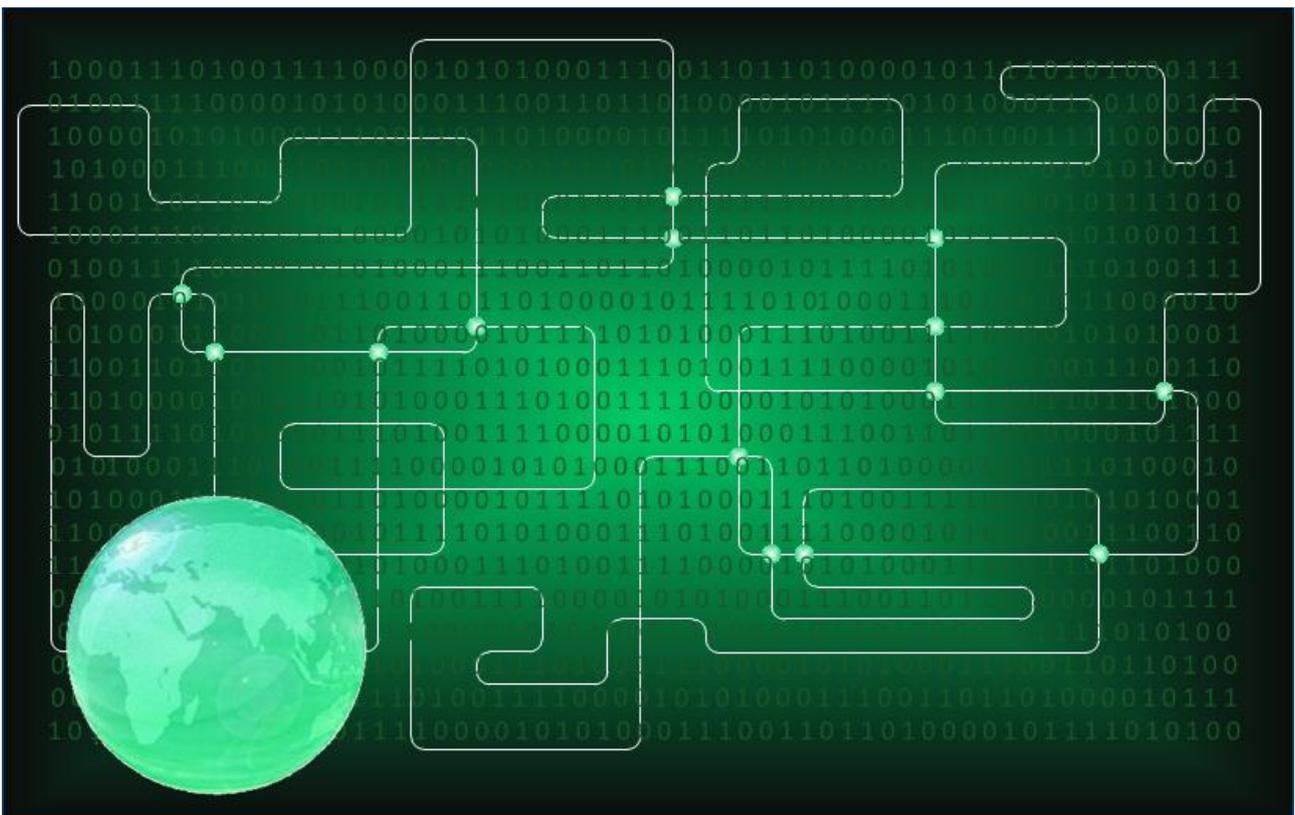


Tecla Spelgatti

Elettrotecnica elettronica e automazione

per la classe 4°

Istituto Tecnico dei Trasporti Aerei – conduzione del mezzo



Dispositivi e macchine elettriche, cenni di elettronica, impianto elettrico
di bordo degli aeromobili



Questo testo è distribuito con licenza Common Creative:
<http://creativecommons.org/licenses/>



CC BY-NC-ND Attribuzione - Non commerciale - Non opere derivate

E' permesso scaricare l'opera e condividerla con altri, ma non modificarla ne utilizzarla, interamente o in parte, per scopi commerciali.



PARTE I: la produzione di energia elettrica

1. INTRODUZIONE ALLE MACCHINE ELETTRICHE

La **CORRENTE ELETTRICA** è la fonte di energia di numerosi dispositivi: computer, frigoriferi, telefoni e lampade sono solo alcuni esempi delle moltissime apparecchiature che fanno uso dell'elettricità per funzionare.

L'elettricità è una scoperta recente anche se i primi studi sull'attrazione tra cariche di segno opposto risalgono all'antica Grecia, in particolare ad un filosofo di nome Talete il quale aveva scoperto che se un pezzo di ambra, una resina fossile, veniva strofinata con un panno di lana diventava capace di attirare i capelli. In greco la parola ambra si dice **ELEKTRON** e da quella parola sono stati tratti il termine elettrone e il termine elettricità che oggi utilizziamo.



Le scoperte di Talete rimasero però senza applicazione pratica. A quel tempo non si vedeva l'utilità della costruzione di macchine che potessero semplificare il lavoro dell'uomo: erano infatti disponibili numerosi schiavi che lavoravano gratuitamente e gli studiosi preferivano dedicarsi a faccende più teoriche.

Gli studi sull'elettricità cominciarono in maniera massiccia durante il diciassettesimo secolo. Nel 1745 venne creato il primo condensatore, chiamato **BOTTIGLIA DI LEIDA**. La scoperta fu casuale e non si trattava certo dei condensatori che conosciamo oggi: era una vera e propria bottiglia di vetro, capace di accumulare delle cariche al suo interno.

Nel 1752 Franklin scoprì che l'elettricità e il fulmine avevano la stessa natura.

Il primo strumento in grado di creare una differenza di potenziale costante, che come sappiamo crea una corrente elettrica come conseguenza, fu la **PILA DI VOLTA**, costruita appunto da Alessandro Volta.

La pila era in grado di trasformare energia chimica in energia elettrica, ma aveva un difetto: si scaricava rapidamente e una volta consumata era necessario utilizzarne un'altra.

Lo scienziato che gettò le basi per la creazione del primo vero e proprio generatore elettrico fu Michael Faraday. Faraday nel 1830 costruì il primo generatore elettromagnetico, ma è passato alla storia per un altro esperimento, più pittoresco di un generatore: la **GABBIA DI FARADAY**. Una lastra o un rete di metallo sono in grado di proteggere le persone che stanno all'interno da scariche elettriche esterne, poiché le cariche si dispongono sulla superficie esterna e non riescono a penetrare dentro alla gabbia. Questo è il motivo per cui i passeggeri di un aereo o di un'automobile non muoiono se il mezzo di trasporto viene colpito da un fulmine. Faraday stesso sperimentò questo fenomeno entrando in una gabbia di metallo e

facendola colpire da scariche elettriche. Da allora ogni apparecchio di metallo che protegge gli oggetti o le persone all'interno dalle scariche elettriche viene chiamato gabbia di Faraday.

Nel 1877 Thomas Alva Edison inventò la **LAMPADINA AD INCANDESCENZA** e negli anni successivi diede il via alla realizzazione negli Stati Uniti delle prime centrali elettriche che producevano **CORRENTE CONTINUA**.

Nikola Tesla fu il primo a proporre di utilizzare la **CORRENTE ALTERNATA** al posto di quella continua poiché garantiva la possibilità di utilizzare alte tensioni e quindi di poter essere trasportata più lontano con meno perdite.

Oggi tutti i paesi producono e utilizzano corrente alternata, principalmente trifase, cioè con tre correnti che viaggiano insieme, sfasate ognuna di 120° .

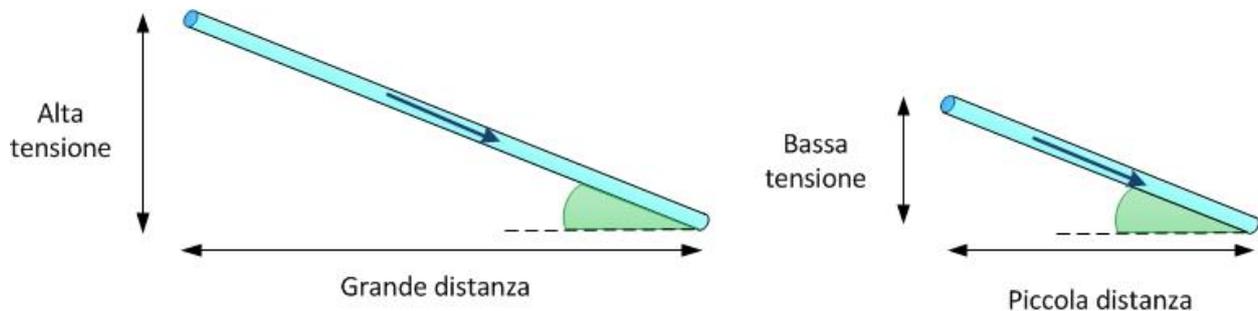
1.1. *Corrente continua e corrente alternata*

Sappiamo dai corsi precedenti che nel paragone fluidodinamico la differenza di potenziale può essere vista come una differenza di altezza e la corrente elettrica come un flusso d'acqua.

Utilizziamo questo paragone per capire la differenza tra i due tipi di corrente.

Possiamo paragonare l'intensità di corrente alla velocità con cui l'acqua scorre nel tubo. Questa velocità dipende dall'inclinazione.

Possiamo invece paragonare la tensione alla quota.



Se la tensione è alta, a parità di corrente (cioè di inclinazione) l'elettricità arriverà più lontano.

La corrente alternata consente di utilizzare tensioni più alte perché il suo valore medio è nullo. Se facessimo lo stesso con la corrente continua (che non si annulla mai) bruceremmo i fili.

Per capire questo concetto possiamo servirci di un paragone. Consideriamo un calorifero e la fiamma di un accendino. La superficie del calorifero ha una temperatura di 60°C mentre la fiamma ha una temperatura di 600°C .

Se mettiamo una mano sul calorifero e la teniamo ferma dopo alcuni secondi cominciamo a sentire troppo caldo e se non vogliamo bruciarci dobbiamo toglierla.

Se invece facciamo passare il dito sulla fiamma velocemente, non sentiamo alcun calore. Possiamo continuare ad agitare il dito sulla fiamma per un tempo indeterminato.

Come è possibile che la fiamma a 600°C non ci bruci mentre lo fa un calorifero a 60°C ?

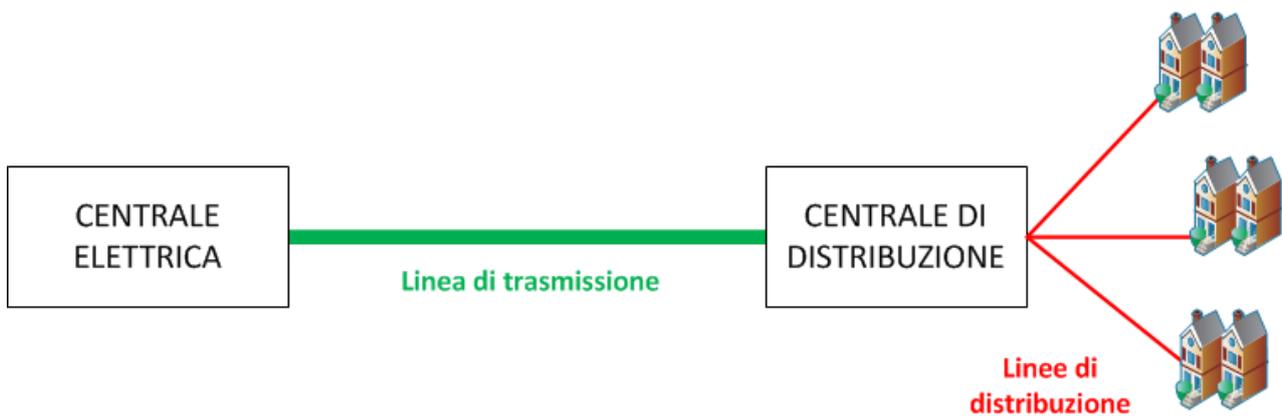
La risposta sta nel fatto che non conta solo il calore trasmesso, ma anche il tempo. Il dito rimane sulla fiamma per una frazione di secondo mentre la mano sta sul calorifero continuamente.

Allo stesso modo la corrente alternata, pur essendo a più alto voltaggio, non brucia i fili.

La corrente alternata viene definita ad alta tensione al di sopra dei 30000 V mentre in elettronica, che utilizza solo corrente continua, si dice che la tensione è alta al di sopra del 300 V.

Dunque, **LA CORRENTE ALTERNATA GRAZIE AL FATTO CHE IL SUO VALORE MEDIO È NULLO CONSENTE DI AVERE TENSIONI MOLTO ELEVATE**, potendo quindi trasportare la corrente per tratte più lunghe, con minori perdite.

L'energia, prodotta nella centrale, viene immessa nei cavi delle **LINEE DI TRASMISSIONE** (che sono molto lunghe e hanno cavi spessi) affinché dalla centrale possa giungere fino alle città. Una volta arrivata alle porte della città la tensione viene abbassata per motivi di sicurezza e immessa nelle **LINEE DI DISTRIBUZIONE** (che sono più corte e hanno cavi più sottili) per essere distribuita alle varie utenze (case, scuole, uffici, industrie).



1.2. La potenza assorbita

A parità di potenza, se la tensione è alta la corrente è bassa. La formula della potenza elettrica è infatti:

$$p = v \cdot i$$

La tensione e la corrente sono cioè inversamente proporzionali.

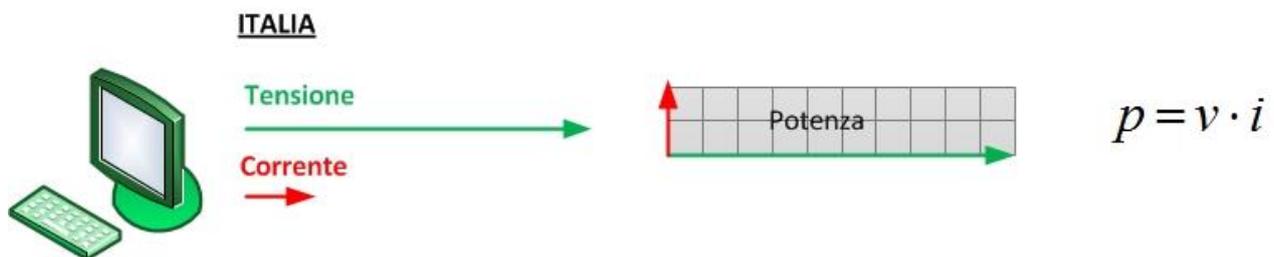
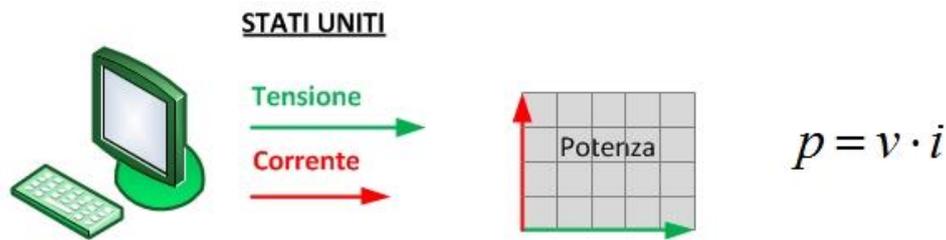
I dispositivi elettrici che abbiamo in casa richiedono per funzionare una certa potenza, cioè una certa tensione moltiplicata per la corrente. In Italia la corrente elettrica è distribuita con una tensione efficace di 220-240 V (è ammesso uno scarto di 20 V) mentre negli Stati Uniti è distribuita con una tensione di 110-120 V. Un dispositivo che si trova a funzionare negli Stati Uniti assorbirà quindi il doppio della corrente che assorbirebbe se fosse collegato in Italia.

Questo però non significa che i costi siano minori o maggiori negli Stati Uniti. Infatti quello che si paga è il consumo di potenza e questa risulta dalla moltiplicazione della tensione e della corrente quindi la potenza assorbita non cambia nei due casi.

Il consumo di potenza è espresso in kiloWatt/ora:

$$[p] = \frac{kW}{h} = \frac{1000 W}{h}$$

Un dispositivo che riporta sulla confezione una potenza di 1500 W consuma 1,5 kW in un'ora.



Nelle nostre case ci sono moltissimi dispositivi elettrici ed elettronici, che devono essere collegati ad una presa di corrente per funzionare.

Possiamo dividere i dispositivi in due grandi categorie:

- Gli elettrodomestici di grande potenza, che assorbono potenze di parecchie centinaia di Watt. Sono ad esempio il frigorifero, la lavatrice, il forno, il phon per capelli, l'aspirapolvere.
- I dispositivi a bassa potenza, come le lampadine, i televisori e le radio, i computer, i telefoni, e tutti quei dispositivi che assorbono potenze di qualche decina di Watt.

1.3. Gli standard elettrici

Ogni stato distribuisce la corrente elettrica con una propria tensione e una propria frequenza e fa uso di prese elettriche di forma particolare. L'insieme delle caratteristiche della corrente distribuita per uso civile e degli apparecchi che la devono utilizzare è chiamato **STANDARD ELETTRICO**. Ogni paese ha un suo standard elettrico e quindi è necessario usare degli adattatori per far funzionare un'apparecchiatura che è stata progettata per uno standard diverso.

Esistono 4 caratteristiche da tenere in considerazione:

- Tipo di corrente distribuita, ad esempio monofase o trifase
- Tensione di distribuzione
- Frequenza di distribuzione
- Tipo di presa utilizzata: nell'unione europea sono accettati come standard i seguenti 4 tipi di prese (prese a marchio CEE)



In Italia la corrente per uso domestico è trifase, a 220 V, con una frequenza di 50 Hz.

1.4. *La produzione di energia elettrica: le centrali*

Per capire come creare energia elettrica è necessario partire da quella che può essere considerata la legge fondamentale della natura: **NULLA SI CREA E NULLA SI DISTRUGGE, MA TUTTO SI TRASFORMA.**

Questo significa che per ottenere energia elettrica è necessario partire da altra energia, che verrà trasformata per diventare un flusso di elettroni.

Il concetto di energia è forse uno di più complessi della fisica. La definizione, all'apparenza non è difficile: **ENERGIA È CIÒ CHE CONSENTE DI SVOLGERE UN LAVORO.** In questo senso, l'energia equivale al lavoro.

Ma cosa è in pratica l'energia? A questa domanda non c'è una risposta univoca. Il flusso di elettroni in un conduttore è energia, il movimento del pistone di un motore è energia, l'acqua che scende nelle condotte forzate di una centrale idroelettrica è energia.

E cos'è il lavoro? Se queste due grandezze hanno la stessa unità di misura e quindi sono la stessa cosa, perché è necessario usare due nomi diversi?

L'energia può essere vista come un qualcosa che potrebbe trasformarsi in lavoro, ma ancora non lo è. Invece il lavoro può essere visto come dell'energia che è diventata lavoro.

E' la stessa differenza che c'è tra l'uovo e la gallina. L'uovo potenzialmente è una gallina (non lo è ancora ma può diventarlo) così come l'energia è potenzialmente un lavoro.

La gallina è un pulcino che ha sviluppato le sue potenzialità ed è diventato gallina, così come il lavoro è un'energia che si è trasformata in qualcosa di concreto.

1.3.1. *Energia meccanica ed energia elettrica*

Le due grandi forme di energia che vengono utilizzate dagli essere umani sono l'energia meccanica e l'energia elettrica. Analizziamole per capire quali sono i vantaggi dell'una e dell'altra.

- L'**ENERGIA MECCANICA** è l'energia legata al movimento e può essere di due tipi, rotatoria o alternata; è la prima forma di energia ad essere stata utilizzata per compiere lavoro in quanto intuitiva e facile da sfruttare utilizzando ingranaggi, cuscinetti, ecc.

Il problema dell'energia meccanica è il trasporto. Come dice la parola stessa, l'energia meccanica si basa sul movimento e quindi, per trasportarla, bisogna mantenere in moto dei dispositivi. Un altro

inconveniente di questo tipo di energia è la dimensione delle macchine che la generano e la trasportano.

Il vantaggio dei dispositivi che utilizzano energia meccanica è che sono molto affidabili e si rompono difficilmente.

- **L'ENERGIA ELETTRICA** presenta due grandi vantaggi rispetto agli altri tipi di energia: è facilmente trasportabile su grandi distanze senza troppe perdite e la dimensione dei dispositivi necessari per il suo utilizzo è modesta in relazione alla potenza utilizzata.

Per contro non è facile immagazzinarla, se non con delle pile, che però danno una riserva di energia limitata. La corrente prodotta nelle centrali deve infatti essere utilizzata subito.

Inoltre i dispositivi che utilizzano corrente elettrica sono meno affidabili dei loro corrispondenti dispositivi meccanici. Ad esempio, le automobili degli anni 60, che erano tutte meccaniche, funzionavano per decine di anni; molte macchine di quell'epoca sono state rottamate non perché erano rotte, ma perché consumavano troppo o non potevano più circolare perché erano troppo inquinanti. Invece le automobili moderne hanno una durata di massimo dieci anni e comunque dopo 5-6 anni cominciano a dare problemi nelle parti elettriche.

1.3.2. Trasformazione dell'energia nelle centrali

Il dispositivo che crea l'energia elettrica si chiama alternatore. E' una macchina, di cui studieremo il funzionamento nel prossimo capitolo, che prende in ingresso del moto rotatorio (deve cioè essere fatto girare) e da in uscita una corrente elettrica alternata:



Il problema sta quindi nel trovare qualcosa che metta in moto l'alternatore, qualcosa che lo faccia girare. Per questo scopo è possibile utilizzare diversi dispositivi:

- Un **MOTORE A SCOPPIO**, simile a quelli delle automobili. Questo tipo di soluzione è adottata nei gruppi elettrogeni, usati nei luoghi in cui non è possibile collegarsi alla rete elettrica, come nei raduni che si svolgono nei prati, in piena campagna. In questo caso la fonte di energia primaria è chimica, cioè l'energia contenuta nel combustibile



- Una **TURBINA**. La turbina è un dispositivo molto utilizzato, anche in accoppiamento con altri, tanto che tutti i dispositivi che funzionano insieme ad una turbina vengono chiamati turbomacchine.

La turbina è simile, come principio di funzionamento, ad un mulino. E' in grado di dare in uscita del moto rotatorio, proprio come un motore a scoppio, ma a differenza del motore non prende l'energia dal combustibile, ma da un fluido (acqua o gas) che contiene molta energia e che, spingendo sulle palette della turbina, la mette in moto. Una turbina può funzionare grazie al vapore, che è un fluido molto caldo, oppure grazie a dell'acqua che scorre a grande velocità. In ogni caso, è necessario che il fluido possieda un'energia elevata per vincere l'inerzia delle palette della turbina e gli attriti che la farebbero fermare.



La turbina viene utilizzata in tutte le centrali elettriche.

A questo punto il problema si è spostato a monte della turbina. La domanda infatti è: da dove arriva il fluido con molta energia?

La risposta a questa domanda stabilisce il tipo di centrale elettrica con cui abbiamo a che fare:

- **CENTRALE IDROELETTRICA:** il fluido è acqua che scende velocemente lungo delle tubazioni, chiamate condotte forzate, partendo da un bacino di raccolta in montagna.
- **CENTRALE TERMOELETTRICA:** il fluido è vapore che si crea partendo da acqua liquida fatta scorrere in tubi che passano dentro ad una caldaia. Nella caldaia viene bruciato qualcosa (carbone, combustibile, metano) per mantenere alta la temperatura e far evaporare l'acqua all'interno dei tubi.
- **CENTRALE EOLICA:** la turbina è sostituita dalle pale del mulino a vento e quindi il fluido in questione è aria.
- **CENTRALE NUCLEARE:** il fluido è acqua evaporata. Il calore per far avvenire il passaggio di stato è fornito da una reazione di fissione nucleare. Il nucleo di un atomo di uranio viene spezzato in due parti; questo processo libera una piccola quantità di energia. Se si moltiplica questa energia per tutti gli atomi di uranio contenuti in una barra la quantità totale di energia diventa notevole.

Il processo di produzione dell'energia elettrica può quindi essere schematizzato in questo modo:



La seguente tabella riporta i vantaggi e gli svantaggi dei vari tipi di centrale:

| TIPO DI CENTRALE | VANTAGGI | SVANTAGGI |
|------------------|---|---|
| IDROELETTRICA | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Fonte di energia totalmente rinnovabile e pulita ➤ Bassi costi ➤ Possibilità di variare rapidamente la quantità di energia prodotta | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Possono essere installate solo in corrispondenza di fiumi montani ➤ Alterano pesantemente il paesaggio ➤ Riducono la portata dei fiumi alterando gli equilibri ambientali |
| TERMOELETTRICA | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Può essere installata ovunque ➤ Alta efficienza: produce grandi quantità di energia (GW) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Producono grandi quantità di elementi inquinanti |
| NUCLEARE | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Elevatissima potenza prodotta in poco spazio ➤ Inquinamento ambientale diretto (emissione di fumi) molto ridotto ➤ Possibilità di essere installate ovunque | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Rischio di incidenti gravissimi qualora le norme di sicurezza non fossero rigidamente rispettate ➤ Impossibilità di smaltire le scorie radioattive (che vengono solo conservate ad oltranza) |
| EOLICA | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Bassissimi costi di costruzione ➤ Fonte di energia totalmente rinnovabile | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Bassa efficienza (25%) ➤ Grande impatto ambientale (è necessario montare moltissime pale) ➤ Occupano una vastissima superficie ➤ Variano le correnti atmosferiche e possono creare modificazioni nel clima |

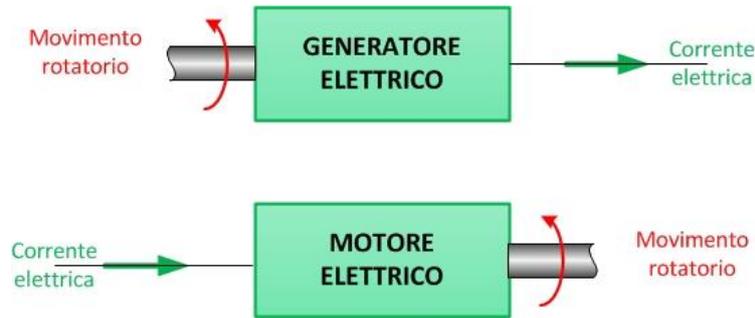
1.5. *Motori e generatori*

Finora abbiamo parlato di come si genera corrente elettrica, senza soffermarci su come è fatto l'alternatore. Questo dispositivo è proprio l'elemento attivo della produzione elettrica poiché realizza la trasformazione da movimento a corrente elettrica.

Prima di capire cosa c'è al suo interno è bene soffermarsi a considerare la macchina nel suo insieme.

Le macchine elettriche si dividono in due grandi categorie:

- Macchine che forniscono energia elettrica a partire dal movimento. Queste macchine vengono genericamente chiamate **GENERATORI ELETTRICI**.
- Macchine che forniscono movimento a partire da energia elettrica. Queste macchine vengono genericamente chiamate **MOTORI ELETTRICI**.



1.6. Il principio di funzionamento delle macchine elettriche

Il principio fisico su cui si basa il funzionamento delle macchine elettriche è quello dell'induzione elettromagnetica: **UNA CARICA ELETTRICA CHE SI MUOVE LUNGO UN FILO GENERA ATTORNO A SE UN CAMPO MAGNETICO CHE INTERAGISCE CON ALTRI CAMPI MAGNETICI EVENTUALMENTE PRESENTI.**

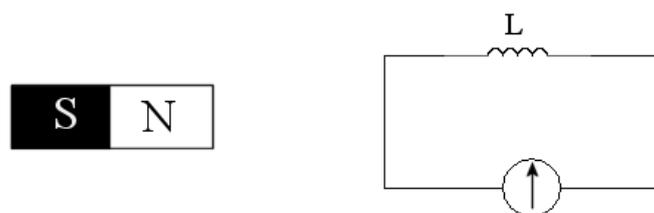
Abbiamo già visto tutto questo nei corsi precedenti, quando abbiamo parlato dell'induttore. Quello che però non abbiamo visto è cosa succede se l'induttore è posto nelle vicinanze di un campo magnetico, ad esempio di un magnete.

Vogliamo quindi capire che relazione esiste tra:

- un **CAMPO MAGNETICO**, che indichiamo con la lettera \vec{B} ;
- la **CORRENTE ELETTRICA** che scorre in una spira;
- il **MOVIMENTO** del magnete o della spira.

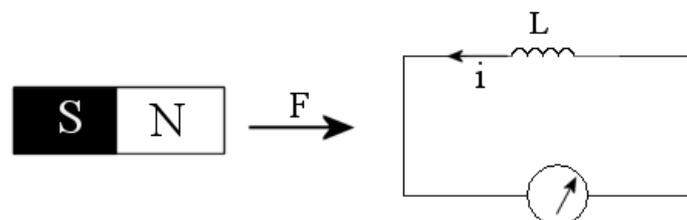
Immaginiamo di prendere una bobina e collegarla ad un amperometro che ci dica quanto vale la corrente che scorre nella bobina.

Immaginiamo poi che vicino a questo circuito ci sia un magnete.



Se il magnete e il circuito sono fermi, cioè non c'è movimento relativo tra i due, l'amperometro segna una corrente nulla nel circuito. Cioè nella bobina non scorre corrente.

Ora facciamo avvicinare il magnete, sottoponendolo ad una forza.



Ora l'amperometro segna una corrente diversa da zero. Nella bobina passa corrente, più precisamente passa una **CORRENTE ALTERNATA**.

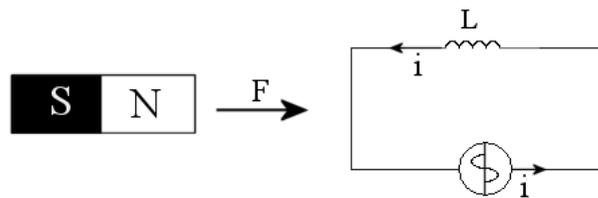
Questo fenomeno è dovuto all'induzione elettromagnetica che abbiamo visto nel capitolo precedente: la corrente nel circuito è prodotta dalla variazione del campo magnetico prodotto dalla calamita.

ATTENZIONE: È NECESSARIO CHE CI SIA UNA VARIAZIONE DI CAMPO MAGNETICO! Se il campo è costante non nasce alcuna corrente.

La domanda a cui ora dobbiamo rispondere è la seguente: se la calamita, per sua natura, genera un campo magnetico costante, che cosa ha prodotto la variazione del campo magnetico?

Sappiamo che un chiodo viene attratto da un magnete con una forza che cambia in base alla distanza: più il chiodo è vicino alla calamita e più la forza magnetica è intensa. E' proprio **LA VARIAZIONE DELLA DISTANZA TRA IL MAGNETE E IL CIRCUITO** che **GENERA UNA VARIAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO** e quindi fa sì che nella bobina scorra una corrente elettrica.

Ora immaginiamo di sostituire all'amperometro un generatore di corrente alternata e vediamo cosa succede al magnete.



In questo caso il magnete viene attratto da una forza F e tende ad avvicinarsi al circuito.

Naturalmente, non è solo il magnete ad essere attratto dalla bobina: per il principio di azione e reazione la bobina è attratta dal magnete.

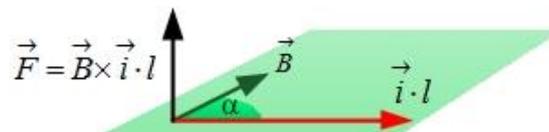
Dunque possiamo affermare che esiste una legge che lega il campo magnetico, la corrente e il movimento.

UN CONDUTTORE ATTRAVERSATO DA CORRENTE ELETTRICA VARIABILE, IMMERSO IN UN CAMPO MAGNETICO, SUBISCE UNA FORZA PARI A:

$$\vec{F}_L = \vec{B} \times \vec{i}l$$

Si tratta di un prodotto vettoriale tra il vettore campo magnetico \vec{B} e il vettore corrente elettrica \vec{i} moltiplicato per la lunghezza del filo in cui scorre la corrente.

Il prodotto vettoriale dà come risultato un nuovo vettore, perpendicolare al piano che contiene i primi due:



Il modulo della forza che mette in moto la spira (o il magnete) è dato dalla formula seguente:

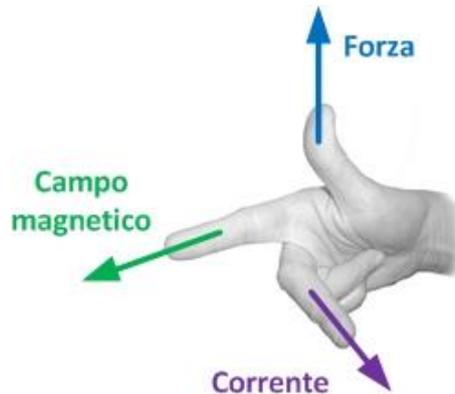
$$F = B \cdot i \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Dove α è l'angolo compreso tra i due vettori.

Per capire il verso della forza è necessario usare la cosiddetta regola della mano destra.

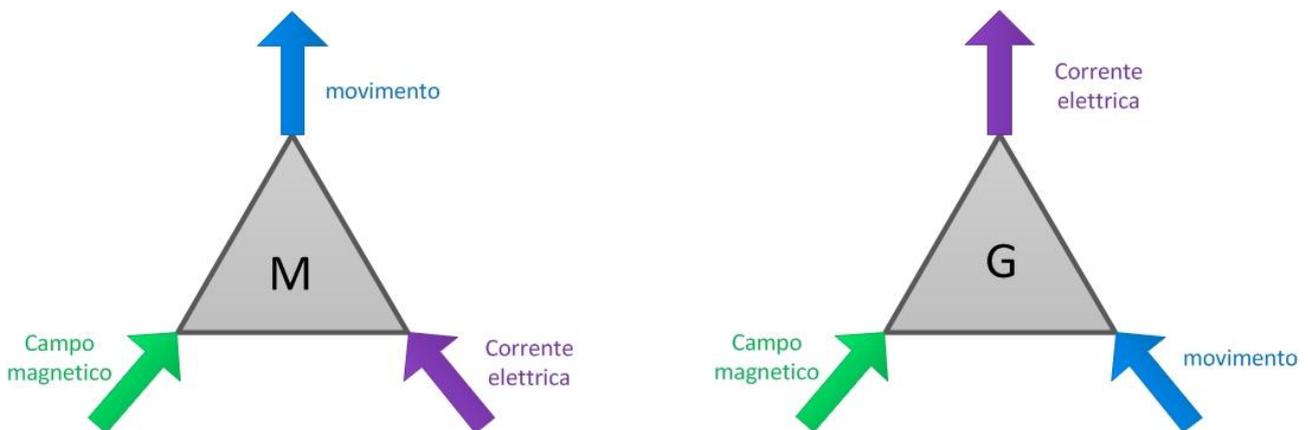
Questa regola è molto utilizzata in diversi settori della scienza perché è di facile memorizzazione.

Per utilizzare la regola della mano destra è necessario mettere l'indice (naturalmente della mano destra) lungo la direzione e il verso del **campo magnetico** \vec{B} ; il medio invece deve essere allineato con la direzione e il verso di percorrenza della **corrente** \vec{i} . La direzione della **forza** \vec{F} , e di conseguenza la direzione del moto della spira, è un vettore che ha la direzione il verso del pollice.



Questa regola fa capire che affinché la spira di prima possa ruotare, la corrente in essa deve scorrere perpendicolarmente alla direzione del campo magnetico, cioè deve uscire (o entrare) dal piano del foglio.

Possiamo riassumere quanto visto finora dicendo che **ESISTE UN MUTUO LEGAME TRA IL CAMPO MAGNETICO \vec{B} , LA FORZA CHE AGISCE SU UNA SPIRA E LA CORRENTE CHE SCORRE IN ESSA**. In particolare, dati due di questi tre elementi è possibile ottenere il terzo:



UN MOTORE ELETTRICO È UN DISPOSITIVO CHE, TRAMITE UN CAMPO MAGNETICO VARIABILE, RICEVENDO IN INGRESSO CORRENTE ELETTRICA PRODUCE MOTO ROTATORIO.

UN GENERATORE ELETTRICO È UN DISPOSITIVO CHE, TRAMITE UN CAMPO MAGNETICO VARIABILE, RICEVENDO IN INGRESSO DEL MOTO ROTATORIO PRODUCE CORRENTE ELETTRICA.

2. I Generatori

In questo capitolo analizzeremo i generatori elettrici e nel prossimo studieremo i motori.

Vedremo tre tipi di generatori elettrici:

- Generatori di tensione elettrica: le **BATTERIE**.
- Generatori di corrente elettrica alternata che chiameremo **GENERATORI AC** (Alternate Current)
- Generatori di corrente elettrica continua che chiameremo **GENERATORI DC** (Direct Current)

2.1. Le batterie

Le batterie, chiamate anche pile, sono dei dispositivi in grado di convertire energia chimica in energia elettrica, sotto forma di differenza di potenziale, e rilasciarla quando richiesto, dando origine ad una corrente elettrica.

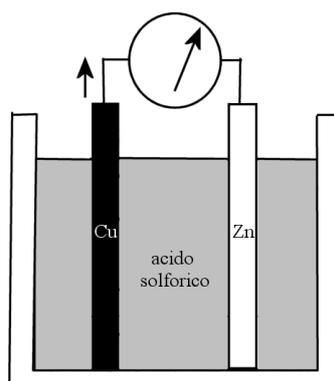
Le batterie sono costituite da celle, cioè da unità fondamentali in grado di immagazzinare carica.

Le celle si dividono in due gruppi:

- **CELLE PRIMARIE** (primary cell o batterie): una volta scaricata, non può più essere ricaricata poiché i componenti chimici che si trovano al suo interno si sono consumati.
- **CELLE SECONDARIE** (secondary cell o accumulatori): una volta scaricata può essere ricaricata fornendole corrente elettrica.

2.1.1. Celle primarie

Questo tipo di cella primaria è costituita da piastre di rame e zinco, immerse in una soluzione di acido solforico.



L'acido solforico è in grado di provocare una reazione chimica chiamata ionizzazione.

Sappiamo che gli atomi sono neutri perché hanno un uguale numero di protoni e di elettroni. Un atomo però, in certe circostanze, può cedere o acquistare un elettrone. In questo caso prende il nome di ione.

Gli ioni sono quindi degli atomi che hanno un elettrone in più o un elettrone in meno.

Un atomo con un elettrone in più diventa negativo mentre un atomo con un elettrone in meno diventa positivo. Abbiamo quindi ioni positivi e ioni negativi.

A contatto con l'acido solforico, lo zinco rilascia ioni positivi Zn^{++} e il rame rilascia ioni positivi Cu^{++} . Quindi le due barre di rame e zinco, avendo perso ioni positivi che sono finiti nell'acido, risultano negative rispetto alla soluzione. Gli elettroni in eccesso sono rimasti sulle due barre. I due materiali però non attirano gli elettroni allo stesso modo: lo zinco infatti ha la tendenza ad ossidarsi più del rame e quindi rilascia elettroni che scorrono lungo il filo.

Quello che si mantiene tra i due poli è una differenza di potenziale e quindi la batteria è schematizzata come un generatore di tensione.

A causa della differenza di potenziale, se si collegano le piastre di rame e di zinco con un filo conduttore, scorre una corrente che per convenzione va dal rame allo zinco.

In realtà gli elettroni scorrono dallo zinco al rame.

Il passaggio di elettroni dallo zinco al rame cessa quando la barra di zinco si è consumata.

2.1.2. Celle secondarie

Le celle secondarie sono delle batterie che, una volta scariche, possono essere ricaricate, cioè è possibile ristabilire la differenza di potenziale ai loro poli. Per farlo è necessario collegare la batteria ad una fonte di corrente elettrica.

Questo tipo di batterie vengono anche chiamate accumulatori di carica elettrica.

Esistono vari tipi di celle secondarie con diverse capacità elettriche, che usano differenti materiali.



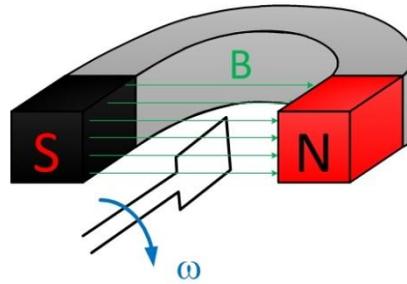
Sugli aerei si utilizzano batterie ricaricabili. A bordo di un velivolo deve sempre essere presente almeno una batteria per motivi di sicurezza: la batteria è l'unico generatore elettrico che è in grado di fornire corrente senza ricevere in ingresso del movimento. Quindi in caso di guasto è l'unico generatore che fornisce corrente in qualunque condizione, anche quando tutto il resto ha smesso di funzionare.

2.2. Generatori di corrente alternata (AC)

Un generatore di corrente si basa sul principio che una spira in movimento in un campo elettromagnetico vede nascere al suo interno una corrente elettrica.

Consideriamo un magnete cavo che genera un **campo magnetico \vec{B}** , al cui interno si trova una spira.

La spira è collegata ad un motore in grado di farla ruotare con **velocità** ω . Se siamo a bordo di un aeromobile potrebbe essere collegata al motore principale.



Ricordiamo che la velocità angolare può essere espressa come:

$$\omega = 2\pi f$$

Spesso, quando si studiano le macchine (non solo quelle elettriche) parlare di giri al secondo è scomodo: per quanto una macchina possa ruotare velocemente, il numero di giri effettuati in un secondo non è molto grande. Si preferisce quindi parlare di giri al minuto e indicare questa grandezza con n .

Chi si occupa di teoria preferisce parlare di frequenza f , i tecnici invece preferiscono parlare di numero di giri n . Fisicamente però, queste due grandezze sono la stessa cosa: cambia solo l'unità di misura.

La velocità di rotazione della spira potrà quindi essere espressa come:

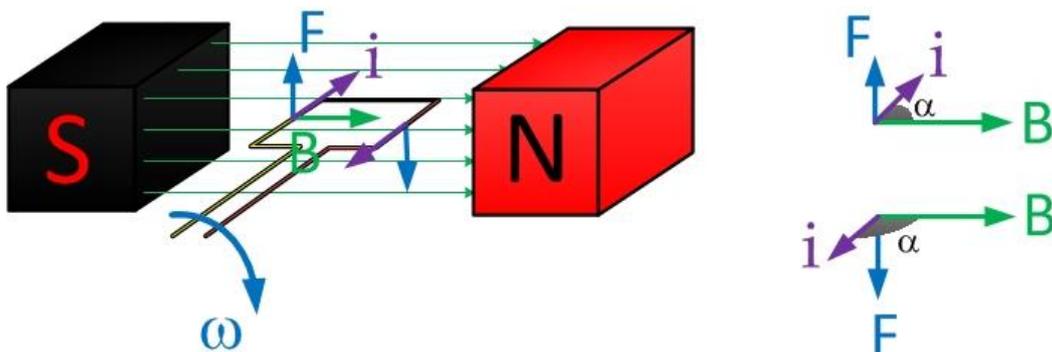
$$\omega = 2\pi \frac{n}{60}$$

Dove il 60 al denominatore tiene conto del fatto che il numero di giri è espresso in minuti mentre la velocità angolare richiede i secondi.

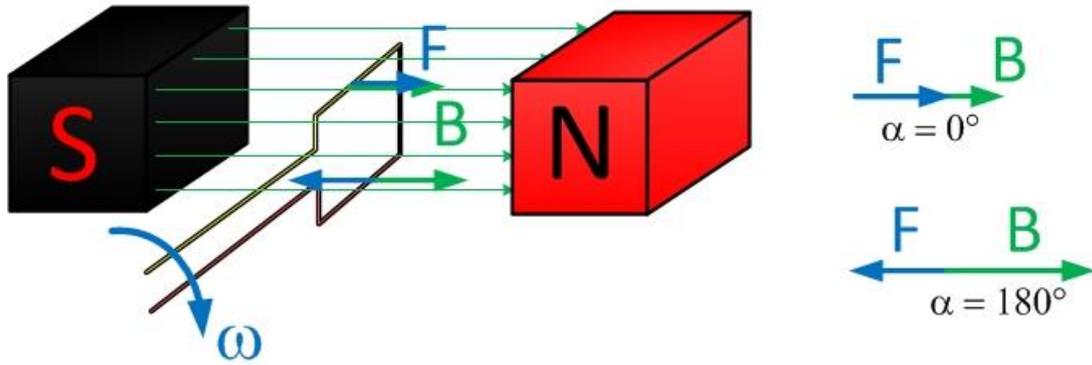
Ora osserviamo lo schema del generatore guardandolo di fronte, in modo da osservare la spira lateralmente: la spira sta ruotando sotto l'azione del motore al quale è collegata; possiamo immaginare che su di essa agisca una **coppia di forze** F . La presenza di una forza e di un **campo magnetico** B genera una **corrente elettrica** i che scorre nel filo in base alla regola della mano destra: entra nel filo giallo ed esce dal filo rosso.

In questa prima configurazione la spira è orizzontale e quindi l'angolo formato tra la corrente e il campo magnetico è pari a 90° :

$$F = B \cdot i \cdot l \cdot \sin \alpha = B \cdot i \cdot l \cdot \sin 90^\circ = B \cdot i \cdot l$$

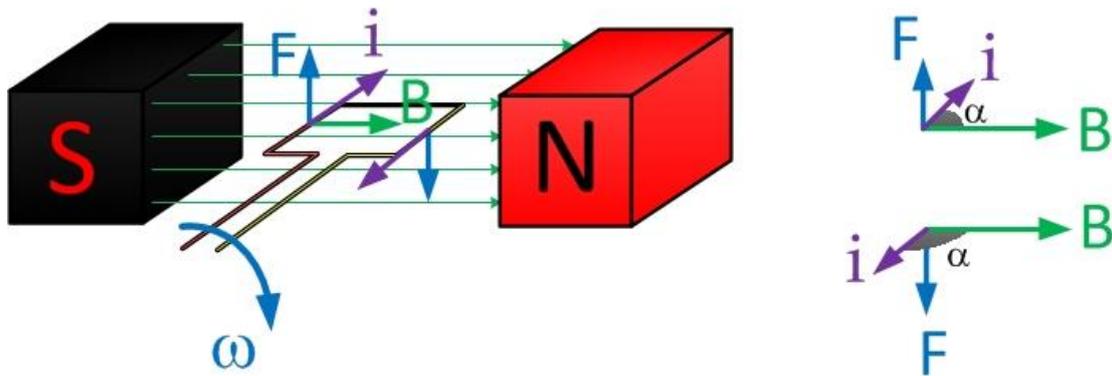


La rotazione prosegue e la spira si trova ora in posizione verticale. In questa condizione la forza si trova ad essere allineata con il campo magnetico.

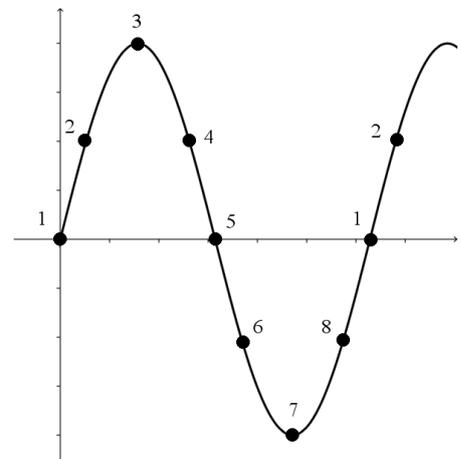
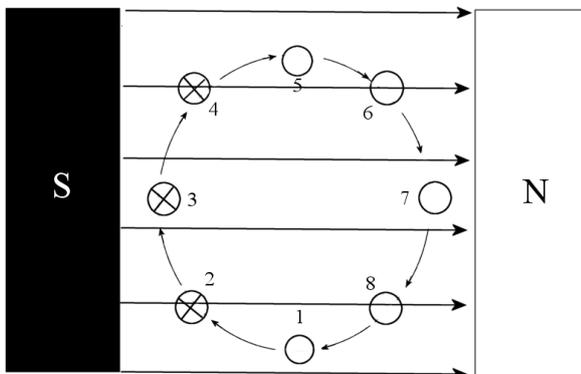


Poiché la forza è allineata con il campo magnetico, la corrente deve essere nulla.

La rotazione prosegue e la spira si trova nella posizione opposta a quella che aveva all'inizio. Prima la corrente entrava nel filo giallo ed usciva da quello rosso: ora entra dal filo rosso ed esce da quello giallo.



Dunque, quando le due estremità della spira si scambiano posizione a causa della rotazione, la corrente cambia verso. Questo significa che ogni mezzo giro abbiamo un'inversione di polarità, come nella corrente alternata. Infatti, se diagrammiamo la corrente che scorre in una delle estremità della spira, troviamo proprio la rappresentazione della corrente alternata:



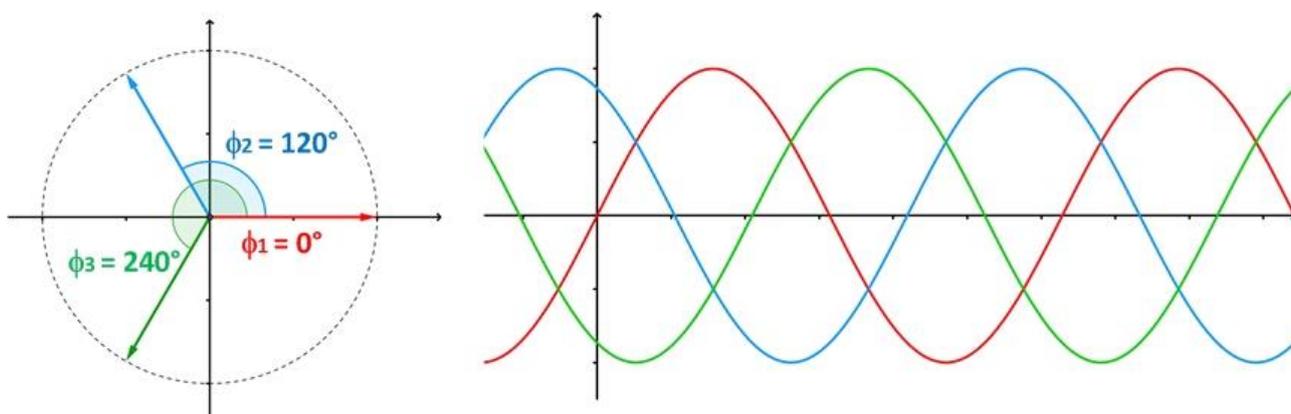
2.2.1. Generatori trifase

La corrente che arriva nelle nostre case è una corrente alternata, ma non è come quella che abbiamo visto finora. Si tratta infatti di una **CORRENTE TRIFASE**.

La parola trifase (tri- fase) indica una corrente formata da tre diverse fasi di corrente. Come abbiamo visto nei corsi precedenti, la fase della corrente è l'angolo con cui il fasore ad essa associato inizia a ruotare nel piano di Gauss.

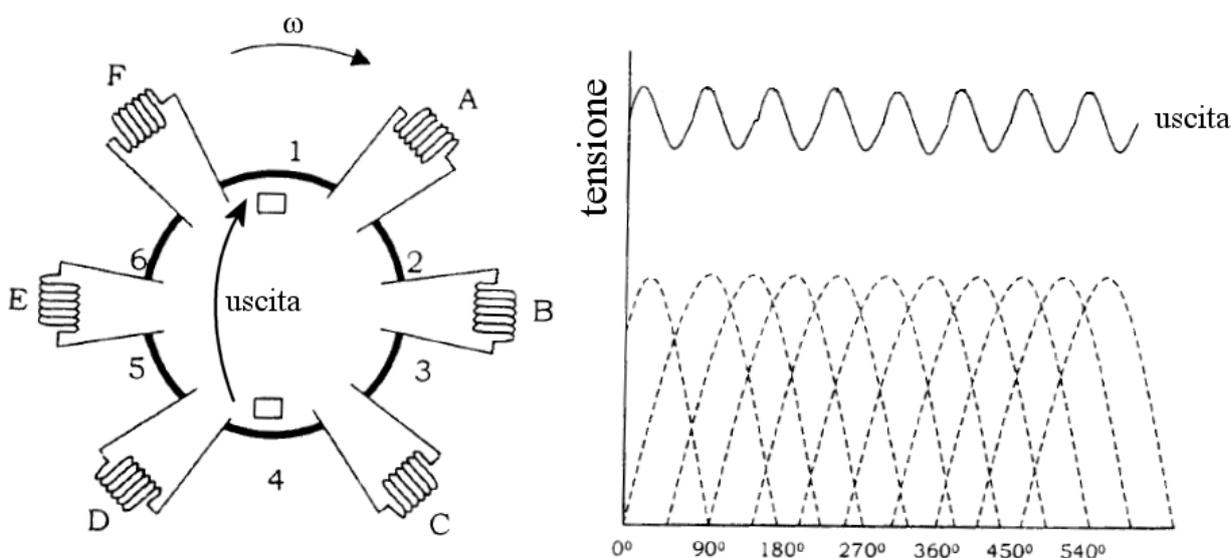
Consideriamo tre diverse correnti:

- La prima corrente ha fase nulla: $\varphi_1 = 0^\circ$
- La seconda corrente ha fase $\varphi_2 = 120^\circ$
- La terza corrente ha fase $\varphi_3 = 240^\circ$



La corrente trifase è dunque formata da tre correnti che viaggiano tutte insieme.

Ogni corrente viene generata da una spira e quindi per poter generare una corrente trifase è necessario avere tre diverse spire che ruotano in un campo magnetico con uno sfasamento reciproco di 120° .



Per utilizzare la corrente trifase è necessario connettere tra loro i morsetti da dove viene prelevata la corrente. I modi per connettere i tre terminali del trifase sono due:

- Connessione a stella
- Connessione a triangolo

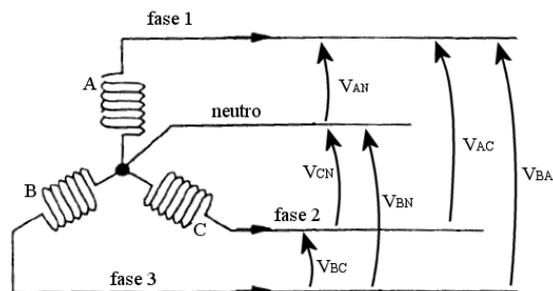
CONNESSIONE A STELLA

Le tre linee sono connesse in un unico punto che prende il nome di centro della stella. Dal centro della stella viene tirato un cavo chiamato neutro.

In questo tipo di connessione, la corrente che scorre nelle linee è uguale a quella che scorre nelle tre spire; in pratica possiamo dire che **SI CONSERVA LA CORRENTE PRODOTTA**.

Abbiamo invece due tensioni diverse, una tra le varie linee e una tra le linee e il neutro.

I generatori degli aeromobili di solito utilizzano una connessione a stella poiché si ha il vantaggio di avere a disposizione due tensioni.



Le tensioni tra le varie linee sono le stesse:

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{AC}$$

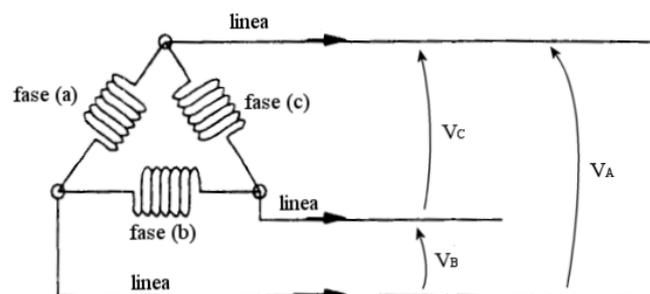
e anche le tensioni tra le fasi e il neutro sono le stesse:

$$V_{AN} = V_{BN} = V_{CN}$$

CONNESSIONE A TRIANGOLO

I tre terminali sono connessi in serie un con l'altro formando un triangolo. La differenza principale con la connessione a stella consiste nel fatto che in questo caso abbiamo una sola tensione. Questo è certamente uno svantaggio rispetto alla connessione a stella.

Il vantaggio consiste invece nel fatto che la corrente erogata è di valore più alto rispetto all'altro tipo di connessione.



2.2.2. La frequenza della corrente prodotta

La frequenza della corrente prodotta da un generatore dipende da due fattori:

- La velocità con cui la spira sta ruotando, cioè il numero di giri
- Il numero di magneti che ci sono all'interno del motore.

Analizziamo questi due fattori.

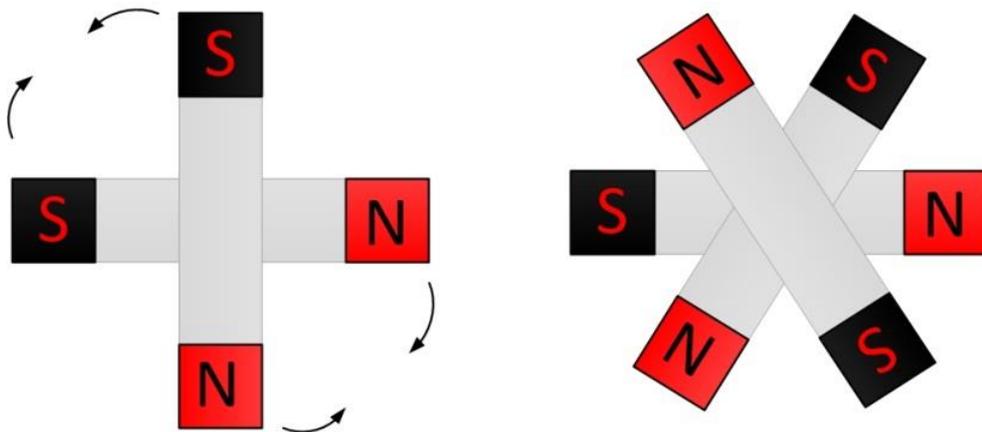
- Più la velocità di rotazione aumenta, più di frequente la corrente inverte la sua polarità, aumentando quindi la frequenza.

$$f \propto n$$

- Ogni coppia di poli magnetici (ricordiamo che non esiste un monopolo magnetico, cioè un magnete che abbia solo il nord o solo il sud) prende il nome di **PAIAPOLO**.

Un generatore è quindi caratterizzato dal suo numero di paiapoli che chiameremo p .

I paiapoli in un motore sono sempre in numero dispari perché altrimenti nascerebbero delle intense forze magnetiche tra di essi:



Poiché l'intensità del campo magnetico è responsabile della nascita della corrente, più magnetici ci sono e più la corrente invertirà di frequente la sua polarità:

$$f \propto p$$

DUNQUE, LA FREQUENZA DELLA CORRENTE GENERATA DA UN GENERATORE AC DIPENDE DAL NUMERO DI GIRI E DAL NUMERO DI PAIAPOLI SECONDO LA LEGGE SEGUENTE:

$$f = \frac{n \cdot p}{60}$$

Il 60 al denominatore è un fattore di conversione da minuti a secondi: infatti il numero di giri è espresso in giri al minuto, mentre la frequenza è espressa in hertz, cioè:

$$Hz = \frac{1}{s}$$

2.2.3. Tipi di generatori AC

Abbiamo visto nel capitolo precedente che una spira rotante in un campo magnetico produce una corrente elettrica alternata. In un generatore AC la parte che ruota prende il nome di **ROTORE**, mentre la parte che resta ferma prende il nome di **STATORE**.

Esistono moltissimi tipi di generatori AC. Noi studieremo solo tre di questi:

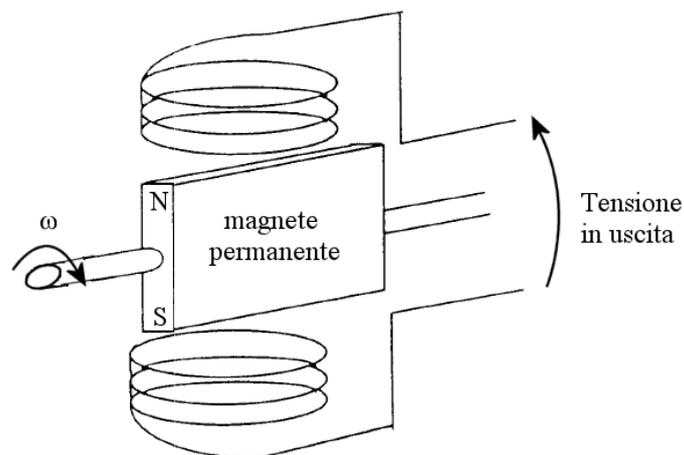
- generatore AC a magnete permanente
- generatore AC ad armatura rotante
- generatore AC a campo rotante

I problemi connessi ad un generatore sono due: la presenza dei magneti, che hanno una grande massa, produce una notevole inerzia quando il magnete ruota; per prelevare corrente (o per dare corrente) ad una spira in rotazione è necessario avere dei contatti striscianti che comportano vari problemi connessi all'attrito.

GENERATORE AC A MAGNETE PERMANENTE

Questo generatore utilizza un magnete permanente come sorgente di campo magnetico. E' proprio il magnete a ruotare su se stesso mentre la spira in cui nasce la corrente è ferma. Questo consente di prelevare corrente senza dei contatti striscianti (se la spira ruotasse sarebbe necessario prevedere un sistema per prendere corrente da un filo in movimento...).

Il problema di questo generatore è costituito dal fatto che il magnete, molto pesante, sta ruotando e quindi genera un grande momento d'inerzia.



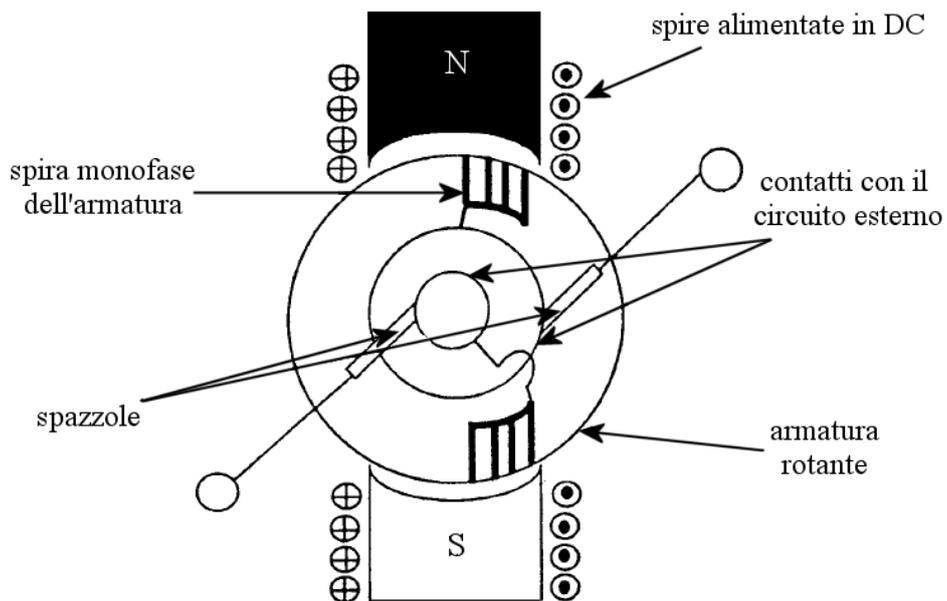
GENERATORE AC AD ARMATURA ROTANTE

In questo tipo di generatore il magnete fa da statore e si trova all'esterno della spira. La spira è montata sul perimetro di un disco che ruota e prende il nome di armatura (da cui il nome di questo tipo di generatore).

Attorno al magnete è avvolta una spira, alimentata da corrente continua, che ha lo scopo di creare due poli alternati sul magnete.

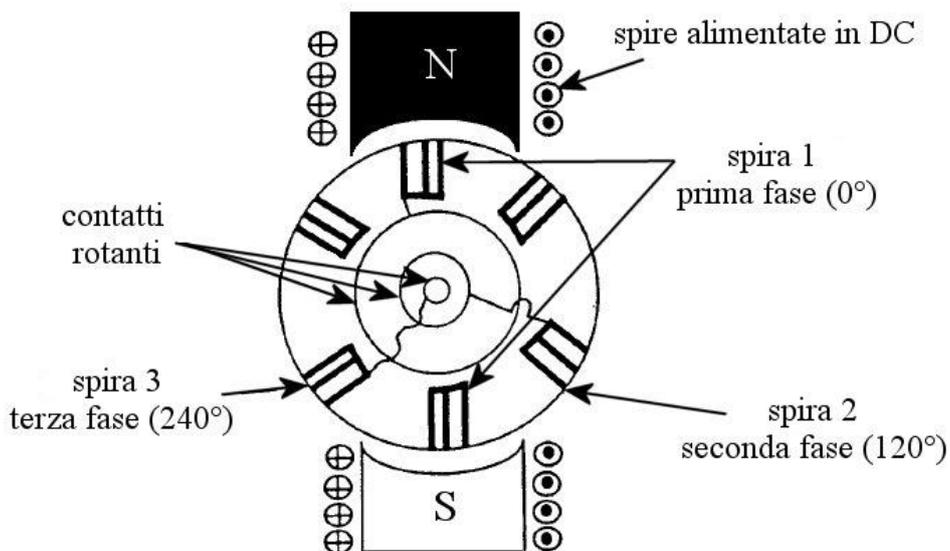
Per aumentare la potenza del generatore è possibile aggiungere altri paia poli.

Questo tipo di generatore ha un rotore molto leggero e quindi ha poca inerzia, ma per contro necessita di contatti striscianti, chiamati spazzole, da cui prelevare la corrente. La spira sta infatti ruotando e quindi anche i contatti dovranno ruotare.



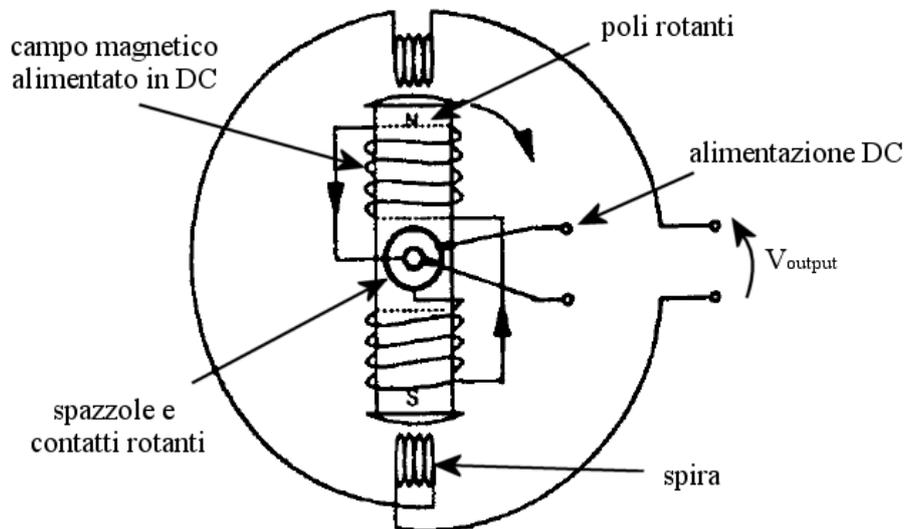
Nel generatore che abbiamo appena visto viene prelevata una sola corrente. Un generatore di questo tipo viene quindi chiamato monofase.

E' possibile inserire sull'armatura altre 2 spire, sfasate di 120° l'una con l'altra, e generare corrente trifase.

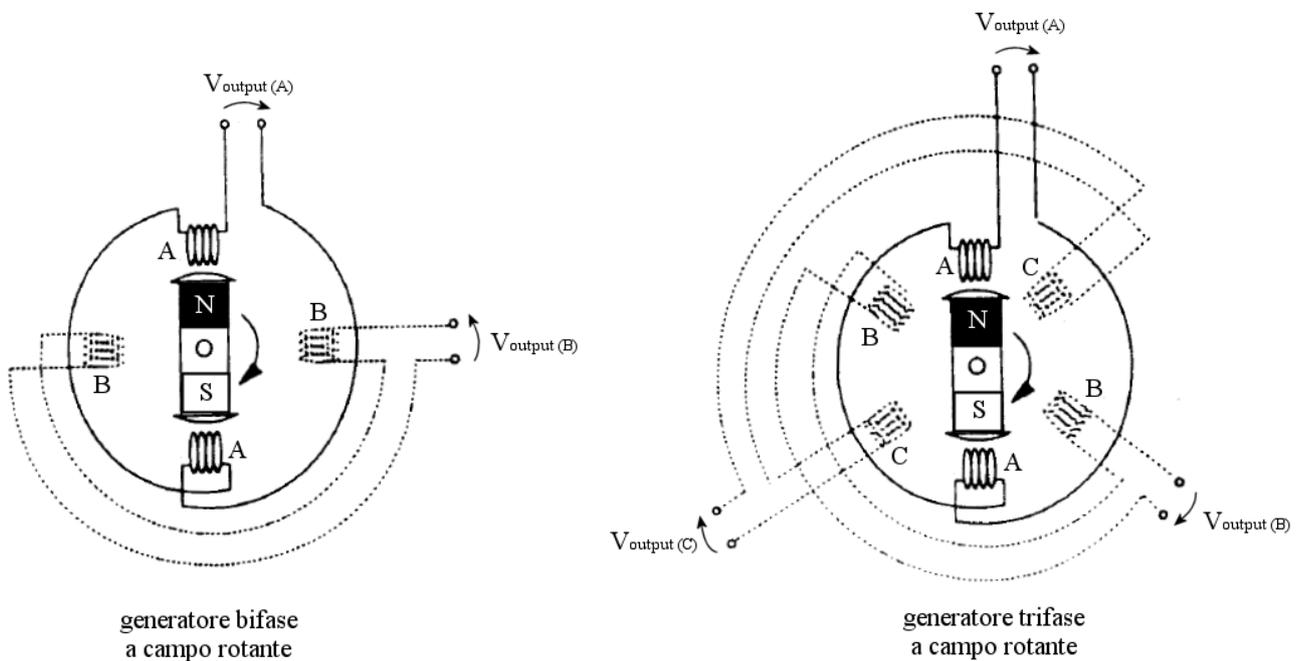


GENERATORE AC A CAMPO ROTANTE

In questo tipo di generatore il campo magnetico è rotante e viene generato da una bobina, avvolta attorno ad un magnete, in cui scorre corrente continua. Le spire da cui viene prelevata la corrente sono ferme (statore) e si trovano all'esterno del campo magnetico.



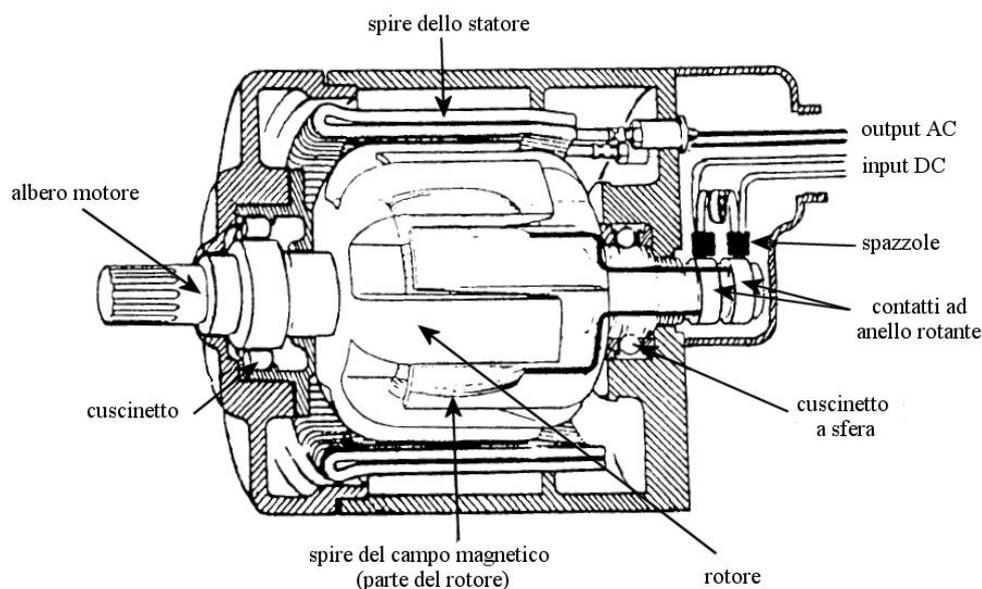
Anche con questo tipo di generatore è possibile produrre corrente con più di una fase. Se vengono aggiunte coppie di spire si possono ottenere correnti bifase o trifase, come negli schemi seguenti:



Questo tipo di generatore è molto utilizzato poiché presenta alcuni grandi vantaggi che lo rendono preferibile a quelli ad armatura rotante:

- E' meglio prendere corrente dallo statore piuttosto che dal rotore perché si evita il problema di mettere in rotazione anche le spazzole che sono delicate.
- E' meglio che i contatti da cui si prende corrente siano sul cerchio esterno per favorire la ventilazione e l'isolamento. La presenza di campi magnetici infatti può interferire con le apparecchiature avioniche e quindi sono necessari degli schermi.

Le seguenti sono rappresentati gli schemi di due generatori. Il primo è uno spaccato di un generatore a campo rotante monofase; il secondo è lo spaccato di un generatore a campo rotante trifase.

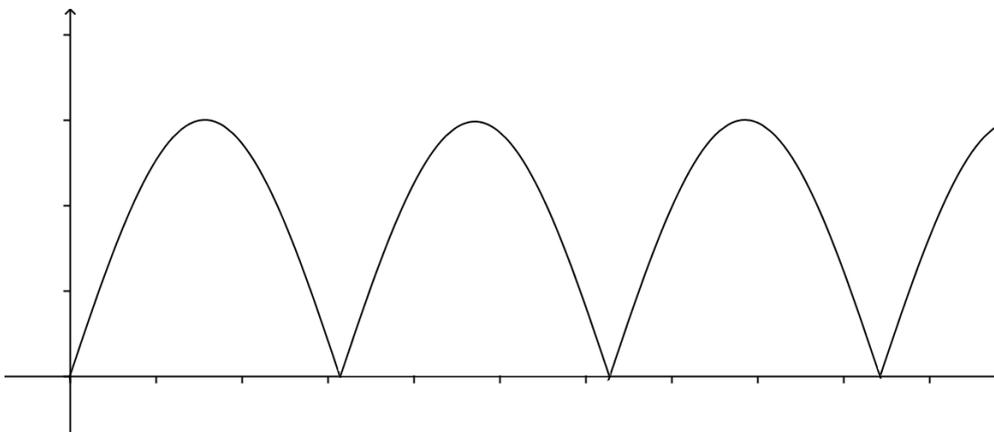


| TIPO DI GENERATORE | VANTAGGI | SVANTAGGI |
|----------------------|--|--|
| A MAGNETE PERMANENTE | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Non ci sono contatti striscianti ➤ La corrente viene prelevata dall'esterno del generatore ➤ Bassi costi | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Grande inerzia durante la rotazione ➤ Molto pesante |
| AD ARMATURA ROTANTE | <ul style="list-style-type: none"> ➤ E' abbastanza leggero ➤ Ha poca inerzia | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Necessita di contatti striscianti ➤ La corrente viene prelevata dall'interno del motore |
| A CAMPO ROTANTE | <ul style="list-style-type: none"> ➤ E' molto leggero ➤ Ha poca inerzia ➤ La corrente viene prelevata dall'esterno del generatore | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Necessita di contatti striscianti |

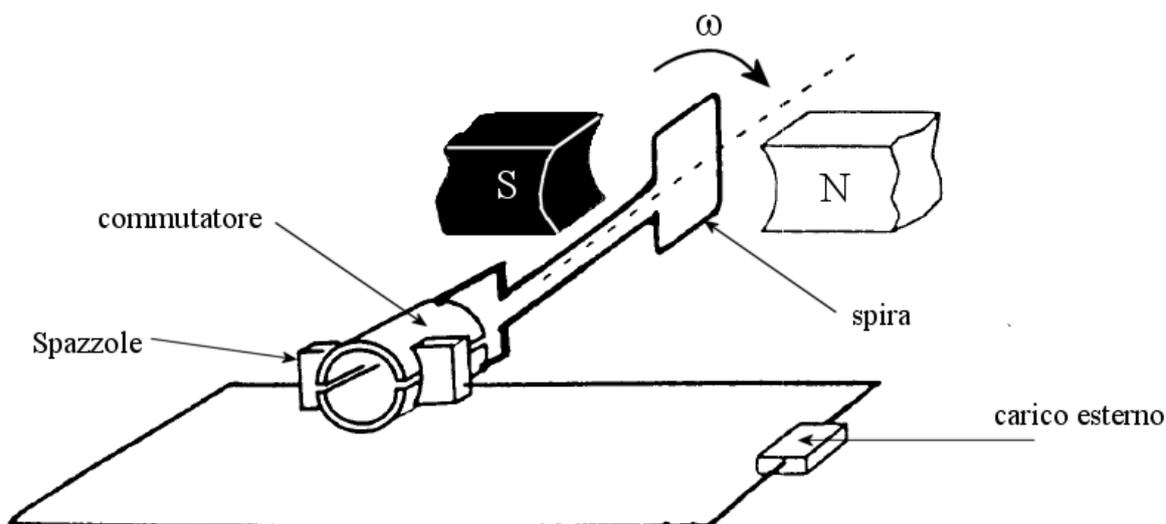
2.3. Generatori in corrente continua (DC)

Se vogliamo generare una corrente continua, è necessario cambiare la polarità della corrente ogni volta che questa si annulla e sta per cambiare segno, in modo da eliminare la parte negativa della corrente.

Quello che si ottiene è una rappresentazione di questo tipo:

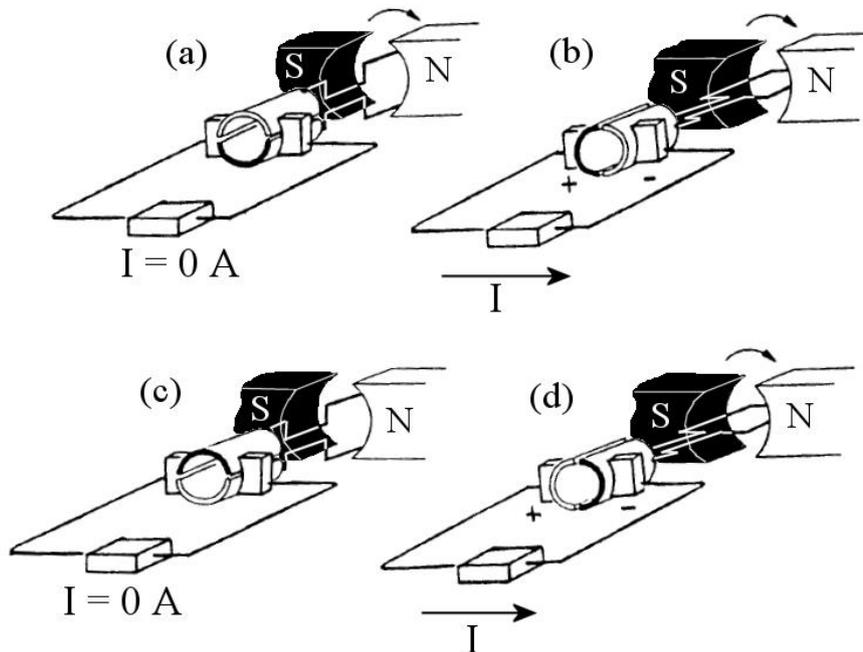


Per poter cambiare la polarità ogni mezzo giro è necessario un interruttore automatico, chiamato **COMMUTATORE**. La parola commutatore è generica: si indica con questo termine qualsiasi dispositivo in grado di variare un circuito in maniera automatica. Esistono moltissimi tipi di commutatore, ma quello utilizzato nei generatori DC è costituito da un cilindro rotante tagliato a metà lungo l'asse, con le due metà isolate l'una rispetto all'altra. Il commutatore viene connesso al resto del circuito tramite dei contatti flessibili chiamati spazzole.



Nell'immagine seguente si può vedere come funziona il commutatore. Le spazzole fanno contatto alternativamente con le due parti della spira. Nell'immagine le sue parti hanno colori diversi. Nella figura (a)

la parte inferiore della spira è colorata di nero; in questa configurazione non scorre corrente perché la spira è perfettamente perpendicolare al campo.



Nella configurazione (b) la spira è ruotata di 90° . In questa configurazione la spazzola positiva è in contatto con il morsetto nero. Nella configurazione (c) la corrente è di nuovo nulla in quanto la spira è perpendicolare al campo magnetico. Nel passare dalla configurazione (c) alla configurazione (d) la spazzola positiva va in contatto con il morsetto bianco.

In questo modo la corrente cambia verso di percorrenza nella spira, ma rimane invariata per quanto riguarda il carico.

Abbiamo generato una corrente continua, o meglio, abbiamo eliminato la parte negativa della corrente.

2.3.1. Il problema delle spazzole

La presenza delle spazzole costituisce un grosso problema sia per i generatori DC sia per i generatori AC.

I problemi che sorgono sono i seguenti:

- Le spazzole **SI CONSUMANO FACILMENTE** e devono essere cambiate spesso, all'incirca dopo 1000 ore di funzionamento.
- Le spazzole, ruotando, **GENERANO DELLE SCINTILLE** che aumentano il rischio di incendi qualora il generatore si trovi a funzionare vicino a del materiale infiammabile.
- Lo scintillio delle spazzole **GENERA INTERFERENZA ELETTROMAGNETICA** che può causare problemi alle comunicazioni radio.

Per questo motivo sono sempre più utilizzati i generatori senza spazzole, molto più complessi da un punto di vista costruttivo e decisamente più costosi.

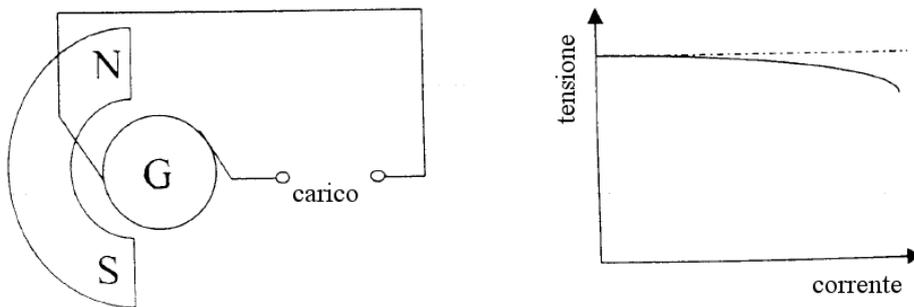
In campo aeronautico, soprattutto su velivoli ad alte prestazioni (militari o acrobatici) in cui non è accettabile il rischio di incendi a bordo e di interferenze con il sistema avionico, l'utilizzo dei generatori senza spazzole è ormai generalizzato.

2.3.2. Classificazione dei generatori DC

I generatori si classificano in base a come viene prodotto il campo magnetico in cui gira la spira. Possiamo avere:

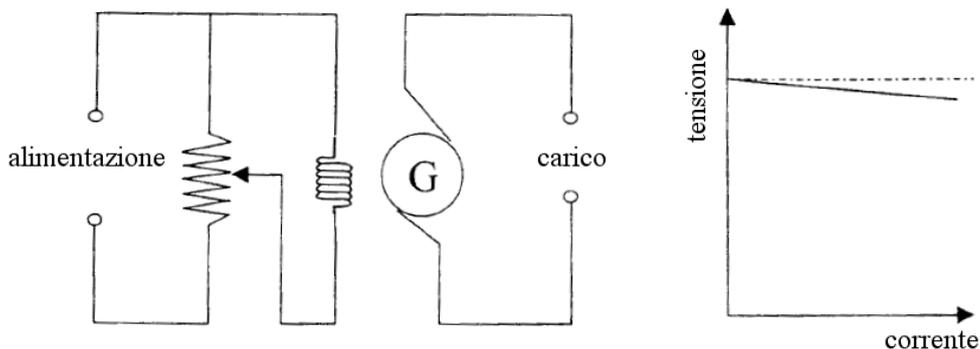
GENERATORI A MAGNETE PERMANENTE

È il tipo più semplice ed è costituito da un potente magnete permanente. Come si può vedere dalla caratteristica volt-amperometrica, la tensione erogata diminuisce lievemente (perdita di tensione) man mano che aumenta la corrente richiesta dal carico.



GENERATORI A CAMPO MAGNETICO INDOTTO DALL'ESTERNO

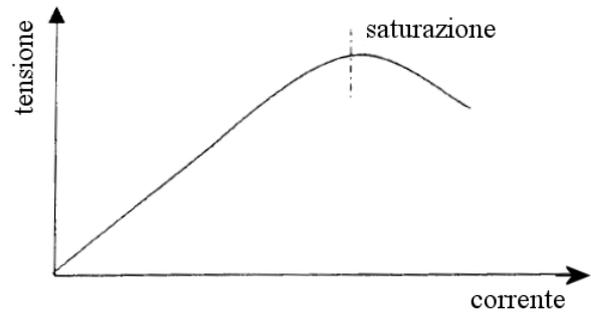
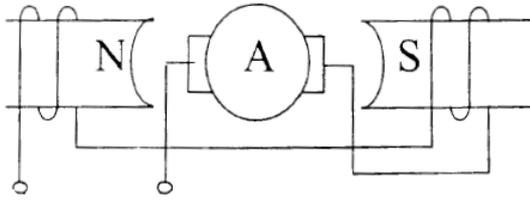
Il campo magnetico è generato da una bobina attraversata da corrente continua proveniente dall'esterno. Anche per questo tipo di generatore ci sono delle perdite di tensione all'aumentare del carico.



GENERATORI A CAMPO MAGNETICO AUTOINDOTTO

Il campo magnetico è generato da una bobina attraversata da corrente continua che attiva dallo stesso circuito del generatore. In questo caso, osservando la caratteristica volt-amperometrica, si vede che la

tensione fornita aumenta all'aumentare della richiesta di corrente da parte dell'utilizzatore collegato al generatore. Ad un certo punto, chiamato punto di saturazione, la corrente richiesta dal carico è troppo elevata e la tensione fornita diminuisce bruscamente.



La capacità di dare tensione anche per elevati valori della corrente richiesta dal carico dipende dal tipo di generatore. Esistono diversi tipi di generatori con campo magnetico autoindotto e ognuno di essi ha una propria caratteristica volt-amperometrica.

3. I MOTORI ELETTRICI

I motori elettrici funzionano con lo stesso principio dei generatori elettrici, ma al contrario: una spira immersa in un campo magnetico viene alimentata da corrente elettrica e si mette in moto.

I motori elettrici si distinguono in base al tipo di corrente con cui vengono alimentati: esistono quindi motori in corrente continua e motori in corrente alternata.

Sia i motori AC che quelli DC si suddividono in due categorie:

- **MOTORE SINCRONO:** la velocità di rotazione dell'albero motore è sincronizzata con quella del campo magnetico, cioè ruotano alla stessa velocità.
- **MOTORE ASINCRONO:** la velocità di rotazione dell'albero motore è inferiore alla velocità di rotazione del campo magnetico generato dallo statore.

3.1. Motori elettrici DC

Consideriamo un magnete e una spira al suo interno, connessa tramite contatti rotanti e spazzole ad una batteria che le fornisce una corrente elettrica continua.

La corrente scorre nella spira e crea un campo magnetico (per il fenomeno dell'induzione elettromagnetica). Il campo magnetico della spira può essere:

- Allineato con il campo magnetico esterno: in questo caso non succede nulla. La spira è in equilibrio stabile.
- Disallineato con il campo magnetico esterno: in questo caso la spira non è in equilibrio e tenderà a ruotare per allinearsi con il campo magnetico.

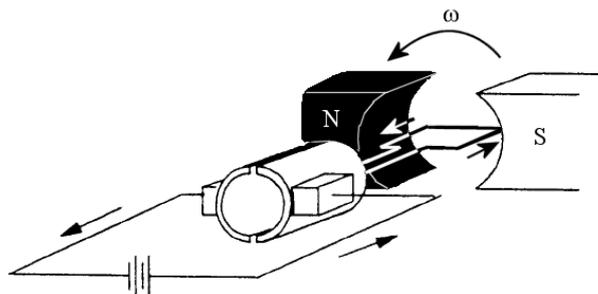
Per avere moto quindi la spira deve essere disallineata con il campo magnetico. Anche in questo caso però una volta che la spira si è riallineata il moto cessa.

Per far sì che il moto sia continuo è necessario che la spira sia sempre disallineata con il campo magnetico: bisogna quindi fare in modo che il campo magnetico della spira cambia la sua direzione ogni mezzo giro.

Per far questo si deve invertire il senso di percorrenza della corrente, scambiando i due poli della batteria.

Un commutatore è proprio in grado di fare questa cosa.

In questo modo la spira si troverà a "rincorrere" continuamente il campo magnetico senza mai riuscire ad allinearsi con esso perché quando sta per riuscirci la direzione del suo campo magnetico cambia.



2.3.3. Tipi di motori elettrici in corrente continua

Esistono moltissimi tipi di motore in corrente continua, ma noi studieremo solo tre di essi:

- motore a spazzole
- motore brushless
- motore con statore a filo avvolto
- motore passo-passo

MOTORE A SPAZZOLE

Il classico motore a spazzole è costituito da uno statore magnetico e da un armatura rotante formata da avvolgimenti di filo conduttore. Nel filo circola corrente che ogni mezzo giro viene invertita dal commutatore tramite due contatti a spazzola.

La velocità con cui ruota l'armatura dipende principalmente da due fattori:

- la **CORRENTE** che circola nella spira. Più la corrente che circola nella spira è alta, più il motore ruota velocemente.

La corrente dipende dalla tensione di alimentazione del motore, che in pratica è la potenza elettrica che forniamo al motore per farlo ruotare. Sappiamo però che la corrente che scorre in un conduttore dipende anche dalla sua resistenza:

$$I = \frac{V}{R}$$

Questo significa che più la resistenza della spira è bassa, più aumenta la corrente che scorre nel conduttore. In effetti, la resistenza produce calore e il calore è energia persa.

Quindi se vogliamo avere un'alta velocità di rotazione dobbiamo alimentare il motore con una tensione elevata e utilizzare spire con una resistenza bassa.

- il **CARICO APPLICATO**. Se applichiamo ad un motore un carico elevato, la velocità di rotazione diminuisce. Questo è dovuto al fatto che la potenza di alimentazione (la tensione che forniamo al motore) viene utilizzata per far ruotare un carico più grande.

MOTORE SENZA SPAZZOLE (BRUSHLESS)

Nei motori senza spazzole la commutazione non è più meccanica, ma elettronica. Questo rende il motore molto più complicato e costoso, ma garantisce ottime prestazioni. Sugli aeromobili vengono spesso adottati questi motori.

MOTORI CON STATORE A FILO AVVOLTO

Abbiamo visto che nei motori CC lo statore può essere realizzato con magneti permanenti; questo però rende lo statore pesante e in aeronautica il peso è un fattore fondamentale. E' quindi possibile realizzare motori che abbiano lo statore formato da avvolgimenti di filo elettrico su materiale magnetico; facendo passare corrente nel filo si genera un campo elettromagnetico, che funge da magnete. Questo circuito è detto **DI ECCITAZIONE**.

I vantaggi di questa configurazione sono:

- la possibilità di avere potenze maggiori (ma si dovrà spendere più energia anche per alimentare questo nuovo circuito).
- la leggerezza (il filo pesa meno di una calamita)

Il motore con statore a filo avvolto può essere alimentato sia in corrente continua che in alternata, e per questo motivo è chiamato anche motore universale.

La tabella seguente riassume i pro e i contro di ognuno di questi motori

| TIPO DI MOTORE | VANTAGGI | SVANTAGGI |
|-------------------------------|--|--|
| A SPAZZOLE | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Possibilità di essere usato come generatore ➤ Bassi costi | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Le spazzole di consumano e creano problemi ➤ Molto pesante ➤ Si produce molto calore nella spira |
| SENZA SPAZZOLE (BRUSHLESS) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ E' affidabile | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Alto costo ➤ Complessità costruttiva |
| CON STATORE A FILO AVVOLTO | <ul style="list-style-type: none"> ➤ E' leggero e affidabile | <ul style="list-style-type: none"> ➤ E' necessario provvedere all'alimentazione dello statore fornendogli corrente. |

MOTORE PASSO-PASSO

Un altro tipo di motore che vale la pena di conoscere è il motore passo-passo, spesso chiamato anche step o stepper. E' un motore elettrico sincrono in corrente continua, senza spazzole, che, a differenza di tutti gli altri motori, hanno come scopo quello di mantenere fermo l'albero in una posizione di equilibrio: se alimentati si limitano infatti a bloccarsi in una ben precisa posizione angolare.

Per questo motivo vengono usati per muovere dispositivi di puntamento (armi, telescopi, ecc...).

Solo indirettamente è possibile ottenerne la rotazione: occorre inviare al motore una serie di impulsi di corrente, secondo un'opportuna sequenza, in modo tale da far spostare, per scatti successivi, la posizione di equilibrio.

È così possibile far ruotare l'albero nella posizione e alla velocità voluta semplicemente contando gli impulsi ed impostando la loro frequenza, visto che le posizioni di equilibrio dell'albero sono determinate meccanicamente con estrema precisione.

3.2. Motori elettrici AC

I motori elettrici che vengono alimentati in corrente alternata si dividono in due categorie: quelli che richiedono corrente monofase e quelli che richiedono corrente trifase.

Sia quelli monofase che quelli trifase possono essere a loro volta classificati nel modo che abbiamo visto all'inizio di questo capitolo:

- Motori asincroni (o ad induzione)
- Motori sincroni (a riluttanza e ad isteresi)

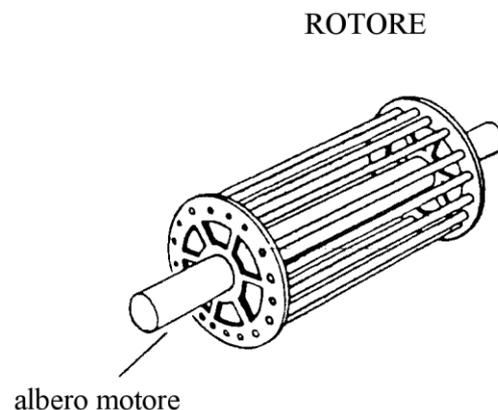
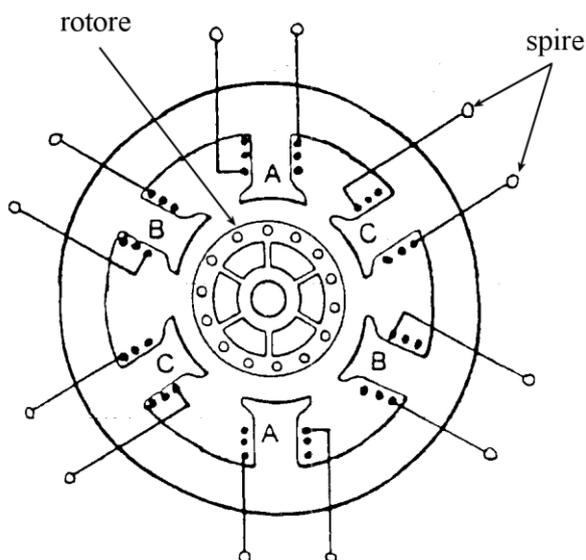
2.3.4. Motore asincrono (o ad induzione)

I motori asincroni possono essere di tipo monofase o trifase.

La maggior parte dei motori di questo tipo vengono realizzati come trifase, ma per piccole potenze si utilizza anche la corrente monofase.

Il **MOTORE ASINCRONO TRIFASE**, indicato anche con la sigla **MAT**, è il motore elettrico più semplice, economico, robusto ed affidabile. Il suo rendimento è elevato, non ha bisogno ne di lubrificazione ne di manutenzione.

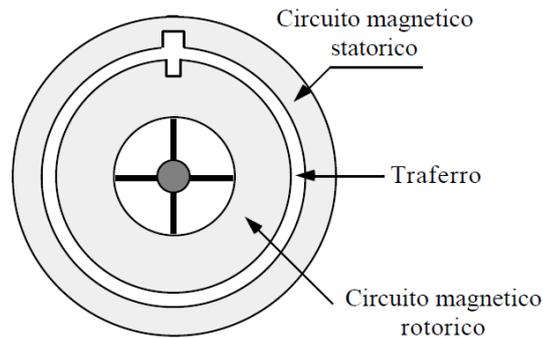
Il suo principio di funzionamento si basa sulla creazione di un campo rotante, creato facendo scorrere corrente trifase in spire ferme nello spazio (statore). Le spire vengono alimentate in successione e in questo modo il campo magnetico risulta rotante.



La forza che mette in rotazione l'albero motore nasce solo se nella spira del rotore circola corrente che nasce per induzione, a causa del campo magnetico variabile. La corrente cesserebbe di scorrere se il campo magnetico fosse fisso. Quindi la spira deve ruotare con una velocità diversa da quella del campo magnetico. Da qui il termine asincrono.

Il motore asincrono è costituito da due parti fondamentali di forma cilindrica:

- una parte esterna, fissa, detta statore
- una interna, coassiale alla prima, libera di ruotare intorno all'asse della macchina, detta rotore



Lo statore ed il rotore sono separati da una intercapedine chiamata traferro (oppure interferro) che ha spesso variabile da qualche decimo di millimetro per i piccoli motori, a qualche millimetro, per i motori più grossi. E' in questa zona che si formano i campi magnetici che danno origine alla rotazione del rotore.

2.3.5. Motori sincroni

Il motore sincrono presenta un'importante caratteristica: la sua velocità di rotazione rimane praticamente costante al variare del carico;

Questo tipo di motore viene usato per quelle apparecchiature in cui la velocità non deve variare in base al carico applicato.

All'avviamento, dato che il rotore parte da fermo, non riesce ad assumere istantaneamente la velocità del campo magnetico a causa della sua inerzia. Per questo motivo è necessario avere un motore ausiliario che trascina il rotore in partenza.



PARTE II: FONDAMENTI DI ELETTRONICA

4. DIODI E TRANSISTOR

L'elettrotecnica che abbiamo studiato finora si occupa della generazione, del trasporto e dell'utilizzo della corrente elettrica tramite materiali conduttori.

L'elettrotecnica è una scienza che, come abbiamo visto, si è sviluppata nel corso dell'ottocento e dei primi anni del novecento e si occupa della progettazione di impianti elettrici e di circuiti per il trasporto di correnti ad alta tensione (almeno 200 V) e bassa frequenza (meno di 100 Hz).

Nella seconda metà del novecento è nato un nuovo settore dell'elettrotecnica che si occupa di correnti a bassa tensione (meno di 20 V) e grande frequenza (fino ad alcuni GHz) usate nei telefoni cellulari, nei computer, nelle televisioni. Questo nuovo settore dell'elettrotecnica ha preso il nome di **ELETTRONICA**.

4.1. La conduzione nei materiali

Nel corso precedente abbiamo visto la differenza tra materiali conduttori e materiali isolanti: i materiali **ISOLANTI** sono quelli che hanno gli elettroni saldamente legati al nucleo e quindi non consentono alla corrente elettrica di scorrere nemmeno se sono sottoposti a grandi differenze di potenziale; i materiali **CONDUTTORI** invece hanno gli elettroni più esterni (quelli più lontani dal nucleo) in grado di liberarsi dal legame che li trattiene e circolare liberamente da un atomo all'altro, se viene fornita loro dell'energia sotto forma di differenza di potenziale. Naturalmente non tutti gli elettroni sono liberi di muoversi, ma solo quelli più lontani dal nucleo. Esistono quindi due tipi di elettroni:

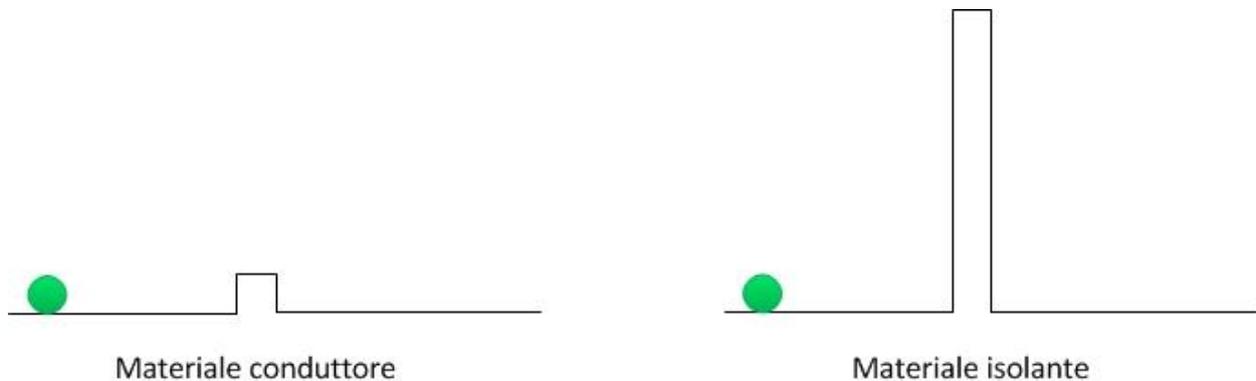
- Gli **ELETTRONI DI VALENZA**: sono vicini al nucleo e quindi sono saldamente legati. Non possono mai lasciare l'atomo.
- Gli **ELETTRONI DI CONDUZIONE**: sono lontani dal nucleo e sono quelli che sono responsabili della conduzione della corrente elettrica.

Quando un elettrone riesce a liberarsi dal nucleo che lo teneva legato a sé, lascia alle sue spalle un posto vuoto, chiamato **LACUNA**.

Questa lacuna è in pratica una mancanza di carica negativa, e quindi si comporta come se fosse una carica positiva. Per capire questo concetto si consideri un atomo nella sua globalità. L'atomo è neutro, cioè ha lo stesso numero di protoni e di elettroni. Se togliamo un elettrone, l'atomo diventa positivo perché c'è uno squilibrio di carica. Quindi, considerando la carica totale, togliere un elettrone equivale ad aggiungere un protone.

Nel caso delle lacune è la stessa cosa: la mancanza dell'elettrone ha gli stessi effetti della presenza di un protone. Possiamo quindi vedere la corrente elettrica come lo spostamento contemporaneo di elettroni (negativi) e di lacune (positive).

Per capire meglio la differenza tra isolanti possiamo immaginare che la differenza di potenziale sia una sorta di muro, un gap energetico che gli elettroni di conduzione devono saltare per poter dare origine alla corrente elettrica.



Esiste però un'altra categoria di materiali con un comportamento intermedio: i **SEMICONDUTTORI**. I semiconduttori sono materiali che a temperatura ambiente non conducono, o meglio, conducono pochissimo. Alcuni elettroni riescono a liberarsi dal legame col nucleo, ma sono molto pochi rispetto al numero di elettroni necessari per poter dire che il materiale conduce.

Se però il materiale viene riscaldato gli elettroni acquistano energia e possono superare il gap energetico. La temperatura a cui bisogna portare il materiale è talmente alta da distruggerlo, ma esiste un trattamento che permette ai semiconduttori di condurre in particolari condizioni senza essere distrutti.

Questo trattamento è chiamato **DROGAGGIO**.

I principali materiali semiconduttori sono il silicio e il germanio.

Il silicio è quello più utilizzato perché è il più abbondante sulla crosta terrestre. Si ricava dalla silice (in pratica la sabbia) che viene fatta reagire con carbonio ad alta temperatura.

Il silicio e il germanio si chiamano semiconduttori puri. Quando vengono sottoposti al trattamento che consente loro di condurre senza distruggersi diventano semiconduttori drogati.

4.2. Drogaggio di tipo P e di tipo N

Quando un semiconduttore viene drogato, si inserisce al suo interno un atomo di una sostanza diversa dal semiconduttore. Ad esempio, il silicio può essere drogato inserendo al suo interno un atomo di alluminio.

Ci sono due tipi di drogaggio:

- **DROGAGGIO DI TIPO N** (dove N sta per "negativo"): consiste nell'introduzione all'interno del materiale di sostanze che hanno un elettrone in più. C'è quindi una carica negativa libera di muoversi.

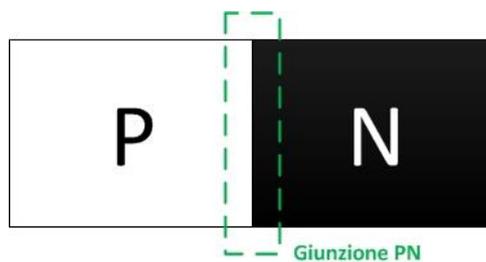
- **DROGGAGGIO DI TIPO P** (dove P sta per “positivo”): consiste nell’introduzione all’interno del materiale di sostanza che hanno un elettrone in meno. Rimane quindi una lacuna (un posto vuoto) che si comporta come una carica positiva.

IL DROGGAGGIO DI UN SEMICONDUOTTORE CONSISTE NELL’INTRODUZIONE DI SOSTANZE ESTRANEE AL SUO INTERNO, ALLO SCOPO DI MODIFICARNE LE CARATTERISTICHE ELETTRICHE.

4.3. La giunzione PN

Il componente fondamentale dell’elettronica è la cosiddetta giunzione PN.

Una giunzione PN si ottiene unendo un materiale semiconduttore drogato di tipo P ad un materiale semiconduttore drogato di tipo N.



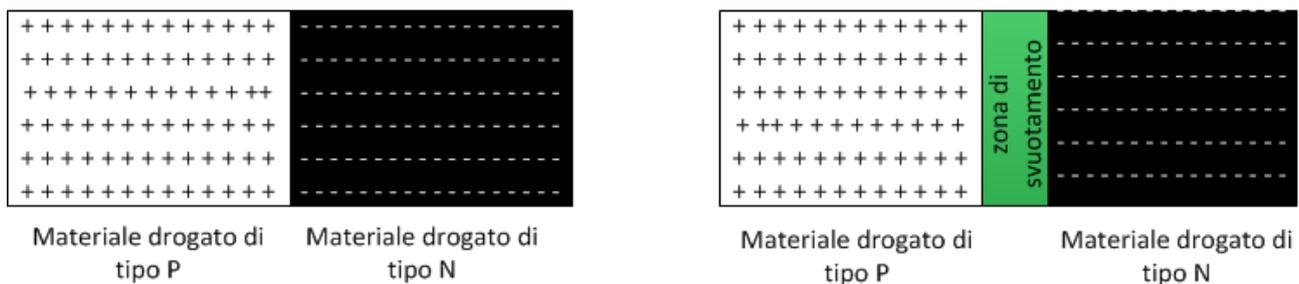
La zona P contiene atomi che hanno catturato un elettrone (ioni negativi) e le lacune che sono rimaste quando gli elettroni di conduzione sono stati catturati. Gli ioni negativi sono fissi mentre le lacune sono libere di spostarsi.

La zona N contiene atomi che hanno ceduto un elettrone (ioni positivi) e gli elettroni emessi da questi atomi. Gli ioni sono fissi, mentre gli elettroni emessi dagli ioni sono liberi di muoversi.

In realtà anche nella zona P ci sono alcuni elettroni liberi e nella zona N ci sono alcune lacune. Sono però in numero piccolo e vengono quindi chiamate **CARICHE MINORITARIE**.

Nel loro globalità, sia la zona P che la zona N risultano neutre: infatti gli ioni negativi compensano le lacune e gli ioni positivi compensano gli elettroni.

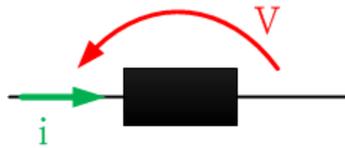
Questa situazione iniziale si modifica rapidamente non appena i due tipi di materiali vengono in contatto. Infatti gli elettroni che si trovano vicino alla giunzione vengono catturati dalle lacune creando così una zona in cui non ci sono più né elettroni né lacune. Questa zona è detta **ZONA DI SVUOTAMENTO**.



A questo punto ci troviamo di fronte a due zone (P-N) unite da un tratto isolante. La differenza di potenziale che c'è tra le due zone impedisce che ci siano ulteriori scambi di elettroni e diviene una vera e propria barriera, chiamata **BARRIERA DI POTENZIALE**.

Per convenzione il campo elettrico porta le cariche a scorrere dal polo positivo al polo negativo, quindi dal semiconduttore di tipo P al semiconduttore di tipo N.

La barriera di potenziale essendo passiva agisce al contrario, secondo la convenzione degli utilizzatori:



La barriera di potenziale è dell'ordine degli 0,6-0,8 V può essere attraversata solo quando viene fornita alla giunzione abbastanza energia (sotto forma di tensione) per superarla.

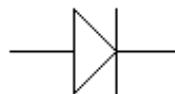
4.4. Il diodo

Il diodo è il più semplice componente elettronico ed è costituito da una sola giunzione PN.

Alla giunzione vengono applicati due morsetti in modo che possa essere collegato ad altri bipoli e il tutto viene incapsulato in un contenitore isolante.

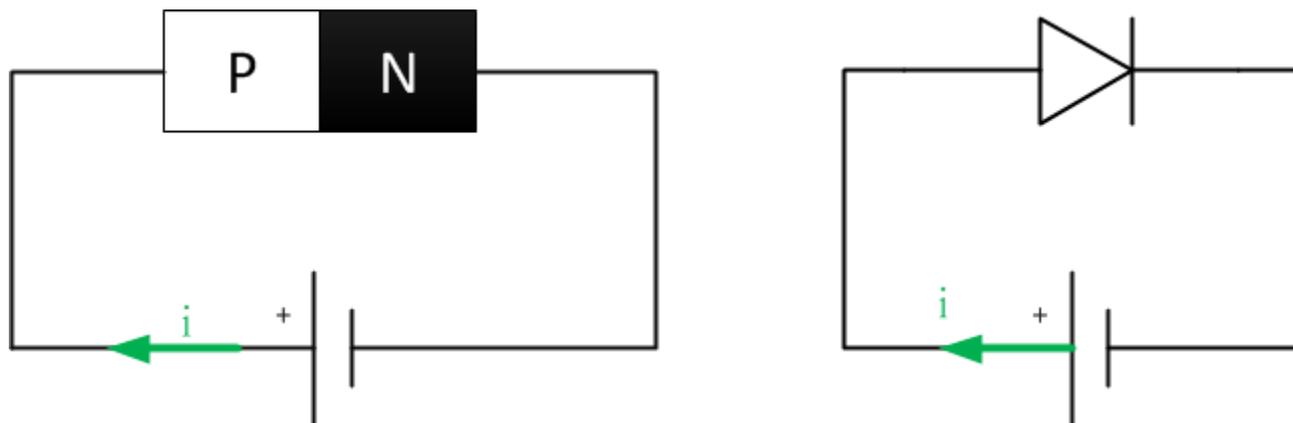


In uno schema elettrico il diodo viene rappresentato con il simbolo seguente:



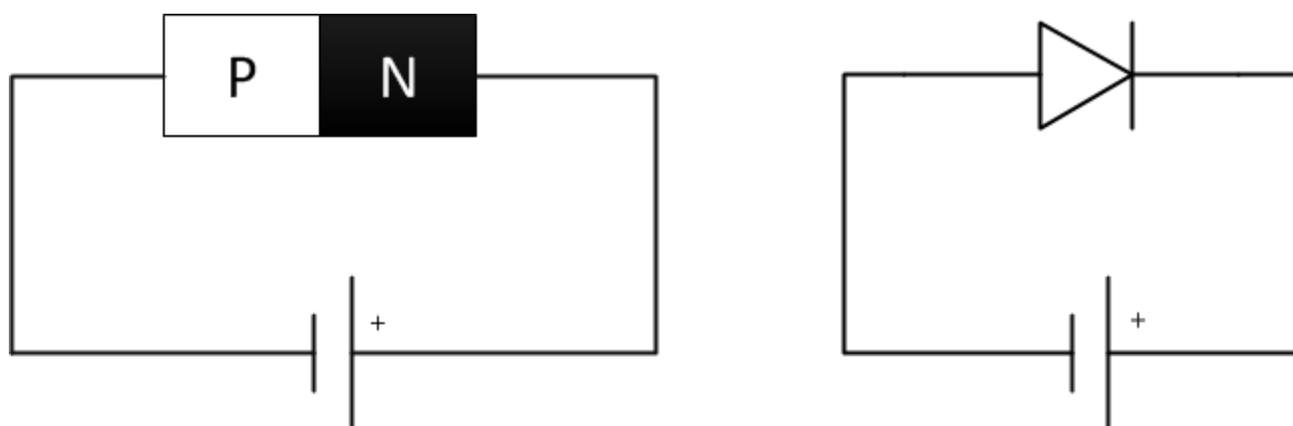
Il diodo può essere equiparato ad una valvola di non ritorno, che fa passare corrente solo in un verso. Il diodo deve essere collegato in modo da fornire corrente alla parte positiva della giunzione perché in questo modo la tensione si oppone alla barriera di potenziale e la corrente è libera di attraversare il diodo, come se questo fosse un corto circuito. Gli elettroni della zona N tendono quindi a spostarsi verso la zona P e le lacune dalla zona P si spostano verso la zona N: la loro somma crea una corrente nel diodo, chiamata **CORRENTE DIRETTA**.

Dunque, quando il diodo è collegato in modo che la corrente scorra dalla zona P alla zona N lascia passare le cariche elettriche senza fermarle. Si dice che il diodo è **POLARIZZATO DIRETTAMENTE**.



Se invece viene collegato con i morsetti al contrario, la tensione fornita dalla batteria si va a sommare alla barriera di potenziale e la rafforza impedendo alla corrente di attraversare il diodo. Esso si comporta quindi come un circuito aperto.

In questo caso si dice che è **POLARIZZATO INVERSAMENTE**.

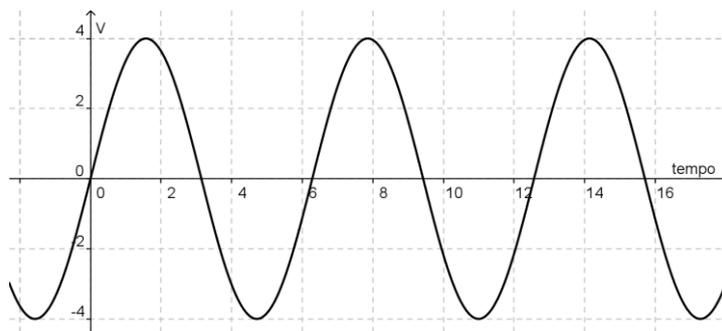


4.4.1. Il diodo polarizzato direttamente

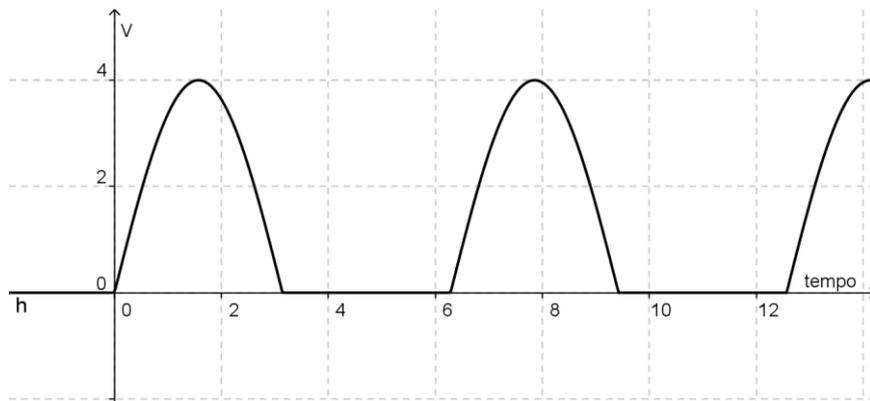
A livello ideale il diodo è un dispositivo che, alimentato con una batteria, fa passare corrente solo in un verso e la blocca quando scorre nel verso opposto.

Il diodo ideale conduce subito, per tensioni anche piccolissime; il diodo reale invece non conduce finché non gli vengono applicate tensioni di circa 0,6 V. Questa tensione è chiamata tensione di soglia.

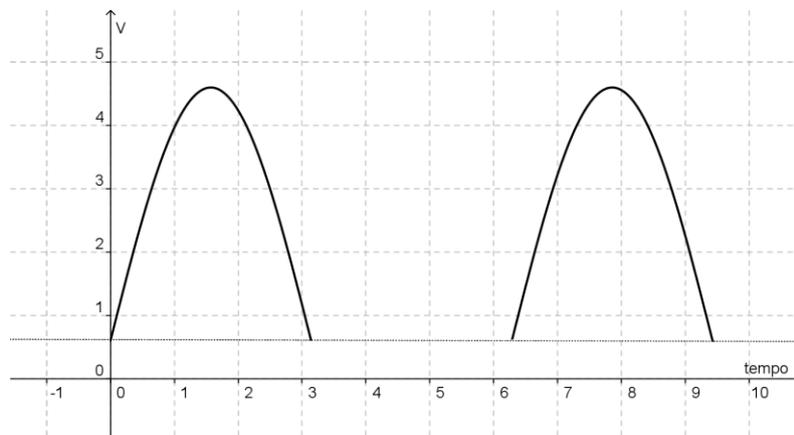
Per capire la differenza tra un diodo ideale e uno reale consideriamo di alimentarli entrambi con corrente alternata:



All'uscita dal diodo ideale si misurerà una corrente come quella rappresentata nel seguito:



Invece nel diodo reale si misurerà una corrente come quella seguente:



Nella realtà il diodo non inizia a condurre quando la tensione è nulla, ma quando la tensione ha un certo valore molto piccolo. Per i diodi al silicio questa tensione è di 0,6 V, per quelli al germanio è di 0,2 V.

4.4.2. Il diodo polarizzato inversamente

La presenza di una tensione inversa provoca un aumento della barriera di potenziale: gli elettroni dal lato N e le lacune dal lato P, sono impediti ad attraversare la barriera. Gli unici elettroni che sono liberi di muoversi sono quelli spontanei, che danno origine ad una debole corrente, che scorre nel verso opposto ed è chiamata **CORRENTE DI SATURAZIONE INVERSA**.

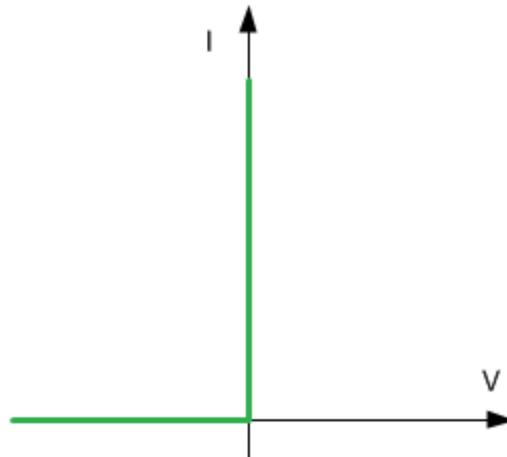
La maggior parte dei diodi non è in grado di funzionare in polarizzazione inversa e si rompe.

4.4.3. Caratteristica volt-amperometrica del diodo

La caratteristica tensione-corrente del diodo, a differenza di quelle che abbiamo visto per la resistenza e i generatori ideali di tensione e corrente, non è una funzione lineare.

Questo significa che non è rappresentata da una retta.

Nel caso ideale il diodo fa passare corrente istantaneamente quando è polarizzato direttamente, quindi la sua caratteristica sarà quella seguente:

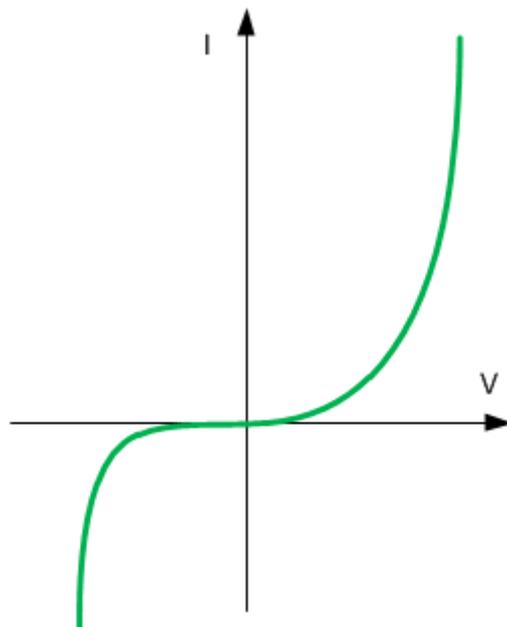


I diodi a giunzione p-n reali hanno una caratteristica analoga a quelli ideali, con alcune differenze:

- quando sono polarizzati direttamente non iniziano a condurre subito, ma solo quando la tensione supera una certa soglia, chiamata **TENSIONE DI SOGLIA**, pari a circa 0,6 V.
- quando sono polarizzati inversamente, invece di impedire completamente il passaggio della corrente vengono attraversati da una corrente molto piccola, chiamata corrente di saturazione inversa. Questa corrente rimane pressoché costante anche quando la tensione inversa aumenta.

Ad un certo punto, però. Superata una tensione chiamata **TENSIONE DI ZENER**, la corrente aumenta molto rapidamente. Questo regime di funzionamento viene chiamato **REGIME DI VALANGA** o **REGIME BREAK DOWN**.

Questo regime di funzionamento non è dannoso per il componente finché la potenza dissipata rimane nei limiti tollerati: i diodi zener sono progettati per funzionare proprio in regime valanga.



4.5. Il transistor

Abbiamo visto che il diodo è un componente elettronico formato da una giunzione PN.

Ora studieremo un altro componente elettronico formato da materiali semiconduttori: il **TRANSISTOR**.

Il transistor può servire come interruttore o come amplificatore ed è formato dall'unione di tre materiali semiconduttori diversamente drogati. Ne esistono di due tipi:

- **TRANSISTOR A GIUNZIONE PNP**: formato da due semiconduttori drogati di tipo P e uno di tipo N
- **TRANSISTOR A GIUNZIONE NPN**: formato da due semiconduttori drogati di tipo N e uno di tipo P

Il semiconduttore centrale ha uno spessore molto piccolo e prende il nome di **BASE**. I due laterali, uguali tra loro, prendono i nomi di **COLLETTORE** ed **EMETTITORE**.



Dai tre semiconduttori escono dei morsetti, o terminali, che rendono possibile collegare il transistor al resto del circuito.

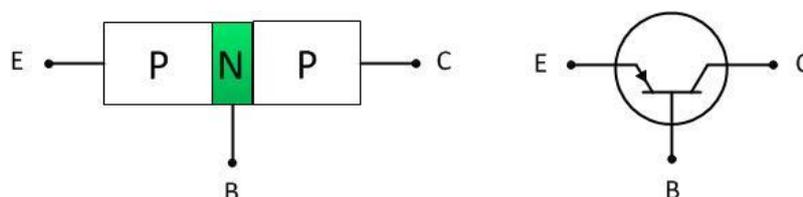
Questo tipo di transistor, formato da giunzioni PN è chiamato anche transistor a giunzione bipolare (in inglese Bipolar Junction Transistor BJT). Esistono anche altri tipi di transistor, ad esempio il transistor ad effetto di campo (FET).

Noi studieremo solo il transistor bipolare.

Il transistor NPN viene schematizzato in un circuito con il simbolo seguente:

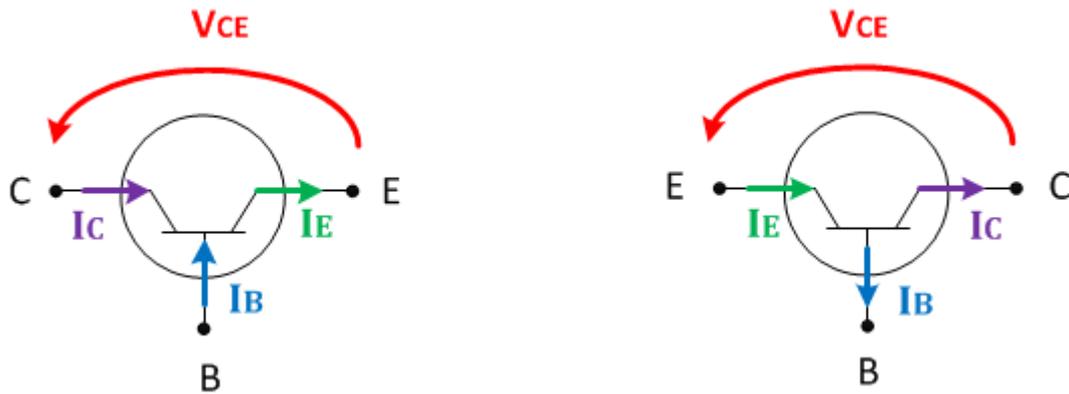


Invece il transistor PNP viene schematizzato con questo simbolo:



4.5.1. Correnti nel transistor

Avendo tre morsetti, il transistor ha tre correnti. Per convenzione si attribuisce alla corrente dell'NPN un verso che va dal collettore all'emettitore (la tensione sarà quindi opposta essendo un utilizzatore) e al PNP un verso che va dall'emettitore al collettore:



Tutto questo vale solo se osserviamo il transistor come scatola con tre morsetti.

Se invece analizziamo ciò che avviene all'interno la situazione diventa più complessa. In questo corso non scenderemo nel dettaglio di come scorrono le correnti (di elettroni e di lacune) in un transistor ma ci limiteremo ad alcune considerazioni.

- Quando un transistor viene alimentato, la corrente esterna, quella che arriva ai suoi morsetti, è costituita da elettroni (si tratta di corrente in un filo di rame) ma all'interno del transistor la corrente è costituita da elettroni liberi e da lacune, come in tutti i semiconduttori drogati.
- **NEL TRANSISTOR NPN LA CORRENTE PRINCIPALE È DATA DAGLI ELETTRONI IN ECCESSO**, mentre **NEL TRANSISTOR PNP LA CORRENTE PRINCIPALE È DATA DELLE LACUNE**. Esiste, come nel caso del diodo, una corrente minoritaria costituita da lacune nel caso del transistor NPN e da elettroni nel caso del transistor PNP.
- Le correnti interne che scorrono dal collettore all'emettitore nel caso dell'NPN o dall'emettitore al collettore nel caso del PNP sono intense mentre **LA CORRENTE CHE SCORRE NELLA BASE È DEBOLE**.

4.5.2. Relazione tra corrente di base e di collettore

La **corrente di base** I_B è una corrente debole, legata alle altre due correnti, quella di **collettore** I_C e quella di **emettitore** I_E .

Queste ultime possono essere considerate più o meno uguali:

$$I_E \cong I_C$$

Invece la corrente di base è legata a queste ultime da un fattore moltiplicativo adimensionale, chiamato **GUADAGNO DI CORRENTE IN CONTINUA** h_{FE} :

$$I_C = h_{FE} \cdot I_B$$

Il valore di h_{FE} è di solito compreso tra 10 e 1000.

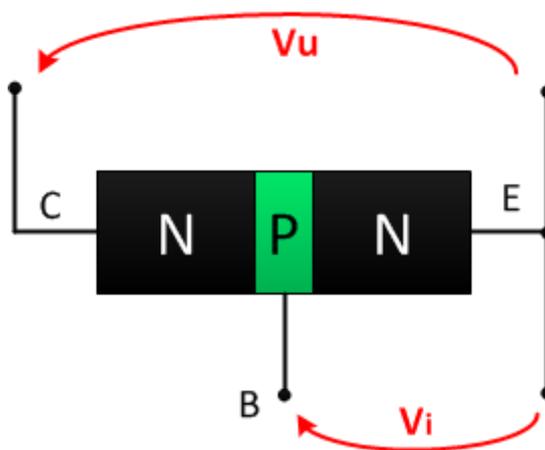
Il fatto che una corrente di base molto piccola possa produrre una corrente di collettore molto grande è sfruttato per creare amplificatori.

4.5.3. Il collegamento dei transistor

I transistor vengono collegati agli altri elementi del circuito tramite i terminali. Solitamente uno dei terminali è collegato ad un doppio filo, in modo da formare un nodo ed essere quindi in comune a due parti del circuito. In base al terminale che viene messo in comune si hanno:

- Transistor a base comune CB (in inglese Common Base)
- Transistor ad emettitore comune CE (in inglese Common Emitter)
- Transistor a collettore comune CC (in inglese Common Collector)

Quello più utilizzato, e quindi l'unico che studieremo, è il transistor ad emettitore comune che viene usato come interruttore e come amplificatore.



Come possiamo vedere dall'immagine, dalla base e dal collettore esce un singolo terminale mentre l'emettitore si divide in due parti: una parte determina una differenza di potenziale con la base, che può essere vista come tensione di ingresso; l'altra parte determina una differenza di potenziale con il collettore, che può essere vista come la tensione di uscita.

Analizzeremo il comportamento e l'utilizzo di questo tipo di collegamento nel prossimo capitolo, quando vedremo gli amplificatori e gli interruttori.

4.5.4. La caratteristica volt-amperometrica del transistor

Un transistor collegato ad una rete di bipoli si presenta come un quadripolo, cioè un dispositivo con quattro morsetti:

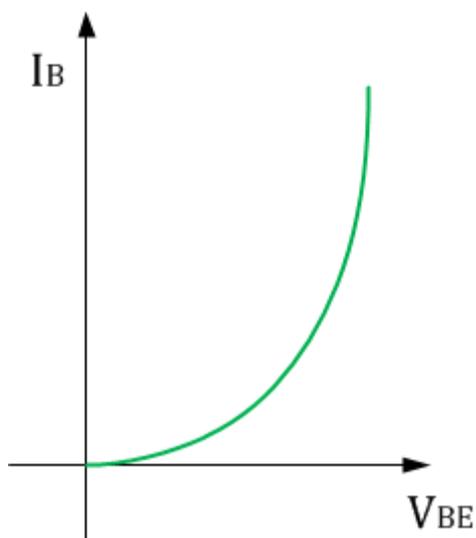
- due di ingresso: ai cui capi si misura la tensione di ingresso: nel caso della configurazione ad emettitore comune si tratta della tensione tra base ed emettitore V_{BE} .
- due di uscita, ai cui capi si misura la tensione di uscita: nel caso della configurazione ad emettitore comune si tratta della tensione tra l'emettitore e il collettore V_{CE} .

Di conseguenza possiamo considerare il transistor in configurazione ad emettitore comune come nello schema seguente:



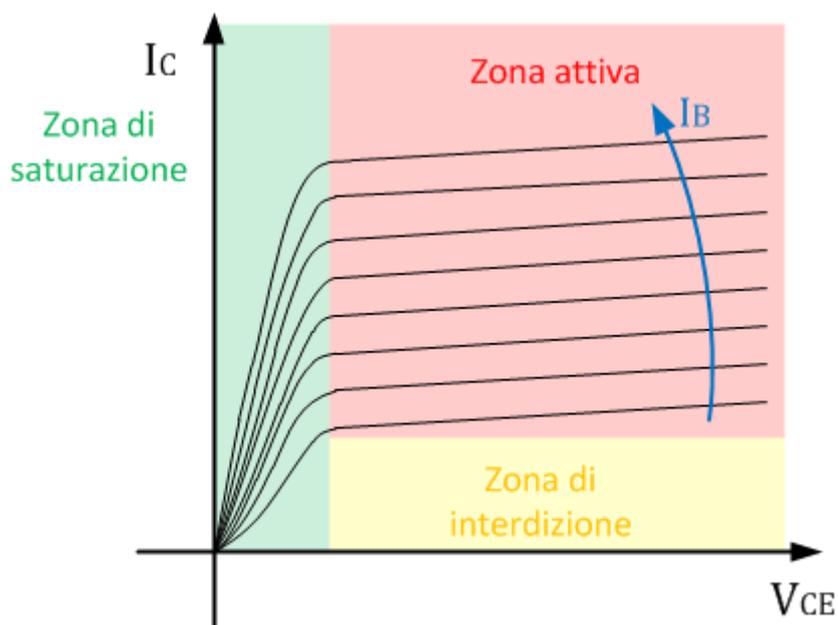
E' quindi possibile tracciare due caratteristiche volt-amperometriche del transistor:

- **CARATTERISTICA DI INGRESSO** in cui compaiono la corrente di base e la tensione tra la base e l'emettitore V_{BE} .



- Caratteristica di uscita in cui compaiono la corrente che esce dal collettore I_C e la tensione tra l'emettitore e il collettore V_{CE} .

Poiché la caratteristica cambia in base alla corrente di base, questo grafico non è formato da una sola curva, ma da una famiglia di curve, ognuna corrispondente ad un certo valore di I_B .



Nella caratteristica voltamperometrica del transistor si distinguono tre zone:

- **ZONA ATTIVA:** in cui la caratteristica è lineare. E' la zona in cui il transistor viene usato come amplificatore, cioè per fornire in uscita una corrente I_C che aumenta di un fattore (il guadagno h_{FE}) all'aumentare della corrente di base I_B che funge da corrente pilota.
Se si vuole avere una corrente elevata in uscita bisogna aumentare la corrente di base.
- **ZONA DI SATURAZIONE:** in cui la corrente di collettore è molto alta mentre la tensione V_{CE} è bassa. Questo significa che il transistor lascia passare la corrente creando una debolissima caduta di tensione. E' come se fosse un cortocircuito (interruttore posizionato su ON) la cui unica resistenza è quella data dal materiale che costituisce il conduttore.
- **ZONA DI INTERDIZIONE:** in cui la corrente in uscita è bassa a prescindere dalla tensione. Questo significa che possiamo assimilare il transistor ad un circuito aperto (interruttore posizionato su OFF)

In base al punto in cui il transistor lavoro si possono avere i due principali utilizzi: come interruttore e come amplificatore. Studieremo questi due tipi di circuito nel prossimo capitolo.

5. ALIMENTATORI, INTERRUTTORI E AMPLIFICATORI

Alcuni apparecchi richiedono in ingresso corrente continua con una tensione diversa da quella che arriva nelle nostre case. I computer ad esempio hanno bisogno di circa 20 V.

Per fornire ai vari dispositivi la corretta alimentazione, ognuno di essi è provvisto di un **ALIMENTATORE** che ha lo scopo di trasformare la corrente cambiandole frequenza e tensione.

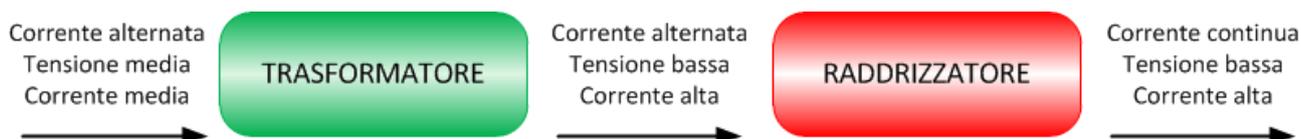
Prima di studiare come è fatto e come funziona un alimentatore cerchiamo di capire come si comporta in termini di correnti, tensioni e potenze.

Un alimentatore è formato da due dispositivi:

- Un **TRASFORMATORE** che ha lo scopo di abbassare la tensione, aumentando la corrente. In questo modo la potenza rimane invariata:

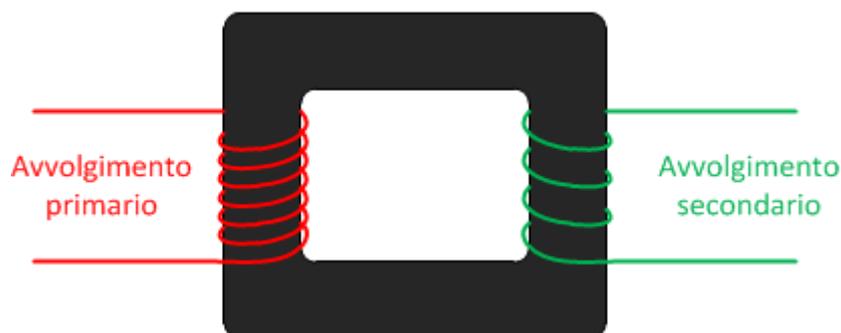
$$P = V \cdot I$$

- Un **RADDRIZZATORE** che ha lo scopo di trasformare la corrente continua in corrente alternata.



5.1. Il trasformatore

Il trasformatore è un dispositivo costituito da un magnete attorno al quale sono avvolte due spire di filo conduttore, in pratica due induttori. I due avvolgimenti non sono in contatto tra loro e vengono chiamati **AVVOLGIMENTO PRIMARIO** e **AVVOLGIMENTO SECONDARIO**.



L'**AVVOLGIMENTO PRIMARIO** è quello a cui arriva la corrente in ingresso, prima della trasformazione; l'**AVVOLGIMENTO SECONDARIO** è quello da cui esce la corrente trasformata.

Cerchiamo ora di capire come è possibile che, senza nemmeno toccarsi, i due avvolgimenti riescano a modificare la tensione.

Il principio fisico su cui si basa il funzionamento del trasformatore è noto come induzione elettromagnetica. Abbiamo già studiato che quando una corrente variabile (ad esempio alternata) percorre un filo conduttore nasce un campo elettromagnetico nello spazio attorno al filo.

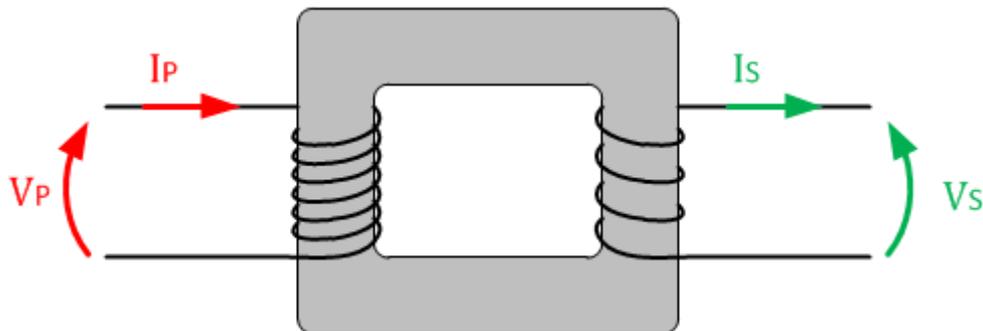
In natura avviene anche il fenomeno contrario: se un filo conduttore viene immerso in un campo magnetico di intensità variabile nel filo nasce una corrente elettrica alternata.

Il fatto che il campo magnetico sia variabile è molto importante: se il campo magnetico non varia non nasce nessuna corrente.

Possiamo quindi riassumere quanto detto in questo modo:

UN FILO PERCORSO DA CORRENTE ALTERNATA GENERA UN CAMPO MAGNETICO CHE VARIA D'INTENSITÀ AL PASSARE DEL TEMPO. IN UN FILO IMMERSO IN UN CAMPO MAGNETICO DI INTENSITÀ VARIABILE, NASCE UNA CORRENTE ELETTRICA ALTERNATA.

Il trasformatore funziona grazie a questo principio.



La tensione ai capi dell'avvolgimento primario V_p genera una corrente primaria I_p nel primo induttore. A sua volta la corrente alternata genera un campo magnetico che varia nel tempo. Il secondo induttore è immerso in un campo magnetico variabile e quindi nel filo comincia a scorrere una corrente secondaria I_s . Di conseguenza ai capi dell'avvolgimento secondario si misurerà una tensione V_s .

Naturalmente, poiché non è possibile creare energia dal nulla, la potenza deve mantenersi costante (per lo meno nel caso ideale) si avrà:

$$P_p = P_s \quad \rightarrow \quad V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

La tensione del secondario dipende dall'intensità del campo magnetico che, a sua volta, dipende dal numero di spire, cioè dal numero di giri che il filo conduttore fa attorno al nucleo magnetico.

Se indichiamo con N_p il numero di spire dell'avvolgimento primario e con N_s il numero di spire dell'avvolgimento secondario, la relazione che lega le due tensioni è:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Ad esempio, se l'avvolgimento secondario ha la metà delle spire dell'avvolgimento primario, la tensione in uscita sarà dimezzata:

$$N_p = 100$$

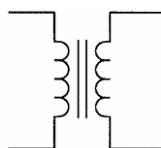
$$N_s = 50$$

$$V_p = 220 \text{ V}$$

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot V_p = \frac{50}{100} \cdot 220 = 110 \text{ V}$$

Il fenomeno avviene anche se il filo conduttore non è avvolto attorno ad un magnete. In questo caso però il fenomeno dell'induzione avviene con più difficoltà. Lo scopo del magnete è quindi quello di agevolare la nascita di una tensione indotta nell'avvolgimento secondario.

In uno schema elettrico, il trasformatore viene indicato con il simbolo della figura seguente:



5.2. Il raddrizzatore

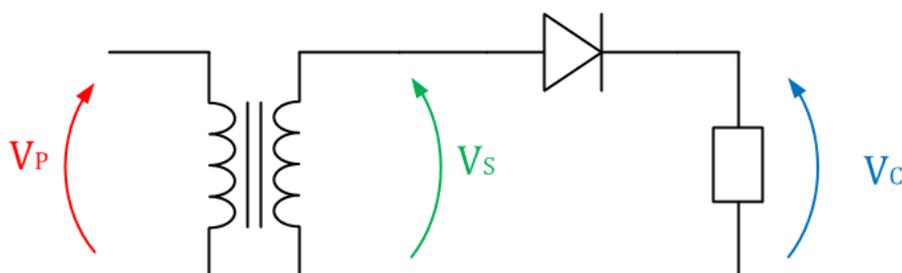
Il secondo elemento che troviamo in un alimentatore è il raddrizzatore. Questo dispositivo serve a trasformare la corrente alternata in continua e per farlo utilizza il diodo.

Esistono diversi tipi di raddrizzatore a seconda del numero di diodi utilizzati e della loro disposizione ma noi vedremo solo i tre principali:

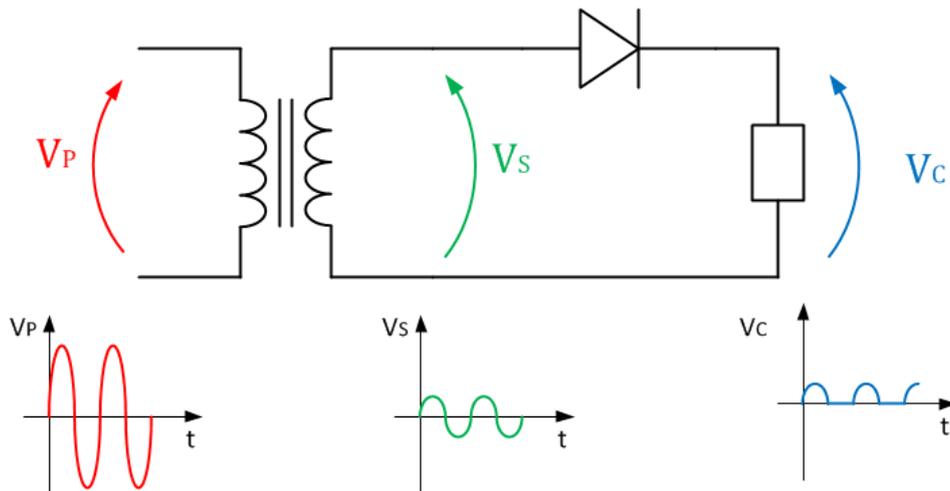
- Raddrizzatore a semionda
- Raddrizzatore a semionda intera con trasformatore a presa centrale
- Raddrizzatore a semionda interna con ponte di diodi (detto anche ponte di Greutz)

5.2.1. Raddrizzatore a semionda

Un circuito raddrizzatore a semionda è costituito da un trasformatore e da un diodo.

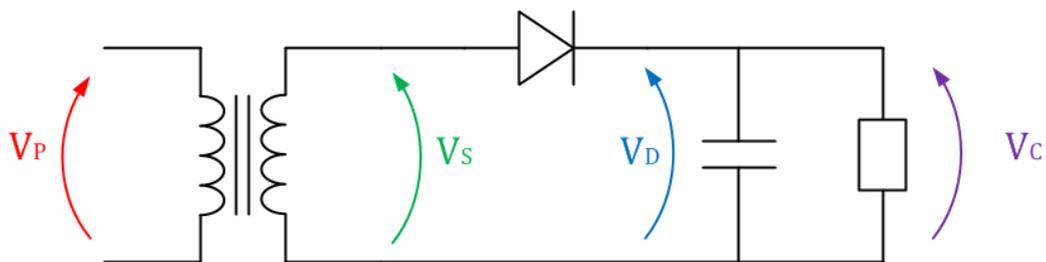


Il trasformatore abbassa la tensione, facendola passare dal valore V_p al valore V_s . La corrente passa poi nel diodo e arriva al carico, rappresentato da una generica impedenza. Sul carico c'è la tensione V_c a cui sono state tagliate le semionde negative.



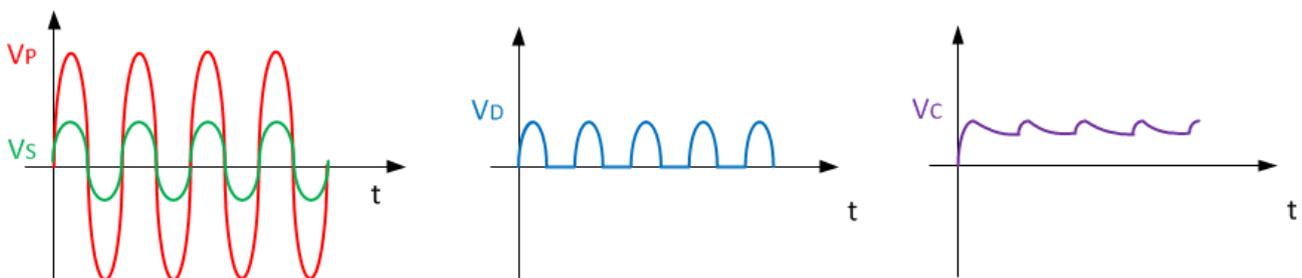
Dal diagramma delle tensioni si vede che in uscita il diodo ha tagliato le semionde negative, lasciando solo quelle positive.

Il circuito fatto in questo modo non ci dà però una corrente continua, ma solo pulsante. Per migliorare la situazione possiamo mettere in parallelo al carico un condensatore, come nello schema seguente:



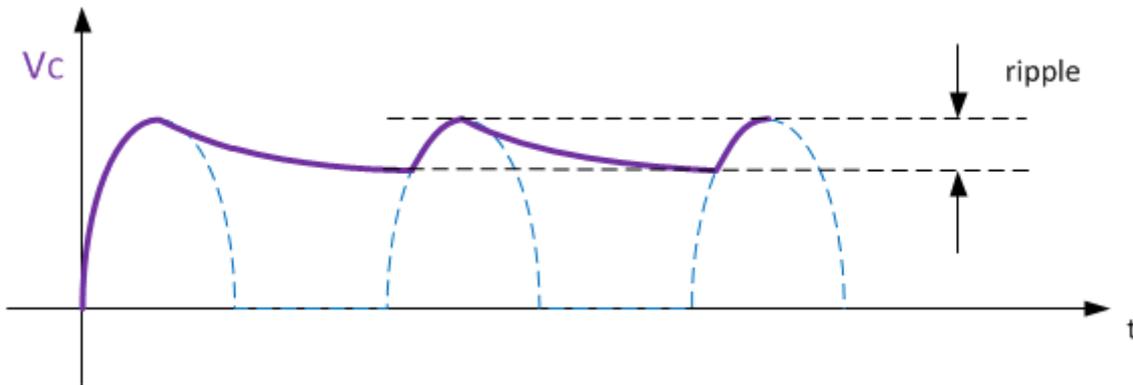
Abbiamo quindi un passaggio in più: la tensione dopo il diodo V_D è quella che prima arrivava al carico; ora invece deve passar dal condensatore e la tensione sul carico sarà la V_C .

Per capire come è fatta la V_C osserviamo i grafici delle tensioni:



Come sappiamo, il condensatore trattiene le cariche quando la corrente aumenta e le rilascia quando la corrente diminuisce. Quindi, in un certo senso, il condensatore fa da ponte tra una semionda e l'altra, livellando la corrente.

Proprio per questo motivo il condensatore inserito in parallelo al carico in un circuito raddrizzatore prende il nome di **CONDENSATORE DI LIVELLAMENTO** e il circuito si dice **STABILIZZATO**. Osservando il grafico seguente si può notare che, anche con il condensatore, la tensione non è veramente continua. La differenza tra la tensione massima e la tensione minima si chiama **RIPPLE** o **RESIDUO DI ALTERNATA**.



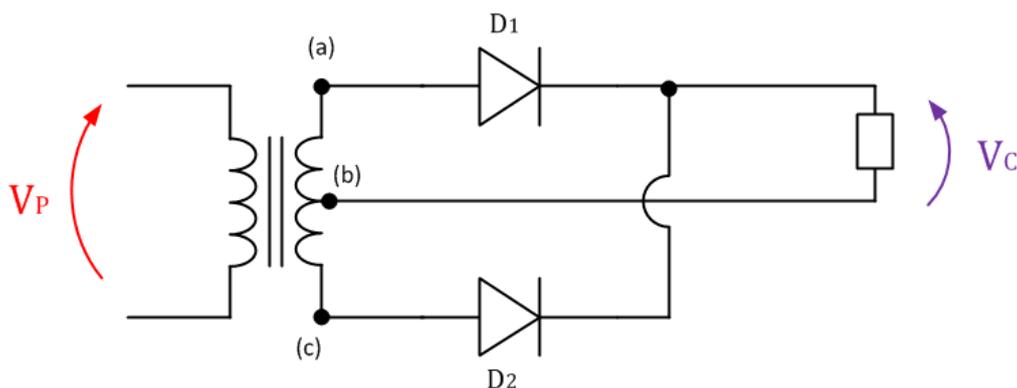
La pendenza della linea che rappresenta la scarica del condensatore dipende dall'entità del carico: più l'impedenza è grande e più il condensatore si scaricherà rapidamente. Quindi il ripple aumenta all'aumentare della corrente prelevata.

Il ripple ci dà l'idea di quanto sia efficiente il raddrizzatore.

Minore è il fattore di ripple, migliore è il livellamento; quindi ci si avvicina di più ad una vera corrente continua.

5.2.2. Raddrizzatore a doppia semionda con trasformatore a presa centrale

Un modo per migliorare l'efficienza del raddrizzatore è quello di utilizzare due diverse tensioni, sfasate di 180° l'una dall'altra. Una tensione è quella che arriva dall'uscita del trasformatore, come nel caso della semionda semplice; l'altra tensione viene presa dall'avvolgimento secondario del trasformatore, mediante una presa centrale (da qui il nome). Le due tensioni vengono raddrizzate tramite due diodi collegati come nello schema seguente:

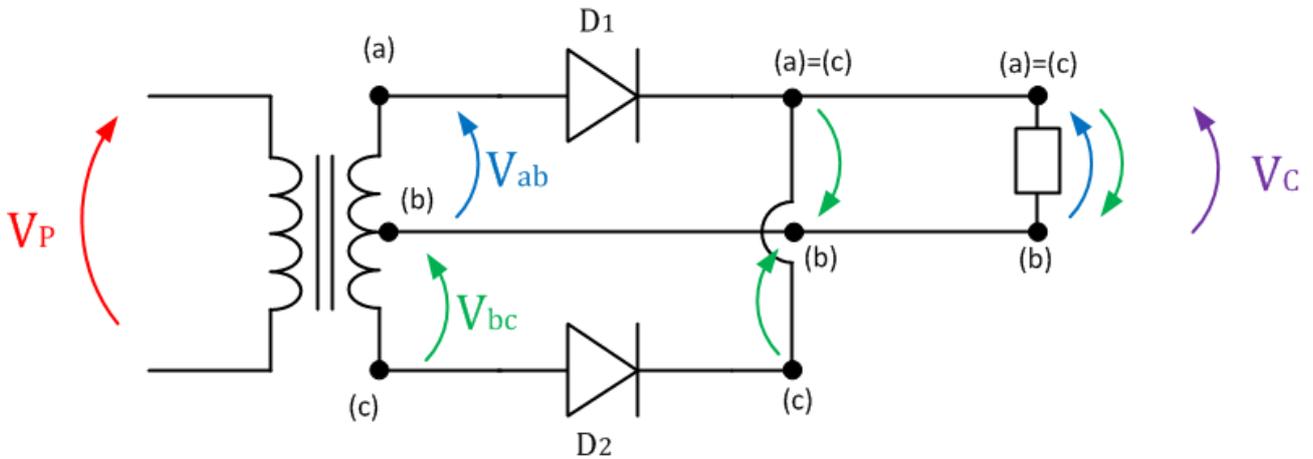


Per capire come funziona questo tipo di raddrizzatore dobbiamo seguire nel loro percorso le due fasi di tensione:

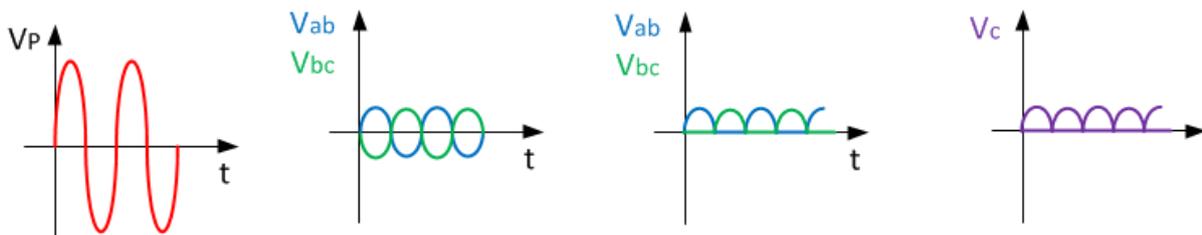
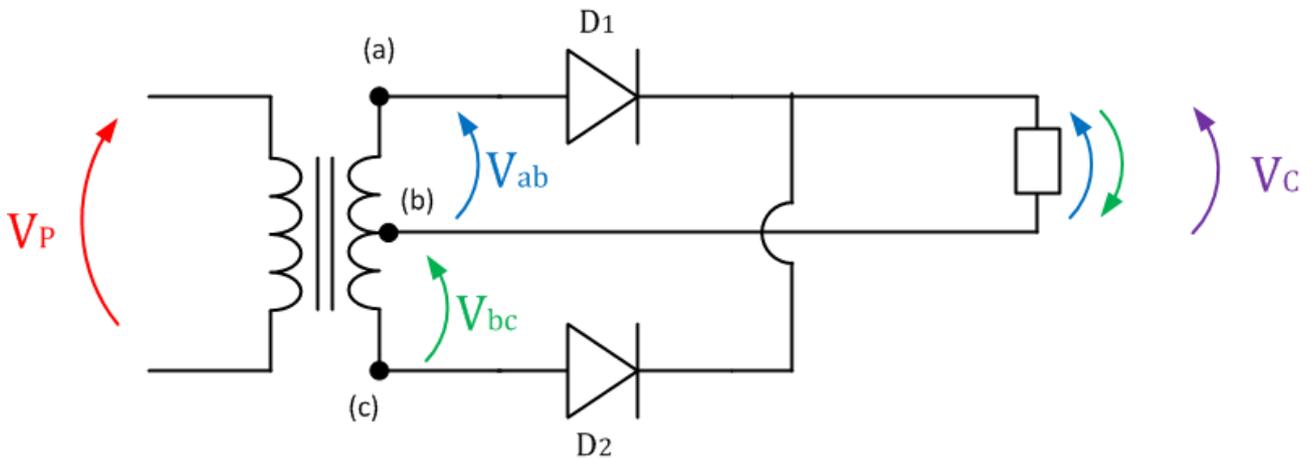
- La prima fase è quella che si misura tra i nodi (a) e (b)
- La seconda fase è quella che si misura tra i nodi (c) e (b)

Se seguiamo le due fasi di tensione nel loro percorso vediamo che la prima fase attraversa il diodo D_1 e arriva dritta al carico.

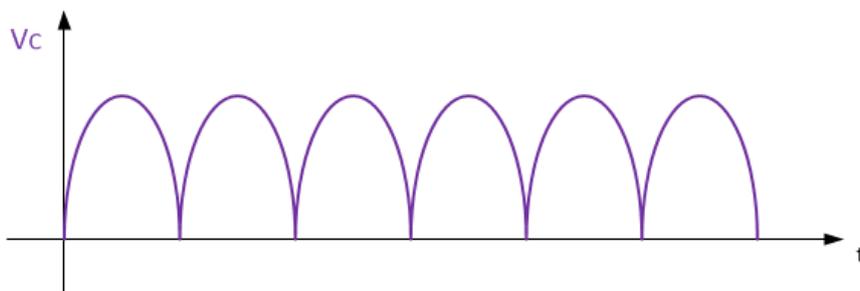
La seconda fase passa dal diodo D_2 ma ad un certo punto subisce un'inversione: il nodo (c) infatti è collegato al ramo del nodo (a):



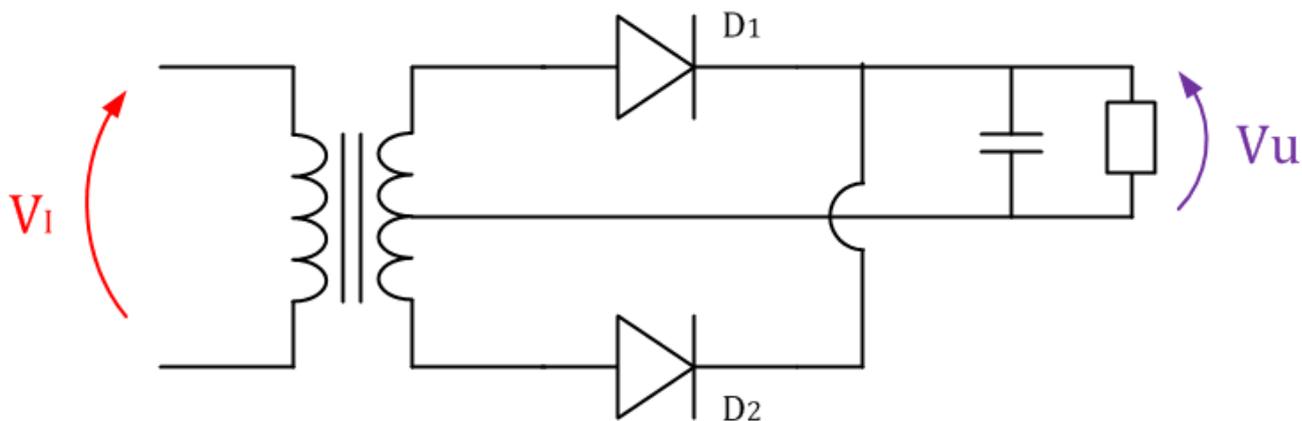
Sommando le due tensioni, a causa del loro sfasamento, si ottiene una doppia semionda.



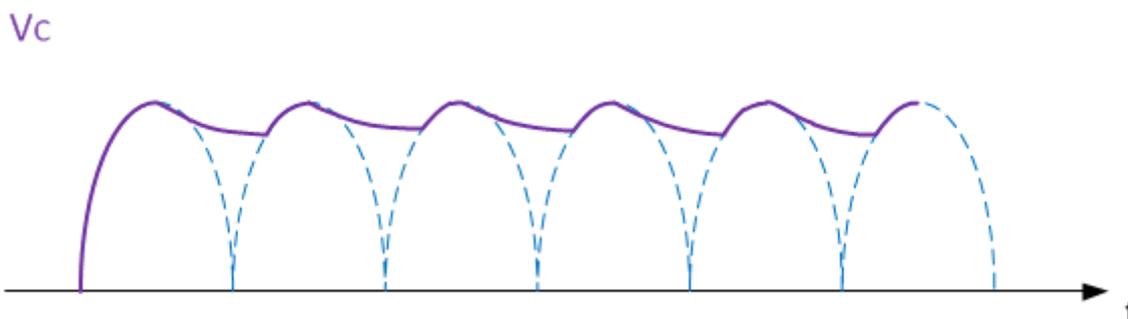
Questo circuito non è stabilizzato in quanto non c'è nessun condensatore. Diagrammando la tensione in uscita si ottiene il grafico seguente:



Per rendere la tensione più stabile si può inserire un condensatore in parallelo al carico:



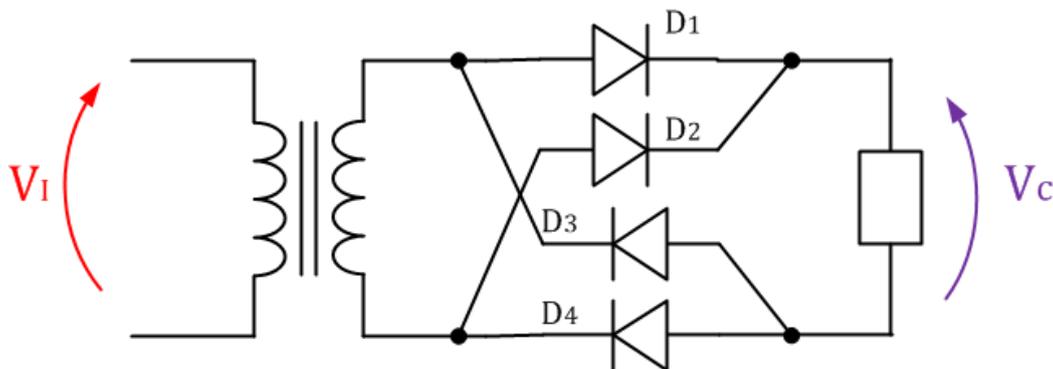
Il funzionamento del condensatore di livellamento è analogo a quello che abbiamo visto per il raddrizzatore a semionda semplice. Il suo scopo è quello di rendere la corrente più continua, colmando il gap tra due semionde.



5.2.3. Raddrizzatore a ponte di diodi

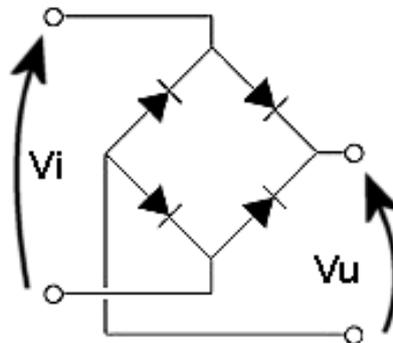
Dal confronto tra i due raddrizzatori precedenti possiamo notare come all'aumentare del numero di fasi diminuisce il ripple e quindi la corrente in uscita diventa più stabile, più continua.

Un tipo di raddrizzatore molto utilizzato è il raddrizzatore a ponte di diodi. Come dice la parola stessa, questo raddrizzatore si basa su una particolare disposizione di diodi chiamata ponte. L'immagine seguente mostra un tipo di ponte, chiamato Ponte di Graetz.

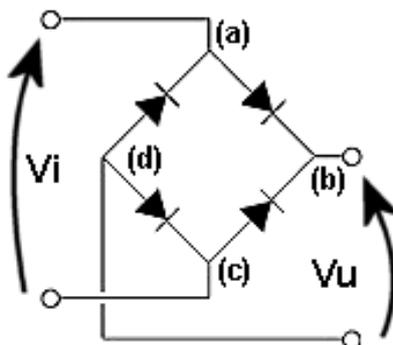
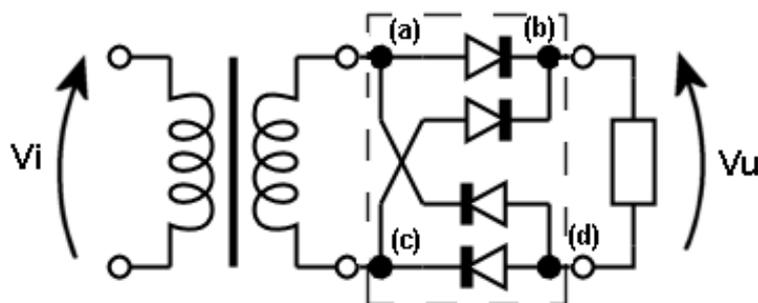


Il ponte di Graetz è costituito da 4 diodi collegati tra loro a quadrato.

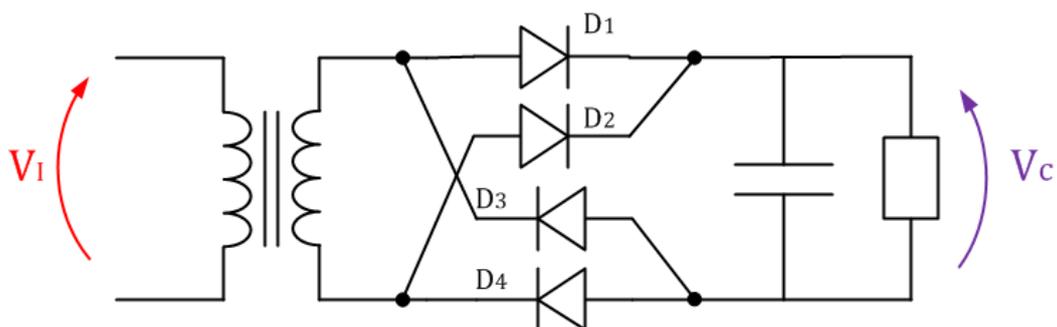
Per capire meglio come è fatto il ponte, conviene rappresentarlo in un altro modo, in cui è evidente la forma a quadrato del collegamento.



Questo schema è identico a quello della figura precedente. Per rendersene conto basta evidenziare i nodi e dare loro un nome:



Anche il raddrizzatore a ponte può essere stabilizzato inserendo un condensatore in parallelo al carico:



5.3. Interruttori

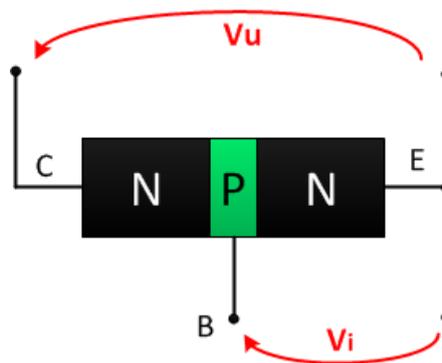
Abbiamo visto che il transistor si può usare sia come interruttore che come amplificatore. E' però necessario fare in modo che il punto di funzionamento cada nelle zone opportune:

- Nella zona di saturazione e di interdizione il transistor funziona come interruttore;
- Nella zona attiva il transistor funziona come amplificatore;

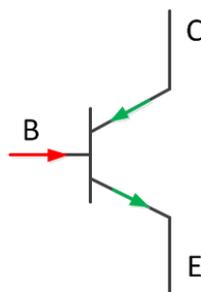
Un transistor può agire come un interruttore, ma a differenza dei normali interruttori è estremamente veloce. Un normale interruttore non passa istantaneamente da aperto a chiuso. C'è sempre un certo intervallo in cui passa solo una parte della corrente che si riduce sempre di più fino ad annullarsi.

Il vantaggio del transistor è evidente se si considera che un computer compie un miliardo di operazioni al secondo e che ogni operazione può essere considerata come una variazione di corrente: o la corrente passa oppure no.

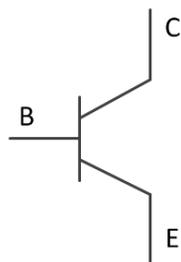
Per usare un transistor come interruttore è necessario utilizzare la configurazione ad emettitore comune. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, in questa configurazione l'emettitore fa parte sia del circuito di ingresso che di quello di uscita:



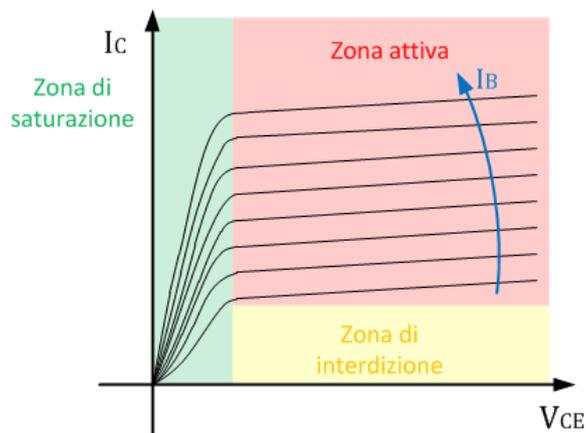
Quando viene usato come interruttore, la base del transistor funziona come pilota: se nella base entra corrente, allora il transistor lascia passare la corrente dal collettore all'emettitore, come se si trattasse di un cortocircuito, di un **CIRCUITO CHIUSO**; in questo caso si dice che il transistor è in **SATURAZIONE**.



Se invece nella base non entra alcuna corrente, il transistor blocca la corrente che entra nel collettore, come se si trattasse di un **CIRCUITO APERTO**; in questo caso si dice che il transistor è in **INTERDIZIONE**.



In questo caso il transistor non lascia passare corrente.



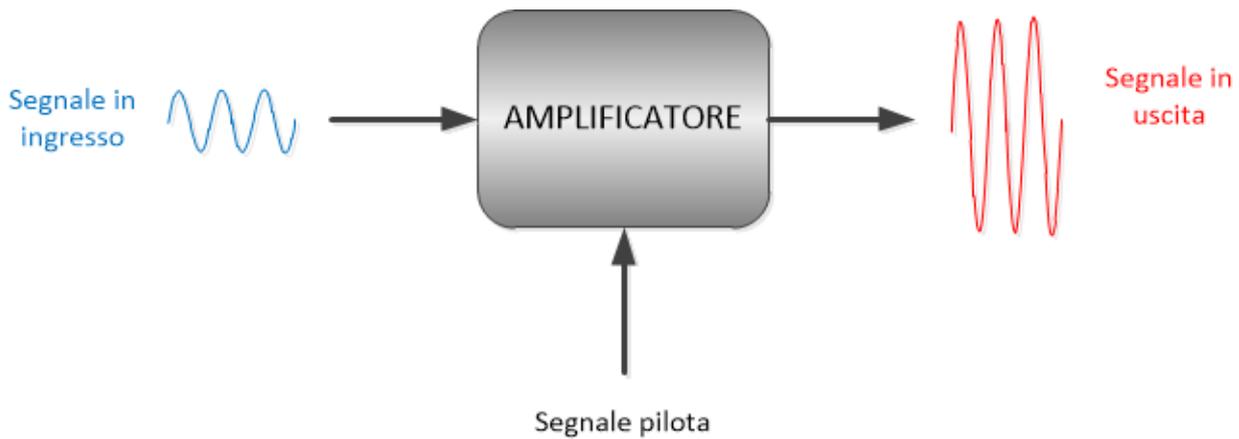
La prima cosa importante da notare è che **LA CORRENTE DI BASE È MOLTO PICCOLA** mentre **LA CORRENTE TRA COLLETTORE ED EMETTITORE È GRANDE**. Questo vuol dire che con una piccola corrente è possibile pilotare un grande segnale.

La seconda considerazione da fare riguarda il verso delle correnti. Poiché il transistor è formato da due giunzioni PN, una tra base ed emettitore, l'altra tra base e collettore, la corrente può scorrere solo in un senso. La singola giunzione PN infatti si comporta come un diodo, cioè come una valvola di non ritorno. Per questo motivo **LA CORRENTE NELLA BASE PUÒ ESSERE SOLO ENTRANTE** e **LA CORRENTE TRA COLLETTORE ED EMETTITORE PUÒ SCORRERE SOLO IN QUESTO SENSO**.

5.4. *Gli amplificatori*

Il transistor può anche essere usato per amplificare un segnale. Amplificare un segnale vuol dire aumentare la sua potenza in uscita rispetto a quella che aveva in ingresso. La cosa importante è che il transistor non deve alterare il segnale, ma solo amplificare la sua potenza: infatti i segnali contengono delle informazioni (ad esempio le immagini televisive) e se le loro caratteristiche venissero alterate si avrebbe una perdita di dati.

La corrente in uscita avrà quindi la stessa frequenza e la stessa fase di quella in ingresso, ma avrà un'ampiezza (cioè intensità) maggiore.



Affinchè il transistor possa funzionare come amplificatore è necessario che si trovi a lavorare nella zona attiva della sua caratteristica volt-amperometrica.

Questo consente di aumentare la corrente del collettore, e quindi dell'emettitore, variando la corrente della base.

Per gli amplificatori viene definito un parametro chiamato guadagno che indica l'aumento di potenza che il dispositivo è in grado di dare.

Il guadagno, indicato con la lettera G, è un rapporto tra due potenze:

- La potenza del segnale di uscita, quello amplificato
- La potenza del segnale in ingresso.

$$G = \frac{P_U}{P_I}$$

Questo numero è sempre maggiore di 1 ed è adimensionale.

A volte però viene utilizzata un unità di misura chiamata decibel.



PARTE 3: IMPIANTI ELETTRICI DI TERRA E DI BORDO

6. GLI IMPIANTI ELETTRICI DEGLI EDIFICI

La parola **IMPIANTO**, nel linguaggio comune, indica un insieme di strumenti in grado di trasportare e trasformare una certa sostanza (acqua, corrente elettrica, olio) da un punto all'altro di una struttura allo scopo di svolgere un certo lavoro. Ad esempio, l'impianto idraulico di un appartamento prende acqua dalla rete idrica e la trasporta per tutta la casa, fino alle apparecchiature che ne hanno bisogno (lavandini, doccia, lavatrice). L'impianto elettrico invece prende corrente elettrica dalla rete e la trasporta per tutta la casa, fino alle prese di corrente, per alimentare le apparecchiature che richiedono corrente elettrica per funzionare. Allo stesso modo l'impianto di riscaldamento prende acqua calda dalla caldaia e la trasporta fino ai termosifoni.

UN IMPIANTO È QUINDI UN'INSTALLAZIONE PERMANENTE CHE HA COME SCOPO PRINCIPALE QUELLO DI FORNIRE ENERGIA (DI DIVERSE FORME) ALLE APPARECCHIATURE CHE LA RICHIEDONO.

Alla fine dell'ottocento, quando vennero realizzati i primi impianti elettrici, non esisteva una legge per regolare i parametri della corrente o per stabilire norme di sicurezza. I primi impianti erano quindi realizzati senza tenere conto dei pericoli che la corrente elettrica può comportare per gli esseri umani.

Fu solo nel novecento che gli stati cominciarono ad interessarsi al problema e a creare i primi enti per la gestione degli impianti.

In Italia, nel 1909, venne fondata un'associazione chiamata Comitato Elettrotecnico Italiano CEI che aveva lo scopo di stabilire delle normative per tutto ciò che riguardava l'elettricità. Il CEI è stato riconosciuto a livello europeo dopo la seconda guerra mondiale (<http://www.ceiweb.it>).

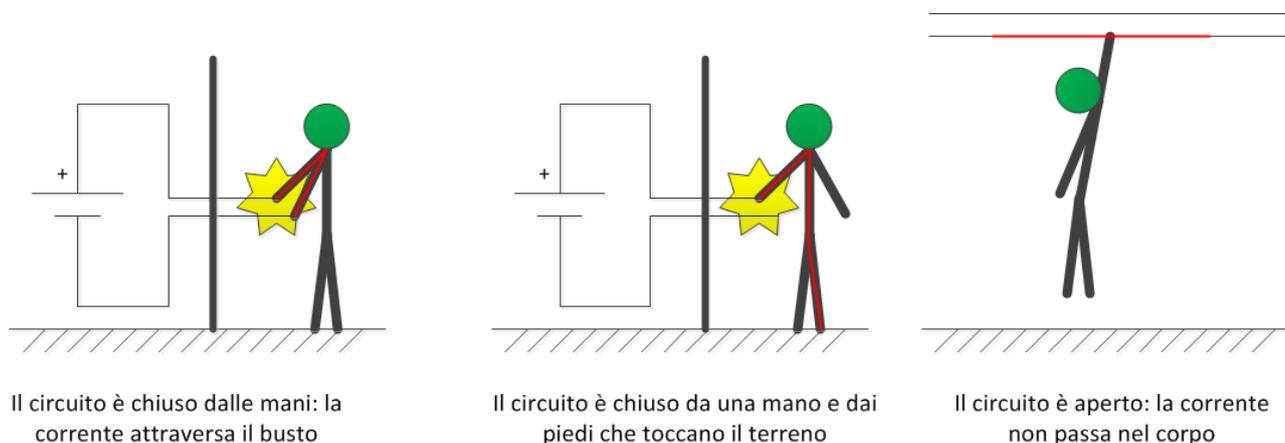
In questo corso non ci occuperemo di come sono realizzati gli impianti nel senso tecnico del termine: non studieremo cioè i tipi di cavo, come sono fatte le prese di corrente e quali dispositivi possono essere collegati. Ci soffermeremo invece sui dispositivi che rendono un impianto sicuro per gli esseri umani e per l'edificio in cui è installato. Parleremo cioè dei sistemi di protezione.

6.1. *Gli effetti della corrente elettrica sul corpo umano*

Quello che crea problemi al corpo umano (e alle apparecchiature) non è la tensione, ma la corrente. Sappiamo dai corsi precedenti che la corrente per scorrere ha bisogno di un conduttore, cioè di un materiale che permetta agli elettroni di muoversi da un atomo all'altro. I materiali conduttori sono moltissimi: il rame, il ferro, l'acqua (ma non l'acqua distillata, bensì l'acqua del rubinetto, che contiene ioni). Anche la carne umana è conduttrice; infatti siamo formati per il 70% di acqua con ioni disciolti. Inoltre nel corpo umano ci sono i nervi, che sono simili a dei fili conduttori e trasportano gli impulsi elettrici dal cervello a tutto il corpo.

Affinchè la corrente elettrica possa scorrere è quindi necessario un circuito costituito da materiale conduttore. Se il circuito è aperto la corrente si ferma e il suo valore diventa: $I = 0 A$.

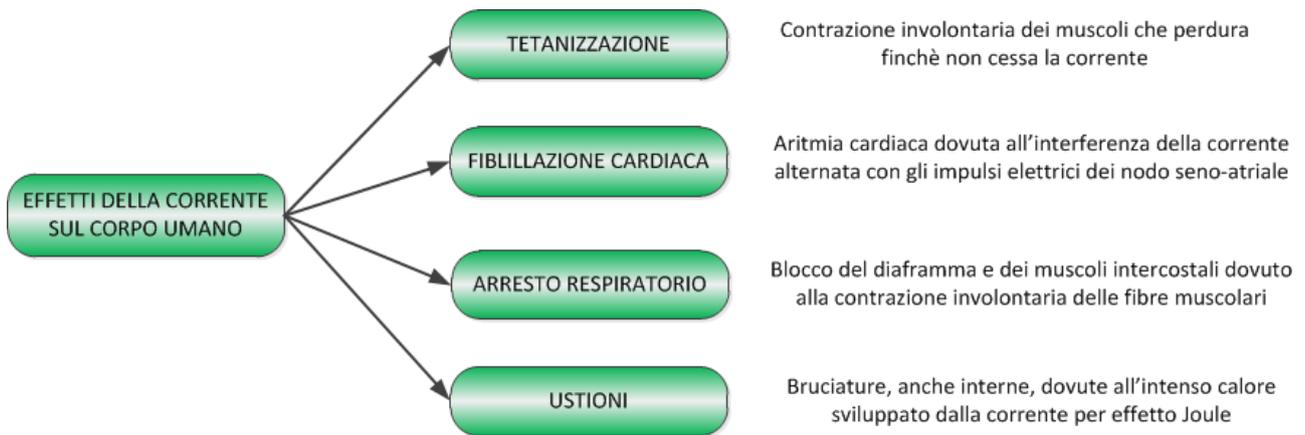
Quando un essere umano “prende la corrente” sta in pratica chiudendo un circuito che prima era aperto. Questo significa che se un essere umano si appende con una mano ai fili dell’alta tensione e non tocca ne il terreno ne un altro filo non “prenderà corrente”.



Gli effetti del passaggio della corrente nel corpo umano sono i seguenti:

- **TETANIZZAZIONE DEI MUSCOLI**: il corpo umano è attraversato da fasci di nervi su cui viaggiano impulsi elettrici provenienti dal cervello. Quando la corrente attraversa un muscolo questo si irrigidisce e se la corrente è troppo intensa il muscolo si contrae e non è più possibile distenderlo finché la corrente persiste. L’intensità di corrente minima affinché si abbia tetanizzazione viene chiamata **CORRENTE DI RILASCIO** e il suo valore è di circa 10mA. Se la corrente è molto elevata non si ha tetanizzazione perché il passaggio della corrente produce una contrazione tanto brusca e violenta da scaraventare la persona lontano dalla fonte di elettricità.
- **FIBRILLAZIONE DEL CUORE E ARRESTO CARDIACO**: il cuore ha lo scopo di pompare il sangue in tutto l’organismo e per far questo si contrae ritmicamente, circa 60 volte al minuto. L’organo che fa contrarre il cuore è una sorta di generatore di impulsi elettrici, il nodo seno-atriale. Gli impulsi elettrici viaggiano su appositi conduttori e arrivano alle fibrille, le parti del muscolo responsabili della contrazione. Se una corrente elettrica di frequenza simile a quella delle contrazioni cardiache attraversa il cuore, interferisce con gli impulsi generati dal nodo seno-atriale e fa contrarre il cuore in maniera incontrollata. Questa situazione viene chiamata fibrillazione.
Se la frequenza della corrente è molto alta, non manda il cuore in fibrillazione, ma blocca i muscoli e gli impedisce di contrarsi provocando un arresto cardiaco.
- **ARRESTO RESPIRATORIO**: per respirare è necessario che il diaframma e i muscoli intercostali della cassa toracica si contraggano ritmicamente (con una frequenza di 10-15 volte al minuto). La tetanizzazione di questi muscoli può impedire la respirazione e se la corrente elettrica non viene rimossa in tempi brevi l’arresto respiratorio può avere conseguenze gravi sul cervello a causa della mancanza di ossigeno.

- **USTIONI:** il passaggio della corrente elettrica produce calore per effetto Joule e questo può provocare gravi ustioni anche in profondità.



Il verificarsi di questi problemi, e la loro entità, dipende da tre fattori:

- L'**INTENSITÀ DELLA CORRENTE:** che a sua volta dipende da due fattori, la tensione elettrica ai capi dei due punti estremi e la resistenza del corpo.

$$I = \frac{V}{R}$$

Da questa formula si vede che se la resistenza del corpo umano è bassa la corrente aumenta mentre se la resistenza è alta la corrente diminuisce. Se infatti si indossano guanti isolanti o scarpe anti-infortunistica la resistenza diventa molto alta e anche in caso di incidente la corrente che attraversa il corpo è bassa e non provoca danni.

- Il **TEMPO** di passaggio della corrente. Se la corrente è applicata per lungo tempo i danni al corpo aumentano.
- La **ZONA DEL CORPO** attraversata dalla corrente. Il cuore e il cervello sono organi delicati e se vengono attraversati dalla corrente c'è un rischio elevato che possano essere danneggiati.

6.2.1 rischi della corrente elettrica

Quando si parla di "prendere la scossa" si pensa comunemente ad un contatto del corpo umano con i fili elettrici. In realtà esistono molti rischi diversi:

- **CONTATTO DIRETTO:** è quello più comune. Il corpo umano chiude un circuito che altrimenti sarebbe aperto e quindi la corrente elettrica scorre direttamente nel corpo umano, come se fosse un filo conduttore. In questo caso la corrente seguirà il percorso più breve, nel senso di quello con minore resistenza. Il percorso seguito dalla corrente è molto importante. Ad esempio, se il contatto avviene tra il braccio destro e il piede destro la corrente attraversa il lato destro del corpo e non passa direttamente per il cuore; se invece il contatto avviene tra il braccio sinistro e il piede destro il percorso della corrente attraversa il cuore e il rischio di fibrillazione aumenta.

- **CONTATTO INDIRETTO:** può capitare che la corrente elettrica si disperda sulla carcassa di un elettrodomestico; se una persona tocca l'oggetto in tensione l'effetto è lo stesso della chiusura di un circuito: la corrente elettrica attraversa il corpo provocando i danni che abbiamo visto nel paragrafo precedente.
- **ARCO ELETTRICO:** un arco elettrico è un fenomeno che si verifica quando l'aria, che è un materiale isolante, a causa di una forte differenza di potenziale diventa conduttore e consente il passaggio di una scarica elettrica, di solito molto veloce. Il processo di formazione di un arco elettrico è del tutto simile a quello che porta alla formazione di un fulmine. Affinchè la corrente possa scorrere attraverso l'aria è necessario che si formi un canale (cioè un percorso, solitamente a zig zag) in cui le molecole sono ionizzate, cioè hanno perso o acquistato un elettrone diventando quindi ioni negativi o ioni positivi. Quello che forma il canale di ionizzazione è la presenza di una grandissima differenza di potenziale tra due punti che risultano essere gli estremi del canale di ionizzazione. Gli ioni sono liberi di scorrere da un capo all'altro del canale sotto l'azione della differenza di potenziale.
- **INCENDIO PER CORTOCIRCUITO:** un cortocircuito si ha quando una parte del circuito si trova senza un carico e quindi la corrente non è più frenata da nulla, se non dalla resistenza del filo. Il valore della corrente di corto circuito è molto alto e quindi provoca surriscaldamento. Se in prossimità di un corto circuito c'è del materiale infiammabile è possibile che si sviluppi un incendio; inoltre se il cortocircuito avviene in atmosfera esplosiva le conseguenze possono essere ancora più gravi poiché l'intenso calore nel filo elettrico può fare da innesco per una deflagrazione o una detonazione.



6.3.1 sistemi di protezione

Quando si ha a che fare con un impianto elettrico possono verificarsi alcuni problemi. Alcuni sono causa di rischi per gli esseri umani, come abbiamo visto nel precedente paragrafo, altri possono causare danni all'impianto stesso.

I principali problemi che si possono verificare sono:

- **CORTOCIRCUITO:** un cortocircuito avviene quando due punti di un circuito tra cui non c'è alcun dispositivo, entrano in contatto tra loro. In questo modo la tensione tra i due punti è nominalmente nulla (in realtà c'è sempre una tensione, seppure piccola). Poiché la resistenza è molto bassa (ha il valore della resistenza del filo) la corrente assume valori estremamente elevati (migliaia di Ampere); questo provoca per effetto Joule temperature elevatissime che possono portare alla fusione dei conduttori e ad incendi o esplosioni.
- **SOVRACCARICO:** è un fenomeno che si verifica quando una delle utenze dell'impianto richiede una corrente maggiore massima che i conduttori possono sopportare.
- **DISPERSIONE ELETTRICA:** questo fenomeno si verifica quando un conduttore isolato disperde parte della sua carica elettrica a causa di un difetto di isolamento. Se la guaina che protegge i fili di rame si deteriora è possibile che la carica passi su dispositivi di metallo che non dovrebbero essere carichi. Questo può portare ad una perdita di potenza, ma anche al rischio di folgorazione per esseri umani che si trovassero in contatto con il dispositivo su cui è stata dispersa la carica.
- **SOVRATENSIONE:** questo fenomeno si verifica quando una fonte di tensione elettrica entra in contatto con un impianto, ad esempio quando un fulmine cade in prossimità di un'abitazione.

Non è possibile eliminare completamente questi fenomeni e quindi quando si progetta un impianto si considera che questi eventi capiteranno sicuramente. E' quindi necessario mettere nell'impianto dei dispositivi che evitano danni alle persone e alle cose quando si verificano questi problemi.

Nei paragrafi successivi esamineremo i vari **DISPOSITIVI DI PROTEZIONE**.

7.3.1. Fusibile

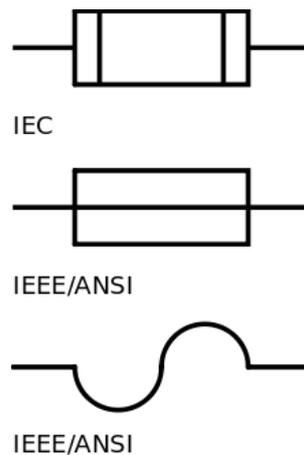
Il **FUSIBILE** è un dispositivo che, in caso si verifichi una corrente troppo elevata a causa di un **CORTOCIRCUITO**, interrompe il circuito. Come dice la parola stessa, il fusibile deve fondersi e lasciare il circuito aperto.

Una volta il fusibile era uno dei principali elementi di protezione degli impianti, ma oggi è stato sostituito dall'interruttore magnetotermico. Viene tutt'ora utilizzato come protezione per i singoli dispositivi in modo da proteggerli dai cortocircuiti.

Nella sua forma più semplice, il fusibile è un filo molto sottile, inserito all'interno di un cilindretto di vetro. Se la corrente che scorre nel filo aumenta troppo esso si brucia. L'unico rischio connesso al fusibile è l'arco elettrico che si crea ai suoi capi quando il filo si brucia. Se le tensioni del circuito sono alte, per evitare problemi con l'arco elettrico, si circonda il filo con un materiale che smorza rapidamente l'arco.

I due parametri principali di un fusibile sono la sua portata di corrente e il tempo che impiega ad interrompere il circuito. Esistono infatti dispositivi molto sensibili, che non sopportano picchi di corrente nemmeno per pochi istanti, e dispositivi che possono tollerare correnti di picco notevoli per qualche secondo.

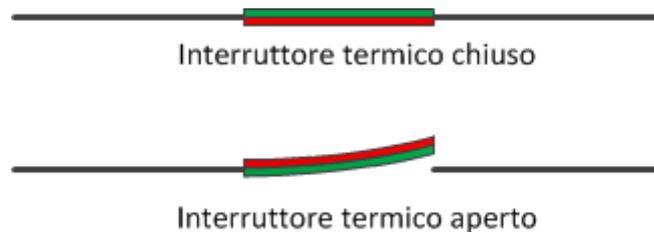
In un circuito il fusibile si rappresenta con i simboli seguenti.



7.3.2. Interruttore termico

L'**INTERRUTTORE TERMICO** serve per interrompere il circuito in caso di **SOVRACCARICO**.

Si tratta di una lamina costituita da due diversi materiali, chiamata lamina bimetallica. Essendo formata da due materiali diversi, con diversa resistenza, la dilatazione termica prodotta è diversa. Questo porta la lamina a piegarsi e ad interrompere il circuito.



Un tempo questo dispositivo era usato, insieme al fusibile, per proteggere i circuiti dalle correnti troppo intense, derivate sia da sovraccarico che da cortocircuito.

Oggi si utilizza un unico dispositivo, chiamato interruttore magnetotermico.

7.3.3. Interruttore magnetotermico

L'**INTERRUTTORE MAGNETOTERMICO** si chiama così perché unisce due diversi principi di funzionamento (termico e magnetico) per proteggere l'impianto da due diversi fenomeni (**SOVRACCARICO E CORTOCIRCUITO**).

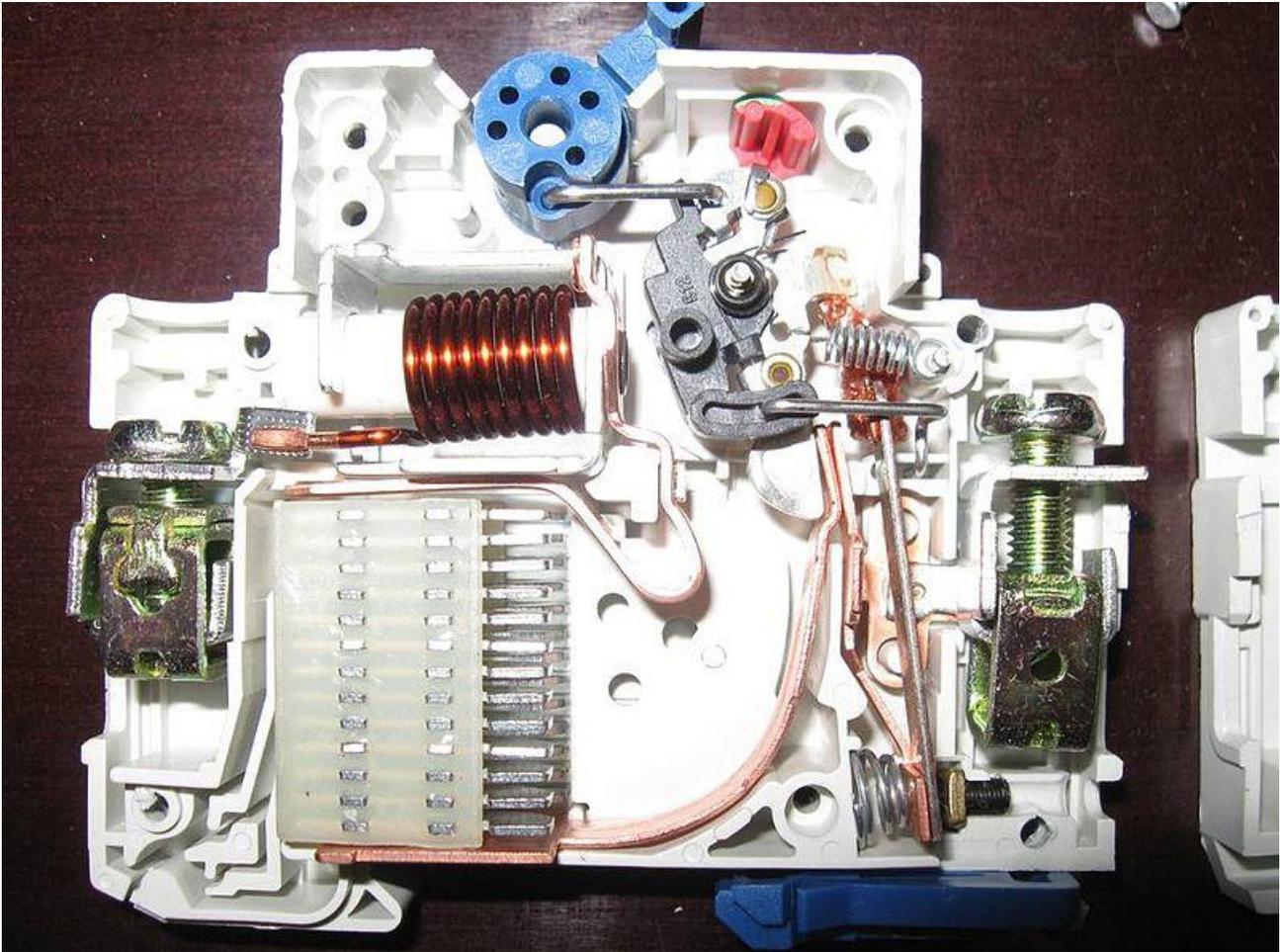
Per proteggere dal cortocircuito si utilizza un induttore. L'induttore è una bobina che genera un campo magnetico quando viene attraversata da corrente; l'intensità del campo magnetico varia in base alla corrente che circola nella bobina. In caso di cortocircuito la corrente è elevatissima e quindi si genera un grande campo magnetico, in grado di attirare l'estremità di una leva di metallo che normalmente è tenuta lontana da una molla.

Quando la leva viene attirata dal campo magnetico dell'induttore, l'altra estremità della leva si



stacca dal circuito, aprendolo e interrompendo il flusso di corrente.

Per proteggere il circuito dai sovraccarichi si usa invece una lamina bimetallica, che funziona nello stesso modo di quella descritta nel paragrafo precedente.



7.3.4. Interruttore differenziale

L'**INTERRUTTORE DIFFERENZIALE** serve per proteggere da **DISPERSIONI ELETTRICHE**. Si parla di dispersione elettrica quando una parte della corrente esce dal circuito, cioè non scorre più nei conduttori e nei dispositivi, ma si disperde da qualche parte.



La corrente elettrica che esce dal circuito può finire tipicamente in due posti:

- sulla massa (cioè la carcassa esterna) di un dispositivo che normalmente non è in tensione
- a terra. Il suolo è infatti un ottimo conduttore di corrente.

La dispersione elettrica in se non è un fenomeno pericoloso: più che altro è un fenomeno che riduce l'efficienza dell'impianto. Quello che è estremamente pericoloso è la possibilità che la corrente elettrica dispersa su una massa venga in contatto con un essere umano o che l'essere umano faccia da ponte tra circuito e terra.

Per questi motivi l'interruttore differenziale è fondamentale per la sicurezza: la dispersione infatti è quasi sempre sinonimo di rischio per gli esseri umani.

L'interruttore differenziale non protegge però dai cortocircuiti e dai sovraccarichi e quindi deve essere unito ad un interruttore magnetotermico.

Attualmente vengono usati apparecchi che uniscono tutti questi dispositivi e che vengono comunemente chiamati **SALVAVITA**.

7.3.5. Scaricatori e varistori

Finora abbiamo visto come proteggere il circuito da correnti elevate. Ora vediamo come si può intervenire in caso di tensioni elevate. Una sovratensione può verificarsi a causa di un fulmine che colpisce un edificio o di un picco di tensione dovuto ad un guasto nella rete di distribuzione.

Per evitare danni all'impianto, alle apparecchiature ad esso collegate o agli esseri umani è necessario scaricare verso terra questa sovratensione.

Il termine generico con cui si indicano i dispositivi in grado di fare questo lavoro è **SCARICATORI**. Ne esistono di moltissimi tipi, ma in generale sono tutti formati da un circuito alternativo, collegato al terreno, sul quale viene dirottata la corrente qualora si superi un certo valore di tensione.

Un particolare tipo di scaricatore è il **VARISTORE**. Esso è costituito da un elemento semiconduttore, realizzato in modo molto simile al diodo. Il varistore è posizionato tra il circuito e il terreno, come se fosse una via di fuga secondaria che la corrente può prendere in particolari condizioni. Questo dispositivo è in grado di variare la sua resistenza in base al valore della tensione ai suoi capi: quando la tensione è bassa la sua resistenza è molto alta e quindi non permette il passaggio dalla corrente che scorre normalmente nel circuito (la via di fuga è chiusa); quando la tensione aumenta molto la resistenza del varistore si abbassa di colpo, collegando il circuito al terreno e consentendo di scaricare a terra la sovratensione (la via di fuga è aperta).

6.4. *Tipi di circuiti nelle case*

Le abitazioni (ma anche le industrie) ricevono corrente elettrica da uno degli enti di distribuzione (ENEL, EDISON, IREN, ecc...) che forniscono energia tramite un contatore, collegato al quadro generale del condominio. Il quadro generale di solito è posto nelle cantine e collega lo stabile alla rete elettrica.

Quando si stipula un contratto per la fornitura dell'energia elettrica è necessario scegliere la potenza massima erogata. Le norme in vigore dal 2011 stabiliscono che per le nuove abitazioni fino a 75 mq la potenza impegnata minima deve essere di 3 kW (3000 W), ma è possibile richiedere una potenza superiore. Se invece l'abitazione ha una superficie di più di 75 mq è necessario installare una potenza impegnata minima di 6 kW (6000 W). Anche in questo secondo caso l'utente può richiedere una potenza maggiore.

Le vecchie abitazioni hanno solitamente una potenza di 3 kW anche se la superficie supera i 75 mq.

Quando la potenza richiesta alla rete supera il massimo, ad esempio perché vengono collegati contemporaneamente più dispositivi di grande potenza (lavatrice, forno, lavastoviglie), la fornitura di energia elettrica viene interrotta.

Per le abitazioni poste in un condominio, c'è un centralino unico, il **CONTATORE GENERALE**, di solito posizionato nelle cantine, dal quale partono i cavi che collegano al quadro generale i **SINGOLI CONTATORI**, posizionati all'interno degli appartamenti. Dentro al singolo contatore si trovano i **DISPOSITIVI DI SICUREZZA**, come l'interruttore magnetotermico.

Dal quadro elettrico di casa partono tre tipi di circuiti:

- Quello per le prese di corrente alle quali devono poter essere collegati gli elettrodomestici. Prevede un passaggio di corrente con intensità di 16 A. Queste prese di corrente sono poste a 30 cm dal pavimento, tranne nel caso del bagno e della cucina in cui devono essere poste 110 cm per evitare danni in caso di allagamento.
- Quello per le luci, che porta corrente ai lampadari e che non prevede prese di corrente nelle quali inserire spine, ma solo interruttori che consentono di accendere e spegnere la luce.. Prevede un passaggio di corrente con intensità di 10 A. Gli interruttori devono essere posti a 110 cm dal pavimento.
- Quello per i circuiti di chiamata, ad esempio il citofono o l'allarme sonoro del bagno. Prevede un passaggio di corrente con intensità di 12 V.

I fili conduttori utilizzati sono cavi tripolari, cioè che al loro interno ci sono tre diversi fili:

- Cavo blu, chiamato **NEUTRO**. In un impianto tutti i fili del neutro convergono insieme e quindi nel neutro scorre la stessa corrente. Per questo motivo il neutro ha sempre lo stesso colore

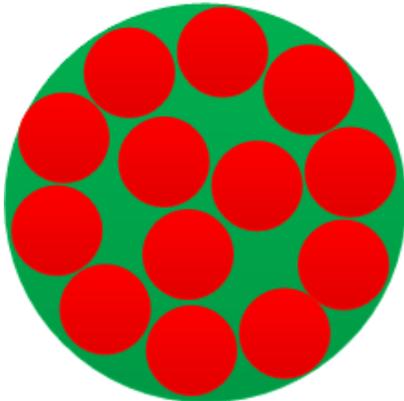
- Il cavo giallo-verde, chiamato **TERRA**. E' un filo di protezione, che collega l'impianto al terreno per realizzare la messa a terra. Poiché tutti i fili della terra sono collegati allo stesso conduttore hanno tutti lo stesso colore.
- Il cavo marrone/nero/grigio/rosso, chiamato **FASE**. Questo terzo filo può avere colori diversi poiché in un impianto ci sono spesso più fasi di corrente e quindi è utile differenziarle.

Ogni cavo è formato da molti fili, avvolti in una guaina isolante.



Il motivo per cui si mettono tanti fili sottili invece di un unico filo grosso è che la corrente scorre in un conduttore solo sulla sua superficie esterna e non all'interno. Questo fenomeno è noto come **EFFETTO PELLE**.

A parità di diametro totale, la superficie aumenta se all'interno del cavo ci sono tanti diversi fili piccoli:



$$C = 2 \pi R$$

$$C = 2 \pi 10 = 20 \pi$$

$$C_{\text{totale}} = 13 \times C = 13 \times 2 \pi 2 = 13 \times 4 \pi = 52 \pi$$

7. L'IMPIANTO ELETTRICO DI BORDO DEGLI AEROMOBILI

Le utenze installate a bordo di un aeromobile richiedono una fonte di energia che le alimenti. Il tipo di energia più appropriato dipende dal tipo di dispositivo: le apparecchiature elettroniche sono, ovviamente, alimentate da energia elettrica, mentre i dispositivi che servono ad estrarre il carburante possono essere alimentati con un altro tipo di energia, ad esempio quella dell'olio che spinge su un pistone.

Gli impianti preposti al trasporto e alla trasformazione di energia a bordo di un aeromobile sono quattro:

- Impianto idraulico
- Impianto pneumatico
- Impianto elettrico
- Impianto combustibile

Tutte le utenze a bordo di un aeromobile vengono alimentate e gestite da uno (o da più di uno) di questi impianti.

In questa parte del corso studieremo l'impianto elettrico.

7.1. Le grandezze della corrente

Fin dalle origini dell'aviazione, erano presenti a bordo degli aerei alcune apparecchiature che richiedevano corrente elettrica per funzionare: le luci e la radio.

Man mano che gli aerei divennero più sofisticati, le utenze alimentate da energia elettrica aumentarono in numero e si differenziarono tra apparecchi che richiedevano corrente continua e apparecchi che richiedevano corrente alternata.

11.1.1. Evoluzione degli impianti

All'inizio ogni apparecchiatura aveva la sua fonte di alimentazione, di solito una batteria, ed era quindi indipendente dalle altre. Questo sistema poteva funzionare finché i dispositivi da alimentare erano pochi, ma con il tempo fu chiaro che portare a bordo tante batterie quante erano le utenze, era sconveniente in termini di peso e di efficienza.

Si cominciò quindi ad utilizzare una sola fonte di energia elettrica e a collegare i dispositivi alla stessa fonte. Nacque così il concetto di impianto elettrico.

Questo sistema consente di risparmiare peso, cosa che è fondamentale in un aereo, poiché ogni grammo in più si paga in combustibile o in carico pagante in meno. Ha però lo svantaggio che se il generatore di corrente elettrica si rompe nessuna delle utenze funziona più; è quindi necessario prevedere un sistema di emergenza. Questa filosofia di progetto si è imposta a partire dalla seconda guerra mondiale e da allora sui velivoli sono sempre presenti gli impianti (elettrico, pneumatico, idraulico, ecc...).

La concezione del velivolo come un insieme di impianti diversi è chiamata concezione **IMPIANTISTICA**.

A partire dagli anni novanta si è però verificato un cambiamento nella progettazione degli impianti dovuto alla possibilità di portare a bordo dei processori (computer) in grado di controllare diverse apparecchiature. Il numero di apparecchiature elettroniche a bordo degli aerei è aumentato sempre di più e lentamente si è affermata la tendenza ad alimentare con corrente elettrica tutto ciò che può funzionare con questo tipo di energia.

Analizziamo il caso dei comandi di volo: il flyer dei fratelli Wright aveva le superfici aerodinamiche controllate da corde e carrucole; man mano che gli aerei diventarono più grossi vennero adottati degli attuatori per muovere le pesanti superfici aerodinamiche. In questo modo il pilota poteva far ruotare una superficie enorme con un piccolo sforzo.

Successivamente gli attuatori meccanici vennero sostituiti da quelli elettrici. Il vantaggio del comando elettrico è che la forza richiesta al pilota è praticamente nulla. Questo fatto, di per sé vantaggioso, ha portato all'esigenza di dare al pilota la sensibilità di quanto stava facendo. Vennero così introdotti sistemi elettronici di sensibilità artificiale che aumentano la resistenza della barra man mano che il pilota spinge i comandi a fondo corsa.

In pratica, quando si parla di aerei di certe dimensioni o ad elevate prestazioni, pilotare un velivolo è diventato come usare un joystick particolarmente sofisticato. Si vola trasmettendo i comandi via cavo, attraverso impulsi elettrici che viaggiano per tutto il velivolo.

Si parla di **FLY BY WIRE**, volare con i fili.

Ormai un aeromobile potrebbe funzionare con il solo impianto elettrico. Rimangono comunque gli altri impianti per esigenze legate alle necessità dei passeggeri o alla lubrificazione delle macchine.

Si pensi, ad esempio, alla necessità di condizionare la cabina. Poiché è necessario avere dell'aria, l'impianto pneumatico deve comunque essere garantito. Inoltre è necessario lubrificare le varie parti meccaniche con dell'olio e quindi è necessario avere un impianto idraulico.

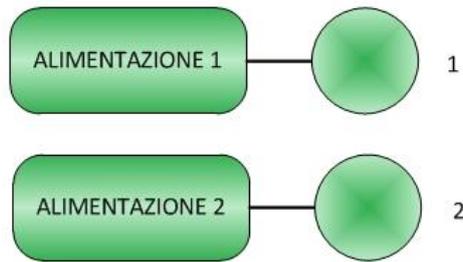
L'aver introdotto in maniera tanto massiccia la corrente elettrica, ha portato alla necessità di prevedere che alcune apparecchiature siano collegate a più di un impianto. Inoltre, mentre prima ogni impianto veniva progettato da solo e poi messo insieme agli altri sull'aeromobile, ora si tende a concepire i vari impianti come parti diverse di un unico grande sistema con un particolare scopo (che varia in base al tipo di velivolo, ad esempio, da trasporto, commerciale, da combattimento).

Ogni impianto viene quindi progettato per essere integrato con gli altri impianti e per svolgere un particolare tipo di lavoro.

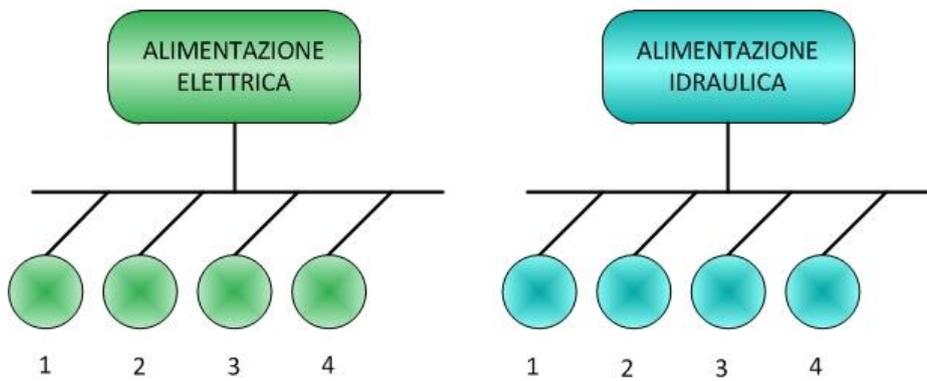
Questo tipo di concezione viene chiamata **SISTEMISTICA**.

Riassumendo, è possibile suddividere l'evoluzione dell'impianto elettrico di bordo in tre fasi:

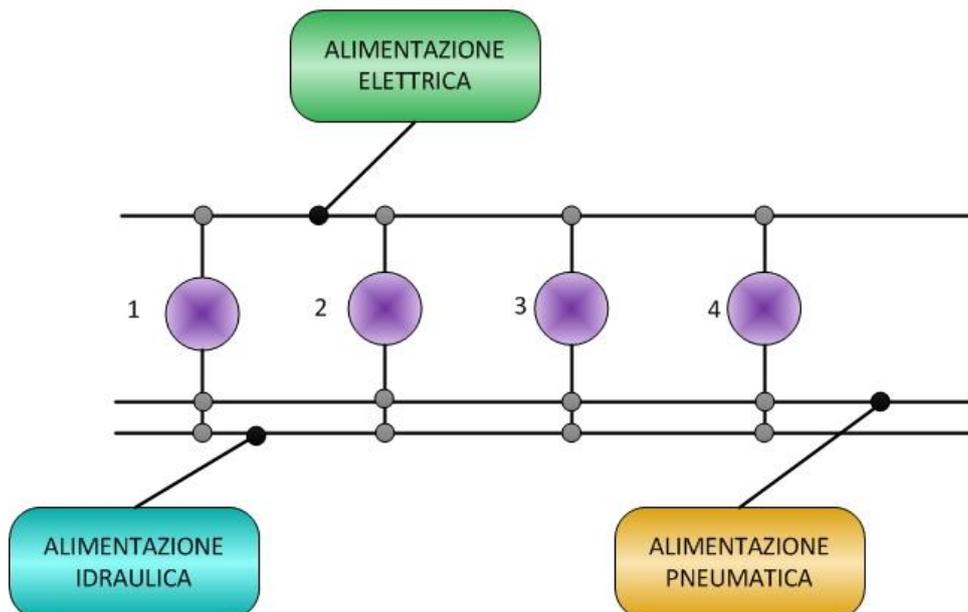
PROGETTAZIONE AD APPARECCHIATURE INDIPENDENTI



PROGETTAZIONE IMPIANTISTICA



PROGETTAZIONE SISTEMISTICA



7.2.1 tipi di corrente

A bordo di un aeromobile possiamo trovare tre tipi di corrente: continua, alternata monofase e alternata trifase. Per la verità le apparecchiature che funzionano in corrente trifase sono poche. La maggior parte viene alimentata da corrente continua o alternata monofase.

Poiché ci sono utenze che funzionano solo in corrente continua e altre utenze che funzionano solo in corrente alternata, non è possibile utilizzare un solo tipo di corrente.

Inoltre ogni apparecchiatura che viene portata a bordo di un velivolo deve essere certificata da uno degli enti aeronautici, cioè deve soddisfare tutti i requisiti richiesti di legge. Questi requisiti sono molto stringenti poiché il velivolo è un ambiente decisamente ostile per qualunque apparecchiatura.

Tanto per cominciare, lo spazio a disposizione è piccolo e quindi è necessario ridurre l'ingombro; le temperature variano tra -56 °C all'esterno, fino a centinaia di gradi in prossimità dei motori; la struttura, e tutto ciò che ad essa è collegato, subisce notevoli accelerazioni che rischiano di portare alla rottura del componente.

Per questo motivo nel settore aeronautico, ancor più che negli altri settori della tecnologia, è diventato fondamentale standardizzare, cioè stabilire dei parametri standard che sono sempre uguali e ai quali si deve uniformare chi progetta apparecchiature o impianti.

Per capire l'importanza della standardizzazione, si consideri l'impianto elettrico domestico. La legge italiana impone che gli enti erogatori di energia elettrica forniscano energia ad una tensione di 220 V e ad una frequenza di 50 Hz. In questo modo chi progetta un apparecchio elettronico sa che riceverà un'alimentazione AC con una tensione efficace di 220 V.

Se la tensione non fosse costante, alcuni apparecchi funzionerebbero in una casa ma non in un'altra.

Negli Stati Uniti, dove la legge impone di distribuire la corrente elettrica con una frequenza di 60 Hz, le apparecchiature europee non funzionano a meno di usare degli adattatori.

Anche a bordo del velivolo la corrente elettrica è stata standardizzata. La tabella seguente mostra le caratteristiche della corrente che si trova a bordo di un qualsiasi aeromobile:

| tipo di corrente | Tensione | Scarto di tensione | frequenza |
|--------------------|--------------------------|--|--|
| Continua | 28 V | 21 V ÷ 29 V | - |
| Alternata monofase | 115 V | 102 V ÷ 124 V | Variabile oppure costante a 400 Hz |
| Alternata trifase | 115 V oppure 200 V | 102 V ÷ 124 V oppure 176 V ÷ 215 V | Variabile oppure costante a 400 Hz |

Analizziamo ora il perché sono stati scelti proprio questi valori per la corrente continua, che nel seguito indicheremo con DC (direct current), e per la corrente alternata, che nel seguito indicheremo con AC (alternating current).

11.2.1. tensione della DC

Il valore della tensione è stato scelto di 28 V perché è un compromesso tra due esigenze contrastanti:

- **LIMITARE IL VALORE DELLA CORRENTE IN CASO DI CORTOCIRCUITO:** durante un cortocircuito la resistenza si annulla e la corrente non è più frenata da niente. E' come uno scivolo che all'improvviso diventa completamente privo di attrito. In questa condizione l'unica cosa da cui dipende la corrente è la differenza di potenziale. Infatti, dalla legge di Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

se la tensione aumenta, aumenta anche la corrente. Questa esigenza porta a tenere la tensione il più bassa possibile.

- **LIMITARE IL PESO DELL'IMPIANTO.** Per capire questo concetto sono necessari alcuni passaggi matematici.

Cominciamo con il considerare l'espressione della potenza elettrica:

$$P = V \cdot I$$

Sostituendo la corrente con la sua espressione ricavata dalla legge di Ohm ($I = \frac{V}{R}$) si ottiene:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Ricordiamo la seconda legge di Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

dove ρ è la resistività, valore tipico di un materiale, l è la lunghezza del conduttore e s la sua sezione.

Sostituendo la legge di Ohm nell'espressione della potenza, si ottiene:

$$P = \frac{V^2}{\rho \frac{l}{s}} = \frac{V^2}{\rho l} s \propto V^2 \cdot s$$

Dunque, possiamo affermare che la potenza è proporzionale alla tensione e alla sezione dei conduttori.

Osserviamo l'espressione che abbiamo ricavato e la sua formula inversa:

$$P \propto V^2 \cdot s$$

$$s \propto \frac{P}{V^2}$$

A parità di potenza, se aumenta la tensione, diminuisce la sezione del filo e quindi l'impianto sarà più leggero.

Questa considerazione, al contrario della prima, ci porta ad aumentare la tensione.

11.2.2. Tensione e frequenza dell'AC

Il valore della tensione della corrente alternata è pari a 115 V ed è scelto come compromesso tra l'esigenza di avere un impianto leggero, proprio come per la corrente continua, e l'esigenza di garantire un adeguato isolamento.

Il valore della frequenza, quando è costante, è stato scelto a 400 Hz come compromesso tra:

L'esigenza di avere dei generatori leggeri: se si aumenta la velocità di rotazione (il numero di giri e quindi la frequenza) diminuisce il peso. Questo fa sì che si tenda ad aumentare la tensione.

L'esigenza di contenere il numero di giri per motivi meccanici e quindi la frequenza.

7.3.1 tipi di impianto

Il fatto che a bordo dei velivoli siano presenti diversi tipi di corrente dipende dal fatto che ci sono diversi tipi di utenze, che richiedono diversi tipi di corrente elettrica.

Naturalmente le utenze variano da un aeromobile all'altro, ma possono essere divise in quattro categorie:

- Carichi resistivi
- Motori
- Comandi e controlli
- Avionica

Analizziamo questi diversi carichi.

11.3.1. Carichi resistivi

Sono costituiti da tutte quelle apparecchiature che, in prima approssimazione, possono essere viste a come resistenze. Rientrano in questa categoria l'illuminazione (le lampade possono essere considerate resistenze) e il riscaldamento delle piccole superfici (ad esempio il sistema antighiaccio sul tubo di Pitot o sui bordi d'attacco dell'ala).

I carichi resistivi possono funzionare sia in corrente continua che in corrente alternata: basta pensare che le lampadine si accendono sia quando vengono alimentate dalla rete domestica (corrente alternata) sia se sono alimentate dalle batterie, come nel caso di una torcia elettrica.

Queste utenze costituiscono una grossa parte del carico elettrico totale.

11.3.2. Motori

Può sembrare strano che i motori costituiscano una parte del carico elettrico del velivolo. In realtà il motivo appare chiaro una volta che si considerano alcuni elementi. Tanto per cominciare, i motori devono essere avviati elettricamente. Inoltre, l'iniezione del combustibile, soprattutto per i motori a getto, è controllata elettronicamente.

Per gli aerei supersonici c'è poi la variazione dell'ugello, anch'essa affidata ad un computer che deve essere alimentato con corrente elettrica.

I motori possono essere alimentati sia in corrente continua che in corrente alternata. Anch'essi sono una parte consistente del carico elettrico totale sul velivolo.

11.3.3. Comandi e controlli

Fanno capo a questa categoria i dispositivi per muovere le superfici aerodinamiche e il carrello, ma anche le spie che segnalano il funzionamento di questi dispositivi.

I dispositivi che rientrano in questa categoria non superano il 10% del carico elettrico totale, ma questo gruppo è in assoluto il più importante in quanto i comandi di volo sono indispensabili per il funzionamento del velivolo.

Questa categoria potrebbe funzionare sia in corrente continua che in corrente alternata, ma è stato stabilito che i comandi di volo e i controlli siano alimentati da corrente continua.

Il motivo di questa scelta sta nel fatto che in caso di estrema emergenza deve essere possibile alimentare i comandi con la batteria del velivolo, l'unico dispositivo in grado di dare corrente anche se tutto il resto, motori compresi, ha smesso di funzionare.

11.3.4. Avionica

La parola avionica deriva dalla fusione di due parole: elettronica e aviazione. Prendono il nome di apparati avionici tutti quei dispositivi elettronici che vengono utilizzati a bordo degli aeromobili.

Rientrano nell'avionica la radio, il radar, i transponder e tutti gli apparati che servono per comunicare.

Questi dispositivi basano il loro funzionamento sulle onde elettromagnetiche e quindi, per loro natura, richiedono di essere alimentati in corrente alternata.

La tabella seguente mostra un riassunto di quanto detto sulle utenze a bordo di un velivolo.

| Tipo di utenza | Alimentazione | Percentuale del carico elettrico |
|----------------|---------------|----------------------------------|
| Resistenza | sia DC che AC | 50 ÷ 70 |
| Motori | sia DC che AC | 10 ÷ 40 |

| | | |
|---------------------|----|--------|
| Comandi e controlli | DC | 5 ÷ 10 |
| Avionica | AC | 5 ÷ 20 |

Dall'osservazione della tabella precedente, si può notare che a bordo di un velivolo ci dovranno sempre essere entrambi i tipi di corrente. Infatti i comandi di volo richiedono corrente continua, mentre l'avionica richiede corrente alternata.

A questo punto, esistono tre possibilità costruttive:

- Generare a bordo sia corrente continua che alternata
- Generare solo corrente continua e trasformarne una parte in alternata
- Generare solo corrente alternata e trasformarne una parte in continua

La prima soluzione non viene mai adottata per motivi di peso, di sicurezza e di standardizzazione.

Rimangono quindi le altre due soluzioni.

In entrambi i casi, si genera un tipo di corrente e si alimenta tutto ciò che è possibile alimentare con quel tipo di corrente; per quei carichi che richiedono una corrente, si procede trasformandone una parte.

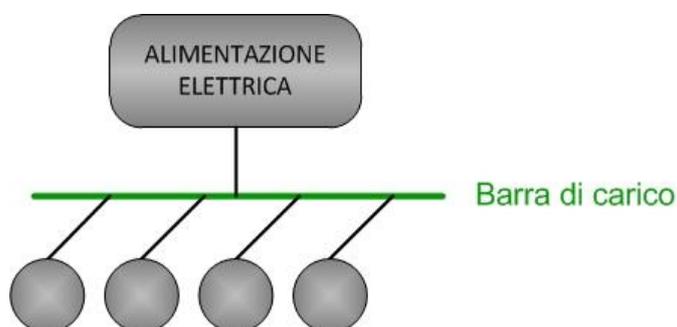
7.4. Le barre di carico e la gear box

Prima di studiare i due tipi di impianto, dobbiamo vedere un paio di concetti fondamentali.

Il primo è il concetto di barra di carico.

L'alimentazione delle varie utenze, sia quando arriva direttamente dal generatore, che quando arriva dal dispositivo incaricato della conversione AC-DC, non avviene direttamente. Le utenze sono collegate in parallelo ad un unico conduttore chiamato barra di carico. La barra di carico è sempre alimentata, le varie utenze invece possono essere escluse grazie agli interruttori.

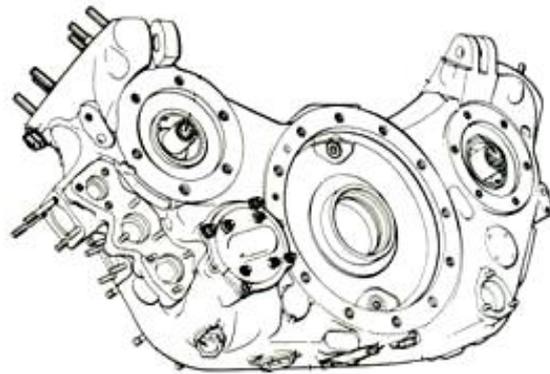
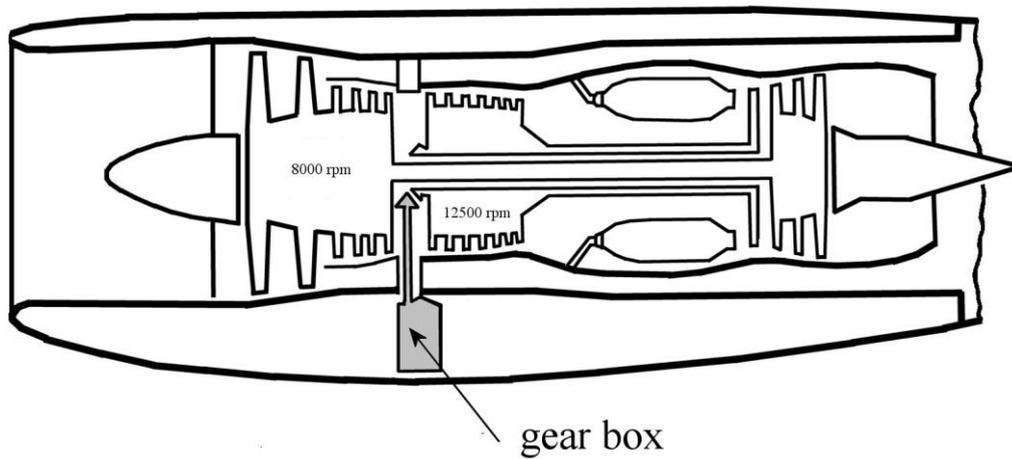
Il collegamento in parallelo garantisce che le utenze continuino ad essere alimentate anche se una di esse smette di funzionare.



Un altro importante concetto è quello di gear box.

Letteralmente gear box significa “scatola di ingranaggi”. Si tratta di un dispositivo collegato al motore e che ha lo scopo di trasmettere un moto rotatorio a quei dispositivi che ne hanno bisogno, ad esempio i generatori elettrici.

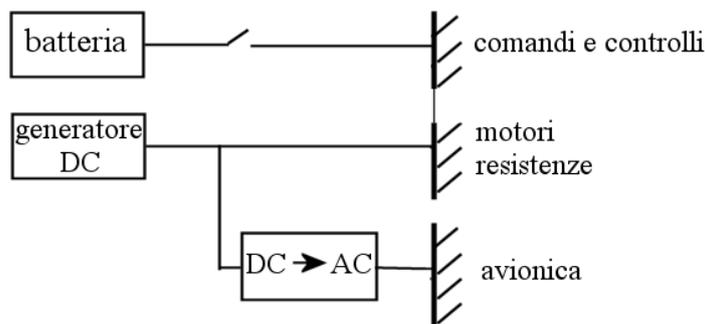
La gear box è costituita da diverse prese di moto, cioè da ingranaggi su cui si può innestare un dispositivo.



8. IMPIANTO CON GENERAZIONE PRIMARIA DC

In questo capitolo studieremo quegli impianti che generano corrente continua, alimentano con essa tutte le utenze possibili, e ne trasformano una parte in AC per alimentare le utenze che non possono funzionare in DC.

Lo schema generale di un simile impianto è il seguente:



Il punto di partenza è il generatore di corrente continua che alimenta direttamente le barre di carico a cui sono collegate le utenze che richiedono DC (o che possono funzionare anche in DC): motori, resistenze, controlli e comandi. Si può notare che i comandi e i controlli possono essere alimentati dalla batteria e sono collegati alle altre utenze tramite un interruttore. Questo consente di alimentarle in caso di emergenza escludendo tutto ciò che non è strettamente indispensabile.

Una parte della corrente prodotta dal generatore viene trasformata in AC e mandata alla barra di carico a cui sono collegati i dispositivi avionici.

Questo è solo uno schema di massima. In realtà sui velivoli sono presenti più di un generatore e ci sono molti altri elementi che dovremo prendere in considerazione.

Prima di analizzare gli impianti reali, dobbiamo però capire in cosa consistono i blocchi fondamentali. Studieremo quindi i tipi di generatori e il dispositivo di conversione, noto con il nome di inverter.

8.1.1 generatori DC

I generatori di corrente continua che si possono trovare su un velivolo sono di 3 tipi:

- Dinamo
- Generatore di corrente continua senza spazzole
- Batteria

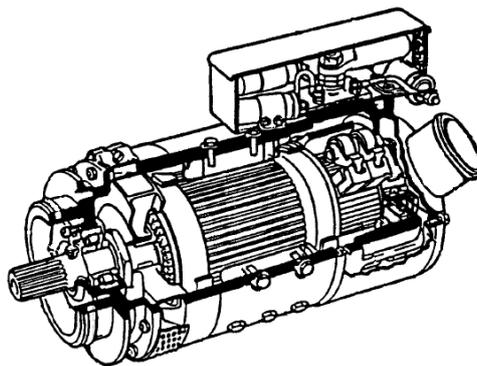
Cerchiamo di capire quali sono i loro vantaggi e i loro svantaggi.

12.1.1. Dinamo

La dinamo è una macchina reversibile, cioè è una macchina che può funzionare sia come motore di avviamento che come generatore di corrente continua. Per questo motivo la dinamo viene anche chiamata starter-generatore.

Il vantaggio della dinamo sta proprio nella sua reversibilità. Con un unico dispositivo si hanno a disposizione due funzioni:

- **GENERATORE DI CORRENTE:** viene azionato dalla gear box del motore e produce corrente grazie alla rotazione all'interno del campo magnetico. Le spazzole, che invertono il senso della corrente ogni mezzo giro, consentono di avere una corrente all'incirca continua. Questo significa che il generatore può funzionare solo quando il motore sta girando.
- **STARTER:** riceve corrente dalla batteria di bordo e la sua rotazione è in grado di avviare il compressore del velivolo. Per non scaricare la batteria di bordo è anche possibile alimentare lo starter dall'esterno, con un attrezzatura portata sulla pista.



La possibilità di avere due funzioni occupando una sola presa di moto della gear box è molto importante, ma è realizzabile solo per una certa categoria di velivoli.

Vediamo il perché.

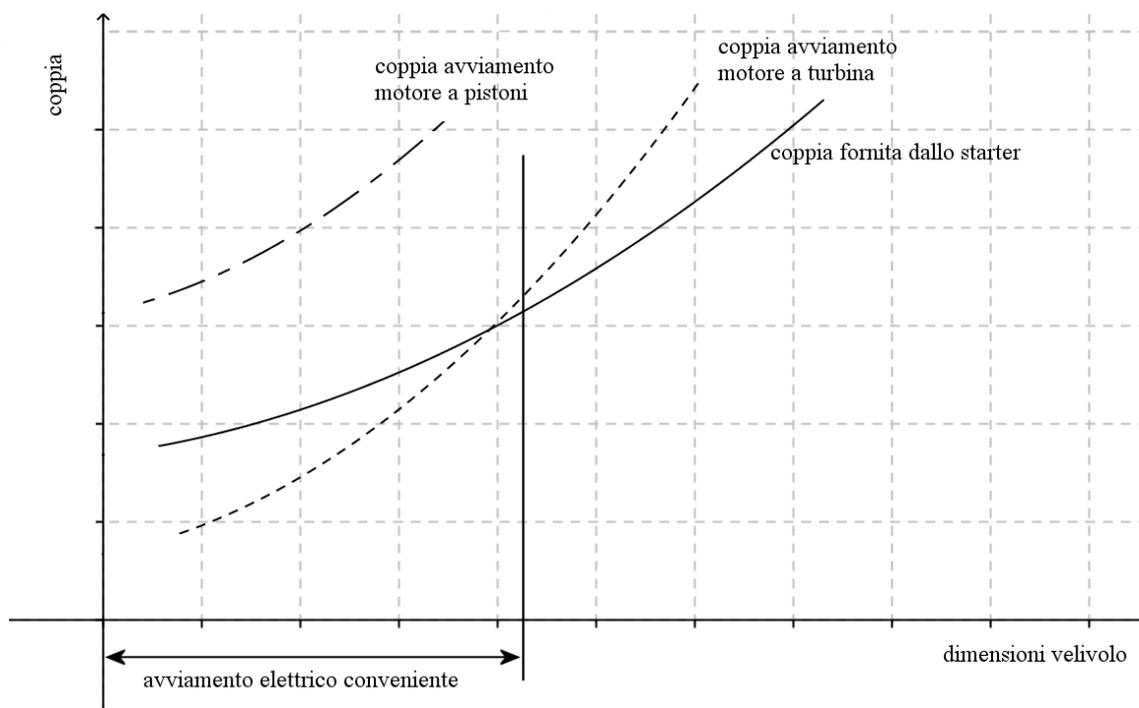
L'avviamento del motore richiede una certa coppia che dipende dalla grandezza del motore e dalla tipologia.

I motori a pistoni hanno una coppia molto alta a causa della necessità di trasformare il moto rotatorio in moto alternato.

I motori a turbina invece, a parità di potenza fornita, richiedono una coppia minore per mettere in moto il compressore. Bisogna però tenere in conto che i motori a turbina variano notevolmente per dimensione e si passa dai motori montati su piccoli aerei (elicotteri, executive, addestratori) con una spinta che non supera i 20000 N fino ai grandi aerei a reazione con spinte da 200000 N.

Per avviare un motore è dunque necessario fornire una coppia almeno uguale a quelle richiesta.

Se diagrammiamo la coppia necessaria in funzione della grandezza del velivolo, otteniamo il grafico seguente:



Si può notare come la coppia richiesta dai motori a pistoni sia superiore a quella che può fornire lo starter. Per i velivoli che utilizzano questo tipo di motori è quindi necessario utilizzare uno starter dedicato.

Per i velivoli equipaggiati con motori a turbina si può individuare una zona in cui è conveniente utilizzare la dinamo come starter e una in cui è necessario avere uno starter dedicato.

Vediamo ora gli svantaggi della dinamo.

Il grosso problema della dinamo è la presenza delle spazzole. Il commutatore è dotato di due contatti flessibili che si consumano molto rapidamente. Le spazzole devono essere cambiate ogni 1000 ore di volo e questo rappresenta una complicazione nella manutenzione.

Riassumendo:

LA DINAMO HA LO SVANTAGGIO DELL'USURA DELLE SPAZZOLE.

HA INVECE IL VANTAGGIO DI POTER ESSERE UTILIZZATA SIA COME GENERATORE CHE COME STARTER SU PICCOLI VELIVOLI A TURBINA. SU QUESTI TIPI DI AEREI SI PREFERISCE QUINDI ADOTTARE LA DINAMO COME GENERATORE MENTRE SUGLI ALTRI VELIVOLI (A PISTONI O GRANDI AEREI A TURBINA) LA DINAMO NON È LA SOLUZIONE IDEALE.

12.1.2. Generatore senza spazzole (brushless generator)

Quando non è possibile adottare la dinamo come starter, si sceglie un generatore senza spazzole.

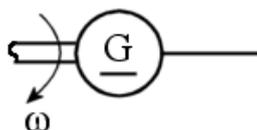
I generatori senza spazzole sono più complessi della dinamo, ma hanno il vantaggio di essere più potenti e affidabili poiché non c'è più il problema dell'usura delle spazzole.

Un generatore senza spazzole è praticamente costituito da un alternatore (generatore di corrente alternata) con un ponte di diodi per raddrizzare la corrente.

La funzione di starter è affidata ad un motore di avviamento dedicato. Ci saranno quindi due prese di moto della garbo occupate.

Poiché la normativa prevede che la tensione della DC a bordo di un aeromobile sia 28 V, è necessario, sia per i generatori con le spazzole che senza, un regolatore di tensione che stabilizzi il valore in uscita.

Il simbolo con cui viene indicato un generatore di corrente continua nello schema di un impianto elettrico per aeromobili è il seguente:



Riassumendo:

I GENERATORI SENZA SPAZZOLE HANNO LO SVANTAGGIO DI OCCUPARE DUE PRESE DI MOTO DALLA GEAR BOX. HANNO INVECE IL VANTAGGIO DI NON AVERE LE SPAZZOLE E DI FORNIRE UNA POTENZA ELEVATA. SUGLI AEREI A PISTONI SI UTILIZZA UN GENERATORE SENZA SPAZZOLE E UNO STARTER DEDICATO.

8.2. Gli inverter

Abbiamo visto come viene prodotta la corrente continua; ora dobbiamo capire come vengono alimentate le utenze che richiedono AC, cioè le apparecchiature avioniche.

Una parte della corrente continua viene mandata ad un dispositivo che la trasforma da continua ad alternata.

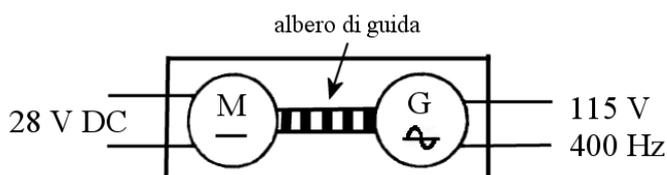
Questo dispositivo prende il nome di inverter e si schematizza in un circuito con il simbolo seguente:



Gli inverter si dividono in due categorie:

- **INVERTER ROTANTI:** che hanno parti in movimento
- **INVERTER STATICI:** non hanno parti rotanti e quindi sono più affidabili dei primi.

In ogni caso, gli inverter sono componenti pesanti e non molto affidabili.

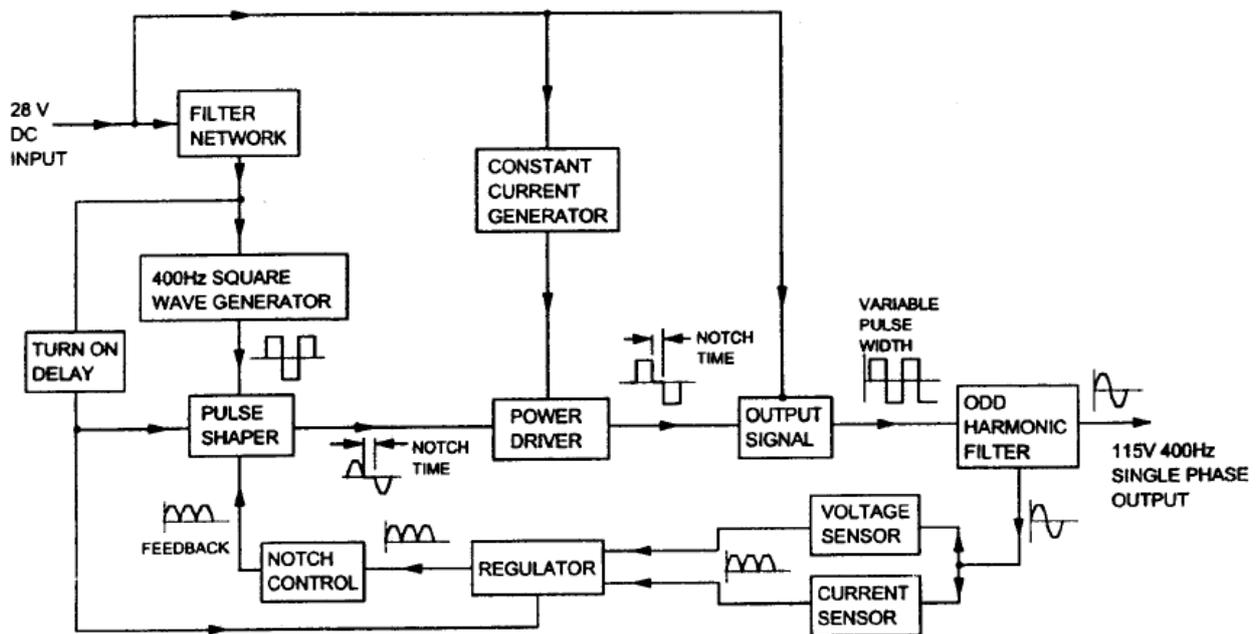


In pratica un inverter rotante è costituito da un motore DC che trascina un generatore di corrente alternata. Il fatto di avere due macchine in rotazione rende gli inverter rotanti pesanti e poco affidabili in quanto le parti in movimento sono a più alto rischio di rottura.

Inoltre è necessario provvedere a due sistemi per mantenere costante la frequenza e la tensione in uscita. Gli inverter di tipo statico sono più affidabili e più leggeri in quanto non hanno parti in movimento. Per questo hanno sostituito gli inverter rotanti e sono ormai ampiamente utilizzati su tutti velivoli con generazione primaria di DC.

L'inverter di tipo statico è costituito da un generatore di onda quadra alla frequenza di 400 Hz e da un modulatore che riceve in ingresso l'onda quadra a 400 Hz, il segnale di corrente continua e un segnale prelevato all'uscita e riportato indietro con un sistema feedback.

Gli inverter statici sono molto complessi. Un esempio di schema di inverter statico è il seguente.



8.3.La batteria e il circuito d'emergenza

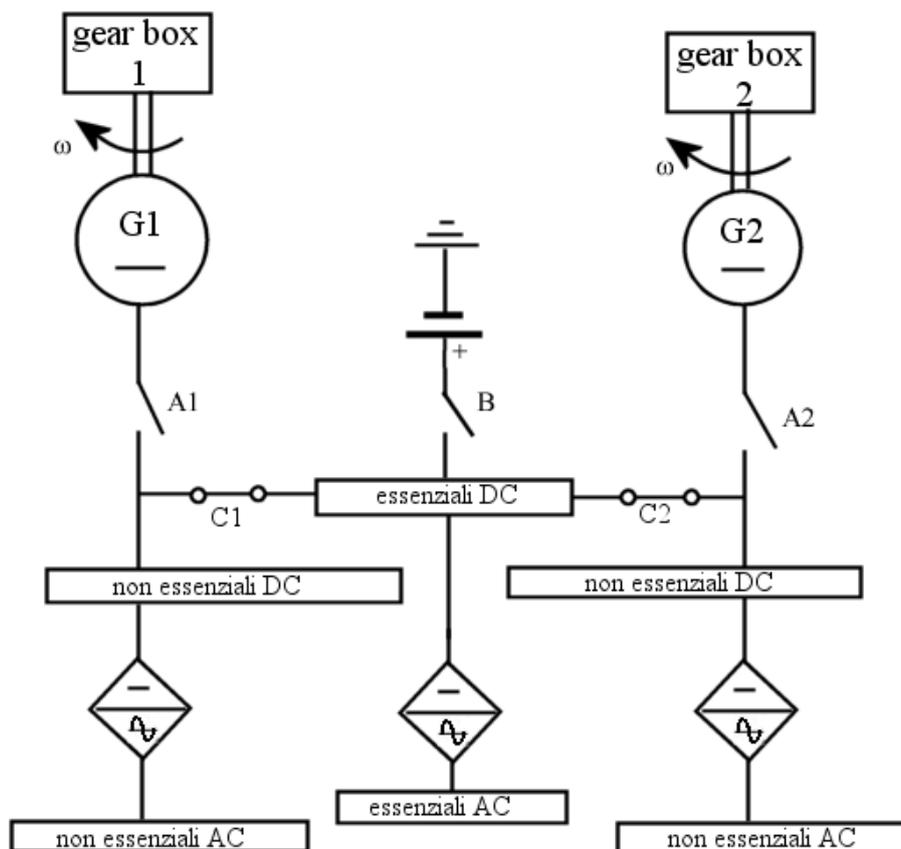
Le batterie vengono inserite nell'impianto elettrico di bordo di un aeromobile per alimentare le utenze essenziali al volo in caso di guasto dei generatori e per fare da "tampone" qualora si verificano carichi improvvisi a cui i generatori non sono in grado di far fronte.

Per normativa su ogni velivolo deve essere presente una batteria principale in grado di alimentare le utenze fondamentali per un certo tempo, sufficiente al velivolo a raggiungere il più vicino aeroporto e ad atterrare. Sugli aerei più grandi è presente anche una batteria ausiliaria per alimentare estintori, luci e per avviare l'APU (Auxiliary Power Unit). L'APU è una piccola turbina pneumatica presente sugli aerei di medie e grandi dimensioni. Il suo scopo è quello di fornire energia ausiliaria in caso di avaria del motore, quando la gear box non funziona. Inoltre viene utilizzata per l'avvio dei generatori elettrici quando il velivolo è fermo sulla pista, a motori spenti. Si può vedere l'APU come un piccolo motore.

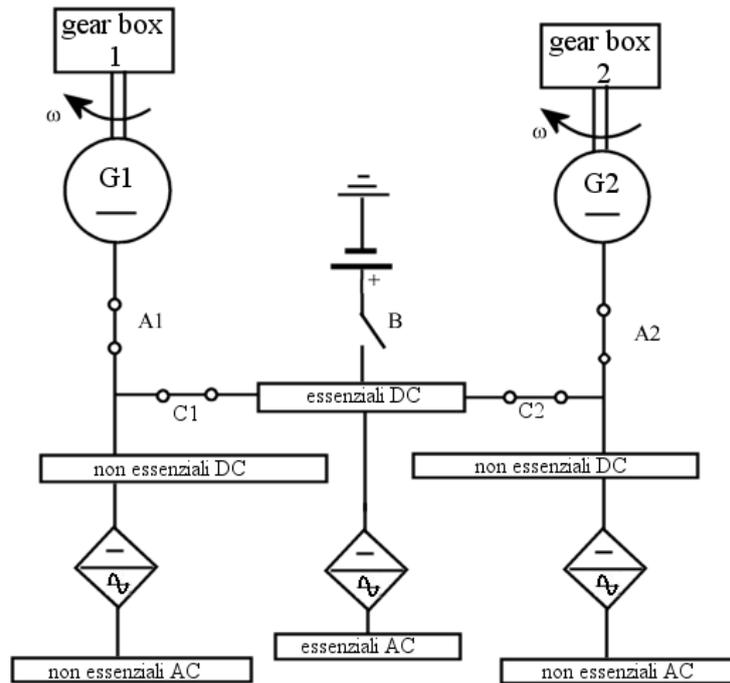
Di solito le batterie ausiliarie sono disposte in parallelo alla batteria principale.

Ci sono poi altre piccole batterie inserite nei singoli dispositivi elettronici al fine di salvare i dati. Ad esempio i computer di bordo sono corredati di piccole batterie dedicate, come quelle dei computer utilizzati a terra. Le batterie sono dimensionate per fornire una tensione di 24 V. A prima vista può sembrare che questo valore non coincida con quello di 28 V prescritto dalla normativa, ma in realtà quando la batteria viene inserita nel circuito si ha un abbassamento di tensione ai morsetti dei carichi. La potenza richiesta si riduce quindi a 23-24 V.

Di seguito è riportato lo schema generale dell'impianto di un velivolo con generazione primaria di corrente continua.

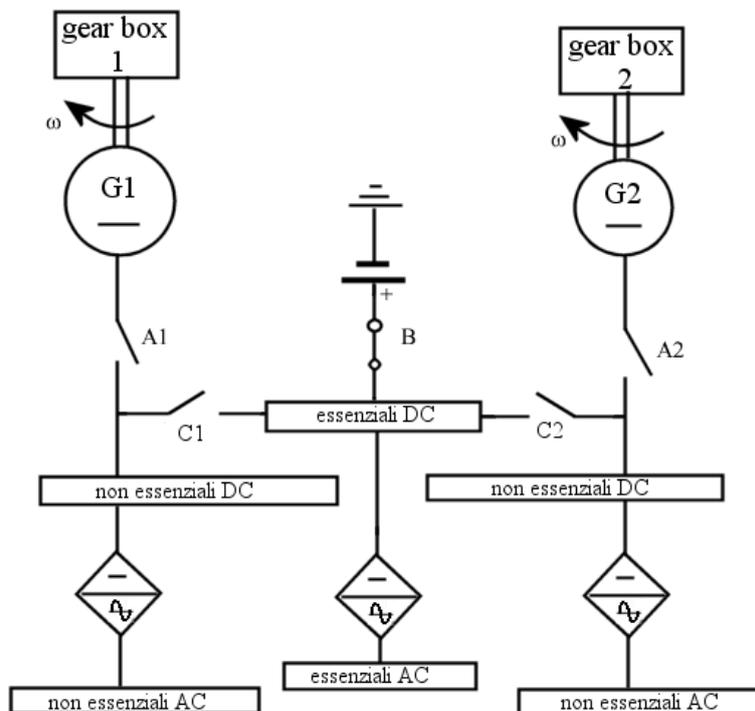


I generatori di corrente continua 1 e 2 vengono azionati dalle gear box dei due motori. In condizioni normali gli interruttori A1 e A2 sono chiusi. In questo modo i due generatori alimentano direttamente le barre di carico a cui sono collegate le utenze non essenziali che possono funzionare in DC (motori, resistenze, ecc...). Gli interruttori C1 e C2 sono chiusi e attraverso di essi la corrente arriva alla barra di carico a cui sono connesse le utenze essenziali in DC (comandi e controlli). L'immagine seguente mostra questa configurazione.



A valle delle barre di carico ci sono tre inverter che alimentano le barre di carico delle utenze in corrente alternata (l'avionica). Le utenze essenziali che richiedono AC (la radio e il trasponder) sono collegate alla barra di carico che prende corrente dalla barra di carico delle utenze essenziali in DC.

In caso di avaria ai motori, gli interruttori A1, A2, C1 e C2 si aprono, mentre l'interruttore B si chiude. In questo modo rimane alimentata solo la linea centrale tramite la batteria. L'immagine seguente mostra questa configurazione.



9. IMPIANTO CON GENERAZIONE PRIMARIA AC

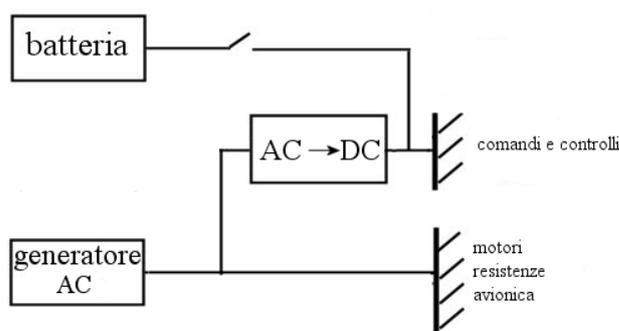
Sugli aerei di grandi dimensioni viene di solito adottato un impianto con generazione primaria di corrente alternata. I vantaggi di questa soluzione costruttiva sono due:

L'impianto è più leggero

Il dispositivo che converte da AC a DC è molto più affidabile degli inverter.

Lo svantaggio è la necessità di prevedere un circuito di emergenza separato per alimentare le utenze essenziali con la batteria.

In questo tipo di impianti si produce corrente alternata e si alimentano tutte le utenze che è possibile alimentare; per le utenze che richiedono necessariamente corrente continua una parte della corrente viene raddrizzata con un dispositivo chiamato TRU (Transformer Rectifier Unit). La figura seguente mostra uno schema semplificato di questo tipo di impianto:



Il punto di partenza è il generatore di corrente alternata. La barra di carico delle utenze in alternata prende corrente direttamente da esso. Una parte della corrente alternata viene trasformata in continua e va ad alimentare la barra di carico delle utenze in continua. Esiste un circuito di emergenza che alimenta, tramite batteria, queste utenze essenziali.

Un impianto è in realtà molto più complesso di così. In particolare, c'è un altro dispositivo che serve a mantenere costante la frequenza della corrente.

Nelle pagine seguenti analizzeremo nel dettaglio le varie parti dell'impianto.

9.1.1 generatori AC

Di solito si utilizzano alternatori senza spazzole per eliminare i problemi connessi alla loro usura e alla necessità di sostituirle frequentemente.

La corrente generata può essere monofase o trifase, a seconda del velivolo.

Consideriamo ad esempio una corrente di 400 Hz, che è quella che si trova a bordo dei velivoli.

| Numero di paia poli | Numero di giri necessario per 400 Hz |
|---------------------|---|
| 1 | $n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{400 \cdot 60}{1} = 24000 \text{ rpm}$ |
| 2 | $n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{400 \cdot 60}{2} = 12000 \text{ rpm}$ |
| 3 | $n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{400 \cdot 60}{3} = 8000 \text{ rpm}$ |

Dalla tabella si vede che il numero di giri al minuto del generatore scende all'aumentare del numero di paia poli. Questo significa che è meccanicamente conveniente utilizzare generatori con molti paia poli.

La formula utilizzata nella tabella ci consente di osservare anche un'altra cosa:

$$f = \frac{n \cdot p}{60}$$

La frequenza della corrente prodotta da un generatore AC dipende dal numero di giri del motore che lo aziona.

Abbiamo visto trattando l'impianto in corrente continua che i generatori prendono il moto dalla gear box che a sua volta prende il moto dall'albero motore dei propulsori.

Questo significa che quando il numero di giri del motore varia, varia anche la frequenza della corrente prodotta.

Per alcune apparecchiature questo non è un problema, per altre invece la frequenza deve essere assolutamente costante e pari a 400 Hz.

Per ottenere una corrente a frequenza costante si utilizza un dispositivo chiamato Constant Speed Drive.

9.2. Il problema della frequenza

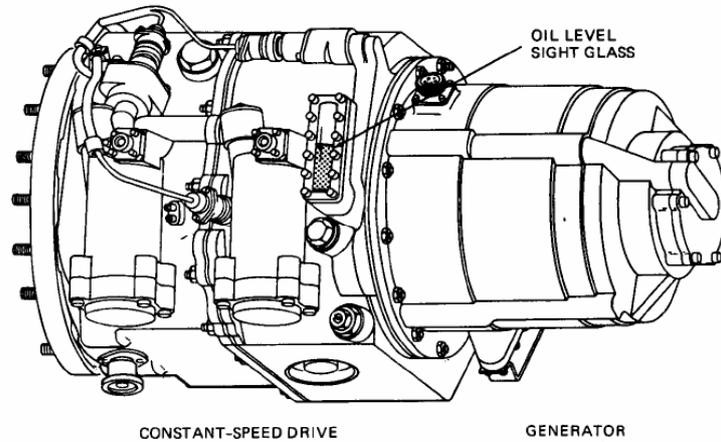
Il CSD è un dispositivo inserito tra la gear box e l'alternatore. In entrata prende il moto dal motore, quindi a giri variabili, e in uscita da una rotazione a numero di giri costante.

Esistono diversi tipi di CSD, tutti molto costosi, ma nonostante questo la loro adozione è ormai generalizzata a tutti gli aeromobili di grandi dimensioni poiché per i motori (che siano elettrici, idraulici o pneumatici), avere una frequenza costante in ingresso garantisce un funzionamento più soddisfacente.

Ormai quasi tutti gli impianti sono a frequenza costante poiché quelli a frequenza variabile risultano meno affidabile e più pesanti: è infatti necessario sovradimensionare tutte le utenze per garantire che funzionino anche a frequenze più basse.

La maggior parte delle unità sono dotate di un meccanismo di disconnessione attivabile elettricamente. Questa disconnessione è realizzata con un apposito comando dalla cabina di pilotaggio del velivolo o

automaticamente tramite una unità di controllo del generatore, in caso di alcuni tipi di guasto del generatore, che comportano condizioni di pericolo ad esempio di incendio.



Negli ultimi anni si è affermato un altro tipo di dispositivo per mantenere costante la frequenza: l'Integrated Drive Generator IDG.

L'IDG contiene sia il generatore elettrico che il CSD in una unica unità.

Questo concetto aiuta a ridurre sia il peso che la dimensione del sistema tradizionale a due unità. Il CSD converte la velocità del motore variabile ad una velocità costante di ingresso dall'alternatore di 12.000 giri/min.

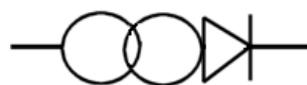
A causa della loro dimensione compatta, la maggior parte dei generatori a c.a. richiedono l'adozione di sistemi di raffreddamento durante il funzionamento. I generatori più vecchi sono tipicamente raffreddati ad aria. I sistemi più nuovi usano l'olio come fluido di raffreddamento. L'olio è inviato al CSD attraverso il generatore e poi attraversa uno scambiatore di calore aria/olio. L'aria raffredda l'olio, che è messo di nuovo in circolo attraverso il CSD ed il generatore. L'uso del raffreddamento ad olio permette di far girare il rotore a velocità più alta, e ciò significa un generatore più leggero e più compatto.

Il Transformer Rectifier Unit T.R.U.

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti, non tutte le utenze possono essere alimentate in corrente alternata. I comandi di voli, in particolare, richiedono una corrente continua.

E' quindi necessario trasformare una parte della corrente alternata prodotta dal generatore in corrente continua.

Il dispositivo che realizza questa trasformazione è noto come Transformer Rectifier Unit T.R.U. che, nei circuiti viene schematizzato col simbolo seguente:



E' un dispositivo realizzato tramite un circuito a diodi, concettualmente simile a quello degli alimentatori, ma molto più complicato da un punto di vista progettuale, come mostrato dall'immagine seguente.

