

Appunti per il Corso di

**Tecnologia e Progettazione dei Sistemi Elettrici ed
Elettronici**

(classe III – Elettrotecnica ed Elettronica)

Bruno Preite

1. I Materiali Conduttori

I materiali conduttori costituiscono le linee per il trasporto dell'energia elettrica dal generatore all'utilizzatore. Le linee possono avere lunghezza variabile, da pochi centimetri, a centinaia di chilometri. Le linee devono ovviamente essere costituite da materiali conduttori. Analizziamo i principali.

RAME: metallo con struttura cristallina cubica a facce centrate. Simbolo **Cu**

Caratteristiche elettriche e meccaniche

- Ottima conduttività (valore tipico medio di $0,0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ @ 20°C)
- Comportamento termico di tipo PTC
- Scarsa resistenza meccanica:
 - Basso carico di rottura
 - Elevato scorrimento plastico
- Costo piuttosto elevato
- Buona resistenza alla corrosione (unico nemico lo zolfo)

Viene venduto, per applicazioni elettriche, in due forme fisiche:

Rame CRUDO che si distingue per la maggiore resistenza meccanica (si usa nelle linee aeree)

Rame RICOTTO che si distingue per una maggiore flessibilità (si usa nei cavi per connettori)

ALLUMINIO: metallo con struttura cristallina cubica a facce centrate. Simbolo **Al**

Caratteristiche elettriche e meccaniche

- Buon Peso Volumico (circa 1/3 del Cu)
- Resistività più elevata del Cu (valore tipico $0,028 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ @ 20°C)
- Scarsissima resistenza meccanica
- Buona resistenza alla corrosione
- Costo minore del rame

A causa di queste caratteristiche esso viene impiegato nelle linee in **Alta tensione** (132, 220, 380 KV), ma deve essere rinforzato per aumentare la resistenza alla trazione. Così viene trafilato in corde dotate di anima in fili di acciaio.

Altro modo per migliorare la resistenza meccanica è di creare:

LEGHE di ALLUMINIO

Si ottengono aggiungendo altri elementi chimici in dosi di qualche % all'**Al** puro, a fine di migliorarne la resistenza meccanica. Ciò però provoca un aumento della resistività. Fra le leghe di Al ricordiamo la

ALDREY

Lega di Al (dal 97 al 98,5%) con piccole percentuali di Silicio (Si), Magnesio (Mg) e Ferro (Fe). Questa lega è caratterizzata da

- un discreto valore di Conducibilità (resistività di $0,0325 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ @ 20°C)
- buona leggerezza
- buona resistenza alla corrosione
- resistenza meccanica pari al rame

I conduttori in Aldrey sono costituiti da fili di piccola sezione cordati fra loro in numero variabile a seconda della sezione voluta e vengono usati per linee elettriche aeree.

RIASSUMENDO

I campi di applicazione dei vari materiali per conduttori elettrici sono:

- Corde bimetalliche in Al e acciaio per le linee AT
- Corde in Rame o Aldrey per le linee aeree in media e bassa tensione
- Rame per i cavi elettrici in bassa tensione
- Rame per gli avvolgimenti dei motori elettrici e dei trasformatori e Alluminio per le gabbie dei motori

2. I Materiali Isolanti

Un materiale è detto isolante se si oppone in modo efficace al passaggio della corrente elettrica. Dal punto di vista atomico, un materiale ha comportamento isolante quando tutti gli elettroni degli strati più esterni sono caratterizzati da legami chimici stabili, così che l'applicazione di campi elettrici anche molto intensi non sia in grado di spezzare tali legami e non permetta agli elettroni di diventare liberi, cioè in grado di creare correnti elettriche nel materiale stesso.

Il legame chimico più stabile da questo punto di vista è quello *COVALENTE*, dunque i materiali buoni isolanti avranno legami di questo tipo, in cui le molecole sono elettricamente equilibrate e non è possibile la liberazione né di elettroni né di ioni in grado di creare anche deboli conduzioni.

Altra struttura tipica di molti materiali isolanti è quella macromolecolare: le sostanze di questo tipo sono caratterizzate da molecole molto più grandi e pesanti del normale, formate a loro volta da molecole base dette *MONOMERI*. Questi composti sono detti *POLIMERI* e vengono ottenute dai monomeri attraverso lavorazioni chimiche dette reazioni di *POLIMERIZZAZIONE*. Fra questi si devono ricordare le sostanze organiche artificiali (sintetiche) come le *RESINE TERMOPLASTICHE* e *TERMOINDURENTI*, le vernici.

Caratteristiche Elettriche

Resistività di volume

Il compito dell'isolante è quello di separare due o più parti soggette ad una certa differenza di potenziale. Se le parti venissero a contatto fra loro si produrrebbe una scarica molto intensa (corto circuito) nel tentativo (vano) di riequilibrare il potenziale. Tale scarica risulta intensa e quindi altamente distruttiva a causa del fatto che la resistenza di contatto dei due materiali conduttori è piccola (tendente a zero), quindi per la legge di Ohm la corrente tenderà a valori elevatissimi (infinito).

Un ottimo isolante dovrebbe avere *CONDUTTIVITA' NULLA*, *CIOE' RESISTIVITA' INFINITA*. In REALTÀ ciò non è possibile, quindi si considerano isolanti i materiali in cui la resistività ρ è maggiore di $10^{10} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Ciò vuol dire che nell'isolante comunque circolerà una corrente, ma essa sarà debolissima e quindi trascurabile nella maggioranza dei casi. Tale corrente si chiama **CORRENTE di DISPERSIONE I_d** .

Si definisce **RESISTENZA DI ISOLAMENTO R_v** il rapporto

$$R_v = \frac{V}{I_d}$$

Tale resistenza viene calcolata su di un blocchetto (provino) di materiale isolante di lunghezza L e sezione S , quindi per la seconda legge di Ohm:

$$R_v = \frac{\rho_v L}{S}$$

Da cui è possibile ricavare la resistività di volume del materiale:

$$\rho_v = \frac{R_v S}{L} \quad \text{se } L=1 \text{ cm, } S=1 \text{ cm}^2 \text{ (cubetto di 1 cm di lato), l'unità di misura migliore per la } \rho \text{ sarà } \Omega \text{ cm, o}$$

meglio, visti i valori elevati, il **M Ω cm**.

Resistività superficiale

E' un parametro che indica il valore della resistenza presentata da un materiale alla circolazione di corrente sulla sua superficie. Per la sua valutazione si applica una forte ddp fra due puntali posti a contatto della superficie del provino. La presenza di correnti di dispersione superficiali riduce il valore della resistività. Tali correnti risentono della rifinitura superficiale del materiale e, soprattutto, degli eventuali depositi presenti su di esso: polvere, smog, acqua piovana, umidità assorbita, sali ...

In questo modo un buon isolante può peggiorare le proprie caratteristiche di resistività superficiale a causa della sporcizia dovuta all'usura: una corrente di dispersione quindi potrà propagarsi lungo la superficie del materiale, senza interessare le sue parti interne.

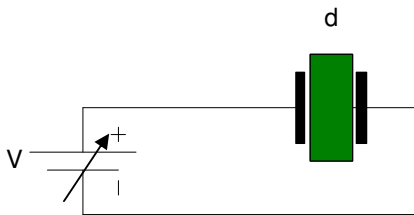
Come si può ovviare praticamente a questo inconveniente?

*Visto che la resistività superficiale cresce al crescere del cammino che deve compiere la corrente di dispersione sulla superficie del materiale, basta creare ad arte cammini lunghi e ciò basterà ad annullare o quasi le correnti superficiali. Per questo motivo, ad esempio, gli isolatori utilizzati nelle linee in alta e media tensione hanno la caratteristica forma **a tazza rovesciata**.*

Rigidità dielettrica

E' un parametro importante perché dal suo valore è possibile stabilire quale deve essere lo spessore minimo che deve avere l'isolante per poter reggere senza rotture una determinata differenza di potenziale.

Misura della rigidità dielettrica



Si sottopone un provino di materiale di spessore d ad una ddp V crescente in modo lineare (qualche centinaio di Volt al secondo), come rappresentato in figura qui a lato.

Ad un certo punto la ddp applicata sarà sufficiente a generare una scarica all'interno dell'isolante, detta **scarica disruptiva**, che danneggia il provino perforandolo. Il campo elettrico che si crea nel provino è dato da

$$E = \frac{V}{d}$$

se al posto di V si pone il valore V_{MAX} che ha provocato la scarica, il rapporto

$E_M = \frac{V_{MAX}}{d}$ rappresenta la **RIGIDITA' DIELETTICA** del materiale considerato.

La sua unità di misura sarà dunque $[KV/mm]$ oppure $[KV/cm]$.

Nota: La tensione di perforazione non aumenta in modo lineare con lo spessore, ad esempio si può avere:

$V_{MAX}=25KV$ per uno spessore di 1 mm

$V_{MAX}=55 KV$ per uno spessore di 3 mm

Di conseguenza si ottengono nei due casi valori di rigidità dielettrica diversi:

$E_{M1}=25/1=25 KV/mm$ e $E_{M2}=55/3=18,33 KV/mm$ rispettivamente.

Per questo motivo si utilizza spesso *l'isolamento stratificato*, cioè si preferisce isolare il conduttore, a parità di spessore, con più strati di isolante sovrapposti, piuttosto che utilizzare un singolo strato.

Riassumendo, questi sono i fattori che possono influenzare il valore della rigidità dielettrica:

Spessore d del provino	vedi la nota sopra
Tipo di Forma d'onda della tensione applicata	per le tensioni alternate la rigidità dielettrica è minore che per le tensioni continue; inoltre la rigidità diminuisce con la frequenza
Temperatura di effettuazione della prova	riduce le qualità isolanti dei materiali
Grado di Umidità dell'isolante	più il tasso di umidità del provino è alto, minore è il valore della rigidità
Forma degli elettrodi utilizzati	l'uniformità del campo elettrico applicato dipende dalla forma degli elettrodi. Vale il cosiddetto "potere delle punte"

3. I Resistori

TIPI DI RESISTENZE E MATERIALI

Le resistenze, impiegate nei circuiti elettronici, a seconda del loro compito specifico, assumono forme esteriori e composizioni costruttive diverse. I simboli normalmente adottati sono due, riportati in *figura 1*. Quello disegnato più in alto è detto "tipo americano", quello più in basso è chiamato "tipo europeo". Il primo dei due è comunque il più usato.

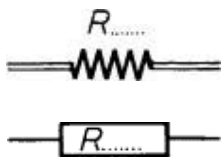


Figura 1 - Simboli elettrici

Normalmente i resistori si presentano in forma di piccoli cilindri, variamente colorati, muniti di due terminali alle estremità, detti **reofori**.

Per la costruzione dei resistori, le varie case produttrici adottano materiali e **metodi di fabbricazione** alquanto diversi. I sistemi più comuni sono quelli dell'**impasto a carbone**, dello **strato di carbone**, dello **strato metallico** e del **filo metallico**.

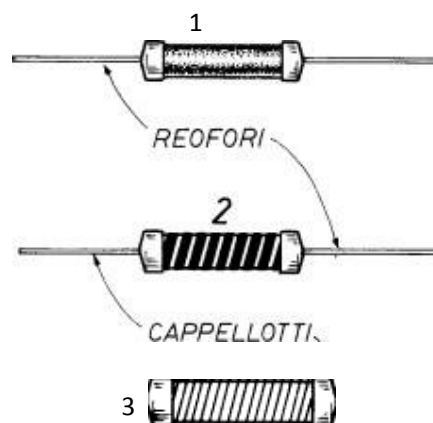
Tali concetti costruttivi valgono per la composizione interna del resistore, ma oltre ciò variano pure i **materiali di rivestimento** isolante esterno, tra i quali ricordiamo la **lacca**, lo **smalto**, le **resine al silicone**, le **resine vetrificate**.

A seconda dei sistemi costruttivi visti, il resistore presenta proprietà leggermente diverse che riassumiamo in tabella.

Tipo	Caratteristiche
Impasto di carbone	buona dissipazione di calore e, conseguentemente, di potenza elettrica.
Strato metallico	permettono di raggiungere tolleranze molto ristrette sul valore nominale; essi sono composti da un supporto isolante sul quale è depositato uno strato metallico.
Filo metallico	Notevole capacità di dispersione termica, usati per dissipare grandi quantità di energia. Sono isolati con smalto, oppure, più spesso, cementati

I resistori ad **impasto di carbone**, assumono dimensioni diverse a seconda della potenza elettrica dissipabile, cioè dell'energia elettrica massima che questi possono trasformare in calore senza subire danni irreversibili. Pertanto, una resistenza dello stesso valore ohmico può assumere dimensioni differenti a seconda del wattaggio. I valori più comuni sono quelli di **2 W - 1 W - 1/2 W - 1/4 W, 1/8 W**. Resistenze con valori superiori ai 2 W sono sicuramente di tipo a filo.

Per rendersi conto della natura di alcuni tipi di resistenze, basta asportare dalla superficie di queste lo strato di vernice che le ricopre. Dopo tale operazione, all'osservatore di solito si possono presentare i tre



modelli riportati in figura 3: la resistenza ad impasto di carbone (1), quella metallizzata (2) o il tipo a filo (3).

Nel primo tipo di resistenza, la percentuale di polvere di carbone, mescolata con adatta sostanza legante, determina il valore resistivo. Il modello metallizzato è composto da un cilindretto di ceramica sul quale è depositata una spirale di metalli vaporizzati. In quello a filo, su un corpo ceramico è avvolto del filo al nichel-cromo; viene impiegato quando si debbono dissipare forti quantità di potenza elettrica, trasformandola in calore.

4. Il Codice dei Colori

Tabella per la lettura del codice dei colori per i RESISTORI

Colore	Cifre Significative	Moltiplicatore	Tolleranza	Coefficiente di temperatura [10 ⁻⁶ /°C]
ARGENTO	-	x 10 ⁻²	± 10%	-
ORO	-	x 10 ⁻¹	± 5%	-
NERO	0	x 1	-	± 250
MARRONE	1	x 10	± 1%	± 100
ROSSO	2	x 10 ²	± 2%	± 50
ARANCIO	3	x 10 ³	-	± 15
GIALLO	4	x 10 ⁴	-	± 25
VERDE	5	x 10 ⁵	± 0,5%	± 20
BLU	6	x 10 ⁶	± 0,25%	± 10
VIOLA	7	x 10 ⁷	± 0,1%	± 5
GRIGIO	8	x 10 ⁸	-	± 1
BIANCO	9	x 10 ⁹	-	-

I resistori vengono commercializzati per serie normalizzate, caratterizzate da tolleranze sempre più strette. Ovviamente una tolleranza ristretta implica un costo più elevato del resistore. Le principali serie sono:

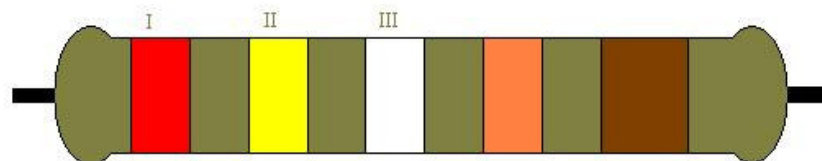
Serie E₆	Tolleranza ±20%
Serie E₁₂	Tolleranza ±10%
Serie E₂₄	Tolleranza ±5% , 2%

Serie E₄₈	Tolleranza $\pm 2\%$
Serie E₉₆	Tolleranza $\pm 1\%$, 2%
Serie E₁₉₂	Tolleranza $\pm 0,5\%$, $\pm 0,25\%$, $\pm 0,1\%$

Si utilizzano i seguenti codici dei colori:

1. **Codice a 4 bande** (2 cifre x moltiplicatore ; Tolleranza)
2. **Codice a 5 bande** (3 cifre x moltiplicatore; Tolleranza)
3. **Codice a 6 bande** (3 cifre x moltiplicatore; Tolleranza; Coefficiente di Temperatura)

Esempio:



ROSSO	GIALLO	BIANCO	ARANCIO	MARRONE
2	4	9	$\times 10^3$	$\pm 1\% = 249 \text{ K}\Omega$

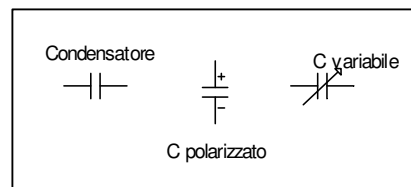
5. I Condensatori

I materiali isolanti vengono utilizzati nella fabbricazione dei Condensatori.

Il condensatore è un bipolo che può essere polarizzato o meno a seconda dei tipi, i cui simboli vengono riportati in figura. Esso è costituito da due parti conduttrici metalliche dette ARMATURE, collegate ciascuna ad un terminale e separate fra loro da un materiale isolante, detto DIELETTRICO.

Il parametro fondamentale che caratterizza il condensatore è il suo valore di capacità C , legato alla carica Q presente sulle sue armature e alla ddp fra di esse dalla relazione:

$$C = \frac{Q}{V}$$



La capacità si misura in Farad (F), quindi un condensatore avrà capacità di 1F se possiede su ciascuna armatura la carica di 1 Coulomb (C), quando è presente fra esse la ddp di 1 volt (V).

La carica si mantiene sulle armature finché è presente la ddp e l'isolante è in grado di separare galvanicamente le armature fra loro. Quando una carica giunge su una delle armature del Condensatore, immediatamente se ne genera una uguale, ma di segno opposto, sull'altra, grazie al fenomeno fisico studiato in elettrostatica (fisica) detto INDUZIONE elettrostatica.

Comportamenti del condensatore

- **Alimentato in continua** il condensatore, al termine di una fase transitoria di carica (le armature diventano sede di cariche elettriche), si comporta come un CIRCUITO APERTO, impedendo dunque la circolazione della corrente elettrica a causa della presenza del dielettrico in serie alle armature.
- **Alimentato in alternata** il condensatore esegue ciclicamente fasi di carica e scarica a causa del fatto che la ddp cambia di valore e di segno con andamento sinusoidale. Le armature invertono la loro polarità ad un ritmo pari alla frequenza della sinusoide e si rende possibile pertanto la circolazione di una corrente attraverso il componente, anch'essa di tipo alternato e della stessa frequenza della tensione applicata.

Grandezze caratteristiche del condensatore

Capacità nominale

È il valore della capacità che identifica il componente. Appartiene ad una serie di valori normalizzati, a seconda della tolleranza, un po' come si è visto per i resistori.

Tolleranza

Esprime il massimo scostamento in segno ed in valore percentuale rispetto al valore nominale che la capacità effettiva del condensatore può avere. Valori tipici sono: $\pm 5\%$, $10\% \pm$

Tensione nominale

E' la massima tensione cui può essere fatto lavorare il componente. Oltre il valore nominale non è più garantita l'integrità, nè tanto meno il funzionamento del componente.

Categoria di temperatura

E' il range termico nel quale è garantito il funzionamento del bipolo. E' bene che sia il più ampio possibile. Valori tipici: -50°/+125°C.

Coefficiente di Temperatura

La capacità varia con la temperatura e questa dipendenza viene indicata in ppm/°C (parti per milione al grado centigrado). Ad esempio un condensatore con TC=P100 vuol dire che presenta un coefficiente termico che vale +100 ppm/°C (P=positive ; N=negative), quindi se il suo valore nominale fosse di 1 Farad, la sua capacità aumenterà di $100 \cdot 10^{-6} = 0,0001$ F per ogni grado. Se l'intervallo di temperatura fosse di 50°C, allora la capacità passerebbe da 1F a 1,005F (aumenterebbe di 5 milliFarad).

Sottomultipli del Farad

Il Farad (F) è una unità di misura che si è rivelata nel corso dei decenni troppo grande nei confronti dei valori di capacità utilizzati in elettrotecnica e in elettronica. Si usano quindi i suoi sottomultipli, in particolare:

Sottomultiplo	Valore	Simbolo	Utilizzo
MilliFarad	10^{-3} Farad = 1/1000 di Farad	mF	Grossi condensatori elettrolitici, ad esempio per motori elettrici o rifasamento...
MicroFarad	10^{-6} Farad = 1 milionesimo di Farad	µF	Capacità per alimentatori, piccoli motori elettrici, filtri audio ...
NanoFarad	10^{-9} Farad = 1 miliardesimo di Farad	nF	Filtri e circuiti elettronici in genere
PicoFarad	10^{-12} Farad = 1 milionesimo di milionesimo di Farad	pF	Circuiti risonanti, circuiti a radio frequenza, capacità parassite ...

Il Condensatore Piano

Il più semplice condensatore che sia possibile costruire è detto condensatore piano ed è costituito da due armature ciascuna di **Area S**, distanziate fra loro da uno **spessore d** di materiale isolante dotato di **costante dielettrica ϵ** .

Si ricorda che $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ dove ϵ_0 rappresenta la costante dielettrica del vuoto (o aria) e vale $8,859 \cdot 10^{-12}$ F/m, mentre ϵ_r è un valore indicativo della sostanza che fa da dielettrico e si trova tabellato sui libri di testo (es. Politene=2,7 ; acqua=80).

La formula per il calcolo della Capacità è :

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

Si deduce da essa che un condensatore è tanto più capace quanto più è grande l'area delle armature e quanto più esse sono vicine fra loro. Inoltre maggiore è il valore di ϵ e più elevata risulterà la capacità.

Tipi di condensatori

Condensatori avvolti

Il dielettrico è carta o altro film plastico, realizzati da due nastri metallici con all'interno il film dielettrico, vengono poi avvolti a formare un cilindretto e incapsulati. I principali dielettrici utilizzati sono: poliestere, polipropilene, teflon, mylar. Possono assumere anche notevoli dimensioni ed elevati valori di capacità (mF). Si usano per rifasare, nell'avviamento dei motori elettrici, nei filtri.

Condensatori in mica o vetro

Il dielettrico è costituito da lamine di mica o di vetro, mentre le armature sono di solito in alluminio. Si può anche spruzzare una vernice a base di Ossido di Argento direttamente sul foglio di mica e creare così le armature. Sono usati a radiofrequenza.

Condensatori ceramici

Il dielettrico è costituito da miscele ceramiche di varia natura, hanno forme variabili, dal disco, alla piastrina, al cilindro ed anche in questo caso le armature sono ottenute per deposizione di leghe di argento sul dielettrico. A seconda del valore della loro costante dielettrica ϵ , sono suddivisi in tre classi (I, II e III). A causa delle loro dimensioni ridotte sono adatti all'impiego in micro elettronica.

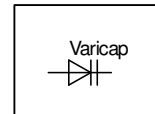
Condensatori elettrolitici

Sono costituiti da due armature (anodo e catodo) con interposto un elettrolita. Quando viene applicata tensione, a causa di fenomeni chimici, l'armatura positiva (anodo) viene a rivestirsi di uno strato di ossido che fa da dielettrico. La maggioranza dei condensatori Elettrolitici è polarizzata, quindi accetta tensioni solo in un senso (l'inversione della tensione distrugge lo strato di ossido rendendo inutilizzabile il condensatore) e devono essere collegati nel circuito prestando attenzione al segno - presente sull'involucro ad indicare il reoforo che funge da catodo. In commercio ci sono anche condensatori Elettrolitici in grado di lavorare anche in alternata; sono di tipo non polarizzato e il loro funzionamento è garantito dal fatto che la loro conformazione a doppio strato di dielettrico fa sì che l'ossido si formi su entrambe le armature.

Le armature sono generalmente costituite da fogli di alluminio o tantalio (migliori), mentre l'elettrolita può essere solido o (purtroppo) anche liquido. Sono usati quando si vogliono ottenere elevati valori di capacità (F) pur mantenendo dimensioni contenute, come nell'elettronica di potenza (raddrizzatori, alimentatori, inverter e gruppi di continuità).

Condensatori variabili

Una particolare categoria di condensatori offre la possibilità di modificare il valore della capacità, di solito variando le dimensioni delle armature, mentre un dispositivo a mezza strada fra la capacità e il diodo è il diodo varicap, usato in elettronica, il cui simbolo è visibile in figura.



6. Materiali per Contatti Elettrici

I contatti elettrici sono presenti in tutti i tipi di **interruttori**, nei contatti striscianti dei motori elettrici (ad es. le spazzole, oppure nelle linee ferroviarie e tranviarie). In questi casi non è tanto la resistività (cioè la resistenza) del materiale con cui è fatto il contatto ad importare¹, quanto più altri parametri che andiamo ad elencare di seguito.

- **Elevata resistenza all'ossidazione** – l'ossido infatti fa crescere il valore della resistenza di contatto
- **Elevata durezza dei materiali di contatto** – per ridurre al massimo l'usura delle parti striscianti o la deformazione dei contatti a causa delle forze in gioco
- **Bassa resistenza di contatto** – in quanto la corrente passa solo nei punti di effettivo contatto fra le parti, che di solito hanno sezione molto limitata. E' quindi importante che queste zone abbiano resistenze particolarmente contenute.
- **Alta conduttività termica** – poiché nelle parti soggette a contatto o a strisciamento si genera per attrito o per arco (vedi più avanti) una grande quantità di calore, che deve essere dissipata, pena la fusione dei contatti.
- **Elevata resistenza all'arco elettrico** – l'arco è un fenomeno fisico di ionizzazione dell'aria in prossimità del contatto, che fa nascere una scarica elettrica o semplicemente scintillio fra i contatti, elevando localmente la temperatura.
- **Elevata temperatura di fusione** – le parti che compongono il contatto devono poter reggere temperature di esercizio elevate, senza generare incollamenti fra i contatti o, peggio, la loro fusione.

I materiali più utilizzati nei contatti elettrici sono:

- **ORO, ARGENTO e PLATINO** (detti metalli nobili), che sono chimicamente poco reattivi, duri, con elevato punto di fusione e bassissimo valore di resistività. Sono però molto costosi, pertanto il loro impiego è soltanto quello di rivestimento, oppure si utilizzano come **micro-conduttori nei circuiti integrati**.
- **LEGHE DI METALLI NOBILI** (oro-nichel, platino-iridio, argento-rame), che migliorano la durezza a scapito della resistività e riducono i costi.
- **MISCUGLI di METALLI e NON METALLI** ottenuti per **SINTERIZZAZIONE** (processo che aggrega sostanze eterogenee in modo da ottenere manufatti di forma desiderata) caratterizzati da buona durezza, elevato punto di fusione e scarsa tendenza agli incollaggi grazie alla capacità di auto-lubrificazione del materiale (ad es. la miscela Ag+grafite)
- **TUNGSTENO** (simbolo chimico W), che viene usato per contatti caratterizzati da frequenti archi voltaici, come ad esempio negli elettrodi delle candele per motori a scoppio.

¹ Infatti per ridurre la resistenza di contatto, di solito, è sufficiente aumentare la superficie su cui il contatto avviene, oppure la sezione del conduttore impiegato.

- **GRAFITE**, che non è altro che carbonio (C), utilizzata nei contatti striscianti (spazzole) dei motori elettrici a collettore. Caratterizzata da scarsa durezza (così non si rovina il collettore) e da un buon valore di resistività. Ovviamente si usura con facilità; per questo le spazzole vengono periodicamente sostituite.

7. Materiali e Tecniche per la Saldatura

Le tecniche di saldatura usate nei circuiti elettronici sono:

- **Saldatura per fusione** – si scaldano i punti da saldare e si cola il materiale (della stessa natura) saldante fuso
- **Saldatura per pressione** – le parti da saldare vengono scaldate fino a diventare pastose e poi pressate le une contro le altre
- **Brasatura** – le parti vengono saldate per capillarità, ovvero per infiltrazione del materiale fuso fra le parti da unire
- **Saldatura a ultrasuoni** – utilizzata nella saldatura dei micro conduttori dei C.I., dove non si può intervenire con la tecnica a pressione

Per le saldature manuali si usa il **saldatore**, mentre per la saldatura industriale delle schede si utilizzano macchinari per la **saldatura a onda**.

Materiali per la saldatura

a) FLUSSANTE

Poiché le superfici da saldare possono risultare ossidate, occorre eliminare l'ossido appena prima della saldatura mediante l'operazione detta di decappaggio. Si usano sostanze che reagiscono a caldo con le parti da saldare, deossidandole e pulendole (eliminando depositi untuosi). Molte volte il fluxante è contenuto nella lega saldante utilizzata.

b) LEGHE PER SALDATURE

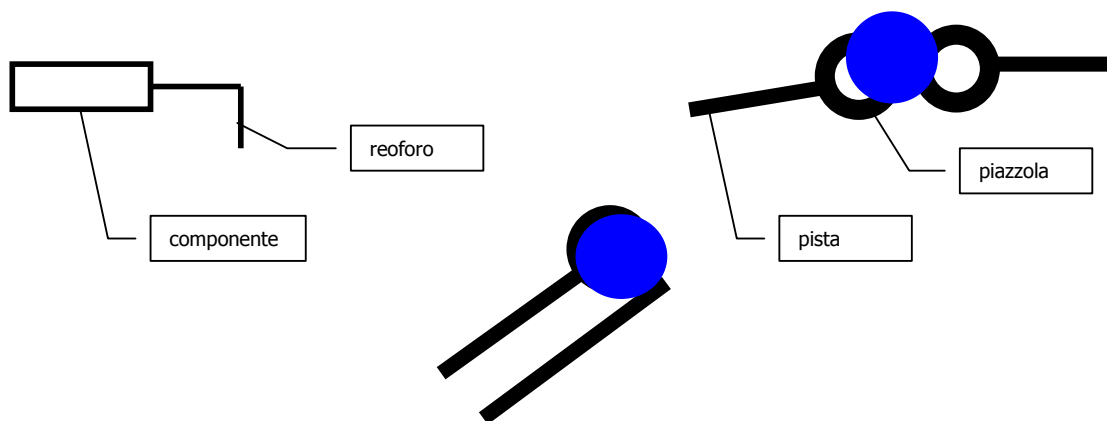
Si utilizzano leghe Stagno-Piombo (Sn-Pb), di solito nel rapporto Sn=63% e Pb=37% (lega eutettica, che fonde a 183 °C). Si possono poi utilizzare leghe a più basso punto di fusione per saldare componenti delicati come i Circuiti integrati, che potrebbero danneggiarsi a causa dell'eccessiva temperatura. Si noti però che di solito più che la temperatura di saldatura, ai fini del danneggiamento del C.I. conta il tempo di durata della saldatura².

Difetti delle saldature manuali

Una buona saldatura assume forma conica con il reoforo verticale, una cattiva saldatura può creare guai del tipo:

- La quantità di **Sn** è eccessiva e si ottiene una saldatura in cui lo **Sn** esce dalla piazzola e può cortocircuitare due piste adiacenti
- La saldatura è fredda a causa della temperatura insufficiente, quindi le parti risultano saldate male o non saldate proprio
- Il reoforo del componente si è incurvato e va a toccare una pista adiacente

Due saldature vicine, a causa del troppo Sn si fondono insieme creando un corto circuito fra le piste



² Quindi nella saldatura manuale occorre sempre lavorare con saldatore caldo alla giusta temperatura (es. 250°C), in modo che il processo di saldatura sia rapido e non stressi il componente saldato.

8. Prime nozioni sul Diodo e sul BJT

a. Conduttori e Semiconduttori

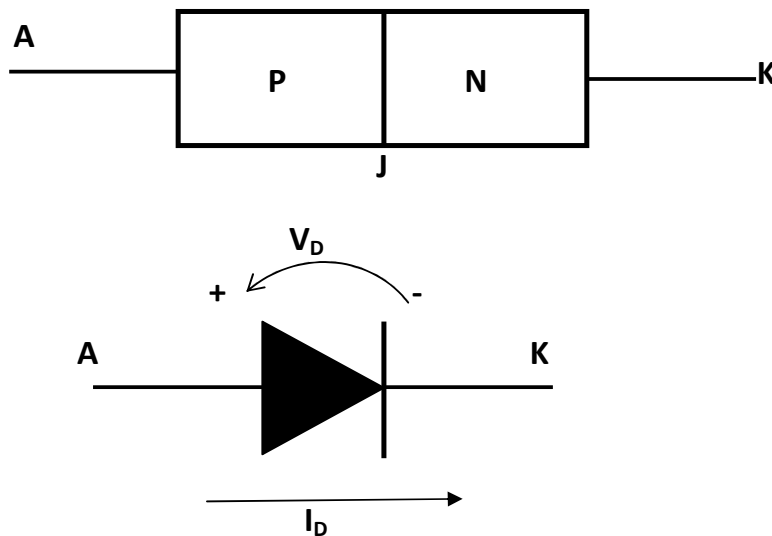
Abbiamo già studiato le proprietà salienti dei materiali conduttori, materiali che rivestono una importanza fondamentale nel settore elettrico – elettronico. Accanto ai conduttori esistono anche i semiconduttori che sono essenziali ed insostituibili nella realizzazione dei componenti elettronici. Il semiconduttore per eccellenza è il **SILICIO (Si)**. Esso è un materiale che, allo stato puro (*silicio intrinseco*), è un isolante, ma mediante un processo chimico – fisico può vedere modificata la sua conducibilità in modo controllato.

Si dice che può essere “**DROGATO**” di tipo **N**, arricchendolo, in qualche modo, di cariche negative (**SILICIO tipo N**) o può essere drogato di tipo **P**, arricchendolo di cariche positive (**LACUNE**), ottenendo così il **silicio di tipo P**.

Ed è proprio la **GIUNZIONE** di silicio P e silicio N che consente di realizzare il componente fondamentale dell'elettronica: **il DIODO a semiconduttore**.

b. Il Diodo

Esso è realizzato unendo del SILICIO P con SILICIO N ottenendo così una **GIUNZIONE PN**. È della GIUNZIONE proprio la zona di transizione (**J**) tra le due aree di diverso drogaggio (osservare la figura).

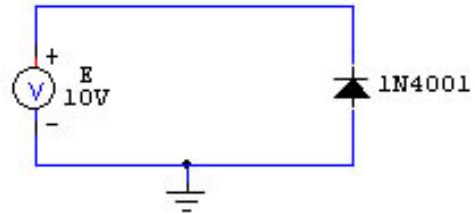
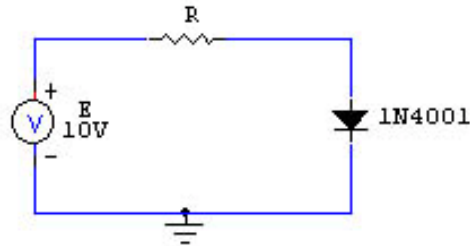


La zona P è chiamata **ANODO (A)** del diodo, mentre la zona N è detta **CATODO (K)**. Alle due estremità vengono effettuati dei depositi metallici per il collegamento dei reofori. La figura riporta anche il simbolo circuitale del diodo al silicio con l'indicazione di corrente (**I_D**) e tensione (**V_D**) di cui ora si parlerà.

Si osservi che la corrente I_D può scorrere solo dall'Anodo verso il Catodo e non al contrario. Il diodo è un componente **UNIDIREZIONALE**. Esso conduce solo da A verso K e **SOLO SE $V_D = V_{AK}$ è POSITIVA** (*Anodo positivo rispetto al Catodo*). Ma non basta, non solo deve essere $V_D > 0$ ma deve anche (V_D) essere superiore ad una **TENSIONE DI SOGLIA** che per il silicio (a 25°C) vale **$V_\gamma = 0.7V$** .

Se $V_D < V_\gamma$ o comunque negativa allora il diodo **NON CONDUCE** (*si dice che è INTERDETTO*) e si comporta come un **CIRCUITO APERTO**. In verità scorre una piccolissima corrente inversa dell'ordine dei μA (studiando gli amplificatori scoprirete che anche questa piccola corrente può essere dannosa!).

In definitiva se $V_D > V_\gamma$ allora il diodo è **POLARIZZATO DIRETTAMENTE** e conduce (**DIODO ON**); se $V_D < V_\gamma$ allora è polarizzato **INVERSAMENTE** e non conduce (**DIODO OFF**). Nella figura seguente si possono vedere le due situazioni circuitali appena descritte.



Polarizzazione diretta, $V_D > V_\gamma$ e corrente nel diodo calcolabile come

$$I_D = \frac{E - V_\gamma}{R}$$

Polarizzazione inversa, $V_D < V_\gamma$ e corrente nel diodo $I_D = 0$

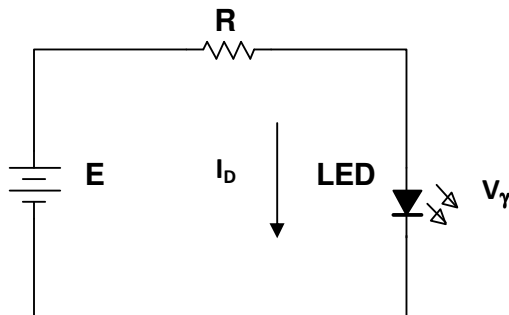
Quindi se il diodo è in polarizzazione diretta può esser sostituito da un semplice generatore di tensione V_γ con la polarità positiva all'anodo e quella negativa al catodo. Fatta la sostituzione il circuito è facilmente risolvibile.

Se invece il diodo è in polarizzazione inversa esso è assimilabile ad un circuito aperto e quindi non vi circola corrente.

c. Diodo LED

Usando come materiale semiconduttore **l'Arseniuro di Gallio (GaAs)** si realizzano i diodi **LED (Light Emitting Diode)** cioè dei diodi che, se polarizzati direttamente, emettono una radiazione visibile o infrarossa. Con appositi filtri, inseriti nel contenitore (**CASE**) del diodo (che sarà trasparente), la radiazione emessa può essere ottenuta di vari colori (*rossa, gialla, verde, blu, bianca*). I diodi LED presentano una V_γ intorno ai **2V** e, per funzionare correttamente, necessitano di una corrente di circa **10mA** (comunque non superiore a 20mA). I diodi LED non possono essere usati in polarizzazione inversa in quanto si danneggiano per tensioni inverse superiori ai 3V.

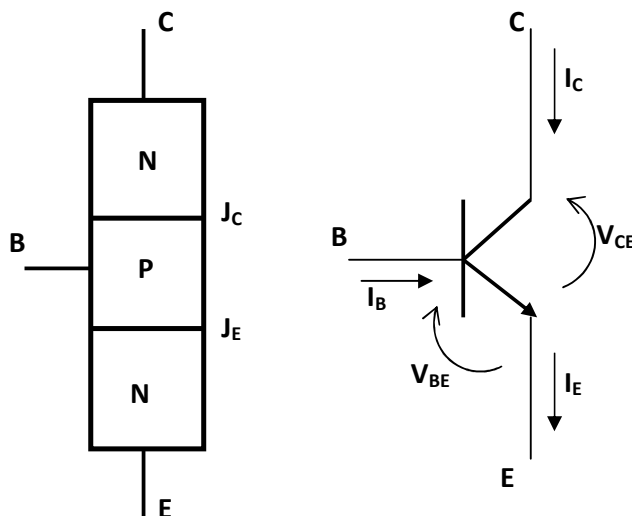
Ecco un esempio di progetto della polarizzazione di un diodo LED. Se uso $E=9V$, dovendo essere $I_D=10mA$ si ha che



$$R = \frac{E - V_\gamma}{I_D} = \frac{9 - 2}{10} = 0.7k\Omega$$

d. Il BJT

Il transistor bipolare o **BJT** (*Bipolar Junction Transistor*) è un dispositivo elettronico a tre terminali denominati **EMETTITORE (E)**, **BASE (B)** e **COLLETTORE (C)**. Tali terminali corrispondono a tre precise aree di semiconduttore che possono essere **NPN** e **PNP**, quindi zone drogate in modo alternato. Tutto ciò dà luogo a due distinti tipi di **BJT** (*BJT NPN e BJT PNP*) che, sostanzialmente, differiscono per le polarità di alimentazione. Le tre aree di drogaggio danno luogo a due distinte giunzioni: la J_C , ovvero la giunzione **COLLETTORE – BASE** e la J_E , ovvero quella **BASE – EMETTITORE**. Nella figura seguente si può osservare la struttura teorica di un **BJT NPN** ed il suo simbolo elettrico (accanto). Il BJT è un dispositivo controllato in corrente. Nel



dettaglio: polarizzando **DIRETTAMENTE** la giunzione **BASE – EMETTITORE** si ha la nascita di una corrente di base I_B , tale corrente richiamerà una corrente di collettore I_C che è molto maggiore della I_B ed è legata a quest'ultima da un fattore di amplificazione h_{FE} (*fattore di amplificazione della corrente di base o GUADAGNO in CORRENTE*). La I_E (*corrente di EMETTITORE*) sarà sempre pari a $I_B + I_C$.

Il BJT presenta due modalità di funzionamento. Può funzionare come amplificatore e si dice che lavora nella **ZONA ATTIVA** dove il rapporto I_C/I_B rimane costante e pari a h_{FE} . Tale funzionamento non viene trattato in questi appunti. Altrimenti il BJT può funzionare come **INTERRUTTORE**: in tale caso si può trovare in **INTERDIZIONE**, ovvero *interruttore APERTO*, o in **SATURAZIONE**, ovvero *interruttore CHIUSO*. Questo funzionamento è quello che ci interessa.

- **STATO ON (SATURAZIONE)**

In tale situazione è necessario che la giunzione **BASE – EMETTITORE** venga **polarizzata direttamente**, quindi deve essere $V_{BE} > V_{BEY} = 0.7V$ (come il diodo). Ma non basta, è anche necessario che per la corrente di base valga la seguente condizione

$$I_B > \frac{I_C}{h_{FE}}$$

Per quanto riguarda la tensione tra **COLLETTORE ed EMETTITORE (V_{CE})**, in saturazione di ha $V_{CE} \cong 0.2V$ (*interruttore chiuso*).

- **STATO OFF (INTERDIZIONE)**

Per interdire il BJT si deve avere $V_{BE} < V_{BEY} = 0.7V$. In genere si fa in modo che sia $V_{BE} = 0$. In tale caso si ha che $I_B = 0$ e, di conseguenza, $I_C = 0$. L'interruttore è aperto.

Un esempio può chiarire quanto detto. Voglio fare accendere un LED posto sul circuito di collettore di un BJT. Lo schema può essere il seguente. Supponiamo che $V_{CC}=12V$ e $V_1=5V$.

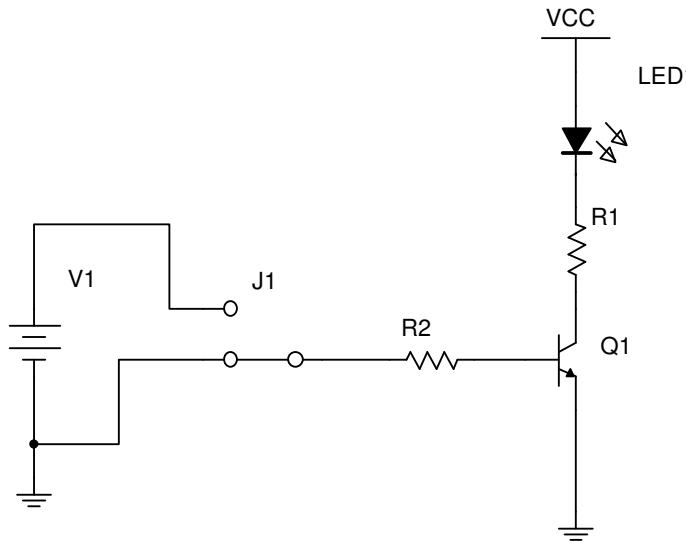
Inoltre è noto che $h_{FE}=100$. Dovendo funzionare il LED deve essere $I_{LED}=I_C=10mA$, quindi si scriverà

$V_{CC} = V_\gamma + R_1 I_C + V_{CE}$, ma con il BJT ON (saturazione) si ha $V_{CE}=0.2V$ e quindi

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_\gamma - V_{CE}}{I_C} \text{ da cui}$$

$$R_1 = \frac{12 - 2 - 0.2}{10} = 0.98k\Omega$$

Per il circuito di ingresso si deve considerare l'interruttore **J1** posizionato sul positivo di



V1, in tale modo la giunzione BASE – EMETTITORE sarà polarizzata direttamente. Quindi nella resistenza **R2** circolerà la corrente di base che, per la condizione di saturazione deve essere

$$I_B > \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{10mA}{100} = 0.1mA . \text{ Allora si scriverà } R_2 = \frac{V_1 - V_{BE\gamma}}{I_B} = \frac{5 - 0.7}{0.1} = 47k\Omega . \text{ Ovviamente}$$

conviene scegliere un valore più piccolo e va bene $39k\Omega$.

Se poi l'interruttore J1 è collegato a massa si ha $I_B=0$, il BJT è OFF (interdizione), quindi $I_C=0$ e il LED è spento.

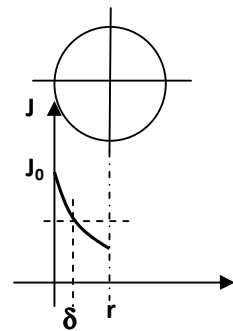
Appendice A

Approfondimento sui materiali conduttori: “L’effetto pelle”

Può sembrare ovvio che i conduttori conducano la corrente continua e la corrente alternata allo stesso modo, ma non è così. Nei materiali conduttori si manifesta un particolare fenomeno fisico, detto “**effetto pelle**”, per cui si ha un aumento della resistenza chilometrica all’aumentare della frequenza. Tale fenomeno è legato al fatto che, al crescere della frequenza, la corrente tende a scorrere sempre più solo sulla superficie e quasi per niente all’interno del conduttore.

Tale fenomeno si spiega perché la zona interna del conduttore è quella in cui si ha un maggiore addensarsi del flusso magnetico dovuto alla corrente. Quindi in tale zona si manifesta un effetto di carattere induttivo, con una impedenza che cresce all’aumentare della frequenza. La superficie, invece, essendo poco toccata dal flusso magnetico, presenta una resistenza pressoché costante a tutte le frequenze. In definitiva, a frequenze elevate, la corrente scorre solo sulla superficie e quasi per niente all’interno; ecco che la resistenza complessiva tende a crescere all’aumentare della frequenza stessa. Il fenomeno, come si vedrà, non è visibile alla frequenza di rete, ma può diventare significativo da qualche decina di chilohertz in su.

Consideriamo un conduttore di **rame** di sezione circolare di raggio r . Sia J_0 la densità di corrente superficiale. Se osserviamo la figura a lato si può scrivere $J = J_0 e^{-\frac{r}{\delta}}$ dove δ è la profondità di penetrazione. Tale parametro è lo spessore, misurato partendo dalla superficie, in corrispondenza del quale la densità di corrente si è ridotta del 30% rispetto a quella superficiale, a causa dell’aumento della frequenza della corrente.



Il valore della profondità di penetrazione è un parametro legato al tipo di conduttore, alle sue caratteristiche resistive, alle sue caratteristiche magnetiche e, ovviamente, alla frequenza di lavoro. La formula per il suo

calcolo è $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0 f}}$ dove $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ (permeabilità magnetica del vuoto).

Ora se consideriamo un conduttore di rame (a 20°C) osserviamo che, a **f=50Hz**, la profondità di penetrazione è circa **9,42mm**; mentre, alla **f=1MHz** essa vale circa **67μm**.

Quindi a frequenze elevate è inutile usare conduttori pieni, ma la parte interna può anche essere vuota. Mentre è bene ricoprire la superficie del conduttore con un deposito di argento per abbassare la resistività superficiale.

Un'altra utile espressione, legata all'effetto pelle, è quella che, per un conduttore a sezione circolare di diametro **d**, consente di collegare la *resistenza chilometrica in alternata* (**R_{AC}**) con quella in *continua* (**R_{DC}**).

L'espressione è la seguente $R_{AC} = \frac{d^2}{4} \frac{1}{\delta(d-\delta)} R_{DC}$.

Un esempio. *Un conduttore di rame (a 20°C) presenta un diametro **d=3mm**. A quale frequenza la sua resistenza chilometrica in alternata sarà raddoppiata rispetto a quella in continua?*

Possiamo scrivere $\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{d^2}{4} \frac{1}{\delta(d-\delta)} = 2$ da cui $\delta = \frac{6 \pm 3\sqrt{2}}{4}$. Chiaramente la

soluzione con il segno *più* è da scartare perché la profondità di penetrazione sarebbe superiore alla sezione. Quindi

$\delta = \frac{6 - 3\sqrt{2}}{4} \cong 0,439 \text{mm}$. Ora dalla relazione $\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0 f}}$ si ottiene

$$f = \frac{\rho}{\delta^2 \pi \mu_0} = \frac{0,0175 \cdot 10^{-6}}{(0,439 \cdot 10^{-3})^2 \pi 4 \pi 10^{-7}} \cong 23 \text{kHz}.$$

Appendice B

Il dimensionamento dei cavi elettrici

Dimensionare un cavo elettrico vuol dire determinare la corretta sezione di un conduttore in base alla intensità di corrente di esercizio che dovrà sostenere.

La sezione ottimale di un conduttore elettrico può essere determinata:

- a) In base alla massima perdita di potenza elettrica tollerabile, compatibilmente con la massima temperatura di esercizio sostenibile dal cavo e con lo scopo fondamentale di mantenere il più possibile elevato il rendimento elettrico dell'intero sistema.
- b) In base alla massima caduta di tensione tollerabile sul cavo. Si osservi che, la caduta di tensione sulla linea di alimentazione produrrà una riduzione della tensione di alimentazione dei carichi con conseguente rischio di malfunzionamento o danneggiamento dei dispositivi.

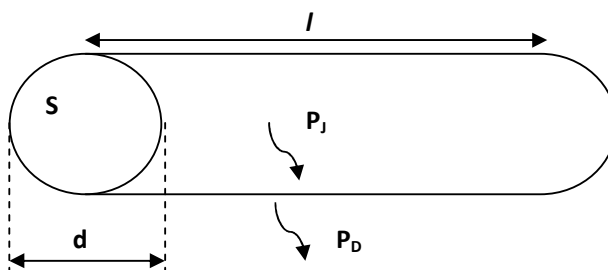
In ogni caso la sezione calcolata è solo teorica e va poi calata nelle sezioni dei cavi disponibili in commercio.

Parlando di cavi elettrici è bene ricordare quali sono le loro tipologie:

- CAVI PER BASSE FREQUENZE, si tratta di cavi in rame "**ricotto**" a conduttore pieno o in treccia di fili; in genere sono isolati con guaina in PVC;
- CAVI PER ALTE FREQUENZE, si tratta di cavi coassiali con conduttore centrale in rame argentato (vedere Appendice A sull'**effetto pelle**) ricoperto da un isolante in TEFLON. Sopra l'isolante si ha una calza schermante in rame ricoperta da una guaina in PVC;
- CAVI PER ALTE E ALTISSIME TENSIONI (o per il trasporto dell'energia elettrica), sono tipicamente delle corde di alluminio intrecciate con un'anima d'acciaio. Talvolta al posto dell'alluminio puro si usa la lega Aldrey (vedi capitolo sui **conduttori**) per aumentare la resistenza meccanica.

Dimensionamento con il metodo del BILANCIO TERMICO

È noto che un conduttore percorso da corrente si riscalda per effetto Joule e raggiunge la “**temperatura di regime**” T_{\max} alla quale la potenza dissipata (P_J) uguaglia quella ceduta all’ambiente (P_D). Ora consideriamo un conduttore cilindrico lungo l e di sezione S .



Se è percorso da una corrente I si ha $P_J = RI^2 = \rho \frac{l}{S} I^2$. Mentre per quella scambiata con l’ambiente $P_D = \lambda A \Delta T$, dove

- λ è il coefficiente di conducibilità termica dell’ambiente espresso in $W/m^2 \cdot ^\circ C$ [per l’aria $\lambda=15 W/m^2 \cdot ^\circ C$]
- A è l’area di scambio termico del conduttore, ovvero la superficie esterna, quindi $A=\pi d l$.
- ΔT è la differenza di temperatura tra il conduttore e ambiente.

Adesso basta imporre $P_J = P_D$ ovvero $\rho \frac{l}{\pi \frac{d^2}{4}} I^2 = \lambda \pi d l \Delta T$. Da tale

equazione si ricava $d = \sqrt[3]{\frac{4 \rho I^2}{\pi^2 \lambda \Delta T}}$.

Un esempio. *Un conduttore di rame lungo $l=100m$ deve essere percorso da una corrente $I=20A$. Sapendo che la temperatura di funzionamento del cavo non può superare i $55^\circ C$ si calcoli la sezione ottimale.*

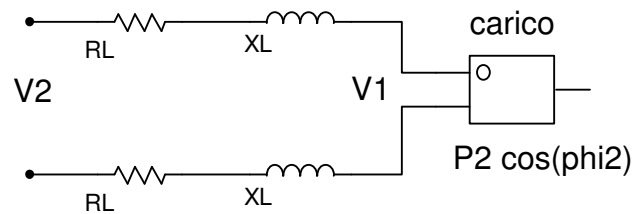
Si calcola subito la resistività $\rho = \rho_{20}(1 + \alpha \Delta T) = 0.0175(1 + 0.0039 \cdot 35) = 0.0199 \Omega mm^2/m = 0.0199 \cdot 10^{-6} \Omega m^2/m$.

Sostituendo $d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0.0199 \cdot 10^{-6} \cdot 400}{\pi^2 15 \cdot 35}} \cong 1.8 mm$.

Dimensionamento con il metodo della MASSIMA CADUTA DI TENSIONE

Questo metodo è utilizzato per le linee di alimentazione in Media e Alta Tensione, in particolare in presenza di elementi reattivi.

Una linea con due conduttori si supponga alimentare un carico con una tensione V_2 , una potenza P_2 e fattore di potenza $\cos\varphi_2$. Ogni conduttore sarà caratterizzato da una resistenza R_L e una reattanza X_L .



La caduta di tensione industriale sulla linea può essere approssimata come $\Delta V = m(R_L I \cos\varphi_2 + X_L I \sin\varphi_2)$ dove $m=2$, per i sistemi monofase, mentre $m = \sqrt{3}$, per i sistemi trifase.

Ora nel caso di linea monofase con $\cos\varphi_2=1$ si ha $\Delta V = 2(R_L I)$ con $R_L = \rho \frac{l}{S}$. Quindi si ha $\Delta V = 2\rho \frac{l}{S} I$ da cui $S = \frac{2\rho l I}{\Delta V}$.

In genere ΔV è dato in forma percentuale $\Delta V\%$ nella misura del 4%, per le linee di alimentazione delle utenze civili, e, del 6%, per quelle industriali. Quindi $\Delta V = \frac{\Delta V\% \cdot V_2}{100}$.

Dimensionamento con il metodo della MASSIMA PERDITA DI POTENZA

È utilizzato per il dimensionamento dei conduttori per le linee di trasporto dell'energia elettrica. Il dimensionamento viene effettuato imponendo una perdita di potenza P_p contenuta entro il 2-4% di quella trasportata.

Sapendo che le perdite in linea si esprimono come $P_p = nRI^2$ dove "n" è il numero dei conduttori, $R = \rho \frac{l}{S}$ e

- $I = \frac{P}{V}$ per le linee in corrente continua
- $I = \frac{P}{V \cos \varphi}$ per le linee in corrente alternata monofase
- $I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \varphi}$ per le linee in corrente alternata trifase

sostituendo si ha

- $S = \frac{n\rho l P^2}{P_p V^2}$ per le linee in corrente continua
- $S = \frac{n\rho l P^2}{P_p V^2 \cos^2 \varphi}$ per le linee in corrente alternata monofase
- $S = \frac{n\rho l P^2}{3P_p V^2 \cos^2 \varphi}$ per le linee in corrente alternata trifase

In tali espressioni **P** è la potenza da trasportare e **V** è la tensione nominale di linea.

Tabella sintetica per le sezioni minime dei conduttori di fase, neutro e di protezione negli impianti delle civili abitazioni

Sezione fase e neutro [mm ²]	Servizio
1,5	Per l'alimentazione di singoli apparecchi di illuminazione o singole prese a spina inferiori a 16A
2,5	Per l'alimentazione di singole prese a spina da 16A o per più prese a spina inferiori a 16A
4	Per la dorsale secondaria che alimenta utilizzatori fissi o più prese a spina da 16A o per la cucina
6	Per la dorsale principale

Sezione di fase (SF) [mm ²]	Sezione conduttore di protezione (PE)
≤16	SF
16÷35	16
>35	SF/2