materiale isolante plastico, ceramico o vetroso
- *elemento resistivo*: a strato (film) , a filo o ad impasto
- *reofori o terminali*: necessari per il collegamento spesso servono anche per il montaggio
- *rivestimento di protezione*: isola elettricamente e protegge il resistore da agenti esterni dannosi

L'elemento resistivo

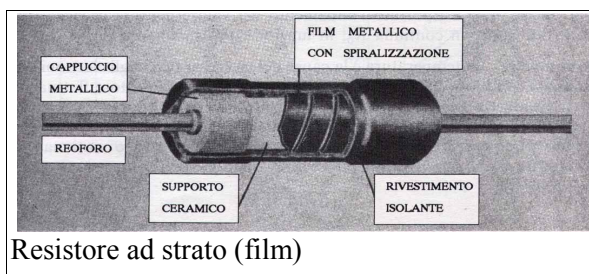
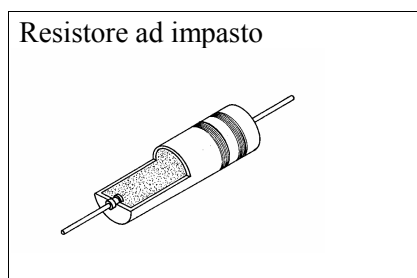
L'**elemento resistivo** è la parte principale del resistore cioè quella parte che viene attraversata dalla corrente e che ne determina il comportamento elettrico. Per questa ragione il tipo di resistore prende il nome dall'elemento resistivo:

Tipi di Resistori

Fissi	a film sottile (thin film)	a carbone (uso generico) metallico NiCr (uso generico, precisione) ossido metallico (uso generico, precisione)
	a film spesso (thick film)	a carbone metal glaze, metallo+vetro (buona dissipazione di calore) cermet, ceramica+metallo (buona dissipazione di calore)
	a filo (wire wound)	media potenza Ni-Cr alta potenza Ni-Cr-Al di precisione Cu-Ni; Cu-Mn-Ni
	ad impasto (ormai non più usati)	
	reti resistive	DIP Dual Inline Package SIL Single In Line
Variabili	Potenzimetri trimmer slider	Impasto, plastica conduttiva, cermet

Nei **resistori ad impasto** o a composizione l'elemento resistivo è costituito da un agglomerato contenente polvere di carbone e/o grafite, resine sintetiche e materiali inerti come il talco.

Il valore della resistenza dipende dalla percentuale di polvere di carbone nell'impasto. Questo tipo di resistori è ormai in disuso perché poco preciso.



Nei **resistori a film** l'elemento resistivo è costituito da uno strato o film di materiale conduttore depositato su un supporto di materiale isolante quasi sempre ceramico ed avente forma cilindrica.

A seconda dello spessore del film possiamo avere:

- *resistori a film spesso (thick film)*;
- *resistori a film sottile (thin film)*.

I resistori a film spesso hanno il film con spessore maggiore di 5 μm realizzato generalmente con materiali ottenuti per sinterizzazione (vedi metallo-ceramica) che vengono genericamente chiamati *cermet*.

I cermet più usati contengono oro, argento, palladio, rutenio, indio, e platino mescolati con ossido di tantalio, nitruri e carburi. Il film spesso può anche essere realizzato con metalli quali tantalio, tungsteno e titanio oppure con carbone.

Nei resistori a film sottile lo spessore è inferiore a 5 μm ed i materiali usati sono: **metalli, ossidi metallici o carbone**.

Quando la resistenza che si vuole ottenere non è particolarmente bassa è necessario diminuire la sezione ed aumentare la lunghezza dell'elemento resistivo. Questo risultato può essere ottenuto incidendo il film con un utensile in modo da ottenere una spirale. In questo modo si ottiene un film che invece di essere cilindrico ha la forma di solenoide.

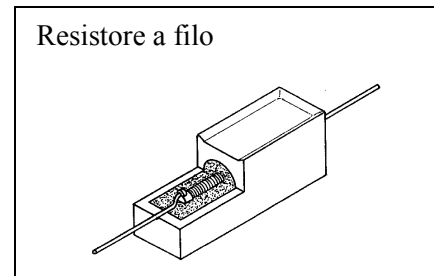
I progressi della tecnologia dei resistori a film e la vastità dei materiali disponibili per la realizzazione del film rende possibile la produzione di resistori con tolleranze fino a 0,05% e coefficiente di temperatura sia positivo che negativo oltre che con una vastissima gamma di valori.

Nei **resistori a filo** l'elemento resistivo è un filo metallico avvolto su un supporto di materiale isolante che, generalmente è ceramico ed ha forma cilindrica. Il diametro del filo può assumere valori che vanno da qualche decimo di millimetro a pochi centesimi di millimetro. Il diametro del filo è legato al valore della corrente che il resistore deve poter sopportare, per cui i resistori con potenza maggiore avranno diametro maggiore. I materiali adoperati per la costruzione dei resistori a filo sono:

- *leghe nichel-cromo*;
- *leghe nichel-cromo-alluminio*;
- *leghe nichel-rame*.

La tecnologia dei resistori a filo consente di ottenere resistori di altissima qualità in termini di precisione, stabilità, coefficiente di temperatura ecc. I materiali più usati per la costruzione dei resistori a filo di precisione sono: la *manganina* (Cu-Mn) e la *costantina* (Cu-Ni).

La tecnologia dei resistori a filo trova vasta applicazione anche nella produzione dei *resistori di alta potenza* e nella produzione dei *resistori variabili*.



Supporto isolante

Il materiale da utilizzare come **supporto isolante** deve possedere

- *elevata resistenza di isolamento*;
- *coefficiente di dilatazione termica uguale a quella dell'elemento resistivo*;
- *capacità di sopportare forti shock termici*;
- *robustezza meccanica*;

I materiali maggiormente utilizzati sono: ceramiche, fibre di vetro, resine fenoliche.

Rivestimento di protezione

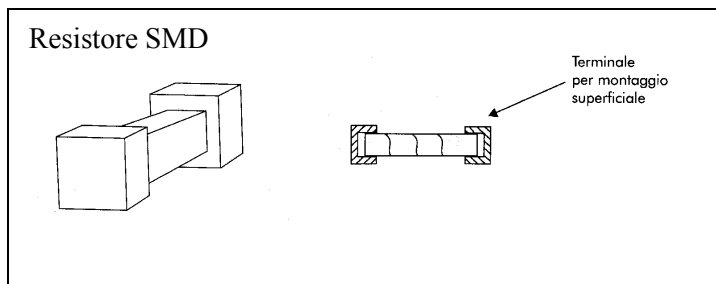
L'elemento resistivo deve essere ricoperto mediante un adatto rivestimento per evitare il suo danneggiamento.

Le tecniche di rivestimento più usate sono:

- *incapsulamento in tubetti ceramici sigillati alle estremità con cementi refrattari*;
- *copertura con smalti vetrosi*;
- *rivestimento con resine sintetiche*;
- *deposizione di strati sovrapposti di vernici isolanti*.

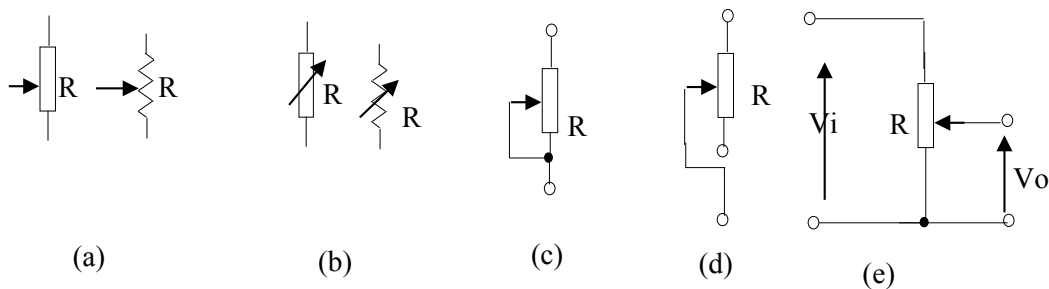
Reofori

I terminali del resistore servono per collegarlo al circuito. Essi vengono realizzati con materiale che sia ottimo conduttore e sono a forma di filo, disposti longitudinalmente lungo l'asse del resistore. Essi sono saldati a due cappellotti metallici che sono a contatto diretto con l'elemento resistivo. Recentemente si è sviluppata una tecnica di montaggio dei circuiti in cui i componenti vengono saldati al circuito stampato dallo stesso lato in cui sono disposti i componenti. Questa tecnica è denominata *Surface Mount Device (SMD)*. In questo caso il circuito non prevede fori per far passare i reofori ed i vari componenti hanno terminali a forma di cappellotto, il quale viene saldato alla pista del circuito stampato.



Resistori variabili

I resistori variabili sono costituiti da un elemento resistivo fisso che fa capo a due terminali fissi; più una parte mobile chiamata cursore che fa capo ad un terzo terminale.



Simboli: Potenziometri/trimmer

- a) simboli grafici del potenziometro
- b) simboli grafici di resistenza variabile
- c) collegamento a reostato (più usato)
- d) collegamento a reostato (meno usato)
- e) collegamento a potenziometro

Sotto l'aspetto funzionale possono essere distinti in **potenziometri, trimmer e slider**.

Il potenziometro è un dispositivo elettrico equivalente ad un partitore di tensione resistivo variabile (cioè a due resistori collegati in serie, aventi la somma dei due valori di resistenza costante, ma di cui può variare il valore relativo).

In origine i potenziometri erano utilizzati per misurare con precisione la tensione elettrica per confronto con una sorgente di riferimento. Il nome significa infatti letteralmente misuratore di potenziale (elettrico). Successivamente il termine si è esteso ad indicare l'impiego del dispositivo in applicazioni del tutto diverse dalla pura misura.

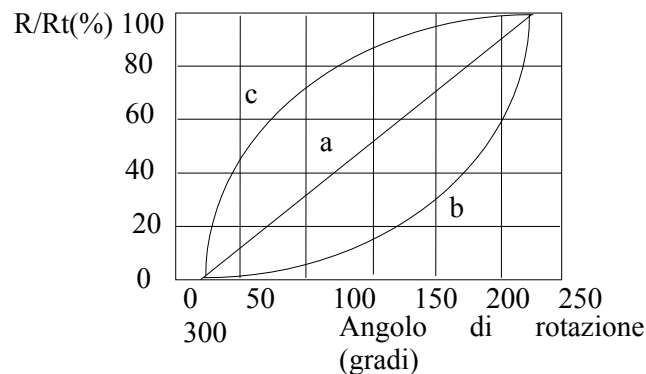
Generalmente l'elemento resistivo nei potenziometri e nei trimmer è di forma circolare ed il cursore viene spostato mediante la rotazione di un albero girevole nei potenziometri, nei trimmer per mezzo di un cacciavite.

Un resistore variabile può essere impiegato o come reostato, cioè che può variare la corrente di un ramo (fig.(c e d)), o come partitore di tensione, cioè che può variare la tensione tra due punti (fig.(e)). Quando il

resistore variabile viene utilizzato come reostato, normalmente si preferisce non lasciare un terminale scollegato, ma collegarlo come in (fig.(c)).

I parametri visti per i resistori fissi valgono anche per i potenziometri in particolare il costruttore fornisce:

- valore nominale;
- potenza nominale;
- tolleranza;
- tensione nominale;
- angolo di rotazione (compreso tra 270° e 330° oppure multigiri)
- legge di variazione: lineare (curva a), logaritmica (curva b), esponenziale (curva c).



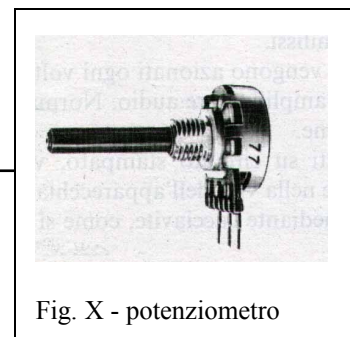
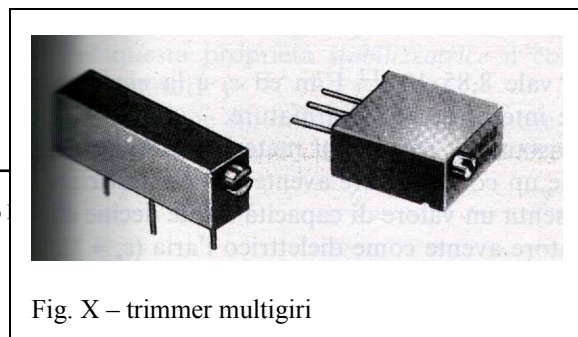
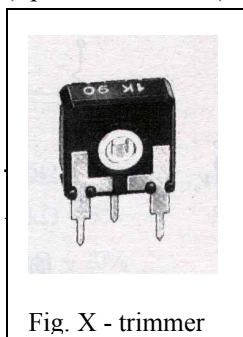
Potenzimetri e trimmer.

Sotto l'aspetto funzionale i potenziometri si possono suddividere in potenziometri veri e propri e trimmer potenziometrici o potenziometri semi fissi.

I potenziometri vengono usati per ottenere variazioni di grandezze (tipo il volume degli amplificatori audio) secondo le intenzioni dell'utente finale e per questo sono montati sul mobile dell'apparecchio e manovrabili tramite una manopola.

I trimmer, più piccoli dei potenziometri, sono adatti per essere montati sul circuito stampato e vengono manovrati solo in sede di taratura; la rotazione è ottenuta tramite cacciavite.

Accanto ai potenziometri rotativi, esistono anche i potenziometri lineari, detti **slider** o potenziometri a slitta, il cui movimento del cursore è rettilineo. Il loro uso è abbastanza frequente nelle apparecchiature musicali (tipo mixer o altro).



Resistori ad ossido metallico 2%

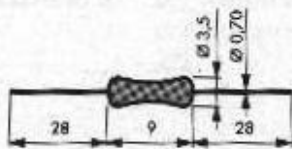


Serie RSMF 1B

- Elevata potenza nominale
- Difficilmente infiammabili
- Dimensioni ridotte
- Resistenti al lavaggio

Dati tecnici

Potenza nominale	1 W (70 °C)
Tolleranza	2%
Rigidità dielettrica	350 V
Colore	verde chiaro
Coefficiente di temperatura	± 200 ppm/K
Temperatura di lavoro	-55...+200 °C



Indicazioni per l'ordine

Confezione: 10 pezzi
Prezzo: per pezzo

Resistore a strato di carbone 5%

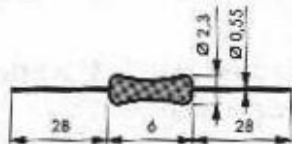


Serie RD 14S

- Rivestimento epossidico
- Resistente al calore e all'umidità
- Resistente agli acidi
- Serie E 12
- DIN 0207

Dati tecnici

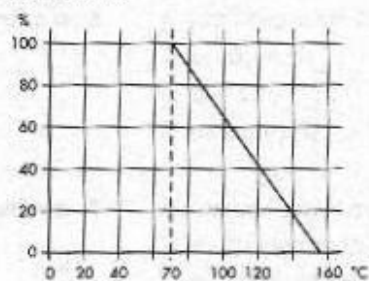
Potenza nominale	0,25 W
Tolleranza	$\pm 5\%$
Tensione di lavoro	300 V
Colore	beige
Temp. di lavoro	-55...+155 °C



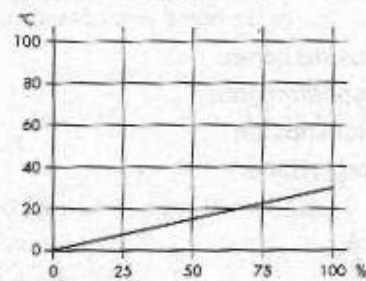
Indicazioni per l'ordine

Confezione: 10 pezzi
Prezzo: per pezzo

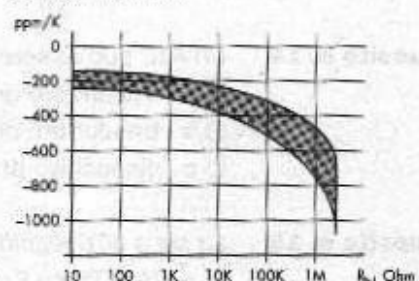
Derating di carico



Aumento della temperatura superficiale



Coefficiente di temperatura



Resistori a filo, di precisione

RCL

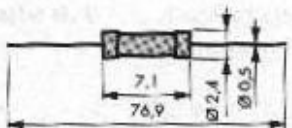


Serie T-1C

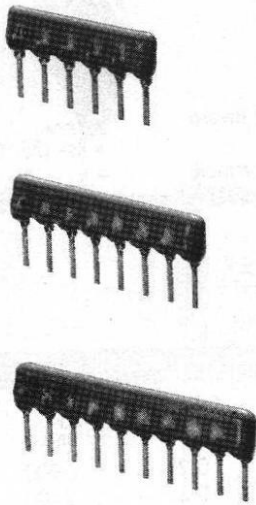
- Eccellente stabilità
- Connessioni saldate
- Nucleo in ceramica purissima
- Rivestimento in silicone resistente alle temperature elevate

Dati tecnici

Tolleranza	1%
Potenza nominale	1 W
Coefficiente di temperatura	
0,1 Ω..0,49 Ω	+ 650 ppm/K
0,5 Ω..0,99 Ω	+ 400 ppm/K
1 Ω..9,9 Ω	± 50 ppm/K
> 10 Ω	± 20 ppm/K
Temperatura di lavoro	-65...+275 °C



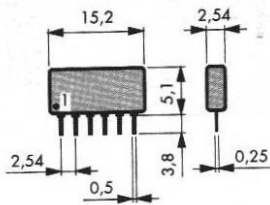
Reti resistive SIL



Dati tecnici

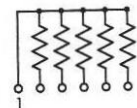
	Tipo 1	Tipo 2
Gamma di valori	47 Ω...1 MΩ	47 Ω...1 MΩ
Potenza nominale per resistore	25 °C 0,2 W	25 °C 0,25 W
	70 °C 0,125 W	70 °C 0,15 W
	25 °C 1,0 W/6 piedini	25 °C 1,00 W/8 piedini
per rete	1,4 W/8 piedini	1,25 W/10 piedini
	1,8 W/10 piedini	0,60 W/8 piedini
Tolleranza	± 2%	± 2%
Coefficiente di temperatura	± 200 ppm/K	± 200 ppm/K
Temp. di lavoro	-55...+125 °C	-55...+125 °C
Differenziale del coeff. di temp.(tracking)	± 50 ppm/K	± 50 ppm/K

6 Piedini

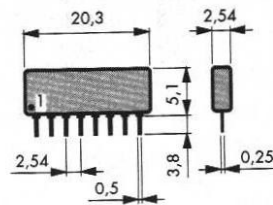


Connessioni

Tipo 1

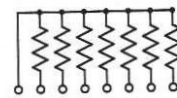


8 Piedini

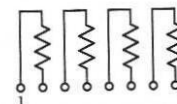


Connessioni

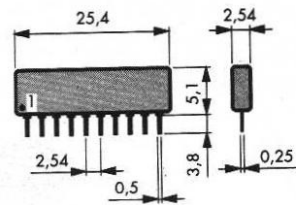
Tipo 1



Tipo 2

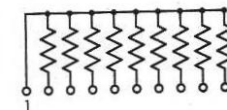


10 Piedini

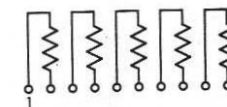


Connessioni

Tipo 1



Tipo 2



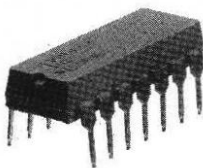
Reti resistive DIL



- Contenitore DIL

Dati tecnici

Gamma di valori	22 Ω...100 kΩ	Coefficiente di temp.	± 100 ppm/K
Tolleranza	± 2%	Temperatura di lavoro	-55...+125 °C



Tipo	4114R-002	4114R-001	4116R-002	4116R-001
Per resistore	0,125 W	0,25 W	0,125 W	0,25 W
Per rete	1,6 W	1,6 W	1,8 W	1,8 W



NORMALIZZAZIONE DEI VALORI NOMINALI DEI COMPONENTI ELETTRONICI PASSIVI.

Per componenti elettronici passivi si intendono in generale quei componenti che dissipano potenza. I principali sono: RESISTORI CONDENSATORI E INDUTTORI.

In genere per questi componenti il costruttore dà come specifiche:

- valore nominale V_n ;
- tolleranza di serie T_s ;
- altre caratteristiche specifiche del componente.

Data l'impossibilità di costruire a priori un'infinita gamma di valori nominali, ci si limita a soddisfare le richieste degli utenti, con una certa approssimazione, mettendo a disposizione una gamma discreta di valori:

$$\text{per es.: } V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n \quad \text{con } V_i < V_{i+1}.$$

La scelta di questi valori viene fatta col criterio di assicurare che, entro un certo campo di valori, un qualsiasi valore richiesto V_x possa essere approssimato con un errore relativo non superiore ad una certa tolleranza T_s , assegnata, minore, naturalmente, di 1.

Detti V_{i-1} e V_i i valori di due elementi consecutivi della gamma tra cui è compreso V_x , si ha:

$$V_{i-1} \leq V_x \leq V_i$$

Si deve quindi verificare una delle seguenti condizioni:

$$1) (V_x - V_{i-1}) / V_x \leq T_s \quad 2) (V_i - V_x) / V_x \leq T_s$$

Per calcolare il rapporto tra due valori consecutivi V_{i-1} e V_i , si consideri le disequazioni 1) e 2) nel caso peggiore (segno =) dalle quali si ottiene:

$$3) V_x (1 - T_s) = V_{i-1} \quad 4) V_x (1 + T_s) = V_i$$

Facendo il rapporto tra le 3 e 4 si ricava:

$$V_i = V_{i-1} (1 + T_s) / (1 - T_s)$$

ovvero, ponendo

$$5) q = (1 + T_s) / (1 - T_s)$$

si ottiene

$$V_i = q V_{i-1}$$

La quantità q , riportata nella 5), rappresenta di quanto bisogna incrementare un valore di una serie per ottenere il successivo.

Quindi avremo:

$$V_1, V_2 = qV_1, V_3 = qV_2, \dots, V_n = qV_{n-1}, V_{n+1} = qV_n, \dots$$

ovvero :

$$V_1, V_2 = qV_1, V_3 = q^2V_1, \dots, V_n = q^{n-1}V_1, V_{n+1} = q^nV_1, \dots$$

La gamma di valori scelta è costituita da una serie di valori in progressione geometrica con ragione q .

Nelle tabelle sono riportati tutti i valori compresi in una decade.

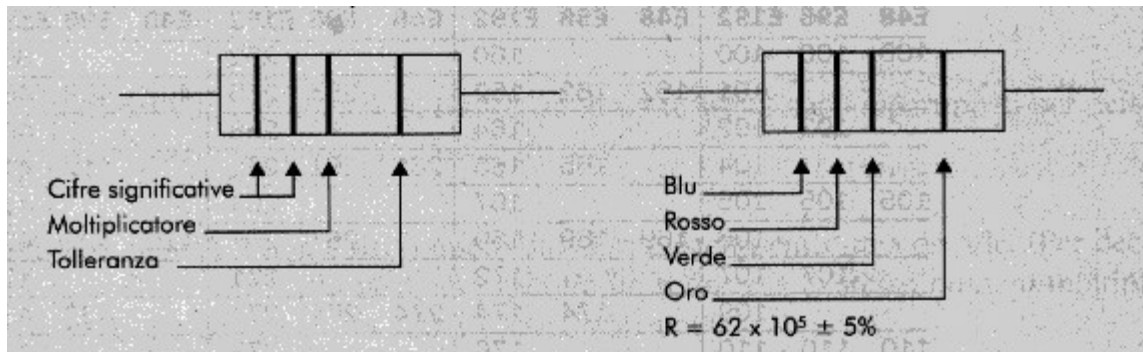
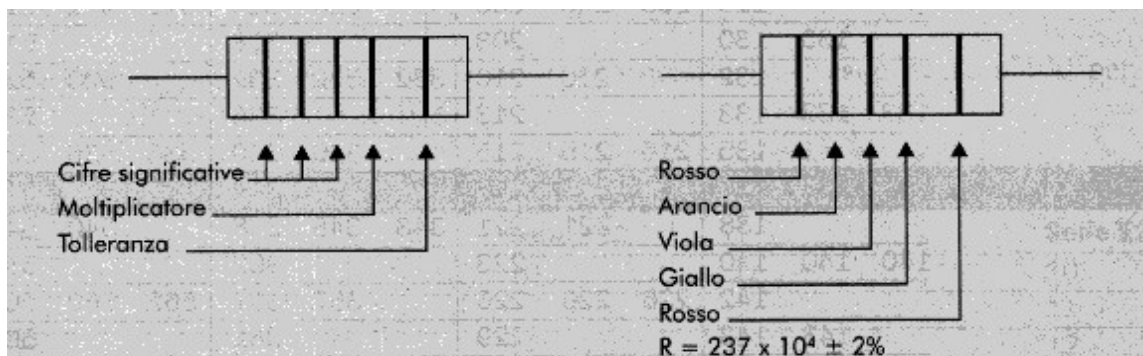
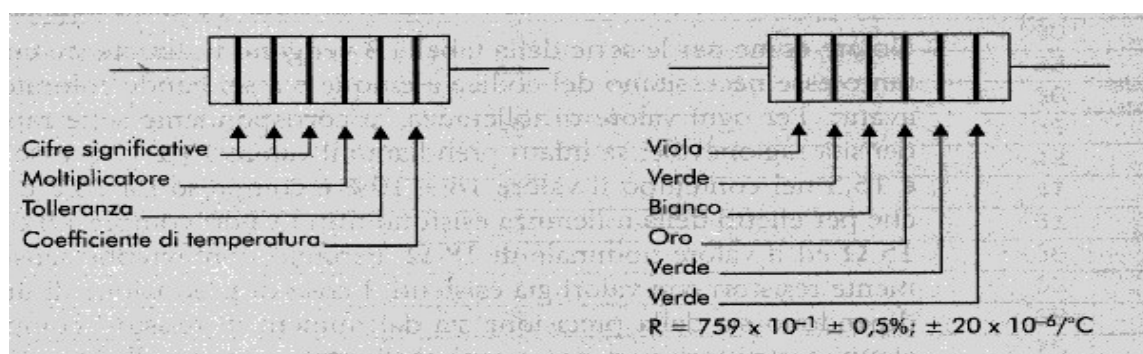
E48	E96	E19 2	E48	E96	E19 2	E48	E96	E19 2	E48	E96	E19 2	E48	E96	E192
100	100	100			160			252			397			626
		101	162	162	162		255	255	402	402	402		634	634
	102	102			164			258			407			642
		104		165	165	261	261	261		412	412	649	649	649
105	105	105			167			264			417			657
		106	169	169	169		267	267	422	422	422		665	665
	107	107			172			271			427			673
		109		174	174	274	274	274		432	432	681	681	681
110	110	110			176			277			437			690
		111	178	178	178		280	280	442	442	442		698	698
	113	113			180			284			448			706
		114		182	182	287	287	287		453	453	715	715	715
115	115	115			184			291			459			723
		117	187	187	187		294	294	464	464	464		732	732
	118	118			189			298			470			741
		120		191	191	301	301	301		475	475	750	750	750
121	121	121			193			305			481			759
		123	196	196	196		309	309	487	487	487		768	768
	124	124			198			312			493			777
		126		200	200	316	316	316		499	499	787	787	787
127	127	127			203			320			505			796
		129	205	205	205		324	324	511	511	511		806	806
	130	130			208			328			517			816
		132		210	210	332	332	332		523	523	825	825	825
133	133	133			213			336			530			835
		135	215	215	215		340	340	536	536	536		845	845
	137	137			218			344			542			856
		138		221	221	348	348	348		540	549	866	866	866
140	140	140			223			392			556			876
		142	226	226	226		357	357	562	562	562		887	887
	143	143			229			361			569			898
		145		232	232	365	365	365		576	576	900	900	900
147	147	147			234			370			583			920
		149	237	237	237		374	374	590	590	590		931	931
	150	150			240			379			597			942
		152		243	243	383	383	383		604	604	953	953	953
154	154	154			246			388			612			965
		156	249	249	249		392	392	619	619	619		976	976
	158	158												988

Notare come per le serie E48, E96, E192 vengono utilizzate tre cifre significative. Per ogni valore di tolleranza, la corrispondente serie rappresenta la massima densità ragionevole; se infatti prendiamo il valore $15 \pm 10\%$ esso è compreso fra 13,5 e 16,5 nel contempo il valore $18 \pm 10\%$ è compreso fra 16,2 e 19,8 Ω . Pertanto non avrebbe senso costruire appositamente resistori con valori compresi fra 15 Ω e 18 Ω .

Si trovano in commercio resistori della serie E24 con tolleranze sia del 5% sia del 2% anche se il 2% è tipico della serie E48.

Codice a bande.

Quando i resistori sono di piccole dimensioni si usa indicare sul contenitore il valore ohmico e la tolleranza ed in alcuni casi il coefficiente di temperatura utilizzando un **codice a strisce colorate**. Esistono tre codici; essi utilizzano rispettivamente *quattro, cinque e sei strisce colorate o bande*.

Figura 5: CODICE a QUATTRO BANDE**Figura 6: CODICE a CINQUE BANDE****Figura 7: CODICE a SEI BANDE**

Colore	Cifra significativa	Moltiplicatore	Tolleranza	Coeff. di temperatura ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Nero	0	1		250
Marrone	1	10	1 %	100
Rosso	2	10^2	2 %	50
Arancio	3	10^3		15
Giallo	4	10^4		25
Verde	5	10^5	0,5 %	20
Blu	6	10^6	0,25 %	10
Viola	7	10^7	0,1 %	5
Grigio	8	10^8		1
Bianco	9	10^9		
Oro	*	10^{-1}	5 %	
Argento	*	10^{-2}	10 %	

TERMISTORI

I **termistori** rappresentano una categoria di resistori caratterizzati da una forte **dipendenza dalla temperatura**.

Essi si dividono in due grandi categorie che prendono il nome di:

- **PTC** (*Positive Temperature Coefficient*);
- **NTC** (*Negative Temperature Coefficient*).

I **PTC** hanno un coefficiente di temperatura positivo per cui ad un aumento di temperatura corrisponde un aumento di resistenza. I materiali più usati per la costruzione dei PTC sono: titanato di bario, titanato di stronzio, e silicio policristallino.

Il comportamento di un PTC è definito dalla seguente relazione in cui A, B, C, sono delle costanti.

$$R_T = A + C e^{B \cdot T}$$

Il coefficiente di temperatura è dato da

$$\alpha_T = \frac{B \cdot C e^{B \cdot T}}{A + C e^{B \cdot T}}$$

Come si può notare nella relazione il valore della resistenza aumenta esponenzialmente con l'aumentare della temperatura, tuttavia questo comportamento è vero solo entro un campo di temperature comprese fra T_S e T_F .

Dal grafico si può notare come per basse temperature la resistenza diminuisce con l'aumentare della temperatura (la curva presenta pendenza negativa) poi la pendenza subisce una graduale inversione e si entra in una gamma di temperature in cui la resistenza aumenta con l'aumentare della temperatura in modo che piccoli aumenti di temperatura comportano forti variazioni della resistenza.

La temperatura di riferimento T_S denominata temperatura di Curie o *switching temperature*, rappresenta la temperatura a cui la resistenza raddoppia il valore assunto a 25 °C.

Vengono di seguito riportati i parametri commerciali di un PTC:

Tolleranza	5%
Resistenza di riferimento	$R_S = 100 \Omega$
Temperatura di riferimento	$T_S = 80 \text{ }^\circ\text{C}$
Resistenza finale a 125 °C	$R_F = 50 \text{ k}\Omega$
Temperatura finale	$T_F = 125 \text{ }^\circ\text{C}$
Tensione di esercizio	30 V_{\max}

La tipica caratteristica tensione corrente di un PTC presenta, per piccoli valori di tensione, il comportamento simile a quello di un resistore: la corrente aumenta con l'aumentare della tensione applicata; oltre un certo valore di tensione l'aumento di temperatura produce un forte aumento della resistenza e quindi una drastica diminuzione della corrente.

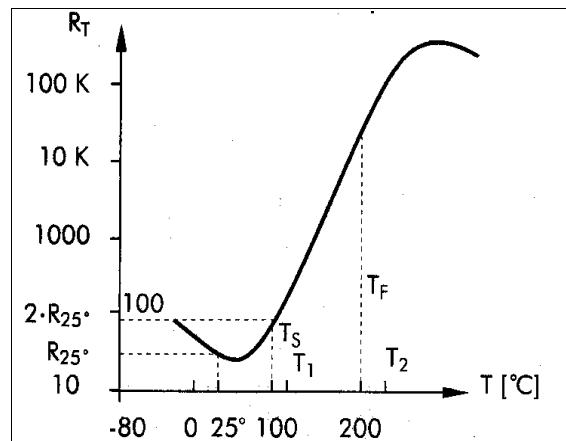


Figura 8: variazione della resistenza al variare della temperatura in un PTC

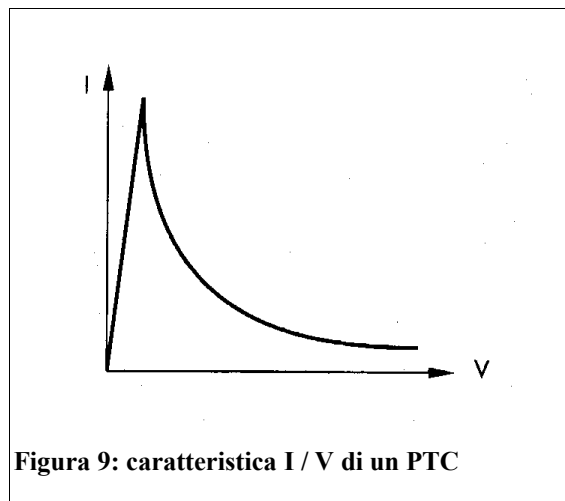


Figura 9: caratteristica I / V di un PTC

I termistori PTC vengono frequentemente utilizzati come dispositivi di protezione contro gli aumenti di corrente o di tensione (*MULTIFUSE*): un eccessivo aumento di tensione sposta il funzionamento nella zona caratterizzata da bassi valori di corrente.

Gli **NTC** hanno un coefficiente di temperatura negativo per cui ad un aumento della temperatura corrisponde una diminuzione della resistenza.

Il comportamento è definito dalla seguente relazione

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Dove

T è la temperatura in °K

R_T la resistenza alla temperatura T

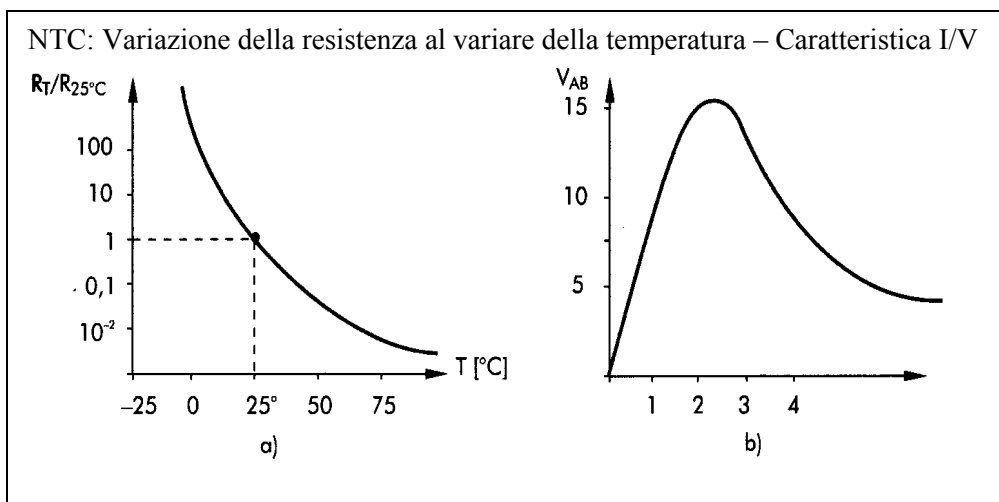
R_0 la resistenza alla temperatura di riferimento T_0

B è una costante dipendente dalla geometria e dal materiale.

Il coefficiente di temperatura è dato da

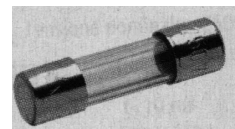
$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2}$$

Contrariamente ai PTC la relazione è valida per una vasta gamma di temperature.



Fusibile

Il fusibile è un dispositivo adatto per la protezione da sovraccarichi e da cortocircuiti. È realizzato con un elemento racchiuso all'interno di una cartuccia che fonde quando è percorso da una corrente superiore a quella nominale determinando l'apertura del circuito da proteggere. A differenza del *Multifuse*, una volta intervenuto, deve essere sostituito.



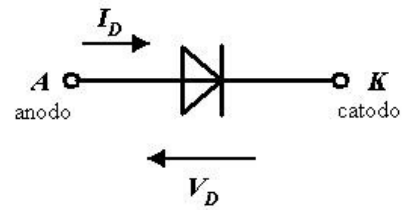
Esempio di parametri corrente-tempo

Corrente nominale	1,5 x I _n		2,75 x I _n		10 x I _n
	min	max	min	max	
100 mA	60 min	30 min	10 ms	500 ms	20 ms
125 mA – 10 A	60 min	30 min	50 ms	2 s	20 ms

DIODO A SEMICONDUCTORE

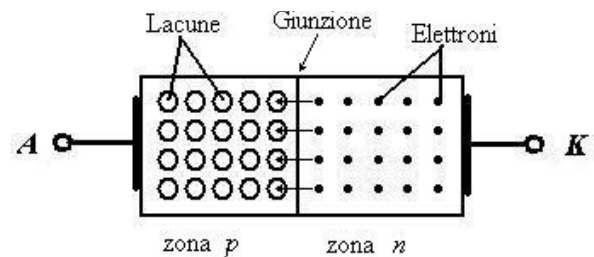
Principio di funzionamento

Il diodo, il cui simbolo elettrico è illustrato in figura, presenta due terminali, detti rispettivamente *anodo* (A) e *catodo* (K). Questo componente è caratterizzato dal fatto che la corrente (I_D) può scorrere, in misura rilevante, solo dall'anodo al catodo e non viceversa.



I terminali fanno capo internamente a due zone di materiale semiconduttore, normalmente silicio, dette *zona p* e *zona n*. La zona p viene ottenuta immettendo nel reticolo cristallino del silicio (sostanza tetravalente, cioè con quattro elettroni nell'orbita esterna) atomi di sostanze trivalenti quali boro, gallio, indio. Questo processo, che prende il nome di *drogaggio* (*doping*) arricchisce il materiale di una notevole quantità di portatori mobili di carica positiva, denominati *lacune*.

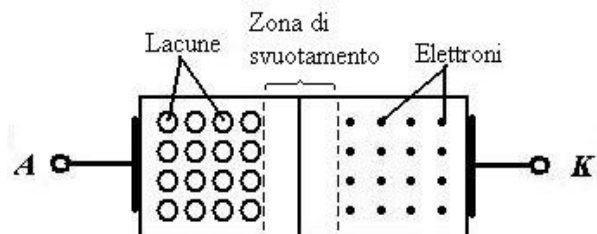
La zona n viene invece ottenuta drogando il silicio con sostanze pentavalenti (arsenico, fosforo, antimonio), che lo arricchiscono di portatori mobili di carica negativa, cioè di *elettroni*. La regione di transizione fra le due zone prende il nome di *giunzione*. In figura è illustrata schematicamente la struttura del diodo; con i circoletti vuoti sono indicate le lacune, con quelli pieni gli elettroni.



In prossimità della giunzione gli elettroni della zona n si spostano nella zona p riempiendo le lacune (*corrente di diffusione*). Non tutti gli elettroni si spostano perché si viene a creare un campo elettrico contrario.

In prossimità della giunzione si crea quindi una *zona di svuotamento* (*depletion layer*), cioè una zona priva di cariche libere.

Polarizzando direttamente la giunzione, cioè collegando il morsetto positivo della batteria alla zona p e quello negativo alla zona n, gli elettroni vengono spinti verso la zona p: la zona di svuotamento si restringe e si provoca il passaggio degli elettroni attraverso la giunzione dalla zona n alla zona p. Nasce pertanto una corrente *diretta*, indicata spesso con I_F (*forward*), che scorre, secondo il verso convenzionale, in senso contrario a quello degli elettroni, cioè dalla zona p alla zona n. Il diodo è in conduzione (ON).

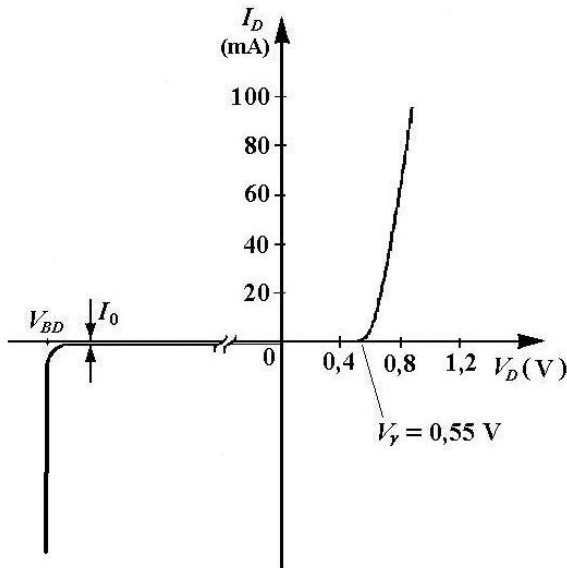


Se si polarizza inversamente la giunzione, cioè si collega il morsetto positivo della batteria alla zona n e quello negativo alla zona p, le polarità della batteria tendono ad allontanare i portatori mobili dalla giunzione, provocando l'allargamento della *zona di svuotamento* a cavallo della giunzione stessa. Non si verifica pertanto passaggio apprezzabile di corrente.

In realtà nelle due zone, oltre ai portatori *maggioritari* (lacune nella zona p ed elettroni nella zona n) sono presenti coppie elettrone/lacuna (in numero molto ridotto rispetto ai precedenti) che si generano per effetto termico e danno origine ad una corrente I_0 , di verso opposto alla precedente, detta *corrente inversa di saturazione*. Si noti che I_0 ($\sim 10 \div 20$ nA) è per diversi ordini di grandezza minore di I_F . Se in prima approssimazione non si tiene conto di questa debole corrente, si può dire che il diodo non conduce ossia è in interdizione (OFF).

Si tenga ancora presente che in polarizzazione inversa la regione di svuotamento, essendo sostanzialmente priva di portatori, costituisce un dielettrico interposto fra due zone conduttrici. Si viene così a stabilire, a cavallo della giunzione, una capacità parassita, che prende il nome di *capacità di transizione* e viene indicata con C_T .

Caratteristica tensione-corrente del diodo a semiconduttore

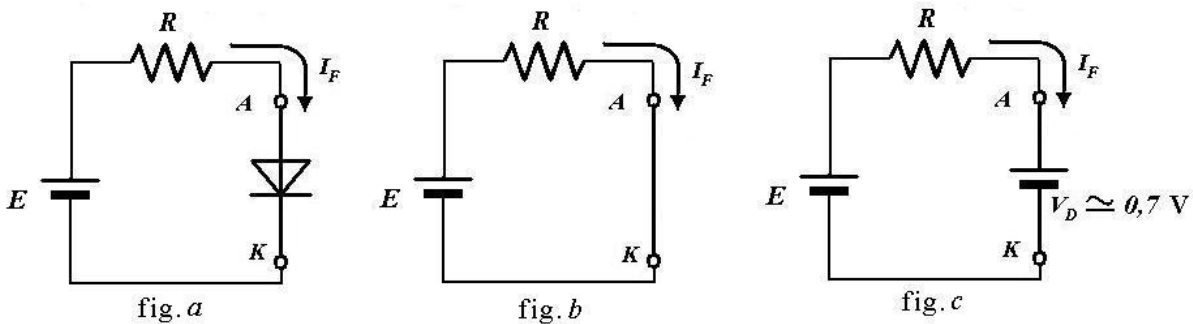


Il funzionamento del diodo è rappresentato in maniera completa dalla sua *caratteristica tensione-corrente* illustrata in figura. Finché la tensione V_D fra anodo e catodo non supera la *tensione di soglia* V_γ pari a circa 0,55 V, la corrente I_D è molto debole e può essere trascurata. Superata V_γ , la corrente aumenta molto rapidamente con la tensione.

Per valori di V_D negativi (polarizzazione inversa) invece nel diodo non scorre corrente, o meglio scorre la corrente inversa di saturazione I_0 di valore normalmente trascurabile. Allorché V_D raggiunge il valore di *rottura* V_{BD} (*breakdown*), l'effetto bloccante della giunzione viene annullato e la corrente cresce di colpo. A questo punto normalmente l'elevato passaggio di corrente provoca nel diodo danni, di origine termica, irreversibili. I valori della tensione di rottura vanno da pochi volt, come nel caso dei diodi LED, alle centinaia di volt (per l'1N4148, diodo molto adatto per applicazioni digitali, $V_{BD} = 100$ v), fino

al migliaio di volt e oltre (diodi rettificatori).

Modelli del diodo in commutazione



Si consideri il circuito di fig. a, in cui la batteria E , di valore superiore alla tensione di soglia V_γ , polarizza direttamente il diodo e fa scorrere una corrente I_F dall'anodo al catodo. In questo caso il diodo è in conduzione (ON) ed in prima approssimazione può essere considerato come un interruttore chiuso (vedi fig. b).

Considerando la caratteristica *tensione-corrente* si nota però che, se il diodo è in conduzione con normali correnti di lavoro, la tensione ai suoi capi non varia di molto, rimanendo compresa all'incirca tra 0,55 e 0,8 V. Si può allora accettare un valore intermedio di 0,7 V e supporre che in conduzione V_D assuma tale valore. In questo modo è possibile rappresentare il diodo in maniera più semplice come illustrato in fig. c, ossia come una batteria di 0,7 V. Si noti nel circuito la presenza della resistenza R , il cui scopo è quello di limitare la corrente attraverso il diodo, che altrimenti salirebbe a valori distruttivi per il diodo stesso.

Esempio.

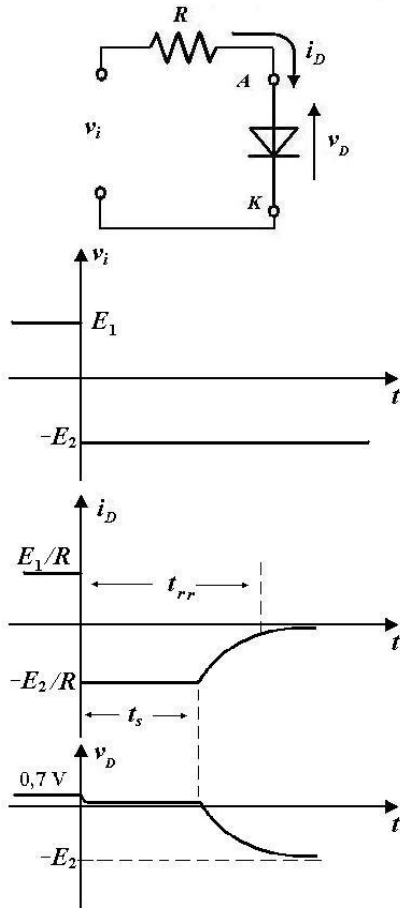
Supponendo di avere una batteria $E = 5$ V ed una $R = 1$ k Ω si calcoli la corrente diretta I_F nel diodo. Usando il modello di fig. c si ricava

$$I_F = \frac{E - V_D}{R} = \frac{5 - 0,7}{1 \cdot 10^3} = 4,3 \cdot 10^{-3} = 4,3 \text{ mA}$$

Con il modello più grossolano di fig. b si ottiene invece un valore meno vicino alla realtà: $I_F = 5$ mA.

Se un diodo è invece polarizzato inversamente (V_D è negativa), nel circuito scorre la corrente inversa I_O di valore molto basso (nel diodo 1N4148 $I_O = 25$ nA). Il diodo è in interdizione (OFF) e può essere rappresentato, se si trascura I_O , mediante un interruttore aperto.

Tempi di commutazione



Nel diodo la commutazione fra i due stati ON e OFF non è istantanea. In particolare riveste notevole importanza il tempo necessario al passaggio dalla conduzione all'interdizione. Si consideri il circuito di figura, in cui il diodo viene sottoposto ad una tensione di polarizzazione v_i che passa da un valore positivo E_1 ad un valore negativo $-E_2$.

Prima dell'istante $t = 0$ il diodo conduce, ai suoi capi è presente una tensione di circa 0,7 V e la corrente I_D , trascurando la caduta sul diodo, vale $I_D = E_1/R$. Allorché v_i passa a $-E_2$, la corrente non cessa di colpo ma inverte la sua direzione. Infatti in ciascuna delle due zone p ed n è ancora presente un eccesso di portatori minoritari proveniente dall'altra zona. Questi portatori risultano allora soggetti ad un campo elettrico che li spinge nella zona di provenienza. Finché questi portatori minoritari in eccesso non sono completamente defluiti, si mantiene una corrente inversa di valore pari a circa $-E_2/R$, trascurando la caduta di tensione ai capi del diodo. Quest'ultima è leggermente più bassa rispetto al caso di polarizzazione diretta per via della tensione sulla resistenza interna del diodo, tensione che ora è di segno contrario a prima.

Il tempo necessario al deflusso dei portatori minoritari prende il nome di *tempo di immagazzinamento* t_s (storage time). Al termine di questo intervallo la corrente diminuisce tendendo esponenzialmente a raggiungere il valore della corrente inversa di saturazione I_O mentre la tensione ai capi del diodo scende tendendo finalmente a $-E_2$. Questo secondo intervallo di tempo è dovuto al transitorio della capacità di transizione C_T , che si deve caricare alla tensione E_2 .

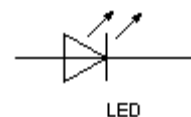
I costruttori forniscono il *tempo di recupero inverso* (t_{rr} : reverse recovery time), definito come l'intervallo fra l'istante in cui la corrente cambia verso e quello in cui la corrente raggiunge uno specificato valore prossimo a I_O . Per l'1N4148 $t_{rr} < 4$ ns.

Minore importanza, a causa del valore molto più basso, riveste il *tempo di recupero diretto* t_{fr} (forward recovery time), che è il tempo di commutazione dall'interdizione alla conduzione.

Altri tipi di diodi

Diodo LED. Quando una giunzione è polarizzata direttamente e quindi attraversata da corrente, emette energia luminosa. Mentre nel silicio questo fenomeno risulta trascurabile, esistono materiali semiconduttori, come l'arseniuro di gallio, in cui l'emissione è piuttosto rilevante.

I diodi che sfruttano questa particolarità prendono il nome di LED (*light-emitting diode, diodo ad emissione di luce*) e vengono usati come visualizzatori sia singolarmente sia in strutture complesse (display a 7 segmenti, a matrice, ecc.). In figura è illustrato il simbolo circuitale del LED.



Correnti comprese fra 5 e 20 mA sono sufficienti a produrre una buona luminosità. La tensione ai capi della giunzione è più elevata che nei diodi al silicio e, partendo da circa 1,7 – 1,8 V per certi LED rossi, cresce fino a 2 V e oltre per i LED gialli e verdi fino a sfiorare i 4 V per i LED blu e bianchi.

Sono molto diffusi anche i LED con emissione nello spettro dell'infrarosso; vengono usati specialmente per telecomandi (ad esempio negli apparecchi TV) e, insieme con i fotodiodi, negli accoppiatori ottici.

A titolo di esempio è riportata una tabella che riporta le caratteristiche principali dei diodi LED prodotti dalla casa costruttrice Vishay. Le caratteristiche elencate nella tabella sono:

λ_p	= lunghezza d'onda di picco, alla quale corrisponde la massima emissione	λ_d	= lunghezza d'onda dominante
$\Delta\lambda$	= larghezza di banda dello spettro	ϕ_v	= flusso luminoso
ϕ_e	= Potenza emessa per irradiazione	V_F	= tensione diretta del diodo
t_r	= tempo di salita	t_f	= tempo di discesa

Color	Technology	λ_p nm	λ_d nm	$\Delta\lambda$ nm	ϕ_v mlm	ϕ_e mW	V_F V	t_r ns	t_f ns	Efficiency* lm/W
Red	GaAlAs on GaAs	650	648	20	60	0.82	1.80	100	100	3.3
Red	GaAsP on GaP	635	620	38	30	0.20	2.00	300	150	1.5
Red	AlInGaP on GaAs	643	630	15	200	1.22	1.85	45	30	10.8
Red	AlInGaP on GaAs	620	618	20	400	1.5	1.85	45	30	21.6
Red	(OMA) AlInGaP on Si	622	615	18	600	2.5	2.8	45	30	28
Softorange	AlInGaP on GaAs	610	605	17	400	1.2	1.90	45	30	21.1
Softorange	GaAsP on GaP	610	605	36	25	0.06	2.00	300	150	1.3
Yellow	AlInGaP on GaAs	590	588	20	200	0.78	1.90	45	30	21.1
Yellow	GaAsP on GaP	585	590	38	30	0.05	2.00	300	150	1.5
Yellow Green	AlInGaP on GaAs	574	572	20	80	1.12	2.0	45	30	4
Green	GaP on GaP	565	570	38	35	0.05	2.00	450	200	1.8
Pure Green	GaP on GaP	555	560	22	12	0.02	2.00	450	200	0.6
Pure Green	AlInGaP on GaAs	561	562	20	30	0.05	2.00	45	30	1.5
True Green	InGaN on SiC	518	523	35	250	0.55	3.10	30	30	8.1
Blue Green	InGaN on SiC	503	505	30	200	0.79	3.20	30	30	6.3
Blue	InGaN on SiC	463	470	25	75	1.21	3.60	30	30	2.1
Blue	GaN on SiC	428	466	65	25	0.96	3.70	30	30	0.7
White	InGaN/TAG on SiC	5500 K x=0.33 / y=0.33		not defined	220	1.21	3.60	30	30	6.1

Table 1: Typical technology characteristics @ IF = 10 mA

*This table gives an overview comparison for all major Vishay technologies. Some LED datasheets might state minor differences.

Fotodiodo. Sfrutta lo stesso principio di funzionamento del LED ma in direzione opposta: quando è investito da radiazione luminosa aumenta la corrente inversa che lo attraversa. Di solito i fotodiodi sono sensibili solo a ben determinate lunghezze d'onda, che equivale a dire che “vedono” solo la luce di un certo “colore”.

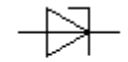
Diodo Schottky. Questo diodo, il cui simbolo è illustrato in figura, è indicato anche con la sigla SBD (*Schottky-barrier diode*) ed è costituito da una giunzione metallo-semiconduttore. Il metallo di solito è alluminio ed il semiconduttore silicio di tipo *n* drogato in modo leggero.

Il diodo Schottky presenta una caratteristica tensione-corrente abbastanza simile a quella del diodo a giunzione *p-n*, con alcune differenze. La tensione di soglia V_γ risulta più bassa (circa 0,35 V per la giunzione alluminio-silicio), mentre la corrente inversa di saturazione è più elevata. Inoltre il tempo di recupero inverso è circa di un ordine di grandezza più basso (50 ps) di quello dei più veloci diodi *p-n* il che consente velocità di commutazione decisamente più elevate. Non esiste infatti il tempo di immagazzinamento t_s . Ciò deriva dal fatto che in conduzione la corrente è costituita unicamente dagli elettroni che, attraverso la giunzione, passano dalla zona *n* al metallo, dove si mescolano con gli elettroni qui presenti in gran quantità, continuando quindi a rimanere portatori maggioritari. Quando la polarizzazione si inverte, non si verifica pertanto il fenomeno dell'eliminazione dei portatori minoritari in eccesso, per il semplice motivo che non se ne trovano né da una parte né dall'altra della giunzione.

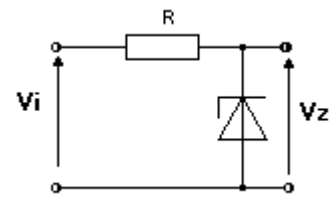


Diodo Zener o a scarica inversa. È un diodo realizzato in modo da poter lavorare senza danno nella zona di scarica (breakdown). Esso viene pertanto impiegato in polarizzazione inversa, con una resistenza in serie che serve a limitare la corrente. Il simbolo circuitale e lo schema di polarizzazione sono illustrati in figura.

Poiché la tensione V_Z , detta *tensione di Zener*, presente ai suoi capi rimane sostanzialmente costante e pari alla tensione di scarica della giunzione, il diodo Zener viene usato come stabilizzatore di tensione, ad esempio negli alimentatori. Esistono in commercio serie di diodi Zener con tensione V_Z da pochi volt a qualche decina di volt e oltre.



Diodo Zener



Varicap. È un diodo in cui si sfrutta la capacità della giunzione polarizzata inversamente. Questa capacità varia con la tensione inversa di polarizzazione, in particolare la capacità diminuisce con l'aumentare della tensione, e quindi il varicap si comporta in modo simile ad un condensatore variabile comandato in tensione. È usato prevalentemente nelle apparecchiature per le trasmissioni radio in particolare nel circuito di sintonia, dove permette di selezionare la stazione radio.

Il legame tra tensione e capacità non è lineare ma sagomato in modo che la frequenza di risonanza del circuito in cui il varicap è impiegato vari quasi linearmente con la tensione di polarizzazione.

Se si ricorda che la frequenza di risonanza è inversamente proporzionale alla radice quadrata della capacità

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{se} \quad C(V) \simeq \frac{k}{V^2} \quad \Rightarrow \quad f_r \equiv V$$

è evidente che per ottenere una relazione lineare tra frequenza di risonanza e tensione, la relazione tra capacità e tensione deve essere esponenziale con esponente circa uguale a -2.

CONDENSATORI

Il condensatore è strutturalmente costituito da due superfici conduttrici, le *armature*, fra le quali è interposto uno strato isolante, *dielettrico*. La grandezza che caratterizza i condensatori è la *capacità C*, espressa in Farad (F). Il valore della capacità dipende dalla forma e dalle dimensioni delle armature e dalla natura del dielettrico. Ad esempio per un condensatore con armature piane e parallele di superficie *S*, poste ad una distanza *d*, l'espressione della capacità è

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{S}{d}$$

dove ϵ_0 è la *costante dielettrica* del vuoto e vale $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m ed ϵ_r è la *costante dielettrica relativa*, caratteristica del materiale interposto fra le armature.

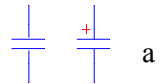
Valori della costante dielettrica relativa per alcuni materiali usati nei condensatori.

	Aria	Policarbonato	Polistirene	Poliestere	TiO ₂	BaTiO ₃	Carta	Mica
Costante dielettrica relativa	1	3	2,6	3,5	70 ÷ 200	1000 ÷ 10000	5	4 ÷ 7

Appare chiaro che un condensatore avente come dielettrico una piastrina di biossido di titanio (TiO₂) presenta un valore di capacità molte decine di volte superiore a quello dello stesso condensatore avente come dielettrico l'aria ($\epsilon_r = 1$).

In commercio sono disponibili condensatori di forme e dimensioni molto varie; si passa da valori di capacità di pF alle migliaia di μ F e addirittura ai farad.

In figura sono riportati i simboli grafici del condensatore generico e di quello polarizzato (elettrolitico). In entrambi i casi il rapporto tra la larghezza e la distanza tra le armature è di 2 a 0,4, l'elettrolitico si distingue per la presenza del segno "+".



A differenza del resistore, il condensatore è in grado di accumulare ed erogare energia.

Un condensatore di capacità *C*, sottoposto ad una tensione *V*, accumula sulle sue armature una quantità di carica $Q = CV$ proporzionale alla tensione *V* applicata.

Nel campo elettrico che si stabilisce fra le armature viene immagazzinata un'energia *E* pari a

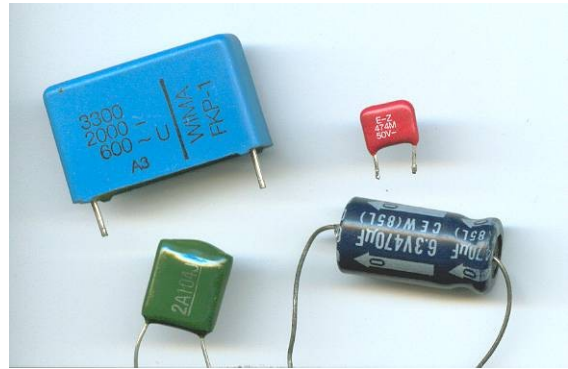
$$E = \frac{1}{2} V^2$$

Il transitorio di carica e scarica del condensatore viene largamente utilizzato nei circuiti di temporizzazione, quali i multivibratori, i generatori di forma d'onda, ecc.

La tensione sulle armature di un condensatore, essendo proporzionale alla quantità di carica *Q*, tende a seguire con una certa inerzia le variazioni anche brusche della corrente. Per questa proprietà *stabilizzatrice* il condensatore è un componente essenziale degli alimentatori.

In regime sinusoidale il condensatore presenta una reattanza data da:

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$



Come si vede il suo comportamento è fortemente dipendente dalla frequenza a cui è chiamato a lavorare. Il condensatore è quindi insostituibile nei filtri, nei circuiti risonanti, come elemento di bypass e di accoppiamento fra circuiti.

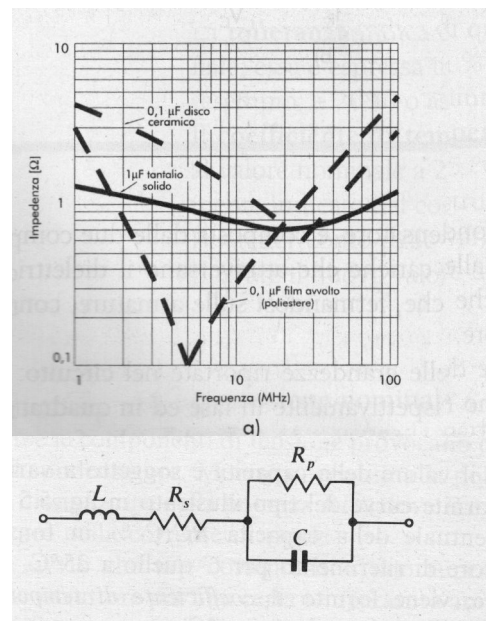
CIRCUITO ELETTRICO EQUIVALENTE di un CONDENSATORE REALE

Un condensatore reale può essere rappresentato con il modello elettrico di figura, dove

- C rappresenta la capacità del condensatore;
- R_p è la *resistenza di isolamento*, che tiene conto del fatto che il dielettrico è interessato da una debole corrente di perdita;
- R_s tiene conto della resistenza dei terminali, delle armature e dei contatti;
- L infine rappresenta l'induttanza distribuita dei terminali e del condensatore stesso.

Come si può dedurre dal modello equivalente, il condensatore presenta un comportamento capacitivo solo fino ad una certa frequenza, al di sopra della quale il comportamento diviene induttivo. Dai diagrammi dell'impedenza in funzione della frequenza rispettivamente per un condensatore ceramico e per uno elettrolitico si nota il diverso ordine di grandezza delle massime frequenze di lavoro.

I costruttori forniscono una serie di parametri elettrici che consentono di individuare correttamente il campo di utilizzazione del condensatore.



Parametri condensatori

Capacità nominale.

La gamma dei valori disponibili va dal pF (condensatori ceramici) alle decine di migliaia di μF (condensatori elettrolitici). Alcuni tipi di condensatori per applicazioni particolari raggiungono e superano 1 F. I valori sono indicati sul corpo del condensatore, in chiaro o più frequentemente in codice.

Tolleranza.

Può essere molto stretta (ad esempio $\pm 0,1\%$ in certi condensatori ceramici) o molto ampia ed anche asimmetrica (ad esempio $-10 / +50\%$ per alcuni tipi elettrolitici). Tuttavia, specie per i condensatori plastici, i valori più comuni sono $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$.

Tensione di lavoro.

È la massima tensione che può essere applicata in maniera continuativa al condensatore senza danneggiarlo. In genere il valore è ampiamente cautelativo. Le tensioni di lavoro più comuni sono 16, 25, 35, 50, 63, 80, 100, 160, 200, 250, 350, 400, 630 V.

Coefficiente di temperatura.

È la variazione percentuale della capacità $\Delta C/C\%$ in funzione della temperatura T . Si assume come valore di riferimento per C quello a $25\text{ }^\circ\text{C}$. Quando la variazione è lineare, viene fornito il *coefficiente di temperatura TC*, generalmente espresso in parti per milione al grado ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$).

Fattore di perdita.

Fornisce un'indicazione delle perdite di potenza che si verificano nella componente resistiva del condensatore.

Per *fattore di perdita* si intende il rapporto tra la parte resistiva e quella reattiva dell'impedenza.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{X_C}$$

È ovvio che dipende dalla frequenza e quindi il fattore di perdita è fornito insieme alla frequenza a cui è determinato.

Per i condensatori elettrolitici vengono forniti altri due parametri importanti.

Corrente di fuga.

È la corrente di perdita (*leakage current*) che scorre nel dielettrico quando alle armature è applicata una specificata tensione continua. Si preferisce fornire questo parametro anziché l'equivalente resistenza di perdita R_p poiché le correnti sono fortemente influenzate dalla tensione e dalla temperatura.

Corrente di ripple.

I condensatori elettrolitici vengono tipicamente usati come elementi di filtro negli alimentatori. In questo tipo di applicazione le armature sono interessate da una tensione continua V_{dc} , alla quale si sovrappone una tensione alternata di ripple V_r a 100 Hz, di ampiezza inferiore alla precedente.

Entrambe le componenti di tensione provocano dissipazione di potenza sugli elementi resistivi del condensatore. Mentre in continua la potenza dissipata vale $V_{dc}I_{fuga}$, il ripple produce la dissipazione della potenza RI_r^2 , dove R è la resistenza equivalente serie e I_r è il valore efficace della corrente di ripple.

Appare ovvio che tale corrente non può superare un valore massimo specificato, fornito dal costruttore per una certa temperatura ambiente, se non si vuole che la potenza dissipata e di conseguenza la temperatura del condensatore divengano eccessive.

Tipi di condensatori

Condensatori a film plastico

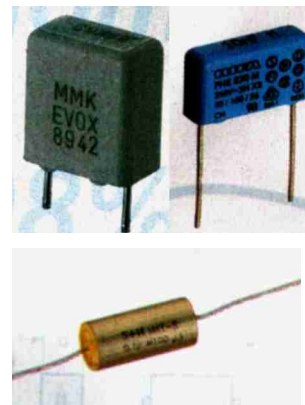
Sono i condensatori più diffusi per applicazioni generali. Il dielettrico, costituito da un sottile film di materiale plastico (policarbonato, poliestere, polistirene, polipropilene, ecc.), pur non presentando una costante dielettrica relativa molto elevata, può essere ridotto in strisce lunghe e sottili, sicché si possono ottenere valori di capacità anche elevati (da 1 nF a 10 - 100 μ F).

Questi condensatori sono di tipo *avvolto*, ovvero sono costituiti da due nastri di materiale plastico (dielettrico) alternati a due nastri di materiale conduttore (armature) arrotolati per dare una forma cilindrica con un ingombro molto ridotto rispetto ai nastri di cui sono costituiti.

Per ridurre l'effetto dell'induttanza parassita, si adotta il cosiddetto avvolgimento anti-induttivo. Le due armature sporgono l'una da un lato, l'altra dall'altro rispetto ai nastri isolanti. I due terminali del condensatore possono così venire direttamente saldati ai bordi delle armature e la corrente non è costretta a seguire percorsi a spirale per raggiungere tutta la superficie delle armature.

Le armature dei condensatori a film plastico possono essere realizzate in due modi: con una striscia tagliata direttamente da un foglio molto sottile di alluminio oppure per metallizzazione (vedi oltre).

L'insieme di armature e dielettrico avvolti assume una forma cilindrica o vagamente ellittica e viene poi incapsulata in un contenitore plastico isolante di forma cilindrica o di parallelepipedo.



I condensatori a film plastico sono di impiego generale, sono affetti da basse perdite e presentano buona stabilità con la frequenza e la temperatura.

Metallizzazione e Autocicatizzazione

La metallizzazione consiste nel depositare sul dielettrico del vapore di alluminio che si solidifica e forma uno strato molto sottile.

Le armature metallizzate hanno uno spessore molto minore di quelle realizzate con un foglio di alluminio e quindi il primo vantaggio è la riduzione dell'ingombro del condensatore.

Il secondo importante vantaggio è evidente nel caso di scarica tra le armature. La scarica in un condensatore è sempre localizzata in un punto, qui si concentra una corrente elevata con una differenza di potenziale alta tra le armature e quindi una elevata potenza dissipata. Ciò causa un forte riscaldamento e la vaporizzazione del sottile strato di alluminio tutto intorno al punto in cui è avvenuta la scarica. In questo modo la zona rovinata dalla scarica non ha più l'armatura e quindi è "esclusa" dal condensatore che riprende a funzionare normalmente.

Condensatori ceramici

In questi condensatori il dielettrico è costituito da materiale ceramico (TiO_2 , MgTiO_3 , BaTiO_3 , ecc.). Strutturalmente possono essere del tipo a disco, piastrina (*plate*) o multistrato (*multilayer*).

I primi due tipi sono ottenuti depositando sulle facce di un disco o di una piastrina sottile di materiale ceramico le due metallizzazioni di armatura alle quali vengono saldati i reofori.

La struttura dei condensatori multistrato è costituita dalla sovrapposizione di strati conduttori (armature) e strati ceramici (dielettrico), che aumenta l'area delle superfici affacciate delle armature. Si riescono così ad ottenere valori di capacità molto più elevati dei tipi precedenti.

Da un punto di vista elettrico i condensatori ceramici possono appartenere alla classe I o alla classe II.



Classe I (a bassa costante dielettrica). Con questi condensatori, la cui ϵ_r è relativamente bassa ($6 \div 250$), si ottengono valori di capacità da pochi pF a 10 nF (multistrato).

Presentano buone proprietà elettriche, basse perdite, buona risposta in frequenza e buona stabilità in temperatura, caratteristica quest'ultima per cui sono particolarmente impiegati. Il coefficiente di temperatura α_T è controllato ed è indicato mediante le sigle riportate in tabella.

Coefficienti di temperatura per i condensatori ceramici della classe I e relativo codice colori.

P100	NPO	N33	N75	N150	N220	N330	N470	N750	N1500
Rosso Violetto	Nero	Marrone	Rosso	Arancio	Giallo	Verde	Blu	Violetto	Arancio Arancio

Esempio:

P100 indica che il coefficiente di temperatura TC è positivo e vale $+100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

N220 significa che TC è negativo e vale $-220 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

NP0 indica che $TC = 0$.

Questi condensatori vengono utilizzati in applicazioni in cui sono esigenze primarie la precisione e la stabilità: circuiti risonanti, oscillatori, filtri, specialmente in alta frequenza (VHF e UHF).

Classe II (ad alta costante dielettrica). Per questi condensatori la costante dielettrica è compresa fra 250 e 10.000 e più. I valori capacitivi disponibili sono più elevati che nel caso precedente; si arriva fino al μF . Sono componenti di basso prezzo e bassa qualità, poco stabili e poco precisi. Presentano buona risposta alle alte frequenze, ragion per cui vengono usati come condensatori di bypass e di accoppiamento fra stadi in circuiti radio TV e per eliminare i picchi spuri (*spike*) dalle tensioni di alimentazione.

Condensatori a mica.

Condensatori a mica. Sono realizzati come i condensatori ceramici ma presentano come dielettrico uno strato sottile di mica. Sono caratterizzati da un'elevata tensione di rottura (perforazione del dielettrico) e da un'ottima risposta alle alte frequenze; per questo motivo vengono usati fino alle frequenze VHF e UHF.

Condensatori elettrolitici.

I condensatori elettrolitici hanno le armature polarizzate, ossia si distinguono un anodo (+) ed un catodo (-) che non devono essere scambiati fra di loro.

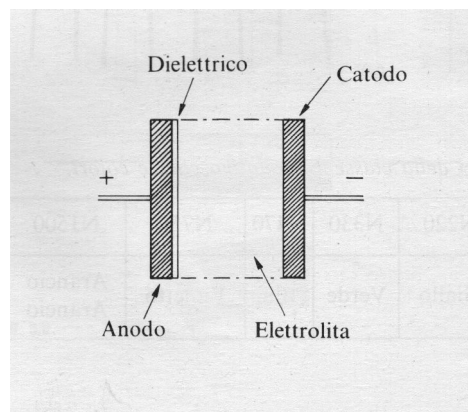
A stretto contatto dell'anodo viene formato un sottilissimo strato di ossido isolante, che funge da dielettrico. Fra questo e l'altra armatura è interposta la massa dell'elettrolita.

Durante il normale funzionamento il potenziale dell'anodo è più elevato di quello del catodo; l'elettrolita è sede di una debole corrente di fuga, costituita da ioni. Gli ioni negativi vengono attratti dall'anodo ed essendo di natura ossidante, provvedono a rigenerare lo strato di ossido là dove si è deteriorato. Gli ioni positivi a loro volta vengono attratti dal catodo e, in corrispondenza di questo, danno origine a piccolissime quantità di idrogeno.

Nel caso in cui la polarità della tensione sulle armature fosse invertita, si verrebbe a distruggere lo strato di ossido isolante sull'anodo e la corrente ionica verrebbe ad assumere valori elevati. La produzione di gas in questo caso potrebbe arrivare a provocare l'esplosione dell'involucro del condensatore.

L'elettrolita può essere di tipo «non solido» oppure «solido». Nel primo caso si tratta di una pasta gelatinosa (dietilene-glicol o dimetilacetammide), con la quale vengono impregnati nastri di carta, successivamente avvolti con i fogli metallici costituenti le armature. Come elettrolita solido viene vece usato il biossido di manganese.

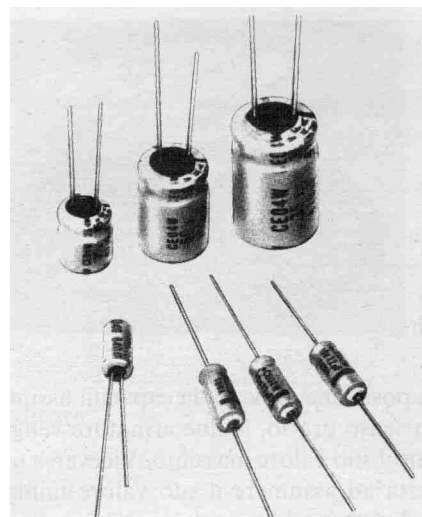
Esistono in commercio condensatori elettrolitici non polarizzati che possono quindi essere usati in regime alternato, anche se con tensioni di lavoro più basse rispetto ai precedenti. In essi lo strato d'ossido è presente su entrambe le armature e il suo spessore cresce o diminuisce a seconda della polarità applicata ai terminali del condensatore.



Condensatori elettrolitici in alluminio.

In questi condensatori le armature sono costituite da due fogli di alluminio. L'armatura di anodo viene resa fortemente rugosa mediante attacco chimico in modo da aumentare la superficie attiva; su di essa viene formato lo strato di ossido di alluminio isolante.

La superficie molto estesa, lo strato di ossido molto sottile, la costante dielettrica non bassa ($\epsilon_r = 8$) consentono di ottenere valori di capacità per unità di volume molto elevati. La formazione iniziale dell'ossido viene ottenuta sottoponendo il condensatore ad una tensione di formazione superiore di almeno 1,2 volte a quella di lavoro.

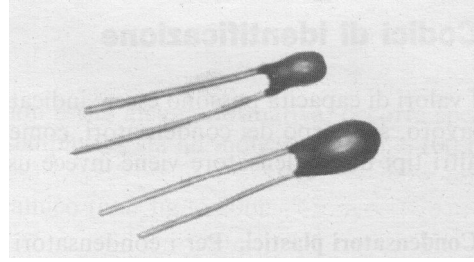


I condensatori in alluminio ad elettrolita non solido presentano la tipica forma cilindrica, con i terminali fuoriuscenti dalle due basi (struttura assiale) o da una base solamente (struttura verticale

Condensatori elettrolitici al tantalio.

Le armature di questi condensatori sono costituite da tantalio, che presenta un ossido con caratteristiche dielettriche ancora migliori dell'ossido di alluminio. Generalmente questi condensatori sono ad elettrolita solido e presentano la classica forma a goccia.

L'anodo, realizzato in tantalio sinterizzato, presenta una struttura fortemente porosa, che viene completamente impregnata di elettrolita (biossido di manganese). Si ottiene così una superficie attiva molto estesa e la capacità per unità di volume può raggiungere valori elevatissimi.



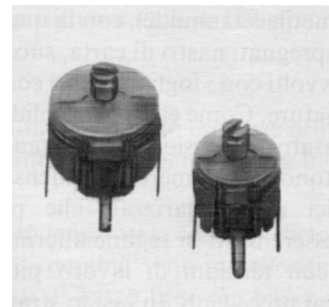
Condensatori variabili

Con questi condensatori è possibile ottenere valori di capacità variabili fra un minimo ed un massimo modificando la posizione reciproca delle armature e di conseguenza l'area delle superfici affacciate.

La posizione dell'armatura mobile (*rotore*) può essere variata rispetto all'armatura fissa (*statore*) mediante la rotazione di un albero. Quando le due armature vengono a sovrapporsi completamente la capacità assume il suo valore massimo.

Il dielettrico è generalmente l'aria ma può essere anche la mica o materiale ceramico plastico. I valori massimi di capacità sono di solito abbastanza bassi (un centinaio di pF)

Quelli di piccole dimensioni sono detti *compensatori* o *trimmer capacitivi*.



Codici di identificazione

I valori di capacità possono essere indicati in chiaro, insieme con i valori della tensione di lavoro, sul corpo dei condensatori, come avviene di solito per quelli elettrolitici. Per gli altri tipi di condensatore viene invece usata una gran varietà di codici.

Per i condensatori plastici un tempo era molto diffuso, ora molto meno, un codice a 5 bande colorate; le prime tre bande rappresentano le due cifre significative ed il fattore moltiplicativo secondo la stessa corrispondenza valida per i resistori.

La quarta fascia indica la tolleranza: nero = +20%, bianco = + 10%, verde = $\pm 5\%$. La quinta fascia fornisce la tensione di lavoro: marrone = 100 V, rosso =250 V, giallo =400V, blu =630V

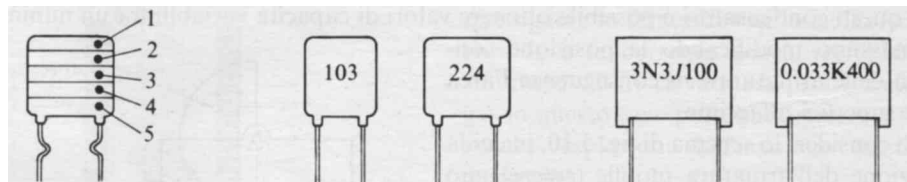
Attualmente è molto più comune un codice a tre cifre di cui le prime due indicano le cifre significative della capacità e la terza il fattore moltiplicativo ovvero il numero degli zeri da aggiungere. L'unità di misura è il pF.

Esempio

I codici 224 e 103 significano rispettivamente

$$224 = 22 \times 10^4 = 220.000 \text{ pF} = 220 \text{ nF}$$

$$103 = 10 \times 10^3 = 10.000 \text{ pF} = 10 \text{ nF}$$



Per i condensatori plastici a contenitore rettangolare è in uso un codice alfanumerico in cui la posizione della virgola decimale è indicata dalla lettera N, che precisa anche l'unità di misura (nF). Se la N è omessa, significa che l'unità è il μF .

Una seconda lettera indica la tolleranza: J = $\pm 5\%$, K = + 10%, M = +20%.

Esempio

I codici 3N3J100 e 0.033K400 stanno ad indicare

$$3N3J100 = 3,3 \text{ nF} + 5\% 100\text{V}$$

$$0.033K400 = 33 \text{ nF} + 10\% 400\text{V}$$

Condensatori ceramici. Per i condensatori ceramici a piastrina è diffuso un codice alfanumerico in cui la lettera indica l'unità di misura e la posizione della virgola decimale. Nei condensatori a coefficiente di temperatura controllato una banda colorata alla sommità del condensatore sta ad indicare il valore del coefficiente di temperatura *TC*.

Esempio

I codici n12 con fascia arancio, 3p3, 150n significano

$$n12 = 0,12 \text{ nF con } TC = -150 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$

$$3p3 = 3,3 \text{ pF}$$

150 n = 150 nF

Nei condensatori a disco della classe II non esiste alcuna normativa; occorre spesso affidarsi all'esperienza e al buon senso. Ad esempio 0.1 sta ad indicare $0,1 \mu\text{F} = 100 \text{ nF}$, 0.01 invece $0,01 \mu\text{F} = 10 \text{ nF}$. Oppure 22 K sta per 22 pF e K per ceramico.

FENOMENI TRANSITORI NEI CIRCUITI RC.

Transitorio di carica.

Si analizzi cosa succede nel circuito di fig. 1 quando si chiude l'interruttore T, supposta V una tensione costante e il condensatore inizialmente scarico (fenomeno del di transitorio di carica).

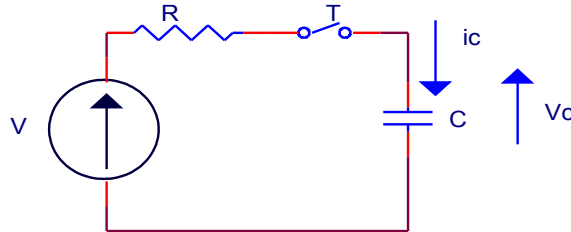


Fig. 1: Circuito per lo studio del transitorio di carica di un condensatore.

Formule di analisi:

- $I_c = C \cdot \Delta V / \Delta t$
- $V = V_R + V_C$
- $V_R = R \cdot I_c$
- $V = 0$ perché $V = \text{costante}$

Condizioni limiti di funzionamento:

iniziali con T aperto (off)	con T on , subito dopo la chiusura	finali con T chiuso (on)
$V_c = 0$	$V_c = 0$	$V_c = V$
$I_c = 0$	$I_c = V/R$	$I_c = 0$
$V_R = 0$	$V_R = V$	$V_R = 0$

Tra il regime permanente iniziale ($V_c = 0$) e quello finale ($V_c = V$) esiste un tempo di transitorio durante il quale il condensatore si carica gradualmente. In fig. 2 sono riportati gli andamenti temporali della tensione V_c e della corrente I_c nel condensatore durante il suo transitorio di carica.

tab.1: carica di un condensatore

t/τ	V_c [V]	I_c [mA]	V_R [V]	V_c/V [%]
0	0,00	1,20	12,00	0,00
0,1	1,14	1,09	10,86	9,52
0,2	2,18	0,98	9,82	18,13
0,5	4,72	0,73	7,28	39,35
1	7,59	0,44	4,41	63,21
2	10,38	0,16	1,62	86,47
3	11,40	0,06	0,60	95,02
4	11,78	0,02	0,22	98,17
5	11,92	0,01	0,08	99,33
6	11,97	0,00	0,03	99,75
7	11,99	0,00	0,01	99,91
8	12,00	0,00	0,00	99,97
9	12,00	0,00	0,00	99,99

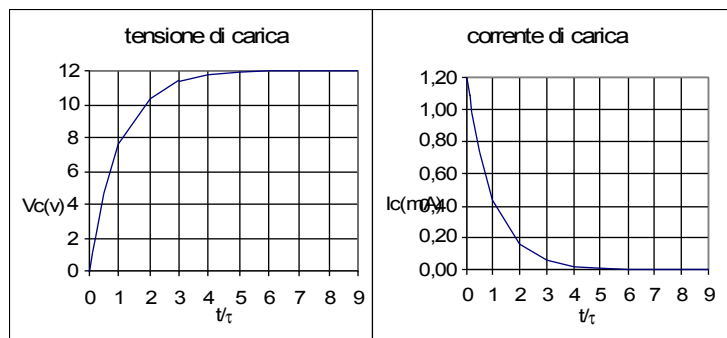


fig. 2 transitorio di carica

Come si vede, la tensione ai capi del condensatore cresce gradualmente, da un valore iniziale nullo e tende a raggiungere il valore a regime in un tempo che, teoricamente infinito, in pratica è pari a 5τ . Con τ si intende la costante di tempo del circuito pari a (vedi nota 1):

$$\tau = R \cdot C \quad (\text{s})$$

Da quanto detto si deduce che il tempo di carica di un condensatore è direttamente proporzionale alla costante di tempo.

Completando l'analisi della figura si vede che la corrente passa da un valore iniziale massimo ($I_c(0)=V/R$, inizialmente C è scarico e presenta una reattanza nulla, cioè è un corto circuito) ad un valore finale nullo (C si comporta da circuito aperto) (vedi nota 2).

Transitorio di scarica.

Si analizzi cosa succede nel circuito di fig.3 quando si chiude l'interruttore T e supposto il condensatore inizialmente carico (fenomeno di transitorio di scarica).

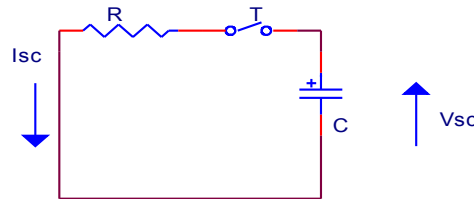


Fig.3: Circuito per lo studio del transitorio di scarica di un condensatore.

Condizioni limiti di funzionamento:

iniziali con T aperto (off)	con T on , subito dopo la chiusura	finali con T chiuso (on)
$V_c=V$	$V_c=V$	$V_c=0$
$I_c=0$	$I_c=-V/R$	$I_c=0$
$V_R=0$	$V_R=-V$	$V_R=0$

Il transitorio è descritto dai grafici di fig.4 , in cui sono riportati gli andamenti temporali della tensione V_c e della corrente I_c nel condensatore. Durante la scarica il condensatore si scarica gradualmente, la tensione V_c decresce dal valore massimo V fino 0 e così pure la corrente; ma quest'ultima è negativa perché presenta un verso contrario rispetto a quello di carica. Anche in questo caso la scarica si può ritenere completa dopo un tempo pari a 5τ .

tab.2: scarica di un condensatore

t/τ	V_c [V]	I_c [mA]	V_R [V]	V_c/V [%]
0	12,00	-1,20	-12,00	100,00
0,1	10,86	-1,09	-10,86	90,48
0,2	9,82	-0,98	-9,82	81,87
0,5	7,28	-0,73	-7,28	60,65
1	4,41	-0,44	-4,41	36,79
2	1,62	-0,16	-1,62	13,53
3	0,60	-0,06	-0,60	4,98
4	0,22	-0,02	-0,22	1,83
5	0,08	-0,01	-0,08	0,67
6	0,03	0,00	-0,03	0,25
7	0,01	0,00	-0,01	0,09
8	0,00	0,00	0,00	0,03
9	0,00	0,00	0,00	0,01

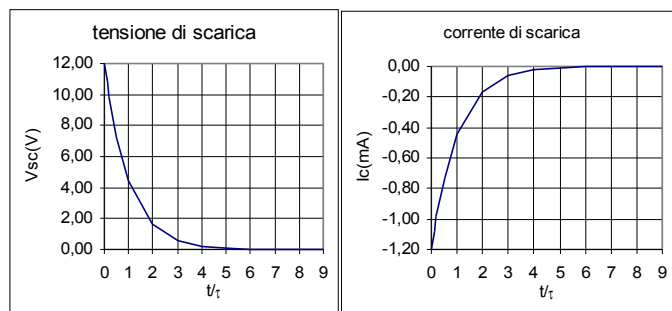
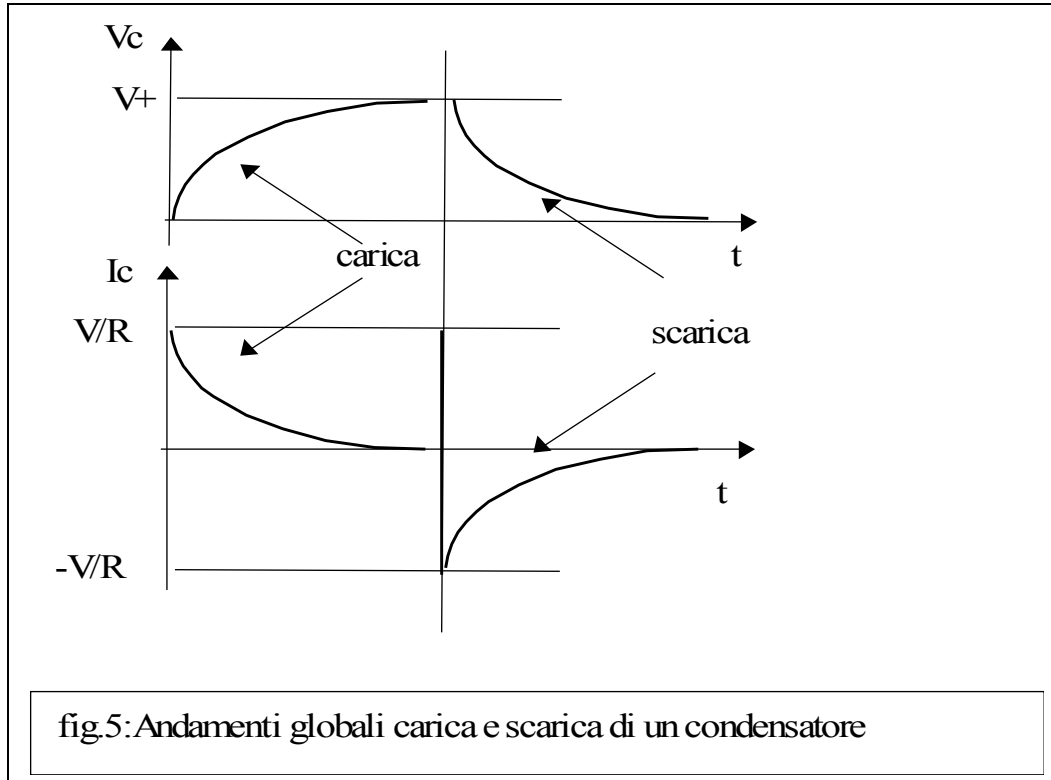


fig. 4 transitorio di scarica di un condensatore



NOTA 1 (sulla costante di tempo)

- **Prontezza di risposta di un sistema.**
Intervallo di tempo tra l'istante di applicazione ad un sistema di una causa e quello in cui si nota l'effetto.
- **Definizione costante di tempo τ :**
la costante di tempo caratterizza il comportamento in transitorio di un sistema fisico, ovvero è un indice della prontezza di risposta dello stesso sistema. Si misura in secondi.
- **Valore della costante di tempo nel circuito RC in esame:**
$$\tau = R \cdot C \quad (\text{s})$$
- **Significato tecnico-pratico della costante di tempo dal punto di vista sistemico:**
è il tempo necessario perché la risposta del sistema (nel nostro caso la carica del condensatore) raggiunga il 67% del valore finale.
- **Significato geometrico:**
è la proiezione sull'asse t dell'intercetta della tangente alla curva nell'istante iniziale con il valore costante.

NOTA 2 (sul comportamento di un condensatore in presenza di un gradino di tensione).

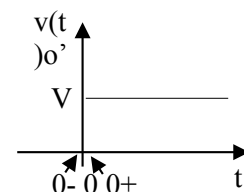
Reattanza del condensatore: $X_c = 1/\omega C$

Gradino di tensione (vedi grafico a lato):

Per $t < 0^- \rightarrow v(t) = 0 \rightarrow f = 0\text{Hz} \rightarrow X_c = \infty \rightarrow C$ è un aperto

Per $t > 0^+ \rightarrow v(t) = V \rightarrow f = 0\text{Hz} \rightarrow X_c = \infty \rightarrow C$ è un aperto

Per $t = 0 \rightarrow v(t)$ istantaneamente passa da 0 a V $\rightarrow f$ molto alta $\rightarrow X_c = 0 \rightarrow C$ è un corto



NOTA 3 : Equazioni analitiche carica e scarica di un condensatore.**Carica:**

- $V_C = V \cdot (1 - e^{-t/\tau})$
- $I_C = V/R \cdot e^{-t/\tau}$
- $V_R = V \cdot e^{-t/\tau}$

Scarica:

- $V_C = V \cdot e^{-t/\tau}$
- $I_C = -V/R \cdot e^{-t/\tau}$
- $V_R = -V \cdot e^{-t/\tau}$

NOTA 4: Equazioni analitiche funzioni esponenziali.

L'equazione generica di una funzione esponenziale è:

- (1) $y(t) = A + B \cdot e^{-t/\tau}$

I valori di A e B si calcolano ponendo nella (1) il valore di $t \rightarrow 0$ e $t \rightarrow \infty$

$$\text{per } t \rightarrow 0 \quad y(0) = A + B$$

$$\text{per } t \rightarrow \infty \quad y(\infty) = A$$

Da cui:

- (2) $A = y(\infty) = Y_{\text{fin}}$
- (3) $B = y(0) - A = y(0) - y(\infty) = Y_{\text{ini}} - Y_{\text{fin}}$

Cioè A rappresenta il valore finale Y_{fin} ; mentre B rappresenta la differenza tra valore iniziale e quello finale $Y_{\text{ini}} - Y_{\text{fin}}$.

Sostituendo la (2) e la (3) nella (1) si ottiene la seguente formula generale di una funzione esponenziale:

- (4) $y(t) = Y_{\text{fin}} + (Y_{\text{ini}} - Y_{\text{fin}}) \cdot e^{-t/\tau}$

Metodo di utilizzo della (4) applicata alla carica e scarica di un circuito RC:

si ricavano le condizioni iniziali e finali dal circuito in esame, cioè i valori di $V(0) = V_{\text{ini}}$; $I(0) = I_{\text{ini}}$;

$V(\infty) = V_{\text{fin}}$; $I(\infty) = I_{\text{fin}}$ e tenendo conto del comportamento di un condensatore riportato nella nota 2.

INDUTTORI

Gli induttori sono componenti elettronici che non si trovano disponibili sul mercato con la stessa facilità e nello stesso assortimento dei resistori e dei condensatori, d'altra parte sono abbastanza facili da costruire e può facilmente capitare di doverne costruire qualcuno. A differenza dei condensatori, per i quali è possibile ottenere fattori di merito (inverso di tangente di delta) molto elevati, negli induttori il fattore di merito non arriva mai oltre il valore di circa 500. Ciò è dovuto alla presenza del conduttore costituente l'avvolgimento che ha una resistenza che cresce con l'aumentare della frequenza (effetto pelle ed effetto di prossimità). Inoltre l'eventuale presenza di un nucleo ferromagnetico, che ha lo scopo di aumentare il flusso concatenato con l'avvolgimento, causa perdite per correnti parassite e per isteresi. Di solito le perdite per correnti parassite sono trascurabili nei nuclei in polvere di ferro in ferroceramiche.

Il nucleo di materiale ferromagnetico aumenta notevolmente il flusso concatenato con le spire, e quindi l'induttanza a parità di dimensioni dell'avvolgimento, perciò è utilizzato soprattutto per valori di induttanza "alti" o quando l'ingombro è importante. Gli induttori senza nucleo ferromagnetico sono anche detti induttori in aria.

INDUTTORI IN ARIA NON DI POTENZA

Si considerano induttori non di potenza quelli attraversati da correnti inferiori all'ampere. Di solito hanno induttanza nominale non superiore al centinaio di microhenry, altrimenti non si ottengono fattori di merito elevati.

Gli induttori in aria possono essere di tipi molto diversi nella forma e nel modo con cui è realizzato l'avvolgimento. In passato, in campo radiotecnico, si usavano induttori a nido d'ape, a fondo di panier ecc. Oggi il tipo di induttore più usato è quello costituito da un avvolgimento ad un solo strato su di un supporto

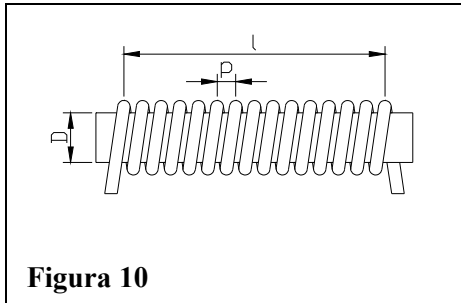


Figura 10

isolante che può essere di ceramica, teflon, ecc. Il supporto isolante gioca un ruolo molto importante nella stabilità del valore di induttanza al variare della temperatura. Per ridurre l'effetto di prossimità è consigliabile che l'avvolgimento sia a spire spaziate con uno spazio vuoto circa eguale ad un diametro del conduttore (valori compresi fra 0,8 e 2 volte il diametro), cioè con un passo p pari a circa il doppio del diametro. Se, viceversa, si avvolgono le spire una vicina all'altra si aumentano le capacità parassite che nel circuito equivalente vanno in parallelo all'induttanza, si abbassa così la frequenza di risonanza e quindi si riduce la gamma di

frequenza utile per l'induttore.

La Fig. 1 indica questo tipo di induttore. Per realizzare induttori ad alto fattore di merito conviene scegliere una forma così detta "quadrata", cioè con una lunghezza di avvolgimento circa eguale al diametro del supporto.

Vi sono molte relazioni che forniscono il valore di induttanza per induttori in aria in funzione del numero delle spire e delle dimensioni del supporto. Una formula che dà risultati abbastanza precisi è la seguente:

$$L \approx 1,95 \cdot 10^{-2} \frac{D^2 \cdot N^2}{9 \cdot D + 20 \cdot l} \quad \begin{array}{l} L = \text{induttanza in } \mu\text{H} \\ D = \text{diametro del supporto in mm} \\ l = \text{lunghezza dell'avvolgimento in mm} \\ N = \text{numero delle spire} \end{array} \quad \text{Formula 1}$$

Elaborando la formula 1 si può ricavare, ad esempio, il numero di spire dagli altri parametri:

$$N \approx \frac{7,16}{D} \sqrt{L(9 \cdot D + 20 \cdot L)} \quad \text{Formula 2}$$

È evidente che, in quest'ultima formula, è necessario impostare dei valori per il diametro D , la lunghezza l del supporto e per l'induttanza L .

Seguono alcuni esempi di calcolo.

Esempio n° 1 - Calcolare il valore dell'induttanza di una bobina costituita da 40 spire di filo del diametro di 1 mm, spaziate di 1 mm (cioè con passo $p = 2$ mm), avvolte su di un corpo cilindrico del diametro di 1 cm.

Abbiamo: $D = 10$ mm; $l = (40 + 40) = 80$ mm; usando la formula 1 si ha

$$L \simeq 0,0195 \frac{10^2 \cdot 40^2}{9 \cdot 10 + 20 \cdot 80} = \frac{3120}{1690} = 1,85 \mu H$$

Esempio n° 2 - Si ha a disposizione un supporto del diametro di 1,5 cm con una lunghezza disponibile per l'avvolgimento di 2,8 cm e del filo di diametro di 14/10 di mm. Le spire sono avvolte con spaziatura uguale al diametro ($p = 2,8$ mm). Qual è la massima induttanza ottenibile?

Il numero massimo di spire avvolgibili nello spazio a disposizione è dato da:

$$2,8 N = 28 \Rightarrow N = 10$$

Dalle dimensioni del supporto abbiamo: $D = 15$ mm; $l = 28$ mm. Usando la formula 1

$$L \simeq 19,5 \cdot 10^{-3} \frac{15^2 \cdot 10^2}{9 \cdot 15 + 20 \cdot 28} \simeq \frac{438}{695} \simeq 0,63 \mu H$$

Esempio n° 3 - Si debba realizzare un'induttanza di 100 μH su un supporto cilindrico del diametro di 3 cm e lungo 7 cm lasciando uno spazio libero per il fissaggio di 0,5 cm per lato sul supporto. Si calcoli il numero delle spire ed il diametro del conduttore.

Tenendo conto dello spazio lasciato per il fissaggio, la lunghezza dell'avvolgimento sarà di 6 cm. Abbiamo:

$$D = 30 \text{ mm} \quad l = 60 \text{ mm}$$

Usando la formula 2 possiamo calcolare il numero di spire:

$$N \simeq \frac{7,16}{30} \sqrt{100 (9 \cdot 30 + 20 \cdot 60)} \simeq 91,4 \simeq 92$$

Supponendo di realizzare l'avvolgimento con un conduttore di diametro d e a spire serrate (che si toccano e quindi $p = d$), abbiamo:

$$92 d = 60 \quad \text{da cui} \quad d = \frac{60}{92} \simeq 0,65 \text{ mm}$$

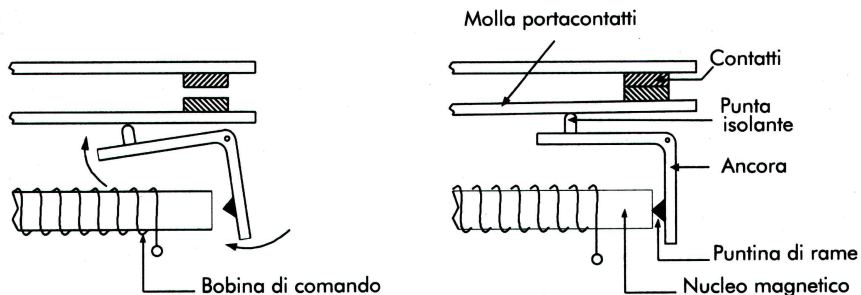
Poiché le spire sono serrate si deve utilizzare un conduttore ricoperto di vernice isolante per evitare cortocircuiti tra spira e spira. Volendo usare conduttore in rame si può utilizzare del filo di diametro 0,56 mm (del rame) che ha però un diametro esterno (a causa dello spessore di vernice) di 0,63 mm.

RELÈ

I relè (*relay*), o più precisamente i relè elettromagnetici, sono commutatori azionati dalla forza elettromagnetica prodotta da una bobina percorsa da corrente.

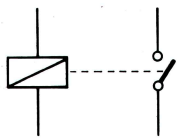
La struttura schematica del relè tradizionale è quella illustrata in figura.

Il circuito magnetico è costituito da un *nucleo* in acciaio dolce su cui è avvolta la *bobina di eccitazione*, da un'*armatura* di sostegno e da un'*ancora* che può compiere piccole rotazioni intorno ad un fulcro.



All'armatura sono fissate due lamine elastiche, le molle, che supportano i *contatti elettrici*.

Questi componenti garantiscono una separazione galvanica netta tra il circuito di cui fanno parte i commutatori, che di solito è di potenza, ed il circuito di eccitazione della bobina, normalmente di bassa potenza.



Negli schemi elettrici è facile trovare il simbolo riportato in figura, in cui la linea tratteggiata che unisce la bobina all'interruttore sta ad indicare la forza elettromagnetica agente sul contatto.

Le configurazioni base degli elementi di commutazione o *contatti* sono essenzialmente tre:

- contatto *normalmente aperto* (NA o NO, *Normally Open*), detto anche *contatto di lavoro*. L'eccitazione della bobina provoca la chiusura del contatto, che torna aperto non appena la bobina viene disattivata.
- contatto *normalmente chiuso* (NC, *Normally Closed*) o *contatto di riposo*.
- contatto di *scambio* {SPDT: *Single Pole Double Throw*), tipico del deviatore, comporta la chiusura del contatto normalmente aperto e l'apertura di quello normalmente chiuso quando la bobina viene eccitata..

A riposo l'ancora è mantenuta elasticamente nella posizione più distante dal nucleo. Quando la bobina viene eccitata, genera una forza elettromagnetica che attira l'ancora contro il nucleo. La rotazione di quest'ultima provoca la flessione della molla inferiore e conseguentemente la chiusura del contatto.

Allorché la bobina viene diseccitata, l'ancora torna nella posizione di riposo e il contatto si riapre. Una piastrina distanziatrice di materiale non ferromagnetico (ad esempio rame), connessa all'ancora, fa sì che fra quest'ultima ed il nucleo in fase di attrazione continui a sussistere un certo traferro, dello spessore di qualche decimo di mm. Questo traferro impedisce che, quando la bobina viene diseccitata, l'ancora continui a rimanere attaccata al nucleo per effetto del magnetismo residuo.

Spesso nei relè sono presenti più molle e quindi il movimento dell'ancora provoca l'attivazione di più contatti.

Le molle, che devono presentare bassa resistenza elettrica ed una buona elasticità, sono realizzate in bronzo fosforoso o in lega rame-berillio o in lega rame-zinco-nichel.

I contatti devono anch'essi presentare bassa resistenza elettrica ed impedire il formarsi di ossidi isolanti; devono inoltre essere resistenti all'usura meccanica e a quella provocata dall'arco elettrico. Vengono usati a questo scopo materiali nobili: oro, argento, platino, palladio, in lega fra di loro o con nichel, rame, tungsteno.

Caratteristiche del relè

Il relè è un componente piuttosto complesso ed è quindi caratterizzato da un certo numero di parametri, che riguardano, oltre alle dimensioni di ingombro e al tempo di vita, la bobina ed i contatti.

Parametri della bobina

Tensione nominale di alimentazione. La tensione di alimentazione può essere continua ma anche alternata. I valori più comuni sono 3, 5, 6, 12, 24, 48 V continui.

Tensione di attrazione (o di eccitazione) e **tensione di rilascio** (o di caduta). Rappresentano rispettivamente la minima tensione che provoca l'attrazione dell'ancora e la massima tensione che ne consente il rilascio. La seconda è inferiore alla prima perché una volta che l'ancora è attratta, e quindi il traferro è minimo, sono sufficienti una corrente e quindi una tensione più basse per mantenere l'attrazione.

Resistenza di avvolgimento e corrente nominale. Vengono normalmente forniti sia il valore della resistenza degli avvolgimenti sia il valore della corrente che percorre la bobina alimentata con la tensione nominale.

Parametri dei contatti

Corrente commutabile massima: dipende dalla dimensione dei contatti.

Tensione commutabile massima: massima tensione sopportabile dai contatti aperti; dipende dalla distanza.

Resistenza iniziale dei contatti: è la resistenza presentata dai contatti chiusi quando non sono ancora usurati.

Resistenza di isolamento: è la resistenza tra i contatti aperti; il suo valore è molto elevato, superiore al migliaio di $M\Omega$.

Tempo di attrazione: intervallo di tempo che intercorre fra l'istante in cui viene applicato l'impulso di eccitazione e l'istante in cui si verifica il primo contatto. A questo contatto seguirà, come in tutti gli interruttori, una serie inevitabile di rimbalzi. L'ordine di grandezza è il ms.

Tempo di rilascio: rappresenta l'intervallo fra l'istante in cui viene diseccitata la bobina e l'istante di apertura del contatto. L'ordine di grandezza è il ms.

Frequenza massima di commutazione: è il numero massimo di commutazioni al secondo (ad es. 20 Hz).

Tipi di relè

Relè neutri

I relè classici precedentemente descritti possono essere attivati sia da tensione continua che alternata; in ogni caso, poiché la forza elettromagnetica dipende dal quadrato della corrente, non ha rilevanza alcuna il verso con cui la corrente percorre l'avvolgimento. Per tale motivo questi relè vengono anche detti *neutri*.

Relè polarizzati

Sono relè in cui il movimento dei contatti dipende dal verso della corrente nella bobina, ovvero dalla polarità della tensione di eccitazione.

Relè ritardati

In certe applicazioni può essere necessario che i tempi di attrazione e di rilascio siano ben più lunghi di quelli forniti da un normale relè.

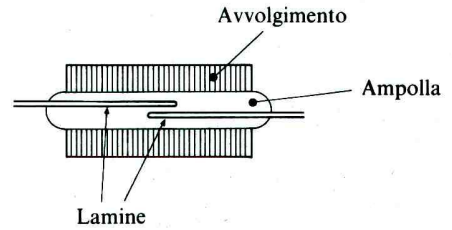
Relè reed

I relè *reed* o relè a *lamine* sono molto usati per la loro semplicità e la grande affidabilità.

In un'ampolla di vetro contenente gas inerte (azoto) trovano sistemazione due lamine di materiale ferromagnetico (ferro-nichel), con le estremità parzialmente affacciate e recanti i contatti. L'ampolla è inserita in un avvolgimento di eccitazione.

Per effetto della corrente che percorre la bobina, nelle lamine si stabilisce un campo magnetico che induce sulle superfici affacciate polarità opposte. Le lamine, allora si attraggono ed i contatti si chiudono. L'usura dei contatti è molto ridotta a causa dell'atmosfera neutra in cui lavorano; pertanto il numero minimo garantito di commutazioni è notevolmente più elevato che nei relè tradizionali. I tempi di commutazione a loro volta sono molto rapidi.

Un altro grande vantaggio dei relè reed sta nelle ridotte dimensioni che consentono addirittura di usare contenitori di tipo DIP (Dual In line Package).

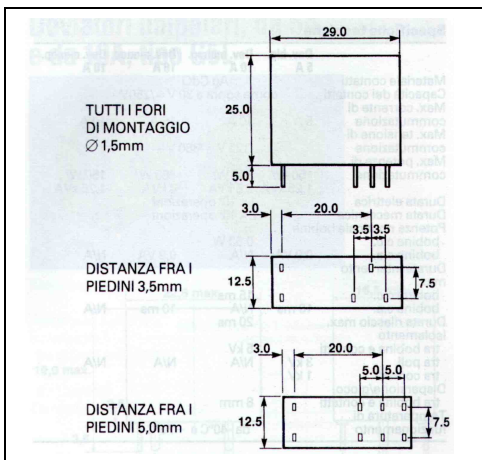
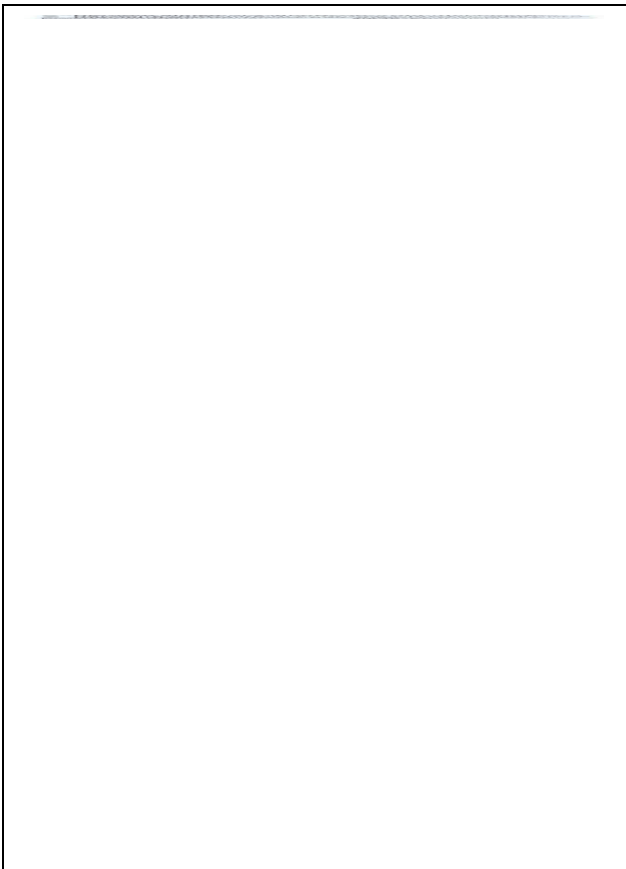


Esempio di dati tecnici

Deviatori bipolari da 5A, deviatori unipolari da 10A e 16A, modello 1

RAFFIGURAZIONI DALL'ALTO

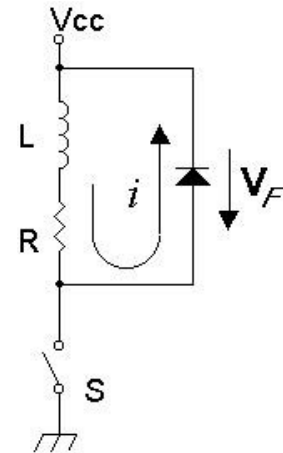
Deviatore bipolare 5A Deviatore monopolare 10A Deviatore monopolare 16A



Diodo volano

L'uso del diodo in parallelo (indicato spesso come *diodo volano* o *free-wheeling* o *dampner*) trova frequenti applicazioni per soppressione delle sovratensioni che si generano nelle commutazioni degli interruttori (specialmente se a semiconduttore) con carichi induttivi.

In figura è illustrato il circuito equivalente di un interruttore che pilota un carico induttivo; R rappresenta la resistenza dell'avvolgimento. Quando l'interruttore viene aperto, la corrente deve annullarsi bruscamente: si genera quindi una forte tensione di autoinduzione che può danneggiare l'interruttore a semiconduttore o creare un arco fra i contatti di un interruttore meccanico. Il diodo fornisce, viceversa, un percorso alternativo alla corrente, che, esaurendosi con costante di tempo $\tau = L/R$, scarica l'induttanza dell'energia accumulata. Grazie alla conduzione del diodo, la tensione ai capi dell'interruttore aperto non supera il valore $(V_{cc} + V_F)$ dove V_F è la tensione ai capi del diodo in conduzione.



TRACCIA PER LA STESURA DI UNA DOCUMENTAZIONE TECNICA

Direttiva 93/68/CEE del 22/7/93 Art.13 Allegato IV

Controllo interno della fabbricazione.

... omissis ...

Punto 3.

La documentazione tecnica deve consentire di valutare la conformità del materiale elettrico ai requisiti della direttiva. Essa deve comprendere, nella misura necessaria a tale valutazione, il progetto, la fabbricazione ed il funzionamento del materiale elettrico; essa contiene:

- *la descrizione generale del materiale elettrico;*
- *disegni di progettazione e fabbricazione nonché schemi di componenti, sottounità, circuiti;*
- *le descrizioni e le spiegazioni necessarie per comprendere tali schemi e il funzionamento del materiale elettrico;*
- *un elenco delle norme che sono state applicate completamente o in parte e la descrizione delle soluzioni adottate per soddisfare gli aspetti di sicurezza della direttiva qualora non siano state applicate le norme;*
- *i risultati dei calcoli di progetto e dei controlli svolti, ecc.;*
- *i rapporti sulle prove effettuate.*

... omissis ...

Attenendoci allo stralcio della direttiva CEE sopra riportato si fornisce una traccia che elenchi i punti essenziali e/o eventuali che una documentazione tecnica (che nel nostro ambito chiameremo Relazione tecnica) deve contenere:

1. **indicazione** chiara del nome operatore, classe, laboratorio, numero progressivo, data;
2. **oggetto/obiettivo della misura/rilievo/collaudo** evidenziato in modo chiaro, lineare, conciso. Es: Misura di resistenza; frequenza di un oscillatore; collaudo di ..; ecc.;
3. **descrizione di massima del funzionamento del circuito e/o dispositivo;**
4. **schemi (elettrico, a blocchi, di stampati¹, ecc.),** disegnati rispettando le norme vigenti, del circuito e/o del dispositivo, corredato dalle indicazioni necessarie (es.: correnti, tensioni, grandezze di I/O);
5. **descrizione (elenco) degli strumenti e/o dispositivi usati** per la misura/rilievo/collaudo con elencazione di : nome, modello, caratteristiche peculiari, precisione; (es.: oscilloscopio HP mod 75CV5 ...);
6. **flusso logico delle azioni da effettuare** per condurre la misura/rilievo/collaudo, da mettere sotto forma di elenco, cioè come:
 - -montare il circuito come in fig. ...;
 - -collegare gli strumenti come nello schema di fig. ...;
 - - e impostare... (impostazioni essenziali su strumenti/generatori, ecc.)
 - -alimentare il circuito con...;
 - - rilevare...;
7. **elenco delle misure effettuate e relative tabelle e/o grafici** dei valori rilevati, con indicazione delle unità di misure secondo le normative in vigore (DPR...);
8. **esecuzione di calcoli** (se necessari) indicando solo le cifre significative (2,3 max 4) e tenendo sempre presente la teoria degli errori; analisi dei risultati ottenuti e confronto con le eventuali previsioni fatte in sede teorica e/o di progetto;

9. **elenco sintetico delle principali caratteristiche** del dispositivo con indicazione dei limiti di validità e opportune condizioni di prova;

10. **discussione ed individuazione della validità** e dei **limiti (range)** delle misure effettuate; eventuali indicazioni per l'esecuzione di misure alternative e/o ulteriori e/o migliori;

OSS: I simboli dei componenti e/o delle grandezze elettriche usate negli schemi e nelle formule devono essere in accordo nell'ambito di tutta la relazione.

Ovviamente la descrizione dei punti è generica e si lascia allo studente lo sviluppo personalizzato della traccia e/o le eventuali integrazioni. Si lascia libertà completa per quanto riguarda l'impaginazione e la veste grafica.

In ogni caso attenersi alla normativa vigente e comunque ricordarsi che:

1. **La relazione deve evidenziare lo scopo della misura/rilievo/collaudato .**
2. **I risultati ottenuti devono essere riproducibili da un altro operatore e/o in tempi diversi.**
3. **La relazione deve evidenziare i risultati e le caratteristiche ottenute.**
4. **Particolare cura deve essere rivolta alle osservazioni.**

Nota al punto 3.

Documentazione di una scheda (Printed Circuit Board PCB) di un dispositivo.

1. Schema elettrico (indicare almeno nome e valore per ogni componente).
2. Lista dei componenti della scheda.
3. Sbrogliato (quando richiesto).
4. Master (uno per lato).
5. Serigrafia con indicazione dell'ingombro e dei nomi dei componenti (R1, R2, C1, ecc.).
6. Piano foratura (master senza piste).
7. Piano montaggio (serigrafia con ingombro e valori dei componenti ed eventualmente in scala 2:1).
8. Solder-Mask (uno per lato) realizzato in negativo. Serve per la stampa del solder-resist.
9. Caratteristiche del PCB:
 - dimensioni;
 - materiale;
 - tipo di PCB (uno o più lati);
 - ecc. .
9. Test elettrico e collaudo (secondo traccia precedente).

Osservazioni:**Caratteristiche da specificare per i componenti**

Elemento	Caratteristiche principali	Caratteristiche secondarie
Resistori	<ul style="list-style-type: none"> • Valore ohmico • Potenza massima dissipabile • Tolleranza 	Tipo di resistore (strato metallico, impasto di carbone, filo metallico,..)
Condensatori	<ul style="list-style-type: none"> • Valore capacitivo • Tensione di lavoro • Tipo di condensatore • (ceramico, poliestere, elettrolitico,...) 	Passo di inserzione del componente
Diodi Led	<ul style="list-style-type: none"> • Colore • Dimensioni (D.3mm, D.5mm D.10mm...) 	forma, alta luminosità,...
Circuiti integrati	<ul style="list-style-type: none"> • Sigla del componente • Specifica contenitore (DIP, PLCC,...) 	specifiche del costruttore (National, ST, Philips,...)
Trimmer	<ul style="list-style-type: none"> • Valore ohmico • Tipo di inserzione (H orizzontale o V verticale) 	Passo di inserzione del componente
Circuito stampato	<ul style="list-style-type: none"> • Materiale del supporto (bachelite, vetronite) • Spessore del supporto (1.6mm) • Spessore del rame (35 µm) • Numero di facce • Superficie in cm² del c.s. e/o dimensioni massime nella forma: (LxH) cm² • Finitura superficiale (solder resist, serigrafia) 	Eventuali specifiche particolari sulla lavorazione meccanica finale (fresature, scontornature, fori particolari, ecc...)

RACCOMANDAZIONI/OSSERVAZIONI SULLA STESURA DI UNA RELAZIONE.

1. Tutti gli allegati devono essere su fogli A4, possibilmente impaginati con Word. Non usare quindi foglietti sparsi, di dimensioni diversi, ecc..
2. Usare le seguenti caratteristiche Tipografiche per gli stili:

Stile	Tipo carattere	Punti	Allineamento	Stile	Effetto
Normale	Times New Roman	11	giustificato	normale	nessuno
Titolo1	Times New Roman	14	centrato	grassetto	Tutto Maiuscolo
Titolo2:	Arial	12	a sinistra	grassetto	Tutto Maiuscolo
Titolo3	Times New Roman	12	a sinistra	grassetto	nessuno
Titolo4	Times New Roman	11	a sinistra	grassetto	nessuno
Intestazione	Times New Roman	9	giustificato	normale	nessuno
Piè di pagina	Times New Roman	9	giustificato	normale	nessuno

3. Curare l'ordine, l'estetica, la presentazione: la relazione è comunque un documento tecnico.
4. Numerare sempre tutti i fogli.
5. Se vengono usati software(S/W) nella relazione devono essere citati:
 - nome pacchetto o solo nome file eseguibile: <NomeFile>.EXE con eventuali parametri;
 - nome/i del/i file nella forma <nomefile>.<estensione> risultato dell'uso del S/W usato;
6. Utilizzare qualche schema a blocchi di più per spiegare meglio l'operato e/o le operazioni da compiere.
7. Il lavoro deve essere verificato alla fine di ogni singola fase e prima della successiva:

- controllare sulla carta se il progetto funziona;
 - nel passaggio da schema elettrico a sbrogliato controllare che ad ogni nodo dello schema elettrico convergano gli stessi elementi sullo sbrogliato e/o viceversa;
 - nel passaggio da sbrogliato a PCB controllare che le piste di entrambi colleghino gli stessi elementi.
 - nel montaggio controllare sempre i componenti che si montano;
 - prima di passare al collaudo controllare bene il prodotto finito.
8. Sul master va messo un riferimento univoco che compaia in ogni tipo di schema presentato: master, serigrafia, piano montaggio, solder-mask, piano-foratura. Inoltre deve essere sempre ben chiaro a quale lato del PCB è riferito un determinato schema.
9. Sulla serigrafia e sul piano di montaggio devono essere ben visibile e in modo univoco il riconoscimento dei componenti polarizzati.
10. Per indicare il valore di resistenze usare codice alfanumerico:
T = (10^{12}); G = (10^9); M = (10^6); K = (10^3); R = (10^0); queste lettere indicano anche la posizione della virgola:
- R10 = 0,1 Ω
 - 1R0 = 1 Ω
 - 10R = 10 Ω
 - 100R = 100 Ω
 - 1K0 = 1 k Ω
 - 10K = 10 k Ω
 - 100K = 100 k Ω
 - 1M0 = 1 M Ω
- Per i condensatori se non si riesce a scrivere il simbolo “ μ ” (si pronuncia mu) al suo posto si può usare la u:
10 uF corrisponde a 10 μ F (10^{-6} F).
11. È consigliabile impostare la relazione man mano che si procede nel lavoro. Il modo migliore è quello di prendere appunti in modo regolarmente tenendo quasi un diario.

Traccia per la stesura della relazione per il 3° anno

(Metodo alternativo e/o integrativo a cura dell'ing. Giorgio Tombola)

La relazione può essere vista come un temino che ha come soggetto l'esperienza di laboratorio. Come in ogni tema si possono individuare l'introduzione (punto 2), lo svolgimento (punti da 3 a 8) e la conclusione (punto 9). Poiché tutte le relazioni si assomigliano almeno un po' si può tentare di abbozzare la traccia per una relazione tipo elencandone i punti essenziali:

1. Indicazione chiara degli autori della relazione, della classe di appartenenza, della materia, del laboratorio, del numero progressivo dell'esperienza e della data. Alcuni di questi dati possono essere ripetuti nell'intestazione o nel piede di pagina.
2. ESPOSIZIONE CHIARA E CONCISA (massimo qualche riga) DEGLI OBIETTIVI che l'esperienza di laboratorio si pone, ad esempio: la misura di una resistenza, il controllo della forma d'onda in un raddrizzatore, la frequenza di un oscillatore, la corrispondenza tra le forme d'onda rilevate e quelle previste in teoria.
3. DISEGNO DEL CIRCUITO ELETTRICO CON L'INDICAZIONE DI TUTTE LE GRANDEZZE (correnti, tensioni, resistenze, capacità, sigle dei componenti ecc.) CITATE NELLE FORMULE E NEL TESTO. Se necessario si possono disegnare anche parti del circuito accanto al testo che le cita oppure, nel caso di più misure diverse tra loro, ripetere più volte il circuito adattandolo alla misura eseguita.

4. SPIEGAZIONE DI MASSIMA DEL FUNZIONAMENTO DEL CIRCUITO, eventualmente con l'uso dello schema a blocchi. Non conviene addentrarsi in spiegazioni dettagliate del funzionamento per almeno due buone ragioni: la prima è che la relazione è rivolta ad un lettore in possesso di conoscenze simili a quelle del redattore, la seconda è che spiegare per iscritto il funzionamento di un circuito riesce difficile anche agli autori di libri di testo.
5. DESCRIZIONE DETTAGLIATA DEGLI STRUMENTI USATI (marca e modello se di produttori noti) e delle loro caratteristiche (ad esempio banda passante, impedenza d'ingresso se utile).
6. Se l'esperienza è complessa oppure le misure sono parecchie e piuttosto diverse tra loro, conviene dividere l'esperienza in diverse fasi, spiegando brevemente per ognuna l'obiettivo. Se necessario si può richiamare accanto al testo lo schema elettrico, intero o in parte, sempre indicando chiaramente le grandezze misurate. Per raccogliere i risultati delle misure conviene usare delle tabelle con l'indicazione dei valori letti e degli errori, degli eventuali fattori di conversione, dei corrispondenti valori con l'indicazione chiara delle unità di misura. Particolare attenzione deve essere posta nella scelta del numero di cifre significative.
7. ELENCO COMPLETO DELLE MISURE E DI EVENTUALI ACCORGIMENTI non ovvi per effettuarle al meglio, dei valori rilevati con l'indicazione della precisione e delle unità di misura, secondo la normativa in vigore (D.P.R. n° 802 del 12 - 8 - 82).
8. Esecuzione dei CALCOLI (se necessari) tenendo sempre ben presente la TEORIA DEGLI ERRORI per valutare le CIFRE SIGNIFICATIVE (le formule utilizzate saranno solo quelle finali e non vanno riportati i passaggi per ottenerle). Confronto dei risultati ottenuti con le eventuali previsioni fatte in sede teorica.
9. DISCUSSIONE DELLA VALIDITÀ E DEI LIMITI DELLA MISURA. Quest'ultima parte è particolarmente importante e dimostra la comprensione dell'intero processo. Si possono aggiungere eventuali indicazioni per l'esecuzione di misure alternative o migliori e per l'uso di strumenti diversi solo se si è in grado di giustificarle.

Ovviamente la descrizione dei punti è generica si lascia all'alunno lo sviluppo personalizzato della traccia e le eventuali integrazioni.

TRACCIA PER LA REALIZZAZIONE DI UN DISEGNO CON L'USO DI UN CAD.

Fase di preparazione a tavolino.

1. Valutare in quanti fogli deve essere scomposto lo schema elettrico completo.
 - OSS.: Come effettuare tale scomposizione, verrà sviluppato in seguito in modo più dettagliato. Nel seguito è invece riportata la traccia per realizzare uno schema semplice (in un solo foglio detto sheet).
2. Preparare su carta lo schizzo dello schema da realizzare col CAD, tenendo presente le seguenti osservazioni:
 - lo schizzo, realizzato manualmente, deve essere il frutto di una o più revisioni ;
 - lo schizzo, salvo qualche lieve ritocco durante il disegno al computer con il CAD, deve rispecchiare la versione definitiva;
 - tenere sempre bene presente che uno schema elettrico deve essere il più chiaro possibile e facilmente leggibile, quindi:
 - evitare incroci di collegamenti (fili) inutili;
 - evitare percorsi lunghi e contorti dei vari collegamenti;
 - quando possibile il flusso logico dei segnali deve essere da sinistra a destra: normalmente gli ingressi vanno a sinistra e le uscite a destra, l'alimentazione positiva in alto e la massa, o l'alimentazione negativa, in basso.
3. Preparare le informazioni da inserire nel cartiglio.
4. Preparare una lista dei tipi diversi di componenti utilizzati nello schema (es: resistori, condensatori, trimmer, integrati, ecc. ecc.) e associare ad essa la libreria che lo contiene.
 - OSS.: Se qualche componente non è presente nelle librerie a disposizione, preparare lo schizzo di come realizzare tale componente con il programma adatto (forma, dimensione, piedinatura, nome, ecc. ecc.). Se possibile per il disegno dei simboli elettrici fare riferimento alle norme CEI che contengono i simboli normalizzati. Nelle pagine seguenti sono riportati i simboli normalizzati di alcuni dei componenti elettronici più comuni.
5. Individuare nello schema da realizzare se ci sono blocchi di componenti che si ripetono, in modo che in sede di sessione CAD di questi blocchi se ne disegna uno e si duplicano gli altri (operazione che un computer effettua bene e volentieri!).

DISEGNO ELETTRONICO

I nostri lontani progenitori, vestiti di pelli e con l'aiuto di un solo pezzo di legno semicarbonizzato, cercavano di rappresentare il mondo che li circondava con pochi semplici segni già migliaia di anni fa. Da allora il disegno è sempre stato un mezzo per rappresentare la realtà e nel tempo si è evoluto e specializzato fino a diventare parte della nostra vita di tutti i giorni.

Dalle sagome incerte che solo un occhio allenato può associare ad una giraffa si è passati ai ritratti dei pittori del rinascimento che con pochi sapienti tratti riuscivano a trasmettere non solo i lineamenti ma anche la personalità del soggetto.

Il disegno ha continuato la sua evoluzione ed è stato usato per rappresentare molti aspetti della realtà tanto da diventare, in qualche caso, comprensibile solo a poche persone in possesso di conoscenze specifiche.

Si pensi alla differenza tra il volto dei ritratti e un disegno meccanico o elettronico. Nel ritratto del volto tutti possono ritrovare la forma familiare di un viso umano, il disegno elettronico invece ad una prima lettura sembra solo una serie di linee senza nessun significato evidente.

Eppure entrambi rappresentano un oggetto reale, o meglio una sua parte.

Infatti il ritratto non può rendere la tridimensionalità del soggetto e il disegno elettronico non dice nulla della forma e delle dimensioni del circuito elettrico che rappresenta, ma si limita ad illustrare i collegamenti tra i componenti. Anche con queste limitazioni le informazioni che si possono trarre dal disegno sono comunque di grande interesse purché disegnatore e lettore usino lo stesso linguaggio. E come ogni linguaggio sono necessarie regole condivise tra chi scrive e chi legge perché le informazioni siano scambiate in modo efficace e corretto e completo.

Le regole in questione si chiamano “norme” e sono emanate da organismi internazionali che stabiliscono, tra l'altro, la forma dei simboli grafici da usare per rappresentare nei disegni i componenti elettronici.

Le strutture che si occupano di normativa elettronica, a livelli geografici differenti, sono essenzialmente tre.

La IEC si occupa della normativa internazionale ed è composta da rappresentanti di diverse decine di nazioni.

Il CENELEC è composto di rappresentanti di oltre 20 nazioni europee ed emana direttive e norme EN (European Norms) in tre lingue: inglese, francese e tedesco, che gli stati membri sono tenuti ad adottare.

In generale il CENELEC adotta le norme stabilite dall'IEC, si occupa di stabilirne di proprie solo per argomenti particolari in cui ci sia urgenza o per cui manchino le norme internazionali.

Con una eccezione: i segni grafici per schemi elettrici. Infatti lo stesso componente, ad esempio il resistore, corrisponde a due segni grafici molto diversi a seconda che si faccia riferimento alle norme europee o a quelle nordamericane.

Il CEI si occupa della traduzione in italiano delle norme e della loro pubblicazione in fascicoli che di solito hanno prezzi molto elevati.

IEC	International Electrotechnical Commission	Oltre 40 nazioni a livello mondiale
↓		
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique	Oltre 20 nazioni europee
↓		
CEI	Comitato Elettronico Italiano	

SEGNI GRAFICI NORMALIZZATI

Tra i molti settori di cui si occupa la normativa ci interessa soprattutto la simbologia usata nei disegni degli schemi elettrici ed elettronici.

Come regola generale il simbolo è caratterizzato dalla forma e non dalle dimensioni, in altre parole un resistore è rappresentato sempre con un rettangolo in cui il lato maggiore è il triplo del lato minore. È importante quindi preservare le proporzioni tra le varie parti del segno.

Nelle tavole delle pagine seguenti sono riportati i segni grafici di alcuni tra i componenti elettronici di uso più frequente. I segni sono disegnati su uno sfondo a quadretti che aiuta a stabilire le proporzioni tra i vari elementi che li compongono, in particolare i quadrati con linea continua hanno lato pari all'unità di misura che chiameremo U mentre le linee tratteggiate disegnano quadrati con lato metà cioè pari a 0,5 U.

Sotto ad ogni simbolo è riportata la denominazione ufficiale e, se questa non è molto usata, tra parentesi il nome normalmente utilizzato. Ad esempio i resistori variabili piccoli da montare sullo stampato e con regolazione a cacciavite, comunemente chiamati trimmer, nelle norme sono chiamati "Potenziometro con contatto mobile e aggiustamento predeterminato".

Subito sotto al simbolo compare un numero composto da tre coppie di cifre che lo individua in maniera univoca. È lo stesso numero attribuito nei fascicoli che compongono le norme. In particolare la prima coppia riporta la "parte" della norma, quella centrale la sezione all'interno della parte, l'ultima è il numero progressivo attribuito al simbolo nella particolare sezione.

Nella tabella seguente sono citati alcuni dei fascicoli che contengono i segni riportati in questa dispensa.

Il condensatore si trova nel fascicolo EN 60617 parte 4 perciò la prima coppia di cifre è 04, nella sezione 2 e quindi la seconda coppia è 02. Dato che è il primo simbolo della sezione la terza coppia sarà 01. Il numero che lo identifica è 04-02-01.

elenco dei fascicoli da cui sono tratti i simboli

norma	data	fascicolo	titolo	parte	—
CEI 3-25	1997-09	3368 H	Segni grafici per schemi	1	Generalità
EN 60617-2	1997-11	4050	Segni grafici per schemi	2	Elementi dei segni grafici, segni grafici distintivi ed altri
EN 60617-3	1997-11	4051	Segni grafici per schemi	3	Conduttori e dispositivi di connessione
EN 60617-4	1997-10	3963	Segni grafici per schemi	4	Componenti passivi
EN 60617-5	1997-10	3964	Segni grafici per schemi	5	Semiconduttori e tubi elettronici

mettere il foglio con i
SIMBOLI NORMALIZZATI
disegnati con il
CAD
spazio occupabile 17 x 25 cm

mettere il foglio con i
SIMBOLI NORMALIZZATI
disegnati con il
CAD
spazio occupabile 17 x 25 cm

mettere il foglio con i
SIMBOLI NORMALIZZATI
disegnati con il
CAD
spazio occupabile 17 x 25 cm

CIRCUITI STAMPATI

Il circuito stampato CS o PCB (Printed Circuit Board) è formato da:

- supporto isolante detto base o board;
- sottilissime strisce di rame dette piste o tracce; servono per la connessione elettrica dei componenti.

Definizioni:

- poligonale: traccia di rame che unisce due o più reofori di altrettanti componenti;
- tracciato: insieme di tutte le poligonali;
- piazzola: allargamento della pista dove vengono saldati i componenti; in genere è a forma circolare o a forma di rettangolo smussato.

Tecniche di montaggio dei componenti elettronici sul PCB.

- **THT** (Through Hole Technology): ad inserzione o a foro passante; i componenti vengono montati da una parte del CS (tetto lato componenti) e le piste sulla parte opposta detta lato rame;
- **SMT** (Surface Mount Technology): a montaggio superficiale; i componenti e le piste sono sullo stesso lato e non ci sono fori passanti.

DEF.: L'insieme del PCB e dei componenti saldati prende il nome di scheda o piastra.

Classificazione dei PCB in base al numero di piani su cui vengono tracciate le piste:

- **monofaccia** o a singola faccia (single layer): componenti da un lato e piste in quello opposto;
- **bifaccia** o a doppia faccia (double layer): piste su entrambi i lati della basetta; in questo caso una poligonale si può estendere su entrambi i lati tramite una connessione passante ottenuta con dei fori metallizzati;
- **multistrato** (multilayer): piste che si sviluppano su 3 o più piani.

Progetto del PCB.

Per il progetto del PCB occorre

1. conoscere:

- schema elettrico;
- classe apparecchiatura (civile commerciale, militare, ecc...);
- condizioni ambientali di funzionamento;
- dimensioni fisiche del contenitore e quindi della basetta;
- numero di esemplari da produrre;

2. scegliere:

- tecnologia di montaggio THT o SMT;
- materiale costituente la basetta (es. vetronite);
- tipologia basetta (singola o doppia faccia);
- tracciato, ossia il disegno delle piste (la parte più importante ed onerosa).

Layout e sbroglio.

Per la realizzazione del tracciato occorre analizzare e studiare due fasi interdipendenti ed estremamente critiche e fondamentali: lo studio del layout e lo sbroglio.

DEF. :

- **Layout:** studio della disposizione dei componenti sulla scheda ;

- **Sbroglio**: definizione del miglior percorso delle piste che realizza tutti i collegamenti elettrici previsti, senza incroci di poligonali.
- **Sbrogliato**: prodotto finale del layout e dello sbroglio. Costituisce la bozza del tracciato che dopo successivi perfezionamenti darà luogo al master.
- **Master** o master artwork o semplicemente **artwork** è il disegno finito del percorso delle piste.

OSS. : Lo studio del layout e dello sbroglio richiede molte prove e molto tempo e dipende dall'esperienza e dall'abilità del progettista. Non ci sono molte regole fisse ma solo buone norme, tra cui quella di osservare e studiare schemi elettrici e relativi PCB già realizzati da altri.

Metodi. Fasi da seguire.

1) Fase.

- procurarsi tutti i componenti elettronici necessari;
- definire l'ingombro del PCB finito (dimensione e forma) e la posizione dei fori di fissaggio della scheda;
- usare una scheda millefori appoggiata su un pezzo di polistirolo e segnare su essa l'ingombro del PCB;
- disporre tutti i componenti secondo un layout preliminare; si ha così una visione immediata del layout.

2) Fase.

Su un foglio di carta millimetrata si riporta a matita una copia della basetta, vista dal lato componenti, e di questi si riportano le posizioni dei reofori indicandoli con un cerchietto e ottenendo così il cosiddetto *pallinato*.

OSS. : Il foglio di carta millimetrata si può anche mettere tra la piastra millefori e il polistirolo.

Nella vista d'insieme così ottenuta devono comparire:

- le piazzole relative agli ingressi, alle uscite, all'alimentazione e alla massa;
- tutti i riferimenti di identificazione per i segnali degli ingressi, delle uscite, dell'alimentazione e della massa;
- le sigle alfanumeriche che individuano i componenti (R1, C4, IC2...);
- i segni di riferimento dei componenti polarizzati (+ per i condensatori elettrolitici e per i diodi);
- le lettere di identificazione dei terminali dei BJT (E=emettitore, C=collettore, B=base) e dei FET e MOSFET (S=source, D=drain, G=gate);
- la tacca di riferimento degli integrati.

3) Fase.

- Si tracciano a matita le linee di collegamento che rappresentano le piste viste, ovviamente, in trasparenza.
- La forma e le dimensioni delle piste, in questa fase, non sono di particolare importanza.
- Controllare, però, che le poligonali non s'incrocino e che la distanza tra le linee di collegamento tenga conto della larghezza delle piste.

OSS. : tra i pin di un circuito integrato è possibile far passare al massimo una sola pista e non più di quattro tra le file dei pin.

- E' consigliabile disegnare per primi i tratti che rappresentano le piste di alimentazione e di massa, in modo da renderli il più possibile corti e diretti. Normalmente queste piste dovrebbero correre lungo i bordi della basetta e disegnati con tratto di matita più marcato per evidenziare che le corrispondenti piste saranno più larghe.
- Si passa poi a tracciare i collegamenti relativi al componente che presenta il maggior numero di numero di connessioni e quindi poi di seguito.
- Occorre fare attenzione ai pinout (disposizione dei pin) dei componenti forniti nei data-sheet dei manuali. In genere per i circuiti integrati il pinout è data la vista dall'alto (top view), mentre per i transistor e per i display è data la vista dal basso (bottom view).

4) Fase.

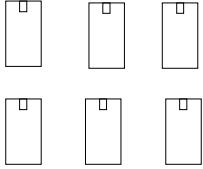
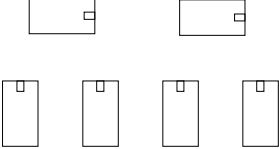
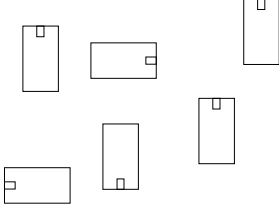
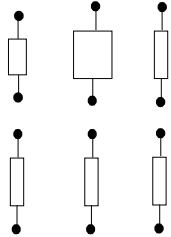
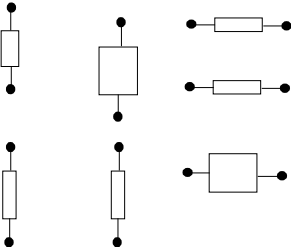
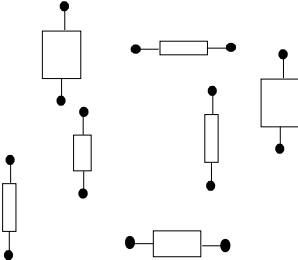
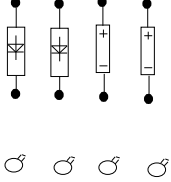
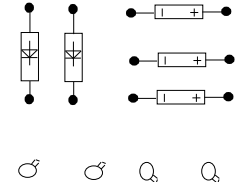
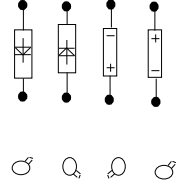
Se il tentativo di sbrogliatura non riesce a causa di due o più incroci, si riprova e per successivi tentativi si cerca una disposizione migliore seguendo i seguenti criteri:

- si modifica il percorso di alcune piste;
- si prova a cambiare la posizione e la disposizione di qualche componente;
- inserire qualche ponticello (ma solo per master artigianali o scolastici);
- se non si riesce proprio a trovare una soluzione si può pensare di usare un CS a doppia faccia.

Regole per ottenere un layout corretto.

- Definire prioritariamente la posizione di eventuali fori di fissaggio della scheda;
- i componenti vanno disposti rispettando il più possibile la posizione che occupano nello schema elettrico;
- i componenti devono essere raggruppati e disposti in modo da sfruttare tutto lo spazio della scheda a disposizione;
- i componenti che richiedono una regolazione in sede di collaudo (trimmer, compensatori, microswitch), quelli previsti per la connessione con altre parti dell'apparecchiatura (morsettiere, connettori, ecc.) , fusibili e altri elementi analoghi dovrebbero essere disposti lungo i bordi della scheda, eventualmente su uno solo di essi. In ogni caso devono essere facilmente accessibili;
- i componenti dello stesso tipo (resistori, C.I., ecc.) vanno raggruppati il più possibile (vedi fig.1);
- l'orientamento dei componenti deve essere lo stesso in ogni singolo gruppo(vedi fig.1);
- per l'orientamento dei componenti usare solo le due direzioni parallele ai lati della scheda (vedi fig.1);
- disporre gli integrati con la tacca di riferimento, preferibilmente, verso l'alto o verso sinistra;
- i componenti ad elevata dissipazione, ossia quelli che generano calore, devono essere disposti lontano dai componenti sensibili al calore (tipo i semiconduttori);
- tenere i componenti che producono disturbi (induttanze, trasformatori) lontani dalle parti di circuito con segnali deboli;
- il montaggio dei componenti assiali (tipo resistori e diodi) sulla piastra deve essere orizzontale;
- lasciare libero da componenti uno spazio di almeno 5mm lungo i lati della scheda;
- lasciare tra i componenti uno spazio sufficiente per poterli afferrare in caso di sostituzione.

Fig.1 :Diverse disposizioni dei componenti su CS

Disposizione ottimale	Disposizione consentita	Disposizione DA RIVEDERE
<p>Componenti DIP</p> 		
<p>Componenti non polarizzati</p> 		
<p>Componenti polarizzati</p> 		

Studio dello sbrogliato.

Lo studio dello sbrogliato è un lavoro che richiede molta calma e concentrazione, è necessario lavorare con matita e gomma in quanto sarà frequente il ricorso a cancellature. E' consigliabile insistere nella ricerca di un buon risultato tenendo conto che la soluzione trovata è sempre migliorabile, ma è anche vero che prima o poi ne devi adottare una !!!

Per facilitare il lavoro è utile iniziare effettuando uno studio di massima dei percorsi su un disegno ingrandito del layout oppure su un suo schizzo.

E' opportuno che i vari componenti siano sufficientemente distanziati per consentire il tracciamento di almeno dieci linee nello spazio fra essi; questo spazio verrà poi ridotto adeguatamente nella fase successiva.

Nella ricerca dei percorsi più idonei è spesso conveniente iniziare da quelli più brevi e diretti e passare gradualmente a quelli più lunghi ed impegnativi.

Nella fase preliminare è utile alle volte spostare alcuni componenti al fine di rendere i percorsi meno ingarbugliati.

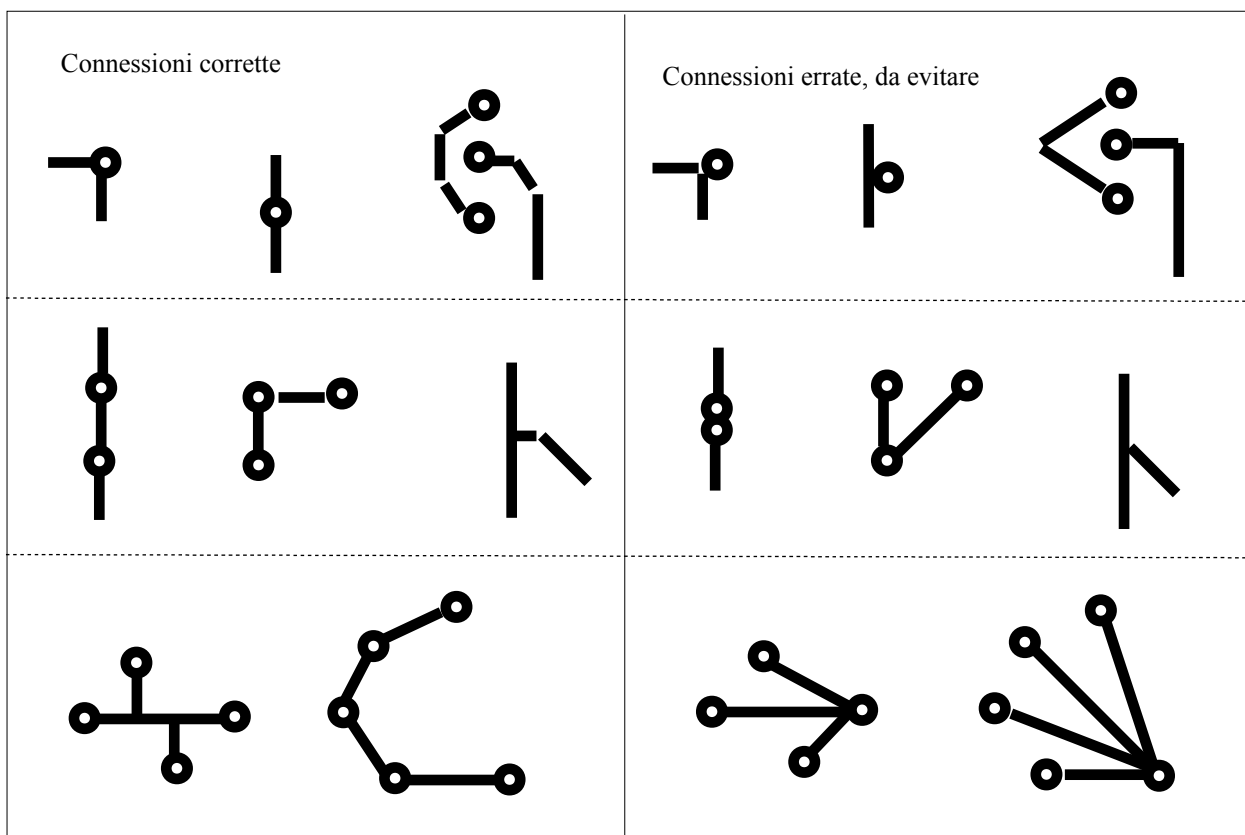
Quando il numero di incroci è elevato si può ricorrere al PCB a doppia faccia. In tal caso vanno individuate tutte le linee prive di incroci e posizzarle sul lato rame, le rimanenti sul lato componenti.

Alle volte si può fare uso di ponticelli, ma ricordarsi che questi vanno considerati a tutti gli effetti dei componenti e che il suo uso è ristretto solo per CS di tipo artigianale o scolastico.

Regole per tracciare i percorsi.

- Non far passare più di quattro piste fra le file dei piedini di un integrato DIP;
- evitare il passaggio di piste fra due piedini contigui dei CI; nel caso di assoluta necessità far passare una sola pista;
- tenere presente che i componenti vanno visti dalla parte bassa, cioè opposta a quella da cui vanno visti guardandoli dal lato componenti (top view);
- le piste devono svilupparsi secondo le due direzioni parallele ai lati della basetta;
- i cambiamenti di direzione non devono essere bruschi ma gradual; utilizzando raccordi a 45° o curvi (vedi fig.2);
- lasciare almeno 5mm privi di piste lungo i bordi della scheda;
- distanziare le piste di una quantità sufficiente ad evitare il corto circuito fra esse;
- il ponticello va considerato a tutti gli effetti un componente e come tale va disposto secondo la direzione dei componenti vicini ed occorre prevedere due piazzole per i suoi collegamenti.

Fig.2 :Esempi di connessioni di piste.



DISSIPAZIONE TERMICA

Un problema a cui si deve prestare attenzione quando si lavora con dispositivi di potenza a semiconduttore, siano BJT, MOS, integrati o diodi, è quello della dissipazione di potenza nel dispositivo e del conseguente aumento di temperatura interna.

La temperatura interna, ovvero quella delle giunzioni, non deve superare il limite superiore $T_{j(max)}$ che, per il silicio, è compreso fra 120°C e 200°C.

RESISTENZA TERMICA

L'analogia termo-elettrica consente di determinare, con una certa facilità, il valore della temperatura della giunzione per una certa potenza dissipata.

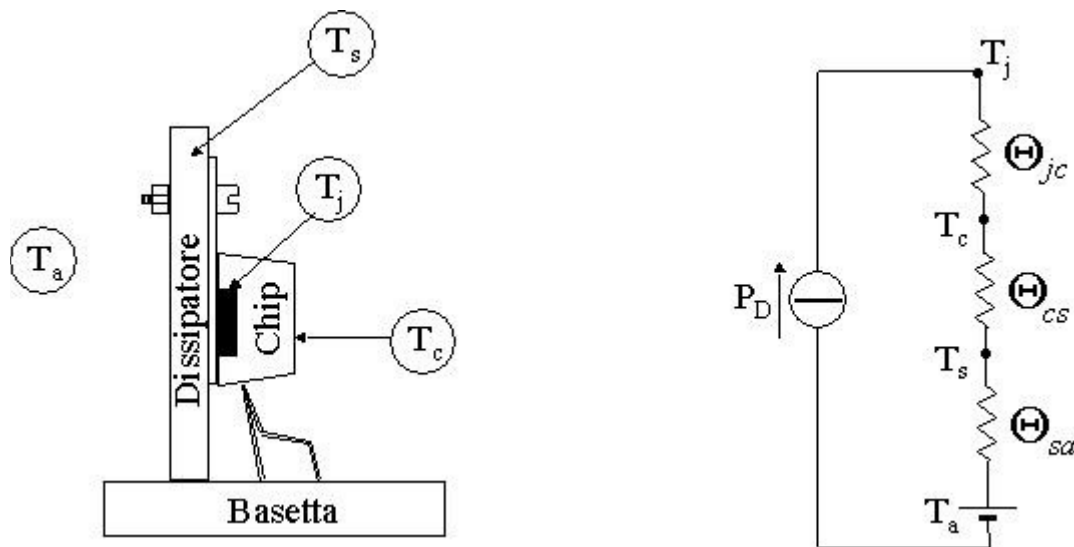


Figura 1: Analogia termoelettrica

La potenza P_D dissipata nel chip viene rappresentata con un generatore di corrente, le temperature della giunzione T_j , della base di montaggio del contenitore T_c , del dissipatore T_s e dell'ambiente T_a , vengono a loro volta considerate come tensioni. Per tener conto delle differenze di temperatura fra i vari punti si introducono le resistenze termiche, indicate con i simboli Θ . Vale pertanto la relazione

$$T_j = T_a + P_D (\Theta_{jc} + \Theta_{cs} + \Theta_{sa}) \quad [1]$$

analoga alla legge di Ohm per i circuiti elettrici.

Normalmente in fase di progetto il problema si pone in questi termini: nota la potenza da dissipare P_D , note $T_{j(max)}$ e T_a , nota dai fogli tecnici Θ_{jc} relativa al dispositivo in questione, si deve scegliere il dissipatore adatto affinché la giunzione non superi $T_{j(max)}$. Dall'equazione [1] si ricava il valore massimo che deve presentare $\Theta_{cs} + \Theta_{sa}$.

La resistenza termica Θ_{cs} dipende dal tipo di contenitore e dalle modalità di montaggio del componente sul dissipatore. Essa varia infatti se fra contenitore e dissipatore si inserisce o meno un foglietto isolante di mica, se si usa grasso termoconduttore al silicone, ecc.; è comunque un dato noto. A sua volta per ogni tipo di dissipatore viene fornita dal costruttore la Θ_{sa} corrispondente. Occorre allora scegliere il dissipatore ed il tipo di montaggio più opportuni affinché la somma $\Theta_{cs} + \Theta_{sa}$ non risulti superiore al valore massimo ricavato dall'eq. [1].

PROCEDIMENTO PER DETERMINARE LA NECESSITA' DEL DISSIPATORE

Note la potenza P_D dissipata dal dispositivo, la temperatura massima $T_{j(max)}$ sopportabile dalla giunzione e la temperatura ambiente T_a massima (in pratica 40°C o più), si calcola il valore massimo che può assumere la resistenza termica giunzione-ambiente:

$$\Theta_{ja(max)} = \frac{T_{j(max)} - T_a}{P_D} \quad [2]$$

Si confronta $\Theta_{ja(max)}$ con i valori Θ_{jc} e Θ_{ja} del dispositivo, tratti dai fogli tecnici:

- 1) se $\Theta_{ja(max)} < \Theta_{jc}$ allora il dispositivo non è in grado di dissipare P_D , quindi occorre orientarsi su di un altro capace di dissipare maggiore potenza;
- 2) se $\Theta_{ja(max)} > \Theta_{ja}$ allora non è necessario l'impiego di alcun dissipatore;
- 3) se $\Theta_{jc} < \Theta_{ja(max)} < \Theta_{ja}$ allora occorre un dissipatore e si passa al dimensionamento.

Si determina la resistenza termica Θ_{sa} che deve presentare il dissipatore mediante la formula

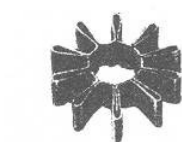
$$\Theta_{sa} \leq \Theta_{ja(max)} - \Theta_{jc} - \Theta_{cs} \quad [3]$$

dove Θ_{cs} dipende dal tipo di contenitore e tipo di montaggio. In tab.1 viene fornito il valore di Θ_{cs} per due tra i più diffusi contenitori di potenza, il TO-3 metallico ed il TO-220 plastico.

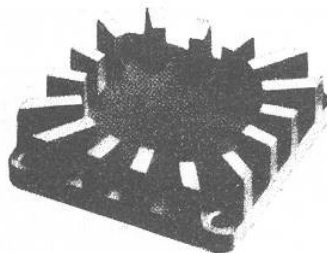
Θ_{cs} (°C/W)	Contatto diretto	Con grasso al silicone	Con silicone e mica
TO-3	0.5 - 0.7	0.3 - 0.5	0.4 - 0.6
TO-220	1.0 - 1.3	0.6 - 0.8	0.8 - 1.1

Tab. 1: Da Voltage Regulator – National Semiconductor.

- Occorre a questo punto scegliere sui cataloghi delle case costruttrici il dissipatore (e le sue dimensioni) con la Θ_{sa} sopra ricavata.

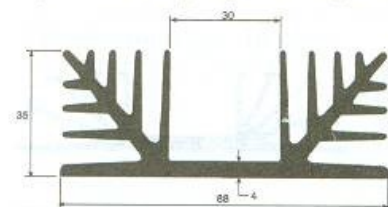


60° C/W



7,6° C/W

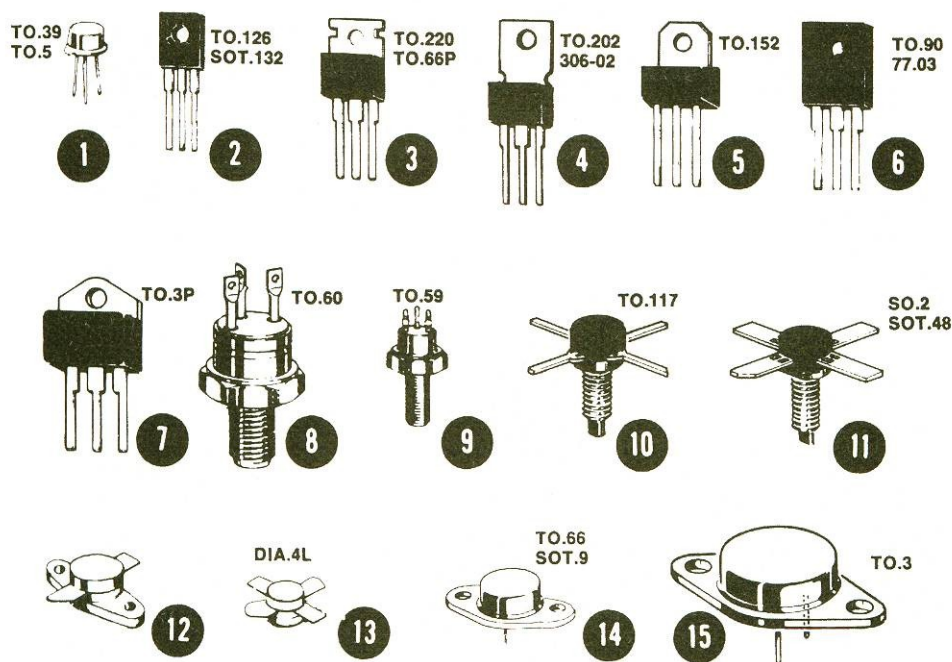
1,4°C/W, 1,65°C/W



	234-2542	234-2520
Lungh.	100	75
Largh.	88	88
Alt.	35	35

Esempi di contenitori per dispositivi di potenza e resistenze termiche contenitore – radiatore

Tipo Contenitore		Contatto diretto	Contatto diretto con pasta al silicone	Contatto con mica	Contatto con mica e pasta al silicone
N. 1	TO.39 TO.5		0,7		
N. 2	TO.126	1,4	1	2	1,5
N. 3	TO.220	0,8	0,5	1,4	1,2
N. 4	TO.202	0,8	0,5	1,4	1,2
N. 5	TO.152	0,8	0,5	1,4	1,2
N. 6	TO.90	0,5	0,3	1,2	0,9
N. 7	TO.3 plastico	0,4	0,2	1	0,7
N. 8-9	TO.59	1,2	0,7	2,1	1,5
N. 10	TO.117	2	1,7		
N. 11	SOT.48	1,8	1,5		
N. 12-13	DIA.4L	1,1	0,7		
N. 14	TO.66	1,1	0,85	1,8	1,4
N. 15	TO.3	0,25	0,12	0,8	0,4

**ESEMPIO**

Scegliere un regolatore in grado di fornire $V_o = 5\text{ V}$ con corrente massima $I_o = 0,7\text{ A}$, disponendo di $V_i = 15\text{ V}$ e dimensionare il dissipatore sapendo che la temperatura ambiente T_a può salire fino a $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Il regolatore LM340 è in grado di fornire una $V_o = 5\text{ V}$ con una $I_o = 1,5\text{ A}$ e di sopportare una $T_{j(\max)} = 150\text{ }^\circ\text{C}$. Dal data sheet si ha che il contenitore è un TO-3 con $\Theta_{jc} = 4\text{ }^\circ\text{C/W}$ e $\Theta_{ja} = 35\text{ }^\circ\text{C/W}$.

Si calcola

$$P_D = (V_o - V_i) \cdot I_o = (15 - 5) \cdot 0,7 = 7\text{ W}$$

e dalla eq. [2] si ricava

$$\Theta_{ja(max)} = \frac{T_{j(max)} - T_a}{P_D} = \frac{150 - 60}{7} = 12,9 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Essendo $\Theta_{jc} < \Theta_{ja(max)} < \Theta_{ja}$ il regolatore necessita di dissipatore con resistenza termica data da [3] ovvero $\Theta_{sa} \leq \Theta_{ja(max)} - \Theta_{jc} - \Theta_{cs} = 12,9 - 4 - 0,7 = 8,2 \text{ } ^{\circ}C/W$ dove Θ_{cs} è relativo al caso peggiore del montaggio a contatto diretto. Ora si può scegliere il dissipatore, ad esempio uno con Θ_{sa} di $6^{\circ}/W$.

VENTILAZIONE FORZATA

Se la resistenza termica richiesta (Θ_{sa}) risulta molto bassa (ad esempio inferiore a $0,5 \text{ } ^{\circ}C/W$), si rende necessario ricorrere alla ventilazione forzata. In questo caso, conoscendo la portata del ventilatore, si può ricavare dalla tabella 2 un coefficiente di correzione da applicare alla R_{sa} del dissipatore. Ad esempio un ventilatore con portata $150 \text{ m}^3/h$ abbassa la resistenza termica del dissipatore dell'esempio precedente al valore

$$\Theta_{ja(forzata)} = \Theta_{sa} \cdot k = 6 \cdot 0,37 = 2,2 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Portata m^3 / ora	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Fattore	0.79	0.60	0.49	0.43	0.37	0.34	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21

Tab.2: Fattori correttivi per le ventilazioni forzate

ESERCIZI

CALCOLO della POTENZA MASSIMA DISSIPABILE con la CURVA di DERATING

I resistori trasferiscono calore all'ambiente prevalentemente per conduzione (attraverso i terminali) e convezione (riscaldamento dell'aria circostante). L'irraggiamento ha un ruolo marginale e limitato ai soli resistori di potenza che raggiungono temperature elevate, dell'ordine di 300 °C e oltre.

Il trasferimento di calore per convezione e conduzione è ben descritto dalla formula seguente, che nella versione compatta, scritta nella prima riga, ricorda la legge di Ohm. Ricordando che il salto di temperatura ΔT è la differenza tra la temperatura del resistore e quella ambiente si ottiene la formula della terza riga.

$$1) \quad \Delta T = R_T \cdot P_d \quad R_T = \text{resistenza termica} \quad P_d = \text{potenza dissipata}$$

$$2) \quad \Delta T = T_r - T_a$$

$$3) \quad T_r - T_a = R_T \cdot P_d \quad T_r = \text{temperatura del resistore} \quad T_a = \text{temperatura ambiente}$$

La potenza dissipabile dal resistore dipende dal salto di temperatura ΔT ed è tanto più alta quanto maggiore è la temperatura del resistore e minore è la temperatura ambiente. Se la temperatura ambiente è di 25 °C e il resistore è alla massima temperatura, la potenza massima dissipabile è chiamata potenza nominale, indicata di solito con P_n ed è fornita dal costruttore.

La formula precedente diventa quindi:

$$4) \quad T_{r \max} - T_n = R_T \cdot P_n \quad T_{r \max} = \text{temperatura massima sopportabile dal resistore}$$
$$T_n = \text{temperatura ambiente alla quale è determinata la } P_n$$
$$P_n = \text{potenza nominale}$$

A volte la potenza nominale è specificata a 70 °C, soprattutto per i resistori di qualità più alta (a strato e a filo).

CALCOLO della POTENZA MASSIMA DISSIPABILE al variare della TEMPERATURA AMBIENTE

Esercizio n° 1 - Un resistore di potenza nominale $P_n = 4 \text{ W}$ e temperatura massima di funzionamento $T_{r \max} = 145 \text{ °C}$, è montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 85 \text{ °C}$. Quale sarà la potenza massima che il resistore potrà dissipare senza subire modificazioni irreversibili?

Il modo più semplice di risolvere il problema è utilizzare la curva di derating. I dati necessari alla tracciatura sono: la potenza nominale P_n , la temperatura alla quale la potenza nominale è determinata T_n e la temperatura massima di lavoro del resistore $T_{r \max}$. Poiché sono tutti disponibili si traccia la curva che risulta come nella figura a destra.

Sull'asse delle ascisse si individua la temperatura ambiente di 85 °C e da questo punto si traccia un segmento verticale (nella figura è tratteggiato).

Dal punto di intersezione del segmento verticale con la curva di derating si traccia un segmento orizzontale (nel nostro caso coincide con una linea del reticolo). Nel punto di intersezione con l'asse delle ordinate si trova la potenza massima dissipabile che corrisponde a 2 W .

Non volendo utilizzare il reticolo basta osservare che 85 °C è esattamente a metà della distanza tra 25 °C e 145 °C o, se si preferisce, il salto di temperatura si è ridotto a 60 °C . Dato che la potenza nominale è determinata con un salto di temperatura di 120 °C e il salto di temperatura attuale è ridotto a metà, la stessa sorte subirà la $P_{D \max}$ (potenza massima dissipabile) che vale metà di quella nominale, cioè 2 W .

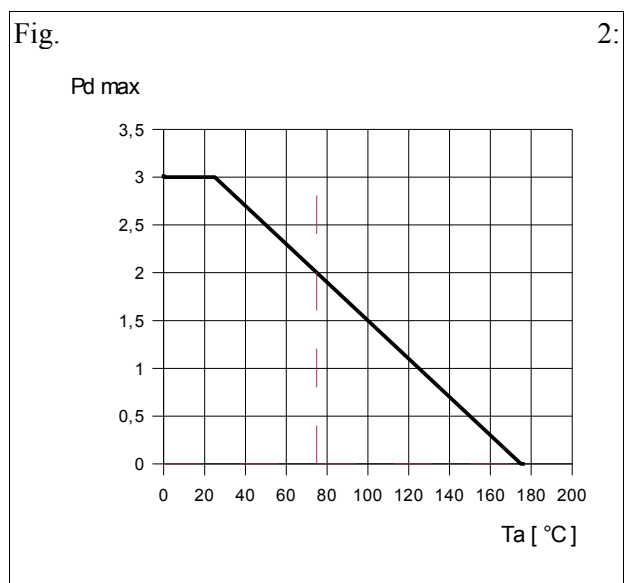
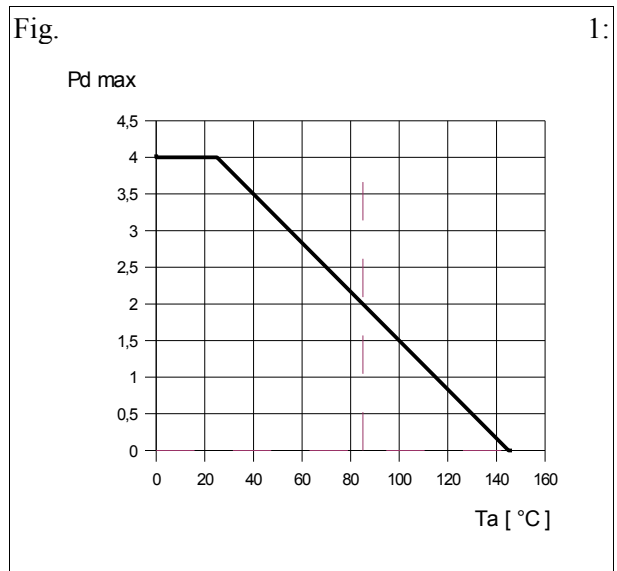
Esercizio n° 2 - Un resistore di potenza nominale $P_n = 3 \text{ W}$ e temperatura massima di funzionamento $T_{r \max} = 175 \text{ °C}$, è montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 75 \text{ °C}$. Quale sarà la potenza massima che il resistore potrà dissipare senza subire modificazioni irreversibili?

Anche in questo caso conviene usare la curva di derating dato che i dati necessari per tracciarla sono disponibili. La curva è disegnata in figura.

Sull'asse delle ascisse si individua la temperatura ambiente di 75 °C e da questo punto si traccia un segmento verticale (nella figura è tratteggiato).

Dal punto di intersezione del segmento verticale con la curva di derating si traccia un segmento orizzontale (nel nostro caso coincide con una linea del reticolo). Nel punto di intersezione con l'asse delle ordinate si trova la potenza massima dissipabile.

In ambiente a 75 °C la potenza massima dissipabile è di 2 W .



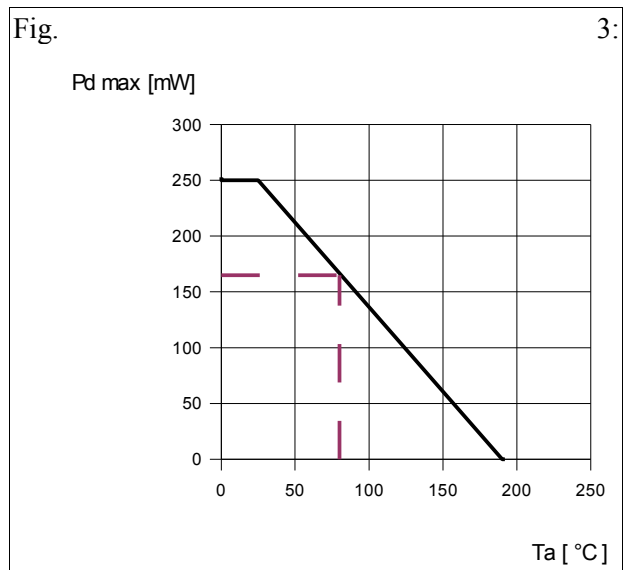
Se non si dispone di un grafico con il reticolo basta osservare che $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ è esattamente ad un terzo della distanza tra $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ o, se si preferisce, il salto di temperatura si è ridotto a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dato che la potenza nominale è determinata con un salto di temperatura di $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e il salto di temperatura attuale è ridotto a $2/3$, lo stesso succede alla $P_{D\text{ max}}$ (potenza massima dissipabile) che vale $2/3$ di quella nominale, cioè 2 W .

Esercizio n° 3 - Un resistore di resistenza nominale $680\ \Omega$, potenza nominale $P_n = 1/4\text{ W}$ e temperatura massima di funzionamento $T_{r\text{ max}} = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$, è montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determinare la potenza massima dissipabile.

Prima di tutto si disegna la curva di derating, tenendo presente che $1/4\text{ W}$ equivale a 250 mW , per cui conviene tarare l'asse delle ordinate in mW . Poi si individua la temperatura ambiente sull'asse delle ascisse e da questo punto, come al solito, si traccia una retta verticale fino ad intersecare la curva di derating. Dal punto di intersezione con la curva si traccia una retta orizzontale che indicherà la potenza massima dissipabile sull'asse delle ordinate.

In questo caso, dalla sola osservazione del grafico, il punto di intersezione della retta orizzontale con l'asse delle ordinate non è determinabile con precisione ma si può stimare intorno a 165 mW .

Se si volesse determinare il valore esatto della $P_{D\text{ max}}$ (potenza massima dissipabile) sarebbe necessario usare la formula $\Delta T = R_T \cdot P_d$ da cui si potrebbe ricavare il valore esatto, pari a $166,6\text{ mW}$. Se lo si confronta con il valore stimato dal grafico si vede che la differenza è minima e non giustifica il tempo impiegato per il calcolo.



CALCOLO della POTENZA NOMINALE del RESISTORE data la POTENZA DISSIPATA

Esercizio n° 4 - Un resistore di resistenza nominale 100Ω deve dissipare $0,5 \text{ W}$. I materiali di cui è costituito gli permettono di sopportare una temperatura massima $T_{r \text{ max}} = 155 \text{ }^\circ\text{C}$. È montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Determinare la potenza nominale P_n necessaria ad evitare il surriscaldamento.

Il problema si può risolvere in due modi: in maniera prevalentemente grafica, usando la curva di derating, o per via analitica, usando la formula 3.

Per la soluzione grafica è indispensabile tracciare la curva di derating anche se manca un dato che potrebbe sembrare essenziale: la potenza nominale. La difficoltà si supera tarando l'asse delle ordinate in percentuale della potenza nominale.

Si vede facilmente che a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ corrisponde una potenza massima dissipabile pari al 50 % della potenza nominale. Dato che questa potenza deve corrispondere a $0,5 \text{ W}$ la potenza nominale sarà il doppio, ovvero 1 W .

Per la soluzione analitica si usa la formula 3

$$T_r - T_a = R_T \cdot P_d$$

in cui si sostituiscono i dati del problema:

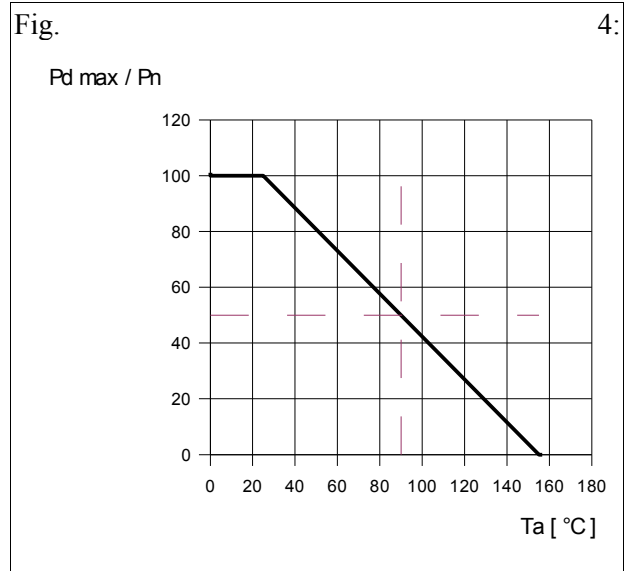
$$155 - 90 = R_T \cdot 0,5 \text{ da cui si ricava}$$

$$R_T = \frac{65}{0,5} = 130 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

utilizzando il valore di R_T appena determinato, sempre nella formula 3, si può calcolare la potenza nominale

$$155 - 25 = 130 \cdot P_n \text{ da cui si ricava } P_n = 1 \text{ W}$$

Quella calcolata è la potenza nominale necessaria ad evitare surriscaldamenti ma è decisamente consigliabile sovradimensionare il resistore e quindi sceglierlo con una potenza nominale doppia o tripla, quindi $2 < P_n < 3 \text{ W}$.



Esercizio n° 5 - Un resistore di resistenza nominale 330Ω deve dissipare 60 mW . La temperatura massima sopportabile dal resistore è $T_{r \text{ max}} = 125 \text{ }^\circ\text{C}$. È montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Determinare la potenza nominale P_n necessaria ad evitare il surriscaldamento.

Il problema si può risolvere in due modi: in maniera prevalentemente grafica, usando la curva di derating, o per via analitica, usando la formula 3.

Per la soluzione grafica è indispensabile tracciare la curva di derating anche se manca un dato che potrebbe sembrare essenziale: la potenza nominale. La difficoltà si supera tarando l'asse delle ordinate in percentuale della potenza nominale.

Si vede facilmente che a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ corrisponde una potenza massima dissipabile pari al 60% della potenza nominale. Dato che questa potenza deve corrispondere a 60 mW la potenza nominale sarà 100 mW .

Per la soluzione analitica si usa la formula 3

$$T_r - T_a = R_T \cdot P_d$$

in cui si sostituiscono i dati del problema:

$$125 - 65 = R_T \cdot 0,06 \text{ da cui si ricava } R_T = \frac{60}{0,06} = 1000 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

utilizzando il valore di R_T appena determinato, sempre nella formula 3, si può calcolare la potenza nominale

$$125 - 25 = 1000 \cdot P_n \text{ da cui si ricava } P_n = 0,1 \text{ W}$$

Quella calcolata è la potenza nominale necessaria ad evitare surriscaldamenti ma è decisamente consigliabile sovradimensionare il resistore e quindi sceglierlo con una potenza nominale doppia o tripla, quindi $0,2 < P_n < 0,3 \text{ W}$. Si sceglie un resistore da 250 mW ($\frac{1}{4}$ di W) che è una delle potenze nominali più diffuse in elettronica.

Esercizio n° 6 - In una apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ va montato un resistore da 560Ω che deve dissipare $2,5 \text{ W}$.

Abbiamo a disposizione un resistore da 560Ω di potenza nominale $P_n = 3 \text{ W}$ e temperatura massima sopportabile $T_{r \text{ max}} = 325 \text{ }^\circ\text{C}$. Possiamo usarlo ?

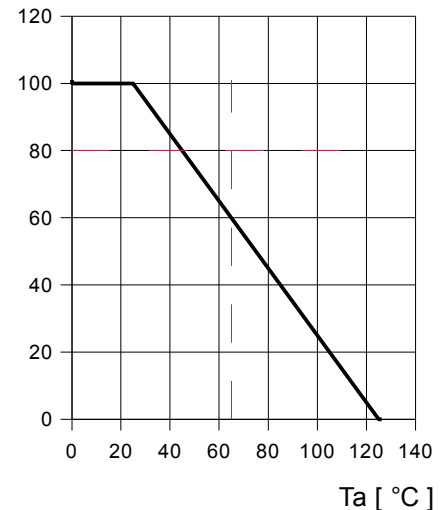
Per rispondere alla domanda bisogna determinare la potenza nominale minima necessaria per questa applicazione.

Al solito si può usare il metodo grafico, più veloce e meno preciso, oppure quello analitico, usando la formula 3.

Fig.

5:

Pd max / Pn



Per tracciare la curva di derating manca la potenza nominale perciò si tara l'asse delle ordinate in percentuale della potenza nominale.

Dal grafico si vede facilmente che a 85 °C corrisponde una potenza massima dissipabile del 80 % o 4/5 della potenza nominale. Dato che questa potenza deve corrispondere a 2,5 W la potenza nominale sarà 5/4 della potenza da dissipare, ovvero

$$P_n = 2,5 \cdot \frac{5}{4} = 3,125 \text{ W}$$

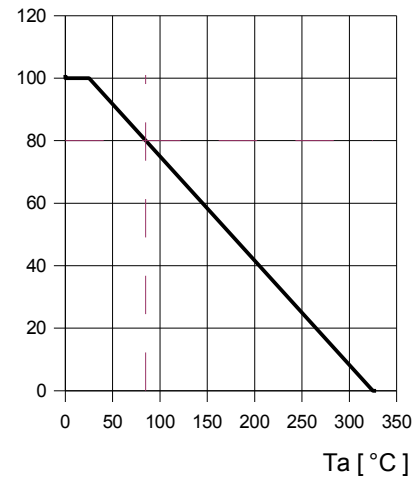
e quindi il resistore da 3 W non può essere usato.

Per evitare che si surriscaldi è opportuno sovradimensionare il resistore scegliendone uno con $P_n > 5 \text{ W}$.

Fig.

6:

Pd max / Pn



Esercizio n° 7 – Lo schema di figura rappresenta la spia di alimentazione di un'apparecchiatura alimentata a 24 V. Il diodo LED deve segnalare la presenza della tensione di alimentazione accendendosi. La luminosità del diodo dipende dalla corrente e per essere visibile in ambienti chiusi sono sufficienti 10 mA.

Supponendo che la temperatura ambiente massima sia $T_{a \max} = 65 \text{ °C}$

- dimensionare il resistore
- determinare la temperatura massima del resistore

Dimensionare il resistore significa determinare i parametri principali: valore nominale, tolleranza e potenza nominale minima.

Innanzitutto determiniamo il valore nominale applicando il secondo principio di Kirchhoff alla maglia:

$$V_{cc} = R \cdot I + V_D$$

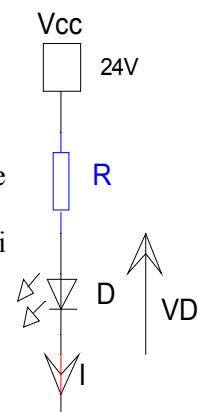
$$R = \frac{V_{cc} - V_D}{I} = \frac{24 - 1,7}{10 \cdot 10^{-3}} = 2230 \Omega$$

Il valore normalizzato più vicino a quello calcolato è 2,2 kΩ e si trova nelle serie E12 (10 %) ed E24 (5 %). Di solito la serie E24 è disponibile solo per i resistori di potenza nominale bassa, fino ad 1 W, vedremo più avanti che la potenza nominale richiesta per R è abbastanza bassa perciò possiamo scegliere la tolleranza del 5 %.

$$R = 2,2 \text{ k} \Omega \quad 5 \%$$

Ora si può calcolare la potenza dissipata dal resistore. Ricordando che conosciamo la tensione sul resistore, ma non la potenza, perché il resistore scelto non è uguale a quello calcolato, ricalcoliamo la potenza usando il valore nominale scelto

$$P_D = \frac{(V_{cc} - V_D)^2}{R} = \frac{(24 - 1,7)^2}{2,2 \cdot 10^3} \simeq 226 \text{ mW}$$



Per determinare la potenza nominale la scelta è tra il metodo grafico, più veloce e meno preciso, e quello analitico, usando la formula 3.

Per tracciare la curva di derating manca la potenza nominale perciò si tara l'asse delle ordinate in percentuale della potenza nominale. Inoltre possiamo supporre che il resistore utilizzato sia di tipo economico, a strato di carbone, e la sua temperatura massima di lavoro sia 125 °C.

Dal grafico si vede facilmente che a 65 °C corrisponde una potenza massima dissipabile del 60 % o 3/5 della potenza nominale. Dato che questa potenza deve corrispondere a 226 mW la potenza nominale sarà 5/3 della potenza da dissipare, ovvero

$$P_n = 226 \cdot \frac{5}{3} \simeq 377 \text{ mW}$$

Per evitare che si surriscaldi è opportuno sovradimensionare il resistore, scegliendone uno con potenza nominale doppia o tripla rispetto a quella appena calcolata, perciò $P_n = 1 \text{ W}$. Ricapitolando:

$$R = 2,2 \text{ k}\Omega \quad 5\% \quad 1 \text{ W}$$

Lo stesso risultato si ottiene con il metodo analitico usando la formula 3

$$T_r - T_a = R_T \cdot P_d$$

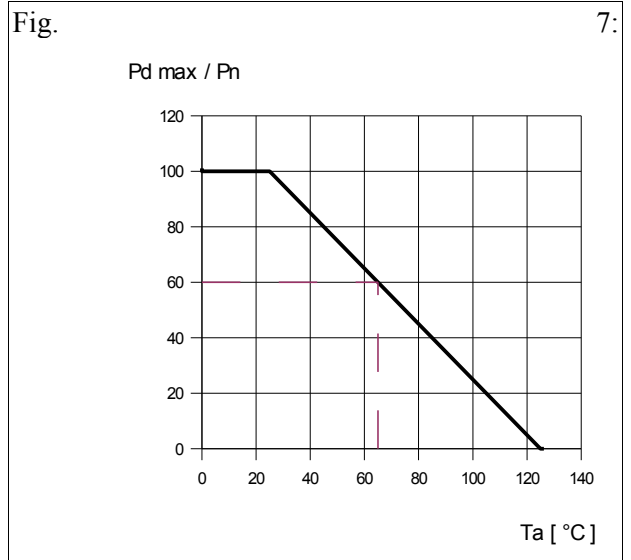
in cui si sostituiscono i dati del problema:

$$125 - 65 = R_T \cdot 0,226 \text{ da cui si ricava } R_T = \frac{60}{0,226} \simeq 265 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

utilizzando il valore di R_T appena determinato, sempre nella formula 3, si può calcolare la potenza nominale

$$125 - 25 = 265 \cdot P_n \text{ da cui si ricava } P_n \simeq 0,377 \text{ W} = 377 \text{ mW}$$

La potenza nominale calcolata corrisponde esattamente a quella determinata con la curva di derating.



VARIAZIONE della RESISTENZA con la TEMPERATURA

Esercizio n° 8 – Un resistore di valore nominale 100Ω a 25°C ha un coefficiente di temperatura $\alpha = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$. Determinare la resistenza che il resistore avrà a 55°C .

Il problema è di semplice soluzione, basta usare la formula

$$R(T) = R(T_0) [1 + \alpha (T - T_0)]$$

Sostituendo i dati dell'esercizio

$$R(T) = 100 [1 + 0,004 (55 - 25)] = 100 [1 + 0,004 (30)] = 100 [1 + 0,12] = 112$$

la resistenza alla temperatura di 55°C sarà $R(55^\circ) = 112 \Omega$

Esercizio n° 9 – Un resistore a filo di valore nominale $18 \text{ k} \Omega$ a 25°C ha un coefficiente di temperatura $\alpha = 20 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$. Determinare la resistenza che il resistore avrà a 75°C .

Al solito si sostituiscono i dati dell'esercizio nella formula, ricordando che quando il coefficiente di temperatura è espresso in ppm (parti per milione) deve essere diviso per un milione o, se si preferisce, moltiplicato per 10^{-6} , come si vede nella formula.

$$R(T) = 18 \cdot 10^3 [1 + 20 \cdot 10^{-6} (75 - 25)] = 18 \cdot 10^3 [1 + 20 \cdot 10^{-6} \cdot 50] = 18 \cdot 10^3 [1 + 1 \cdot 10^{-3}]$$

A questo punto il calcolo può essere completato in due modi:

a) il primo modo è probabilmente quello che verrebbe naturale: svolgere prima la somma all'interno della parentesi quadra e poi la moltiplicazione.

$$R(T) = 18 \cdot 10^3 [1,001] = 18 \cdot 1001$$

se si vuole completare il calcolo senza l'uso della calcolatrice (abitudine che consiglio vivamente di acquisire) si deve effettuare a mente una moltiplicazione a 4 cifre che senza grosse difficoltà porta al risultato.

b) il secondo modo è meno intuitivo ma permette di semplificare i calcoli da effettuare a mente: si svolge direttamente la moltiplicazione e solo successivamente si sommano i due addendi.

$$R(T) = 18 \cdot 10^3 \cdot 1 + 18 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 10^3 + 18$$

è evidente che la somma finale si esegue facilmente, inoltre è evidenziata la variazione assoluta di resistenza di 18Ω dovuta alla variazione di temperatura. Perciò il risultato è

$$R(75^\circ) = 18018 \Omega = 18,018 \text{ k} \Omega$$

Esercizio n° 10 – Ci serve un resistore da 820Ω con buona stabilità in temperatura da montare in un circuito elettronico. Ne troviamo uno che sembra a filo di cui non abbiamo nessuna caratteristica. Come possiamo decidere se fa al caso nostro ?

Dato che la caratteristica richiesta è una buona stabilità in temperatura è necessario conoscere il valore del coefficiente di temperatura α . Di solito questo valore è fornito dal costruttore ma in questo caso non abbiamo a disposizione nessuna caratteristica perciò non resta che determinarlo.

Conviene innanzitutto ricavare l'espressione di α dalla formula usata per il calcolo della $R(T)$

$$R(T) = R(T_0) [1 + \alpha (T - T_0)] \Rightarrow R(T) = R(T_0) + R(T_0) \alpha (T - T_0)$$

$$\Rightarrow R(T) - R(T_0) = R(T_0) \alpha (T - T_0) \Rightarrow \frac{R(T) - R(T_0)}{R(T_0)} = \alpha (T - T_0)$$

e finalmente si ricava l'espressione di α

$$\alpha = \frac{R(T) - R(T_0)}{R(T_0)} \frac{1}{(T - T_0)}$$

da cui si vede che per calcolare il coefficiente di temperatura bisogna disporre di due valori di resistenza a due temperature diverse.

I costruttori di resistori dispongono di ohmetri molto precisi e di formi termostatati, in cui la temperatura è controllata con precisione, noi cercheremo di cavarcela con i mezzi a disposizione in un normale laboratorio. Bisogna innanzitutto procurarsi un ohmetro e un termometro preciso, poi bisogna trovare due locali a temperature il più possibile diverse. In inverno possono andare bene l'interno e l'esterno di un edificio in cui le temperature possono differire anche di qualche decina di gradi.

Si collega l'ohmetro al resistore, si mette il termometro con la parte sensibile vicino al resistore, si aspetta che entrambe le misure, resistenza e temperatura, si siano stabilizzate e si prende nota dei valori. Si ripete la stessa procedura nell'altro ambiente. I valori rilevati sono riportati in tabella.

Sostituendo i risultati delle misure nell'espressione di α

resistenza	temperatura
832,4	21,5 °C
831,4	8,9 °C

$$\alpha = \frac{831,4 - 832,4}{832,4} \frac{1}{(8,9 - 21,5)} \simeq 95,34 \cdot 10^{-6}$$

Se osserviamo che una delle misure di temperatura ha solo due cifre significative non è corretto usarne di più per il valore calcolato di α , perciò il primo arrotondamento porta a

$$\alpha \approx 95 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 95 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}$$

Ad un esame più attento si vede che le misure non sono state eseguite in modo da ridurre al minimo gli errori, ad esempio il termometro non può misurare correttamente la temperatura del resistore dato che la sua punta non riesce ad essere in contatto termico con il resistore, che ha dimensioni paragonabili se non più piccole. Conviene quindi fare un ulteriore arrotondamento e ottenere un valore di più facile utilizzo.

$$\alpha \simeq 100 \frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}}$$

Infine si può concludere che il resistore è sicuramente molto stabile in temperatura.

Esercizio n° 1.1 - Un resistore di potenza nominale $P_n = 3 \text{ W}$ e temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 155 \text{ °C}$, è montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 90 \text{ °C}$. Determinare la potenza massima dissipabile.

[soluzione $P_{D \text{ max}} = 1,5 \text{ W}$]

Esercizio n° 1.2 - Un resistore di potenza nominale $P_n = 6 \text{ W}$ e temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 175 \text{ °C}$, è montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 75 \text{ °C}$. Determinare la potenza massima dissipabile.

[soluzione $P_{D \text{ max}} = 4 \text{ W}$]

Esercizio n° 1.3 - Un resistore di potenza nominale $P_n = 4 \text{ W}$ e temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 185 \text{ °C}$, è montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 45 \text{ °C}$. Determinare la potenza massima dissipabile.

[soluzione $P_{D \text{ max}} = 3,5 \text{ W}$]

Esercizio n° 1.4 - Un resistore a strato metallico di potenza nominale $P_n = 1/3 \text{ W}$ a $T_a = 70 \text{ °C}$ e temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 165 \text{ °C}$, è montato in un'apparecchiatura che funziona in un ambiente a temperatura $T_a = 65 \text{ °C}$. Determinare la potenza massima dissipabile.

[soluzione $P_{D \text{ max}} = 0,33 \text{ W}$]

Esercizio n° 2.1 - Un resistore deve dissipare una potenza di $1,5 \text{ W}$ in un ambiente a temperatura $T_a = 75 \text{ °C}$. Abbiamo a disposizione dei resistori con temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 145 \text{ °C}$. Che potenza nominale dovrà avere ?

[soluzione $P_n = 3 \text{ W}$]

Esercizio n° 2.2 - Un resistore deve dissipare una potenza di $0,8 \text{ W}$ in un ambiente a temperatura $T_a = 45 \text{ °C}$. Abbiamo a disposizione dei resistori con temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 125 \text{ °C}$. Che potenza nominale dovrà avere ?

[soluzione $P_n = 1 \text{ W}$]

Esercizio n° 2.3 - Un resistore deve dissipare una potenza di $1,4 \text{ W}$ in un ambiente a temperatura $T_a = 80 \text{ °C}$. Abbiamo a disposizione dei resistori con temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 135 \text{ °C}$. Che potenza nominale dovrà avere ?

[soluzione $P_n \geq 2,8 \text{ W}$ si sceglie $P_n = 3 \text{ W}$]

Esercizio n° 2.4 - Un resistore deve dissipare una potenza di 300 mW in un ambiente a temperatura $T_a = 50 \text{ °C}$. Abbiamo a disposizione dei resistori con temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 125 \text{ °C}$. Che potenza nominale dovrà avere per non scaldare eccessivamente ?

[soluzione $P_n \geq 0,4 \text{ W}$ si sceglie $P_n = 1 \text{ W}$]

Esercizio n° 2.5 - Un resistore deve dissipare una potenza di 110 mW in un ambiente a temperatura $T_a = 90 \text{ °C}$. Abbiamo a disposizione dei resistori a strato metallico la cui potenza nominale è determinata a 70 °C e con temperatura massima di funzionamento $T_{r \text{ max}} = 170 \text{ °C}$. Che potenza nominale dovrà avere per non scaldare eccessivamente ?

[soluzione $P_n \geq 137,5 \text{ mW}$ si sceglie $P_n = 250 \text{ mW}$]

Esercizio n° 3.1 - Un resistore ha una resistenza di $10\text{ k}\Omega$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$ e un coefficiente di temperatura $\alpha = 0,003\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Che resistenza avrà a $105\text{ }^\circ\text{C}$?

[soluzione $R(105) = 12,4\text{ k}\Omega$]

Esercizio n° 3.2 - Un resistore a strato metallico ha una resistenza di $1000\ \Omega$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$ e un coefficiente di temperatura $\alpha = 100\text{ ppm / }^\circ\text{C}$. Che resistenza avrà quando raggiungerà la temperatura di $T_r = 85\text{ }^\circ\text{C}$?

[soluzione $R(85) = 1006\ \Omega$]

Esercizio n° 4.1 – Calcolare la corrente nominale I_N di un trimmer $R_N = 100\ \Omega$ e $P_N = 1\text{ W}$. Se la temperatura massima di lavoro è $125\text{ }^\circ\text{C}$ quale sarà la corrente nominale in ambiente a $75\text{ }^\circ\text{C}$.

[soluzioni $I_N = 100\text{ mA}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$; $I_N \sim 71\text{ mA}$ a $75\text{ }^\circ\text{C}$]

Esercizio n° 4.2 - Un trimmer ad impasto da $1000\ \Omega$ di potenza $0,4\text{ W}$ è alimentato tra i due terminali esterni con una tensione di 20 V e il cursore è scollegato.

- 1) La potenza dissipata è inferiore a quella nominale ?
- 2) Considerando la temperatura massima di funzionamento di $125\text{ }^\circ\text{C}$ quanto vale la $P_{D\text{ max}}$ in ambiente a $50\text{ }^\circ\text{C}$?

[soluzioni 1) NO; 2) 300 mW]

Esercizio n° 4.3 - Un trimmer ad impasto da $1000\ \Omega$ di potenza $0,4\text{ W}$ è alimentato tra i due terminali esterni con una tensione di 20 V e il cursore è scollegato.

- 3) La potenza dissipata è inferiore a quella nominale ?
- 4) Considerando la temperatura massima di funzionamento di $125\text{ }^\circ\text{C}$ quanto vale la $P_{D\text{ max}}$ in ambiente a $50\text{ }^\circ\text{C}$?

[soluzioni 1) NO; 2) 300 mW]

Indice generale

EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO.....	1
GENERALITÀ.....	1
IMPIANTI A BASSISSIMA TENSIONE.....	4
TENSIONI POTENZIALMENTE PERICOLOSE.....	4
CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEI MATERIALI	6
SUDDIVISIONE MATERIALI.....	6
MATERIALI USATI IN ELETTRONICA.....	6
STRUTTURA DEI METALLI.....	6
LEGHE METALLICHE.....	7
PROPRIETÀ PRINCIPALI DEI MATERIALI.....	7
LEGAMI CHIMICI TRA ATOMI DEI MATERIALI.....	7
<i>Legame metallico</i>	7
<i>Legame ionico</i>	7
<i>Legame covalente</i>	7
MATERIALI ISOLANTI.....	8
PROPRIETÀ ELETTRICHE DEI MATERIALI.....	9
<i>Resistività elettrica (di volume) ρ</i>	9
Dipendenza della resistività dalla temperatura.....	10
<i>Rigidità dielettrica</i>	11
<i>Unità di misura</i>	11
<i>Costante dielettrica relativa</i>	11
RESISTORI.....	13
PROPRIETÀ.....	13
<i>Parametri principali</i>	13
Potenza nominale.....	13
Curva di DERATING.....	15
<i>Parametri secondari</i>	17
Coefficiente di temperatura.....	17
Coefficiente di tensione.....	17
Stabilità.....	18
TECNOLOGIE COSTRUTTIVE.....	19
<i>Parti che costituiscono un resistore</i>	19
<i>L'elemento resistivo</i>	19
<i>Tipi di Resistori</i>	19
<i>Fissi</i>	19
<i>Variabili</i>	19
<i>Supporto isolante</i>	20
<i>Rivestimento di protezione</i>	20
<i>Reofori</i>	21
RESISTORI VARIABILI.....	21
<i>Potenziometri e trimmer</i>	22
NORMALIZZAZIONE DEI VALORI NOMINALI DEI COMPONENTI ELETTRONICI PASSIVI.....	25
CODICE A BANDE.....	28
TERMISTORI.....	30
DIODO A SEMICONDUCTORE.....	32
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	32
CARATTERISTICA TENSIONE-CORRENTE DEL DIODO A SEMICONDUCTORE.....	33
MODELLI DEL DIODO IN COMMUTAZIONE.....	33
TEMPI DI COMMUTAZIONE.....	34
ALTRI TIPI DI DIODI.....	34
CONDENSATORI.....	37
CIRCUITO ELETTRICO EQUIVALENTE DI UN CONDENSATORE REALE.....	38

PARAMETRI CONDENSATORI.....	38
<i>Capacità nominale</i>	38
<i>Tolleranza</i>	38
<i>Tensione di lavoro</i>	38
<i>Coefficiente di temperatura</i>	38
<i>Fattore di perdita</i>	39
<i>Corrente di fuga</i>	39
<i>Corrente di ripple</i>	39
TIPI DI CONDENSATORI.....	39
<i>Condensatori a film plastico</i>	39
Metallizzazione e Autocicatizzazione.....	40
<i>Condensatori ceramici</i>	40
CONDENSATORI A MICA.....	41
CONDENSATORI ELETTROLITICI.....	41
<i>Condensatori elettrolitici in alluminio</i>	41
<i>Condensatori elettrolitici al tantalio</i>	42
CONDENSATORI VARIABILI.....	43
CODICI DI IDENTIFICAZIONE.....	43
FENOMENI TRANSITORI NEI CIRCUITI RC.....	45
TRANSITORIO DI CARICA.....	45
TRANSITORIO DI SCARICA.....	46
NOTA 1 (sulla costante di tempo).....	47
NOTA 2 (sul comportamento di un condensatore in presenza di un gradino di tensione).....	47
NOTA 3 : Equazioni analitiche carica e scarica di un condensatore.....	48
NOTA 4: Equazioni analitiche funzioni esponenziali.....	48
INDUTTORI.....	49
INDUTTORI IN ARIA NON DI POTENZA.....	49
RELÈ.....	51
CARATTERISTICHE DEL RELÈ.....	51
<i>Parametri della bobina</i>	52
<i>Parametri dei contatti</i>	52
TIPI DI RELÈ.....	52
<i>Relè polarizzati</i>	52
<i>Relè ritardati</i>	52
<i>Relè reed</i>	52
ESEMPIO DI DATI TECNICI.....	53
DIODO VOLANO.....	54
TRACCIA PER LA STESURA DI UNA DOCUMENTAZIONE TECNICA.....	55
DIRETTIVA 93/68/CEE DEL 22/7/93 ART.13 ALLEGATO IV.....	55
<i>Controllo interno della fabbricazione</i>	55
<i>Punto 3</i>	55
<i>Nota al punto 3</i>	56
<i>Osservazioni</i>	57
CARATTERISTICHE DA SPECIFICARE PER I COMPONENTI.....	57
RACCOMANDAZIONI/OSSERVAZIONI SULLA STESURA DI UNA RELAZIONE.....	57
TRACCIA PER LA STESURA DELLA RELAZIONE PER IL 3° ANNO.....	58
TRACCIA PER LA REALIZZAZIONE DI UN DISEGNO CON L'USO DI UN CAD.....	60
FASE DI PREPARAZIONE A TAVOLINO.....	60
DISEGNO ELETTRONICO.....	61
SEGNI GRAFICI NORMALIZZATI.....	62
CIRCUITI STAMPATI.....	66
PROGETTO DEL PCB.....	66

LAYOUT E SBROGLIO.....	66
<i>Regole per ottenere un layout corretto</i>	68
<i>Studio dello sbrogliato</i>	69
<i>Regole per tracciare i percorsi</i>	70
DISSIPAZIONE TERMICA.....	71
RESISTENZA TERMICA.....	71
PROCEDIMENTO PER DETERMINARE LA NECESSITA' DEL DISSIPATORE	72
VENTILAZIONE FORZATA.....	74
ESERCIZI	75