

**ELETTRONE**, particella elementare che, insieme al protone e al neutrone, è tra i costituenti fondamentali della materia. Scoperto nel 1897 dal fisico inglese J.J. Thomson durante esperimenti sui raggi catodici, l'elettrone è oggi la particella elementare meglio conosciuta. Ha massa a riposo di  $9109 \times 10^{-28}$  g, e carica elettrica negativa pari a  $1602 \times 10^{-19}$  C. Essendo caratterizzato da un valore semi-intero dello spin, questa particella si colloca nella famiglia dei fermioni, e obbedisce alla statistica di Fermi-Dirac. La sua antiparticella è il positrone. Gli elettroni intervengono in un gran numero di fenomeni: il flusso di corrente elettrica in un conduttore sottoposto a una differenza di potenziale è dovuto allo spostamento ordinato degli elettroni liberi del conduttore; i raggi catodici sono costituiti da elettroni; inoltre, sono elettroni anche le particelle beta emesse nei decadimenti radioattivi di alcuni nuclei instabili.

## CIRCUITO ELETTRICO

Catena di conduttori connessi (dispositivi elettrici con specifiche funzioni ed elementi di collegamento), percorsa da corrente elettrica, generalmente alimentata da un generatore. Se la catena è chiusa, la corrente può circolare e il circuito elettrico si dice chiuso; se la catena presenta un'interruzione, la corrente non circola e il circuito si dice aperto. Viene detto cortocircuito un circuito chiuso nel quale il percorso tra i terminali del generatore ha impedenza trascurabile, cioè idealmente nulla. In questo caso circolano correnti molto intense che possono danneggiare il circuito. Si dice nodo un punto del circuito in cui convergono tre o più rami conduttori. Una maglia è un percorso chiuso all'interno del circuito; in generale un circuito può contenere più di una maglia.

## LA LEGGE DI OHM

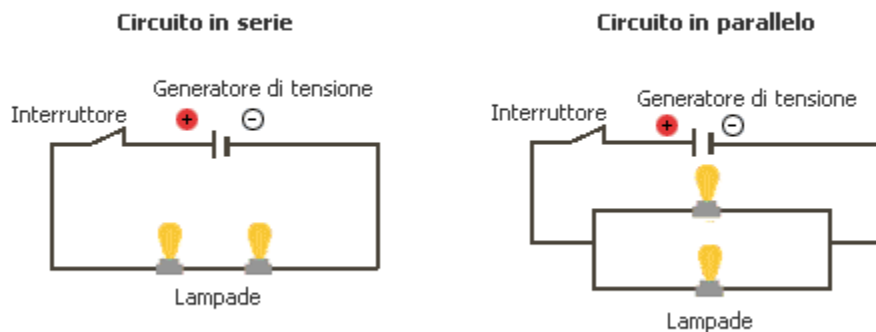
Una delle principali leggi a cui obbedisce il flusso della corrente in un circuito è la legge di Ohm, dal nome del fisico tedesco Georg Ohm che la formulò. Essa afferma che l'intensità della corrente di un circuito realizzato con componenti puramente resistivi è direttamente proporzionale alla tensione fornita dal generatore e inversamente proporzionale alla resistenza complessiva del circuito stesso. In termini algebrici, la legge di Ohm può essere espressa nella forma  $I = V/R$ , dove  $I$  indica l'intensità di corrente, misurata in ampere,  $V$  la tensione ai capi del generatore, in volt, ed  $R$  la resistenza del circuito, in ohm (*Vedi* Unità di misura elettriche). La legge di Ohm è valida per qualsiasi circuito elettrico o singolo componente puramente resistivo, sia che in esso circoli corrente continua (DC, dall'inglese *direct current*), sia corrente alternata (AC, *alternated current*). Tuttavia, per analizzare circuiti complessi o circuiti in AC contenenti induttori (*vedi* Induzione elettromagnetica) e/o condensatori, è necessario tenere conto di altre leggi fisiche.

Un circuito in cui ogni collegamento è realizzato in modo che tutta la corrente passi da un componente al successivo senza distribuirsi su più rami è detto circuito in serie; un simile circuito si presenta come un unico anello senza diramazioni. Se due o più resistori sono collegati in serie, la resistenza totale è pari alla somma delle singole resistenze. Due resistori si dicono invece collegati in parallelo se sono sottoposti alla stessa differenza di potenziale, cioè se i due terminali di ciascun elemento sono collegati a una coppia comune di punti; in questo caso, la resistenza complessiva è data dalla formula

$$R_{\text{equivalente}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots}$$

È evidente che la resistenza complessiva (o equivalente) di più resistori in parallelo è sempre minore della più piccola delle singole resistenze coinvolte; nel caso di due resistenze uguali, ad esempio, la resistenza equivalente è esattamente la metà di ogni singola resistenza. Nel collegamento in parallelo, tutti i dispositivi coinvolti sono sottoposti alla stessa differenza di potenziale; in altre parole, il terminale a polarità positiva (+) di ciascuno di essi sarà collegato a un conduttore comune, e analogamente i terminali a polarità negativa (-) saranno collegati a un altro conduttore comune.

Il sistema più semplice per collegare componenti elettrici diversi consiste nel disporli uno dopo l'altro, in quello che viene chiamato un "circuitto in serie". Con questo genere di collegamento, se uno degli elementi si guasta (nell'illustrazione, una lampadina), anche l'altro smette di funzionare in quanto non più attraversato da corrente (il circuito è stato interrotto). In alternativa, è possibile collegare ciascuna lampadina indipendentemente, in modo che se una delle due si guasta, l'altra continua comunque a funzionare. In questo caso il circuito è detto "in parallelo".



© Microsoft Corporation. Tutti i diritti riservati.

## LE LEGGI DI KIRCHHOFF

Quando un circuito contiene diramazioni, le correnti e le tensioni si distribuiscono tra i componenti secondo quanto prescritto dalle leggi di Kirchhoff, dal nome del fisico tedesco Gustav Robert Kirchhoff che le scoprì. La prima legge di Kirchhoff, conseguenza del principio di conservazione della carica elettrica, afferma che la somma delle correnti che convergono in un nodo del circuito è uguale, in ogni istante, alla somma delle correnti che se ne allontanano. La seconda legge, conseguenza del principio di conservazione dell'energia, afferma che, lungo ogni maglia, la somma algebrica delle tensioni misurate ai capi degli elementi presenti è nulla. L'applicazione delle leggi di Kirchhoff a un circuito permette di determinare il valore delle correnti in esso circolanti e delle tensioni ai capi dei suoi elementi.

Le due leggi di Kirchhoff permettono di determinare l'intensità di corrente  $i$  che circola nei rami di un circuito, noti gli elementi che ne fanno parte. Nell'illustrazione il circuito è costituito da due maglie, contenenti una resistenza  $R$ , una capacità  $C$  e un'induttanza  $L$ . La legge dei nodi, che rappresenta una conseguenza del principio di conservazione della carica, afferma che la somma delle correnti che confluiscono in un nodo del circuito (correnti entranti) è pari alla somma di quelle che se ne allontanano (correnti uscenti). La legge delle maglie consegue invece dal principio di conservazione dell'energia e afferma che la somma algebrica delle tensioni ai capi degli elementi di una maglia (prendendo con il segno positivo le cadute di potenziale).

**L'IMPEDENZA**, l'applicazione della legge di Ohm ai circuiti percorsi da correnti alternate è complicata dalla presenza di effetti induttivi e capacitivi: entrambi limitano l'intensità delle correnti e, mentre l'induttanza ritarda i picchi delle correnti alternate rispetto ai picchi delle relative tensioni, la capacità ritarda i picchi delle tensioni rispetto a quelli delle relative correnti. L'intensità della corrente alternata che fluisce in un circuito AC può essere quindi determinata graficamente per mezzo di opportune rappresentazioni vettoriali, oppure tramite l'equazione algebrica

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

in cui  $L$  rappresenta l'induttanza,  $C$  la capacità e  $f$  la frequenza della corrente considerata. La grandezza a denominatore nella frazione è detta impedenza del bipolo o del tratto di circuito in esame (a una data frequenza) ed è generalmente rappresentata con la lettera  $Z$ . L'impedenza può essere considerata come una generalizzazione della resistenza per i circuiti percorsi da correnti variabili nel tempo: infatti, se si pone  $f = 0$  (corrente continua), l'impedenza  $Z$  si riduce alla semplice resistenza  $R$ . Dunque, in generale, la legge di Ohm per qualunque circuito elettrico può essere espressa nella forma  $I = V/Z$ .

## **CONDENSATORE**

È un elemento di circuito elettrico capace di immagazzinare cariche elettriche.

Un condensatore è costituito da una coppia di corpi conduttori, detti armature, separati da un materiale isolante o dielettrico. A seconda della forma geometrica delle armature, un condensatore può essere piano (armature piane e parallele), cilindrico (armature cilindriche coassiali) o sferico (armature sferiche concentriche). Per caricare un condensatore è necessario collegarne le armature ai capi di un generatore (ad esempio una batteria); al termine del processo, le due armature sono elettricamente cariche, una positivamente, l'altra negativamente, e manifestano una differenza di potenziale (tensione) direttamente proporzionale alla quantità di carica accumulata. L'energia spesa dal generatore per caricare il condensatore viene immagazzinata tra le sue armature sotto forma di energia elettrostatica, che viene restituita nel processo di scarica. I condensatori sono realizzati in una grande varietà di forme e dimensioni, in relazione all'uso cui sono destinati. Tra i dielettrici più usati, l'aria, la mica, la ceramica, la carta, l'olio e persino il vuoto.

La quantità massima di carica accumulabile in un condensatore è limitata dalla tensione massima che si può applicare al dielettrico, che non può superare un determinato limite, specifico per ogni condensatore.

**COMPORTAMENTO IN CORRENTE CONTINUA E ALTERNATA**, quando un condensatore è inserito in un circuito a corrente continua è come se il circuito fosse aperto: la corrente circola soltanto nel breve intervallo di tempo necessario alla carica del condensatore. In un circuito a corrente alternata, invece, un condensatore si comporta come un conduttore. Questa proprietà si rivela utile per impedire il passaggio di correnti continue in alcune parti dei circuiti elettrici.

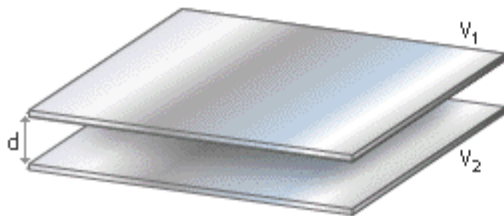
**PARAMETRI CARATTERISTICI**, il principale parametro che descrive le proprietà di un condensatore è la capacità, definita come la quantità di carica che produce una differenza di potenziale di un volt tra le armature, oppure come il rapporto tra la quantità di carica accumulata sulle armature e la

differenza di potenziale presente tra di esse. La capacità di un condensatore dipende dalle sue caratteristiche geometriche e dal tipo di materiale isolante tra le armature; si misura in farad (un condensatore ha la capacità di un farad se, alla tensione di 1 volt, accumula carica pari a 1 coulomb). La bottiglia di Leida è un condensatore le cui armature sono sottili fogli metallici avvolti sulle due superfici interna ed esterna di una bottiglia di vetro, che costituisce il dielettrico.

Condensatori a capacità fissa o a capacità variabile sono impiegati, insieme agli induttori, per realizzare circuiti risonanti in diversi dispositivi elettronici, quali gli apparecchi radio. Condensatori di grande capacità vengono utilizzati anche nelle linee di trasporto dell'energia elettrica, per compensare l'effetto induttivo di molti carichi e rendere più efficiente il trasporto dell'energia.

Illustrazione schematica di un condensatore ad armature piane e parallele. La capacità di un condensatore è proporzionale all'area delle armature e inversamente proporzionale alla loro distanza: se tale distanza è riempita di un materiale dielettrico, la costante di proporzionalità è la costante dielettrica del mezzo. La capacità del condensatore determina la quantità di carica che può venire accumulata su ciascuna armatura, attraverso la relazione:  $Q = C(V_2 - V_1)$ , dove  $V_2 - V_1$  è la tensione applicata alle armature. L'energia elettrostatica accumulata all'interno del condensatore carico è pari a  $E_{el} = \frac{1}{2} C (V_2 - V_1)^2$ : in figura è mostrato l'andamento delle linee del campo elettrico che si stabilisce fra le armature.

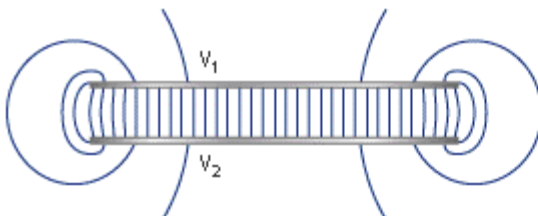
**Condensatore ad armature piane e parallele**



$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$\epsilon_0$  = costante dielettrica del vuoto =  
 $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$

**Sezione trasversale e configurazione del campo elettrico**



$$|E| \sim V_2 - V_1$$

Intensità del campo elettrico  
all'interno del condensatore

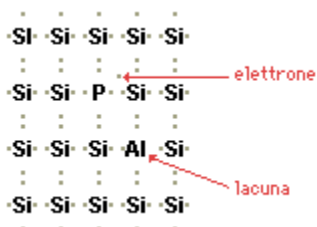
© Microsoft Corporation. Tutti i diritti riservati.

## SEMICONDUTTORE

Categoria di materiali presenti in natura allo stato solido cristallino, la cui capacità di conduzione dell'elettricità, a temperatura ambiente, è intermedia tra quella degli isolanti e quella dei conduttori. La conducibilità elettrica, cioè la capacità di un corpo di lasciarsi attraversare da corrente, è una delle proprietà della materia che assume il più ampio range di valori in natura. Alcuni metalli, quali il rame, l'argento e l'alluminio, sono eccellenti conduttori; altri materiali, come il diamante e il vetro, sono isolanti pressoché perfetti. A temperature molto basse, i semiconduttori puri si comportano come isolanti, ma la loro conducibilità può crescere drasticamente per effetto di un aumento della temperatura, di un'esposizione alla luce o di un trattamento che prevede l'aggiunta di piccole percentuali di altre sostanze (drogaggio). La fisica dello stato solido studia le proprietà di questi materiali.

**LA CONDUZIONE: ELETTRONI E LACUNE**, tra i semiconduttori comuni si trovano alcuni elementi puri, quali il silicio, il germanio e il selenio, e alcuni composti, quali l'arseniuro di gallio, il seleniuro di zinco e il tellururo di piombo. La crescita della conducibilità di questi materiali per effetto dell'incremento della temperatura, dell'irraggiamento o dell'aggiunta di impurità si deve all'aumento del numero di portatori di carica elettrica prodotto da questi trattamenti nel reticolo cristallino. In un semiconduttore puro, o intrinseco, come un cristallo di silicio, gli elettroni di valenza (gli elettroni che occupano le orbite più esterne di un atomo) sono condivisi a due a due con altri atomi adiacenti, per formare i legami covalenti che uniscono gli atomi dando consistenza al cristallo. In condizioni ordinarie, gli elettroni di valenza sono vincolati ai nuclei degli atomi e occupano posizioni fisse all'interno del solido; tuttavia, l'energia termica e la luce possono rompere i legami chimici, liberando elettroni di conduzione. Nella posizione lasciata libera (lacuna) da uno di questi elettroni, rimane un eccesso di carica positiva, che viene subito compensato dallo spostamento di uno degli elettroni di valenza degli atomi adiacenti. L'eccesso di carica positiva si trasferisce così a un atomo vicino; l'effetto equivale allo spostamento della lacuna, cioè di una carica positiva. In sostanza, la rottura di un legame covalente genera due portatori di carica liberi: un elettrone e una lacuna. Questo giustifica l'aumento di conducibilità del materiale per irraggiamento o per riscaldamento. L'energia necessaria per liberare un elettrone da un legame covalente è detta gap di energia.

**IL DROGAGGIO**, un altro metodo per creare cariche libere in un cristallo semiconduttore è il drogaggio: si tratta di un trattamento che consiste nell'inserimento di piccolissime percentuali di materiali (impurità o droganti) dotati di tre o cinque elettroni di valenza (i semiconduttori ne hanno quattro). Ogni atomo di drogante sostituisce, nei legami covalenti, un atomo di semiconduttore. Se il drogante ha cinque elettroni, uno di essi resta libero per la conduzione: il drogante si dice "donatore" e il semiconduttore, così drogato, è detto di tipo *n*, poiché in esso prevalgono portatori di carica negativi (gli elettroni). Se il drogante ha solo tre elettroni di valenza, il legame covalente è incompleto e nel reticolo cristallino genera una lacuna: il drogante si dice "accettore" e il semiconduttore drogato è detto di tipo *p*, poiché in esso prevalgono portatori di carica positivi (le lacune). Questo concetto è illustrato dallo schema, che mostra un cristallo di silicio (Si) drogato. I quattro elettroni di valenza di ogni atomo sono rappresentati da punti. Nel cristallo con drogaggio di tipo *n* alcuni atomi di fosforo (P), che hanno cinque elettroni di valenza, sostituiscono altrettanti atomi di silicio, liberando un elettrone ciascuno. Nel cristallo con drogaggio di tipo *p* sono inseriti atomi di alluminio (Al), che hanno tre elettroni di valenza; ciascun atomo di Al, a cui manca un elettrone per realizzare un legame covalente completo, costituisce una lacuna. Si ottiene, in ogni caso, un aumento della conducibilità.



Se, in uno stesso cristallo, vengono realizzate una zona *p* e una zona *n* adiacenti, si crea una "giunzione *p-n*". Le proprietà di questo particolare sistema fisico sono alla base del funzionamento del diodo a semiconduttore, un dispositivo generalmente utilizzato come raddrizzatore nei circuiti a corrente alternata. Esso infatti presenta un'altissima resistenza al passaggio della corrente in una direzione e una resistenza pressoché trascurabile in direzione opposta; applicando una tensione di

polarità opportuna, è possibile determinarne il comportamento di conduttore o isolante. Combinazioni di più giunzioni permettono di realizzare i transistor e dispositivi come celle solari e laser a giunzione.

I componenti a semiconduttore vantano innumerevoli applicazioni nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche. La tecnologia dell'integrazione, che permette di realizzare, sfruttando le proprietà delle giunzioni *p-n*, centinaia di migliaia di componenti sulla superficie di una piccola porzione di cristallo di silicio, ha reso possibile l'attuale grado di miniaturizzazione dei dispositivi elettronici. La realizzazione di nuovi tipi di transistor, detti MOS (*Metal-Oxide-Semiconductor*), usati in coppie complementari (con conduzione affidata a semiconduttore di tipo *p* l'uno e di tipo *n* l'altro), ha permesso di aumentare ulteriormente l'efficienza di questi circuiti (integrati C-MOS). *Vedi anche* Circuito integrato; Microprocessore.

## DIODO

Componente di un circuito elettrico che permette il passaggio di corrente in una sola direzione.

**TIPI DI DIODO**, Il diodo a vuoto, realizzato con la tecnologia dei tubi a vuoto, è costituito da una coppia di elettrodi metallici (catodo e anodo), racchiusi sotto vuoto in un'ampolla di vetro sigillata. Il catodo, riscaldato dal passaggio di una corrente, emette elettroni per effetto termoionico. Attratti dall'anodo, a cui è applicato un potenziale positivo, gli elettroni migrano verso di esso, chiudendo il circuito. Poiché il flusso di elettroni è possibile unicamente dal catodo all'anodo, il diodo a vuoto viene usato per il raddrizzamento delle correnti alternate.

Se nell'ampolla è presente un gas rarefatto (ad esempio elio o argo) il diodo si dice a gas: la corrente tra gli elettrodi è maggiore di quella che passa in un diodo a vuoto, perché rafforzata dall'effetto di ionizzazione del gas.

**DIODO ZENER** Particolare tipo di diodo a giunzione *p-n* che sfrutta la conduzione quasi unidirezionale offerta dalla superficie di separazione fra due zone fortemente drogate di uno stesso cristallo semiconduttore (solitamente silicio). Quando la zona di tipo *p* (ossia con eccesso di lacune) è polarizzata positivamente rispetto alla zona di tipo *n* (con eccesso di elettroni), la giunzione presenta bassa resistenza (polarizzazione diretta). Nel caso contrario (polarizzazione inversa) presenta invece resistenza elevata, fino a che la tensione ai capi del diodo è mantenuta entro un determinato intervallo di valori (solitamente compreso tra qualche volt e poche centinaia di volt). Oltrepassato tale limite, il diodo Zener diventa fortemente conduttore, impedendo alla tensione inversa di aumentare ulteriormente (effetto descritto intorno al 1940 dall'inglese C. Zener). Per questa sua caratteristica il diodo Zener, usato in polarizzazione inversa, è particolarmente sfruttato come stabilizzatore di tensione o sorgente di tensione di riferimento costante.

**DIODI A SEMICONDUTTORE**, I diodi d'impiego più comune nei circuiti elettronici attuali sono a semiconduttore. Il più semplice tra questi, il diodo a punta, risale ai primordi della radiofonia, quando il segnale radio veniva rivelato, in ricezione, per mezzo di un cristallo di germanio su cui poggiava la punta di un sottile filo metallico. Nei moderni diodi a punta, al germanio o al silicio, la lastrina di cristallo e il filo metallico (di tungsteno o di bronzo) sono montati all'interno di un tubicino di vetro e collegati ai due terminali che sporgono dalle estremità del tubo. Le proprietà del diodo sono determinate dal contatto tra il filo e la lastrina; il senso diretto della corrente è quello dal filo alla lastrina.

**DIODO A GIUNZIONE**, I diodi a giunzione sfruttano le proprietà fisiche della superficie di separazione (giunzione) tra due zone di uno stesso cristallo semiconduttore, trattate (drogate) in modo diverso. Tali proprietà consentono il passaggio di una corrente elettrica di intensità considerevole in una sola direzione; la corrente che circola in senso opposto non è nulla, ma è trascurabile. Rispetto ai diodi a vuoto, quelli a giunzione, anch'essi usati come raddrizzatori, sono più compatti, economici e resistenti.

La realizzazione di giunzioni p-n dotate di caratteristiche particolari (con uno e entrambi i campioni di semiconduttore fortemente drogati, ad esempio) permette di ottenere tipi particolari di diodo, che mostrano caratteristiche variabili a seconda della intensità e del verso della tensione applicata. Alcuni esempi sono costituiti dal diodo Zener, sfruttato come stabilizzatore di tensione, dal diodo Schottky, dotato di tempi rapidissimi di commutazione, particolarmente adatto nei circuiti elettronici ad alta frequenza, dal diodo tunnel, la cui corrente inversa può raggiungere valori molto elevati, utilizzato soprattutto come oscillatore, amplificatore e commutatore, e infine dal diodo varactor, che, grazie alla capacità variabile mostrata in polarizzazione inversa, trova la sua applicazione ottimale in circuiti di sintonizzazione per VHF e microonde.

Un altro tipo di diodo a giunzione è il fotodiodo, che produce spontaneamente una tensione fra i terminali la giunzione viene illuminata: tale caratteristica lo rende adatto all'impiego nelle celle solari. Nei diodi a emissione di luce (LED), infine, l'applicazione di piccole tensioni produce l'emissione di una radiazione luminosa. I LED sono usati come indicatori luminosi, nei visualizzatori numerici delle calcolatrici e degli orologi digitali, nei telecomandi e nei sistemi a fibre ottiche.

## **ALIMENTATORI**

La maggior parte dei circuiti elettronici necessita di essere alimentata da tensione continua. Questa è ottenibile da batterie o da alimentatori interni, che convertono la tensione alternata degli impianti di distribuzione domestici in tensioni continue stabilizzate. Il primo elemento di un alimentatore è il trasformatore, che riduce o aumenta il valore della tensione di rete al livello richiesto per il funzionamento dell'apparecchiatura, e garantisce l'isolamento elettrico del dispositivo dalle linee della rete, in modo da ridurre i rischi di fulminazione. Il trasformatore è seguito da un raddrizzatore, normalmente a diodi. In passato, per i raddrizzatori di piccola potenza usati negli apparecchi elettronici venivano impiegati diodi a vuoto e una gran varietà di materiali, quali cristalli di germanio o solfuro di cadmio. Oggi si usano quasi esclusivamente diodi al silicio, che offrono grande affidabilità a basso costo.

Fluttuazioni e ondulazioni sovrapposte alla tensione DC raddrizzata (rilevabili come un rumore di fondo negli impianti audio) possono essere filtrate, ovvero eliminate da un condensatore; maggiore è la capacità del condensatore, minore è l'ondulazione residua della tensione. Un controllo più preciso del livello di tensione e un ulteriore abbattimento dell'ondulazione possono essere ottenuti con un regolatore di tensione, che disaccoppia l'alimentatore dal circuito esterno, rendendo la tensione indipendente da eventuali fluttuazioni a livello della rete. Il più semplice regolatore impiega un diodo Zener, una giunzione p-n appositamente realizzata utilizzata in polarizzata inversa: quando la tensione ai suoi capi supera un valore stabilito, il diodo diventa fortemente conduttore, impedendo alla tensione di aumentare ulteriormente. Regolatori di tensione più sofisticati vengono costruiti mediante i circuiti integrati.

