

ELETTRONICA PER PRINCIPIANTI

INTRODUZIONE

A chi è rivolto questo testo?

Volevo spendere solo poche parole sul perché di questo testo. Alla tenera età di 34 anni, due lauree alle spalle, lavoratore, con casa, ragazza, un bimbo in arrivo e.....l'improvvisa necessità di imparare a costruire qualche circuito "in casa". E' da sempre che invidio chi si progetta i circuiti da se e questa volta ho deciso di fare sul serio. Non ho ne tempo ne voglia di iscrivermi all'università o corsi vari, ho perciò deciso di arrangiarmi. Cercando scopro che su internet si trovano tante belle cose ma nulla che mi soddisfi sino in fondo. E' a questo punto che ho deciso di cominciare questo testo che non voglio chiamare libro, manuale o quant'altro. Qui raccoglierò quello che sto imparando raccogliendo le informazioni che trovo online, cercando innanzitutto di capirle, e poi di trasmetterle in questo testo. Quindi avrete capito che non conosco l'elettronica per cui non aspettatevi un manuale da superesperto. Proprio per questo motivo molte cose saranno probabilmente inesatte o superficiali perciò non prendete per legge quanto scritto, anzi, se ne sapete più di me e trovate degli errori sono ben lieto di modificare il testo. Allo stesso modo mi sembra sia chiaro che il target è il principiante che stia cercando una guida per cominciare da zero. Certo a scuola dovete esserci andati, almeno la legge di Ohm, Volt, Watt, Ampere, insomma, qualche base dovete avercela altrimenti sarà dura. Questo testo rappresenta in sé una specie di sfida, vorrei dimostrare come una persona quasi del tutto ignorante in materia possa, con un po' di pazienza, un PC, ed internet, riuscire a scrivere un testo di cui non sapeva quasi nulla prima di scriverlo, spero di riuscirci come spero che possa essere utile a qualcuno o possa far sorridere qualcun' altro.

Alcuni contenuti sono presi da siti internet sparsi per il mondo (con relativi link), se qualche autore ritenesse che questo testo viola in qualche modo la sua opera, è pregato di segnalarmelo ed il materiale incriminato verrà prontamente sostituito.

Strumenti

Sin dall'inizio di questa avventura sapevo che esistono dei programmi per il disegno e la simulazione dei circuiti. Ne ho provati tanti, per fare alcuni nomi cito solamente OrCAD, IntelliCAD, Electronics WorkBench, KiCad, Eagle, Deeds. Fra questi citati ve ne sono alcuni professionali che costano un accidenti, confesso di averne prelevato delle versioni diciamo "non ufficiali", per testarli e vedere cosa offrono, se sono semplici da usare etc. La conclusione è che i programmi professionali a noi comuni analfabeti dell'elettronica non solo non ci servono, ma sono dannosi in quanto sono estremamente complessi da usare per cui rischiamo di perdere il tempo a capire come usare i programmi piuttosto che avere uno strumento di ausilio per imparare l'elettronica. Ma volutamente ho tralasciato un piccolo programmino gratuito...lo SwitcherCAD III della Linear Technology. E' un programma distribuito dalla Linear Technology (LT), che potremmo considerare una sorta di "programma pubblicitario" nel senso che fra i componenti che troviamo pronti all'uso ve ne sono molti di quella ditta mentre vi è una certa carenza di componenti di altre ditte. Questo è forse l'unico vero limite di questo software ma è del tutto bypassabile e vedremo fra poco come. Questo programma che abbrevierò con SC3, non solo è gratis, ma è anche molto "leggero" ed è di una semplicità di utilizzo che non ha eguali. Queste sono le motivazioni per cui utilizzerò lo SC3 in questo manuale e per cui vi consiglio di scaricarlo da <http://www.linear.com> (al momento la pagina per il download si trova qui <http://www.linear.com/designtools/softwareRegistration.jsp> e non siete nemmeno obbligati a registrarvi). Aggiornamento: il nome del software è stato upgradato a LTSpice IV. Se un giorno diventerete maghi dell'elettronica magari dovrete passare oltre ed usare programmi che non disegnano solo il circuito ma anche i circuiti stampati veri e propri e permettono di creare dei files appositi da dare in pasto alle macchine che poi li stampano "dal vero"....tutte cose che per uso hobbistico non ci servono.

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)


Questa per me è stata una sorpresa: ho scoperto che esiste questo, diciamo linguaggio per la descrizione e simulazione di circuiti elettronici. Tutti i programmi di simulazione circuitale si appoggiano a questo tipo di linguaggio ed anche SC3 ne fa uso. Ciò significa che possiamo bypassare in modo relativamente semplice il limite di cui vi accennavo sul limitato numero di componenti disponibili, basta infatti aggiungere le “descrizioni SPICE” dei vari componenti per averne a centinaia di nuovi. Niente paura, ho già fatto questo lavoro per voi per cui vi basta sostituire l'intera directory lib contenuta nella directory di SW3 (fate un backup di sicurezza prima) con quella che potete trovare nel mio sito.

Vi segnalo comunque un tutorial in italiano su SC3 già bello che pronto, ma forse troppo complesso per chi comincia, io l'ho trovato complicato al primo impatto:
<http://xoomer.alice.it/fysalvat/switchercove.html>

In questo sito trovate anche alcuni schemi già pronti, inoltre trovate delle librerie di componenti modificate, ma quelle che sono pubblicate sul mio sito sono notevolmente più complete ma devo ringraziare proprio il tutorial suddetto (di Pietro Salvato) che m'ha fatto capire come procedere per ottenere questo risultato.

COMINCIAMO

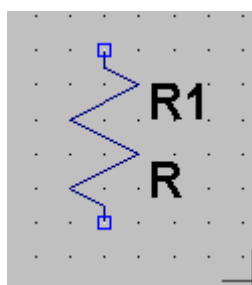
CIRCUITO DI PROVA

 Apriamo lo SC3. Sulla destra troveremo un pulsante come quello a lato per aprire un nuovo progetto. La stessa cosa può essere fatta dal menù File->New Schematic.

A questo punto se l'opzione View->ShowGrid è attiva vi troverete con uno sfondo grigio e dei puntini neri, altrimenti ci sarà solamente uno sfondo grigio. Ora siamo pronti per cominciare a mettere dei componenti sul “foglio virtuale”.

Iniziamo con il preparare un circuito banale composto da un semplice generatore di corrente continua che potrebbe essere una batteria o un alimentatore, unito con una sola resistenza.

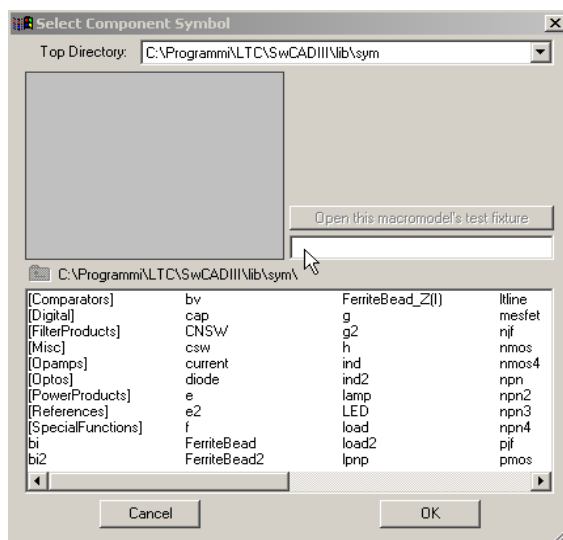
Incominciamo con inserire la resistenza: dalla barra degli strumenti selezioniamo il simbolo del resistore che è quello a lato. Portatevi sul foglio vuoto e premete il pulsante sinistro del mouse. La resistenza verrà rilasciata nel punto voluto ed il disegno sarà



simile a quello qui sotto. Il simbolo indica la resistenza che prende il nome di R1. SC3 a differenza di altri programmi assegna direttamente un nome ai nuovi componenti selezionati. La R sotto indica invece il valore della resistenza che non abbiamo ancora inserito altrimenti sarebbe stata sostituita dal valore numerico della resistenza stessa. I due quadratini blu sono i nodi tramite i quali possiamo collegare la resistenza al resto del circuito. Ora dobbiamo inserire un generatore di tensione. Andiamo sul simbolo che somiglia ad

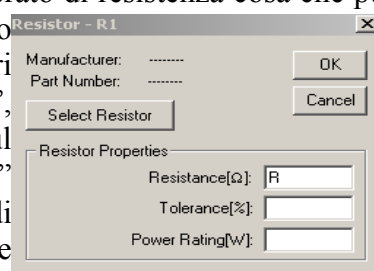


una D, che è deputato all'inserimento di numerosi componenti. Si aprirà una finestra come quella riportata qui sotto. Nel rettangolo bianco dove ho messo la freccia, scriveteci voltage e premete su OK. A questo punto potete posizionare il generatore sul foglio



bianco per cui a questo punto dovreste avere sia la resistenza che il generatore in vicinanza come da prossima figura. Il generatore viene automaticamente chiamato V1 ed il “valore” impostato a V. Ora andate sulla resistenza e premete con il pulsante destro del mouse. Vi si apre una nuova finestra che permette di inserire il valore desiderato di resistenza cosa che può

essere fatta tanto impostando i valori richiesti “a mano”, quanto premendo sul tasto “select resistor” che permette di selezionare una delle resistenze presenti nel

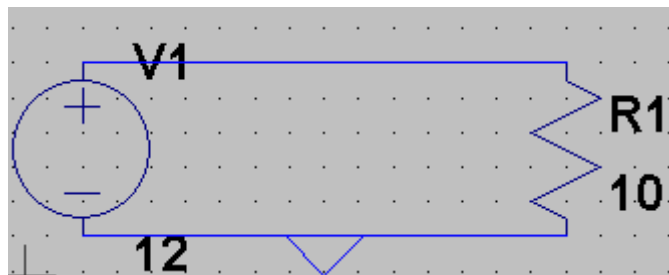


database del programma. Se avete modificato le librerie con quelle che ho messo a disposizione sul mio sito, troverete un numero di componenti significativamente superiore rispetto a quanto disponibile nel programma “base”. Per ora accontentiamoci di modificare a mano il valore di resistenza per cui scriviamo 10 al posto di R. Diamo l'OK e vedremo subito che il valore è cambiato. Ora facciamo la stessa cosa con il generatore premendo il pulsante destro del mouse ed inseriamo il valore di “DC Value” impostandolo a 12. Diamo invio. A questo punto manca solo il




collegamento della resistenza al generatore tramite fili (wire). Per fare ciò premete sul pennino (oppure premete F3) e tirate due “fili” fra i nodi della resistenza e del generatore (vedi pagina seguente). Se in durante il tracciamento dei fili tenete premuto CTRL avrete la possibilità di disegnare fili inclinati.

Un'ultima cosa. SC3 ci obbliga ad inserire una “massa” per cui andate sul simbolo con il triangolino verso il basso e posizionate lo lungo la linea del -12V come dallo schema qui sotto:

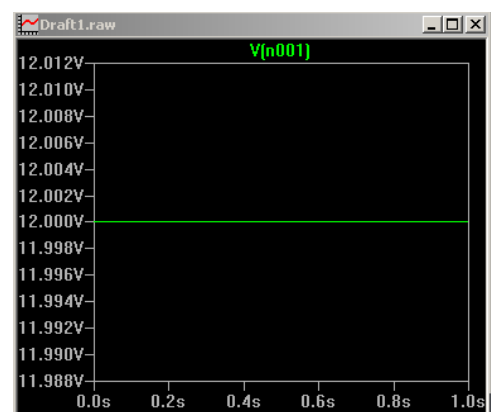
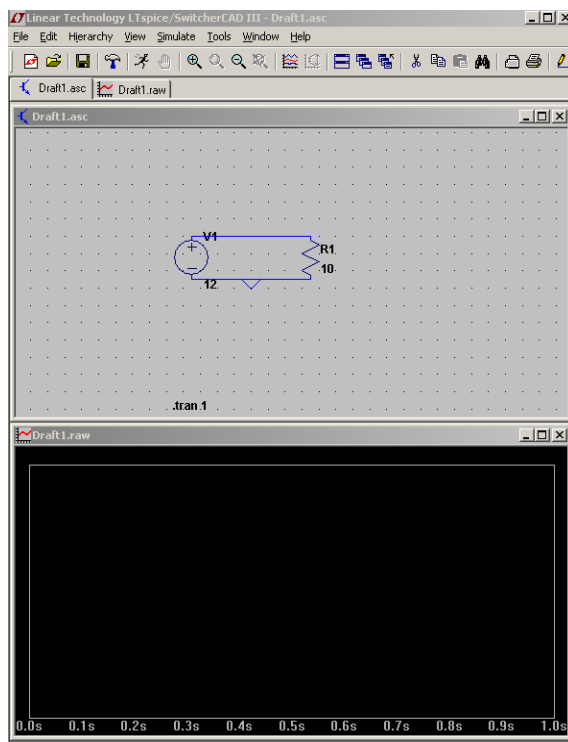
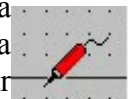


PS: Se fate degli errori premete il tasto CANC, compariranno delle forbici che vi permettono di cancellare pezzi di circuito per ridisegnarli a vostro piacimento.

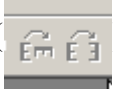
Bene il nostro primo circuito è pronto e possiamo testarlo. Premete sull'iconcina “dell'uomo che corre”  per avviare il simulatore. Esce una nuova schermata piuttosto complessa e piena di

parametri. Non spaventiamoci, basta inserire il valore 1 nel campo “Stop Time” che indica semplicemente di eseguire il test per 1 secondo...diamo l'OK e compare un'ulteriore schermata che vi chiede quale linea volete vedere inizialmente nel simulatore, ignorate pure e date l'OK. Dovreste

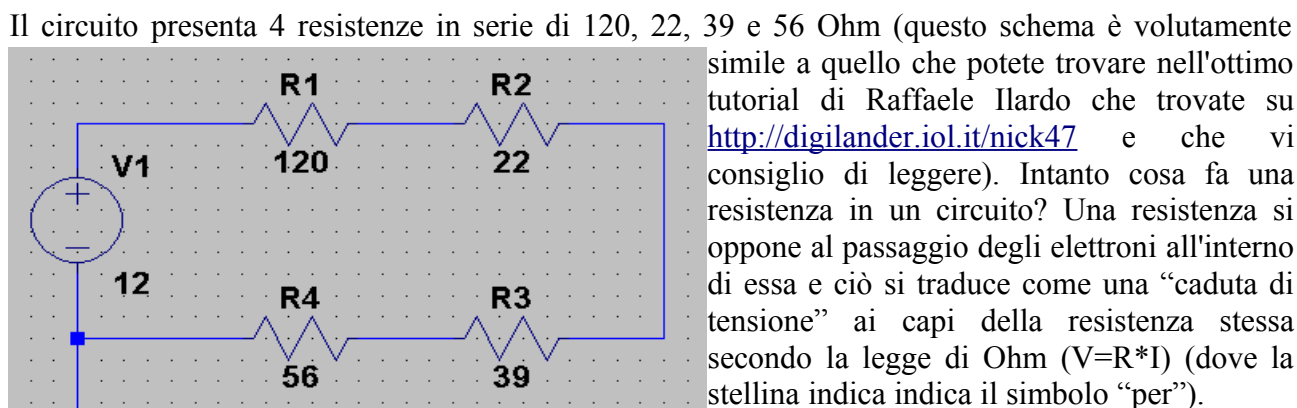
trovarvi di fronte ad una schermata molto simile a quella che vi propongo qui a fianco. La schermata nera mostra il tempo fino ad 1 secondo, ma nessun grafico come da noi richiesto. Ora avvicinatevi col mouse al filo superiore, quello in cui dovreste esserci +12V. Vedrete che il puntatore diventa una specie di puntale da tester simile a quello qui a fianco. Se quando il puntatore ha questa forma potete fare un click singolo per aggiungere la traccia al simulatore oppure un doppio click per cancellare eventuali tracce già presenti ed inserire quella desiderata. Chiaramente il circuito è un po' troppo banale e ciò che ottenete è una linea orizzontale posta sui 12V come prevedibile.



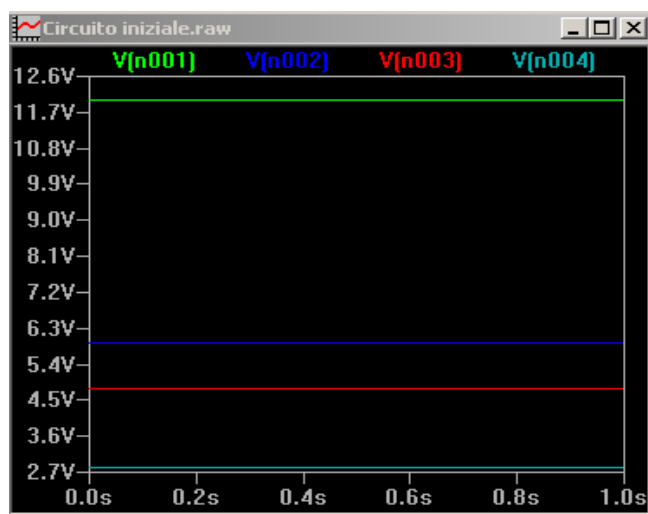
Le Resistenze (resistori)

Ora che abbiamo imparato a disegnare un circuito di base, creiamone uno simile al seguente in cui vi è sempre un'alimentazione a 12V in corrente continua e vi sono 4 resistenze in serie. Ne approfitto per dirvi che per “ruotare” un componente prima di posizionarlo sul disegno, è possibile premere CTRL+R oppure usare le apposite icone sulla barra di comando (). Disegniamo il

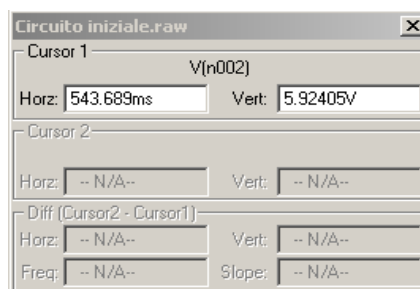
seguente circuito (che trovate sul sito con il nome di “4resistori”).



Innanzitutto chiediamoci quanta corrente circola in questo circuito: essendo la somma delle resistenze pari a 237 Ohm (Ω) e la differenza di potenziale di 12V sarà $I=V/R$ ossia $I=12/237=0,0506$ Ampere (A), ossia 50,6 milliAmpere (mA). Ora provate a simulare il circuito e misurate il voltaggio prima delle varie resistenze: noterete che all'inizio è di 12V e poi cala a circa 6 (5,92) dopo la prima resistenza a 4,81 dopo la seconda e



2,83 dopo la terza. Dopo la quarta chiaramente passiamo a 0 in quanto la tensione si è ripartita sulle varie resistenze, tant'è che il software non ci permette la misurazione. Ecco qui il grafico di come dovrebbero apparire le varie tensioni. NB: I grafici ottenuti sono quelli che otterremmo ponendo il puntale + nel punto indicato dal mouse ed il puntale nero a massa, al polo negativo. Come vedremo il puntale negativo (nero) può essere spostato per testare un segmento isolato del circuito. Come facciamo a leggere questi valori in modo preciso? Vedete in alto le scritte in diversi colori V(n001), V(n002), etc? Cliccandoci sopra ottenete un cursore che si sposta lungo la traccia selezionata e, in una finestra separata, vi mostra i valori del punto selezionato con il mouse. Trascinando la linea punteggiata verticale che compare potete spostare il punto di riferimento ovunque nel grafico per leggere i valori esatti in una finestra come quella qui riportata. Si noti che questa funzione è valida per qualunque simulazione e non solo per casi banali come questo in cui abbiamo delle semplici rette. Possiamo fidarci di questi valori? Facciamo una prova: dopo la prima resistenza lo SC3 ci dà un potenziale di 5,92405V. In quel punto la resistenza che i nostri poveri elettroni incontreranno fino al traguardo del polo negativo, sono la somma di 22+39+56 Ω , ossia 117 Ω . Se moltiplichiamo la R per la I (Intensità di corrente) che avevamo calcolato prima, otteniamo $117*0,0506329=5,9240493$ che corrisponde al dato di sopra



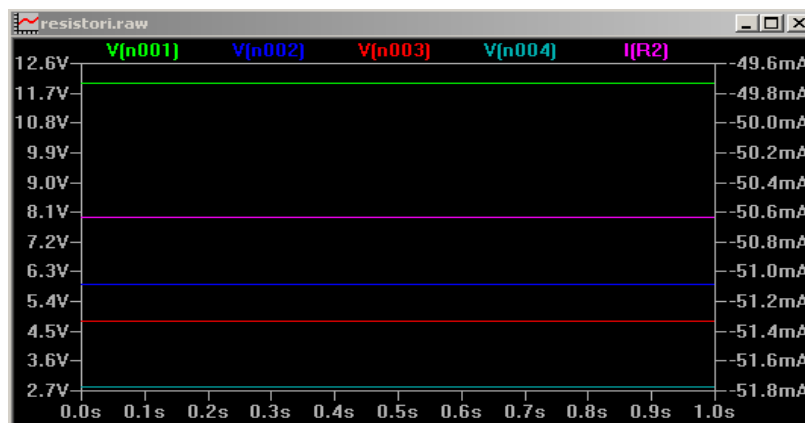
(arrotondamenti a parte).

Ma non basta. Vi sarete accorti che passando con il mouse sopra le resistenze durante la simulazione, si visualizza una “pinza amperometrica”



simile a quella che potete vedere qui.

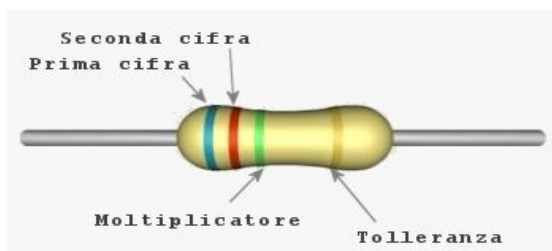
Se ci premete sopra vedrete che nella simulazione compare una nuova traccia ma anche una nuova scala sul versante destro del grafico con i mA che attraversano la resistenza. Nell'esempio che ho riportato qui sotto, ho testato la R da 22 Ω nella quale passano 50,63mA. La stessa cosa può essere fatta nei “wire”, i fili o piste che collegano le varie parti del circuito. Per farlo dovete tenere



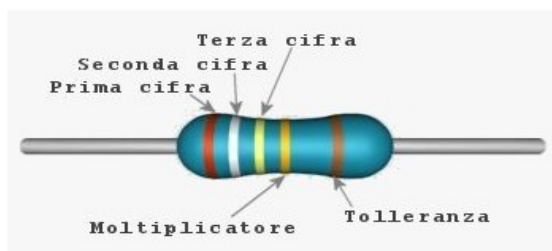
premuto in contemporanea il tasto “alt”....e, avrete già notato che con il tasto alt premuto passando sopra le resistenze esce un nuovo simbolo che raffigura un piccolo termometro

Premete il pulsante sinistro del mouse e vedrete un'ulteriore scala che misura i Watt dissipati da quella specifica resistenza, ad esempio potrete vedere che la nostra amata R2 dissipa 56,4mW.

Ciò è importante in quanto molti componenti presentano una massima potenza dissipabile oltre la quale si bruciano inesorabilmente.



Oppure 5:



| Codice colori per resistori | | | |
|-----------------------------|---------------|------------------|------------|
| Colore | Cifre 1, 2, 3 | Moltiplicatore | Tolleranza |
| nero | 0 | 1 | - |
| marrone | 1 | 10 | 1% |
| rosso | 2 | 10 ² | 2% |
| arancione | 3 | 10 ³ | - |
| giallo | 4 | 10 ⁴ | - |
| verde | 5 | 10 ⁵ | - |
| blu | 6 | 10 ⁶ | - |
| viola | 7 | - | - |
| grigio | 8 | - | - |
| bianco | 9 | - | - |
| oro | - | 10 ⁻¹ | 5% |
| argento | - | 10 ⁻² | 10% |
| nessun colore | - | - | 20% |

Come identifichiamo il valore in ohm delle resistenze. Chiaramente non parleremo di resistenze

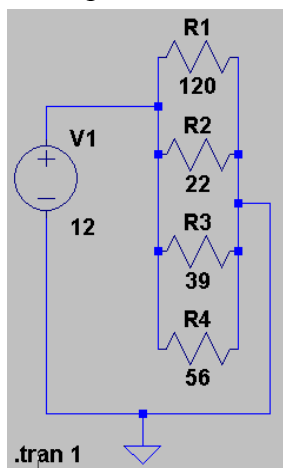
superminiaturizzate usate in schede elettroniche particolarmente avanzate, parliamo delle classiche resistenze da usare per i nostri circuiti hobbistici. I resistori presentano una serie di anelli colorati che codificano il valore della resistenza stessa, come visibile nella che segue in queste pagine (tratta da http://www.dinopx.com/Guide/Elettronica/Modding/guida_elt-5.asp). Come vediamo le resistenze presentano un certo numero di anelli colorati, ad ogni colore corrisponde una cifra per cui mettendo una dietro l'altra le cifre corrispondenti ai colori otteniamo i valori della resistenza. I primi anelli possono essere 2 o 3 a seconda del tipo di resistenza per cui andranno a formare le prime 2 o le prime 3 cifre della resistenza. La successiva è il cosiddetto moltiplicatore, che sta ad indicare un valore di moltiplicazione che applicato alle cifre precedentemente rilevate determina l'esatto valore in ohm. L'ultimo anello è di colore oro o argento oppure non c'è proprio. Esso indica la tolleranza della resistenza, la sua assenza significa "20%" di tolleranza mentre i valori argento ed oro stanno ad indicare rispettivamente 10% e 5%. Un eventuale ulteriore anello sta ad indicare il cosiddetto "coefficiente di temperatura" che è di fondamentale importanza in quei resistori che modificano in maniera significativa la loro resistenza in base alla temperatura.

Ad esempio ho qua fra le mani, mentre scrivo, una resistenza con le fasce di colore marrone, verde, marrone, oro. Secondo quanto visibile in tabella la prima cifra del valore dovrebbe essere 1, la seconda 5, la terza indica un moltiplicatore di 10. La tolleranza del 5%, per cui dovrei avere per le mani una resistenza di $150\Omega \pm 5\%$. Ho provato con il multimetro digitale che mi fornisce valori oscillanti compresi fra 150.8 e 151.

Una cosa importante da notare è che l'aumento della temperatura comporta un aumento della resistenza, effetto spesso trascurabile ma che in talune situazioni può diventare critico. Talvolta la misura di variazione di questa resistenza sta proprio alla base del funzionamento di un dato circuito, ad esempio i termostati possono funzionare proprio sfruttando la variazione di resistenza al variare di temperatura di certi materiali.

Vediamo un'ultima cosa. Durante la simulazione del circuito mettiamoci con il mouse fra R1 ed R2, premendo con il tasto DESTRO del mouse sul "filo" compare un menu: selezioniamo la voce "Mark Reference" ed il puntale nero verrà spostato dal punto di default ossia la massa, al punto desiderato. Ora facendo delle misure, queste saranno prese in paragone al nuovo riferimento. Ad esempio facendo una misura fra R2 ed R3 ci verrà fuori un valore di -1,11V che corrisponde alla caduta di potenziale di quella singola resistenza. Ora ripassiamo rapidamente: vi ricordate come si comportano le resistenze in parallelo? La formuletta

qui a fianco dovrebbe rinfrescarvi le idee: la resistenza totale corrisponde al reciproco della somma dei reciproci delle varie resistenze. Preparate il

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n} \dots$$


circuito qui a lato che non è altro che il circuito di prima in cui le resistenze sono messe in parallelo invece che in serie. Provatelo e divertitevi a misurare le varie correnti e potenze dissipate dalle singole resistenze.

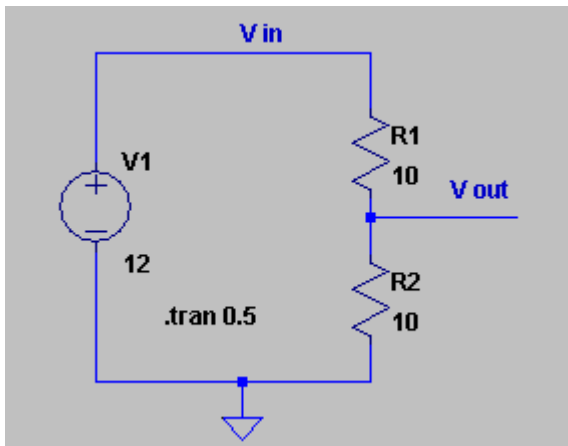
Le resistenze sono probabilmente i componenti più semplici in assoluto, vorrei comunque soffermarmi a ricordare che oltre al valore in Ohm è necessario tenere conto della potenza dissipata, ad esempio $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 2, 5, 10 o 20 Watt. Inoltre non esistono in commercio tutti i valori possibili ed immaginabili per cui nella progettazione bisognerà tenere conto dell'approssimazione a valori realmente presenti sul mercato. Non dimentichiamo comunque la possibilità di inserire resistenze in serie o parallelo per ottenere un'approssimazione migliore nei casi in cui sia necessaria.

Dato $\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ne deriva che $R_t = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ che viene comunemente indicato con il più lineare $R_1 // R_2$. Per questo motivo se trovate scritto in questo o altri testi qualcosa tipo A//B,

questo sarà l'equivalente di $\frac{A \cdot B}{A + B}$ che indica appunto che A e B sono resistenze in parallelo.

Partitore di tensione

E' un semplice circuito che permette di ripartire una tensione fra due componenti passivi disposti in



serie, nel nostro caso due resistori. Prendiamo ad esempio il circuito disegnato qui a lato. Vediamo che V out viene prelevato fra le due resistenze R1 ed R2 che nel caso specifico sono state arbitrariamente impostate a 10Ohm. La funzione di trasferimento risulta essere:

$$\alpha = \frac{R2}{(R1 + R2)}$$

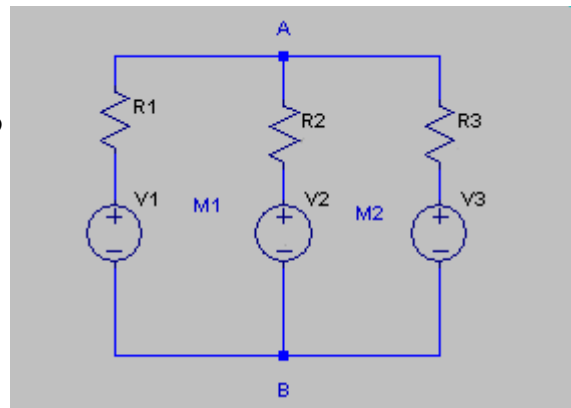
e quindi $V_{out} = \alpha * V_{in}$. Ne deriva che se le due resistenze sono uguali, in uscita avremo una tensione pari alla metà di quella di ingresso, anche se tale assunto è valido solamente finché non applichiamo un

carico al circuito in uscita.

Nodi, rami, maglie e leggi di Kirchhoff

Prima di proseguire vorrei ricordare una convenzione che potrebbe creare confusione. Nella realtà la corrente elettrica è formata da elettroni, e quindi da cariche negative, per tale motivo essa “uscirà” dal generatore attraverso il polo negativo. Ma per motivazioni storiche basate sulla non conoscenza degli elettroni agli albori dell'elettrotecnica, per convenzione il verso della corrente non viene fatto fluire dal polo negativo a quello positivo, ma da quello positivo a quello negativo. Tale convenzione non ha nessuna conseguenza pratica nel senso che spostare cariche negative in un verso è del tutto uguale a spostare ipotetiche cariche positive nel verso opposto.

Ora vediamo un po' di definizioni guardando lo schema a lato: il **nodo** è il punto di confluenza fra almeno tre conduttori, per cui nel nostro caso saranno nodi gli incroci contrassegnati con A e B. Se avete notato, lo SC3 li evidenzia automaticamente con dei quadratini azzurri. Il **ramo** è invece la parte di circuito che collega due nodi. Nel nostro esempio ci sono tre rami:



- 1) nodo 1: da A passa a R1, V1 e giunge a B
- 2) nodo 2: da A passa a R2, V2 e giunge a B
- 3) nodo 3: da A passa a R3, V3 e giunge a B

L'ultimo concetto è quello di **maglia**, ossia una parte di circuito chiuso. Nel nostro circuito ci sono due maglie che ho chiamato M1 e M2, che sono composte:

- 1) M1 è composta dal ramo 1 e 2
- 2) M2 è composta dal ramo 3 e 2

In realtà esiste una terza maglia che potremmo chiamare M3 che comprende quelle già viste e circola lungo tutto il perimetro del circuito (V1-R1-A-R3-V3-B-V1).

Ora vediamo le **leggi di Kirchhoff**.

La prima legge, detta anche legge dei nodi o delle correnti, stabilisce che dato un nodo, la somma delle correnti in entrata ed uscita da esso deve essere uguale a zero.

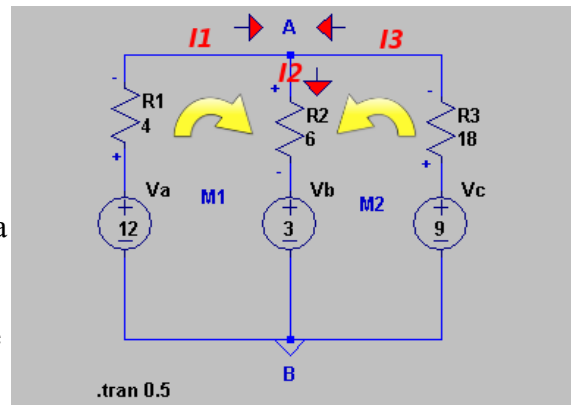
La seconda legge, detta legge delle maglie o delle tensioni, asserisce che la somma dei potenziali lungo una maglia deve essere uguale a zero.

Per dimostrare la prima legge, prendiamo il nodo A come esempio. Dei tre rami che vi convergono è alquanto logico comprendere che non è possibile che tutte e tre le correnti “arrivino” al nodo o che tutte e tre “escano” dal nodo. Almeno una delle tre dovrà avere un verso diverso per cui ci saranno correnti in “entrata” e correnti in “uscita” la cui somma sarà pari a zero, visto che di per se il nodo non assorbe corrente. E' come se fossero dei tubi di acqua: tanta acqua arriva e tanta uscirà, se diamo un segno arbitrariamente positivo a quella che entra e negativo a quella che esce, la somma risulterà comunque zero.

La seconda legge, detta anche legge delle maglie, stabilisce che la somma dei potenziali lungo la maglia deve essere uguale a zero. Perciò sommando le tensioni dei generatori alle cadute di potenziale dei resistori, la somma di questi valori sarà pari a zero sia per la maglia M1 che per la maglia M2.

Partendo da questi concetti vediamo come risolvere il circuito visto sopra, ossia cerchiamo di ricavare le correnti che attraversano i singoli spezzoni del circuito approfondendo i concetti appena enunciati.

La prima cosa da fare è scegliere in maniera arbitraria un senso di scorrimento della corrente nel nostro circuito. Lo possiamo fare a nostro piacimento, nel caso poi non corrisponda al reale verso di scorrimento della corrente, otterremo dei valori di corrente <0 che ci indicheranno un verso opposto a quello da noi stabilito. Prendiamo lo schema qui a lato. Per prima cosa ho disegnato con le freccette rosse, la direzione arbitrariamente scelta per lo scorrimento della corrente. Si rammenta nuovamente che il verso è del tutto arbitrario, lo scegliamo in base alle nostre preferenze. Nel nostro esempio ho scelto di far scorrere le correnti a partire dai due generatori laterali V_a e V_c per farla defluire nel ramo centrale tramite la corrente I_2 .



Visto che la somma delle correnti entranti ed uscenti rispetto ad un nodo deve essere pari a zero, possiamo scrivere che $I_1 + I_3 - I_2 = 0$ che equivale a $I_1 + I_3 = I_2$. La seconda cosa da fare è altrettanto importante, quantomeno per noi novellini dell'elettronica. Seguendo il percorso della corrente appena scelto dobbiamo scrivere le “polarità” dei resistori per cui mettiamo un piccolo “+” all'ingresso del resistore ed un “-” alla sua uscita. Osserviamo con molta attenzione lo schema qui sopra: da V_a seguiamo il percorso della corrente raggiungiamo R_1 per cui mettiamo il + in ingresso ed il - in uscita. Giungiamo al nodo A e scendiamo verso la resistenza R_2 ponendo un'altro +. Si noti che dal nodo A non potevamo andare verso R_3 in quanto abbiamo stabilito prima un verso opposto della corrente in questo ramo, infatti se osservate la polarità della resistenza R_3 partendo dal nodo A, questa risulta invertita.

Ora dobbiamo scrivere le equazioni delle maglie. Prendiamo ad esempio la maglia M1. Ho deciso arbitrariamente di partire da V_a e valutare i vari punti in senso orario come nella freccia gialla, ma avremmo potuto partire da qualunque punto ed anche in senso inverso, indipendentemente da qual'è la direzione della corrente precedentemente scelto. Partendo da V_a ed “uscendo” dal +, otteniamo una tensione positiva V_a : facciamo attenzione che se avessimo scelto di andare in senso antiorario la corrente sarebbe uscita dal polo negativo per cui avremmo dovuto cominciare con un $-V_a$. Proseguiamo con R_1 : quando nei resistori incontriamo per primo il segno positivo dobbiamo registrare una caduta di tensione, se invece incontrassimo prima il segno negativo avremmo dovuto selezionare un incremento di tensione. In questo caso possiamo perciò indicare con $-V_1$ la caduta di tensione in R_1 . Poi passiamo per R_2 con una nuova caduta di tensione. In ultimo il generatore V_b : anche in questo caso incontriamo prima il segno + per cui ci sarà un calo di tensione, se invece

fosse stato polarizzato in modo inverso avremmo dovuto segnare un incremento di tensione.

In definitiva per la maglia M1 abbiamo: $V_a - V_1 - V_2 - V_b = 0$. Per la legge di Ohm, essendo $V = R \cdot I$ possiamo scrivere che $V_a - I_1 R_1 - I_2 R_2 - V_b = 0$.

Per ora abbiamo due equazioni ma le correnti che vogliamo calcolare sono 3 per cui ci serve almeno un'altra equazione per poter risolvere il circuito, dovranno esserci infatti almeno tante equazioni quante sono le variabili da calcolare.

A questo punto abbiamo due possibilità. La prima è calcolare la formula che descrive la seconda maglia, M2, o in alternativa la maglia che da V_a passa al nodo A, passa per V_c , per il nodo B e rientra in V_a (M3). Ho scelto quest'ultima opzione solo per dimostrare che non è necessario seguire il verso della corrente come stabilito nel primo punto. La prima parte dell'equazione è identica a quella per la maglia M1 per cui è $V_a - I_1 R_1$. Ora raggiungiamo R_3 ed incontriamo per primo il segno – per cui non ci sarà una caduta di tensione ma un incremento, cosa abbastanza logica se pensiamo che in questo istante stiamo “guardando” il circuito al rovescio rispetto all'ordine di scorrimento della corrente che abbiamo deciso prima. Per ultimo c'è il generatore $-V_c$.

Complessivamente la maglia M3 avrà la formula $V_a - I_1 R_1 + I_3 R_3 - V_c$

A questo punto otteniamo un sistema di tre equazioni lineari che sono:

$$V_a - I_1 R_1 - I_2 R_2 - V_b = 0 \rightarrow V_a - V_b = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

$$V_a - I_1 R_1 + I_3 R_3 - V_c = 0 \rightarrow V_a - V_c = I_1 R_1 - I_3 R_3$$

$$I_1 + I_3 - I_2 = 0$$

Dato che conosciamo i valori di tensione dei generatori e le resistenze, otteniamo che:

$$4I_1 + 6I_2 = 9 \rightarrow I_2 = (9 - 4I_1)/6$$

$$4I_1 - 18I_3 = 3 \rightarrow I_3 = (4I_1 - 3)/18$$

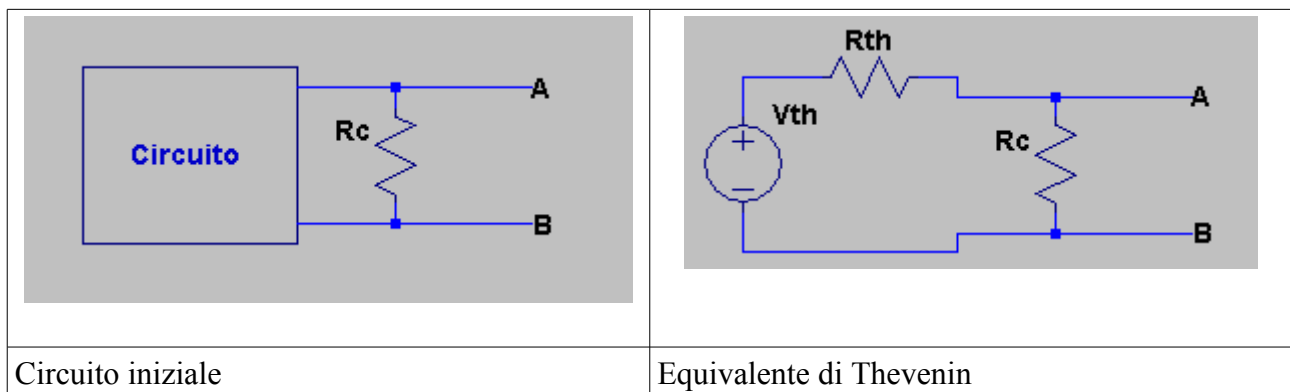
$$I_1 + I_3 - I_2 = 0 \rightarrow I_1 + (9 - 4I_1)/6 - (4I_1 - 3)/18 = 0 \rightarrow I_1 = 30/34 = 0,882A$$

Una volta calcolato I_1 ricaviamo anche $I_2 = 0,912A$ e $I_3 = 0,029A$. Essendo i numeri ottenuti tutti positivi, significa che il verso della corrente scelto all'inizio del procedimento è corretto e corrisponde a quello reale.

Teorema di Thevenin

Questo teorema sarà necessario più avanti, ma riguardando i circuiti formati essenzialmente da resistenze e generatori, ho preferito aggiungerlo in questo spazio.

Il teorema di Thevenin stabilisce che prendendo in esame due punti in un circuito lineare di una qualsiasi complessità, alimentato da una certa tensione, questo può essere sostituito da un generatore di tensione e una resistenza in serie che ne replichino le caratteristiche.



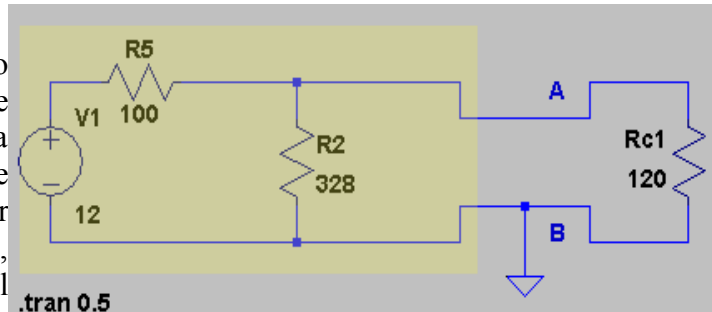
Lo schema qui sopra sintetizza in modo semplice quanto detto. Innanzitutto il circuito da cui

vogliamo ottenere l'equivalente di Thevenin deve essere di tipo lineare, e quindi deve rispondere alla legge di Ohm. Per questo motivo viene applicato a circuiti formati da resistenze e generatori. Questo circuito, per quanto complesso, può essere sostituito dal generatore V_{th} con in serie una resistenza R_{th} . Per misurare questi due parametri si procede nel seguente modo:

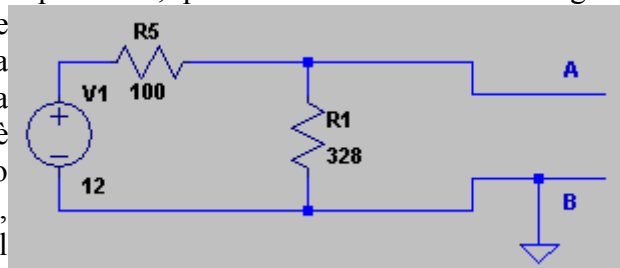
La V_{th} si misura ai capi A e B eliminando il carico R_c .

La R_{th} si misura ai capi A e B eliminando dal "Circuito" tutti i generatori. Per farlo sarà sufficiente cortocircuitare i poli + e -.

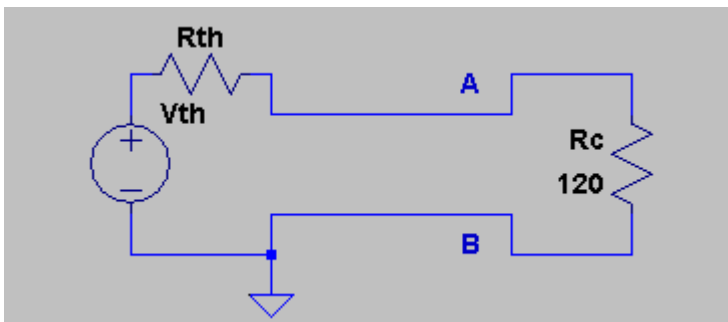
Facciamo un esempio pratico. Qui sotto vediamo un circuito composto da due resistenze in serie e una in parallelo. La resistenza è un componente che risponde linearmente alle variazioni di tensione per cui il circuito sarà un "circuito lineare", fatto indispensabile per poter applicare il teorema di Thevenin. Nello schema



vediamo che ho segnato i capi A e B del circuito. Ora vediamo come creare l'equivalente di Thevenin della parte sinistra del circuito rispetto ai capi A e B, quella evidenziata con il rettangolo giallo in trasparenza. Per prima cosa occorre calcolare la "tensione a vuoto" del circuito, ossia la tensione misurata ai capi A-B eliminando tutta la parte destra del circuito che nello schema è rappresentato da una singola resistenza R_{c1} . Con lo SC3 ci mettiamo un istante a fare questo calcolo, pasta posizionare il puntale sul punto A e vedere il risultato (9,196V), ma per impratichirci un po' vediamo come fare il calcolo manualmente.



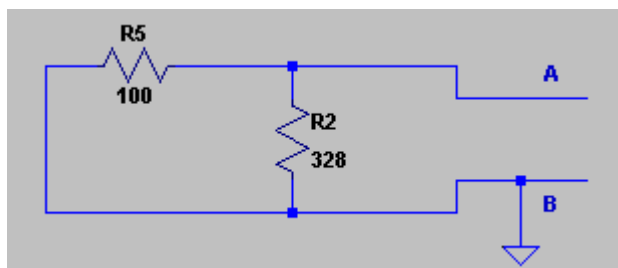
Essendo R_5 ed R_1 due resistenze in serie la R totale è di 428Ω per cui la corrente che attraversa il circuito è di $0,028037A$. A questo punto è semplice calcolare la tensione dopo R_1 , infatti essendo $V=R*I$ otteniamo che la caduta di tensione $V_5=100*0,028037$ ossia $2,8037V$. La differenza sarà $12-2,8037=9,196V$, che è lo stesso risultato misurato con SC3..



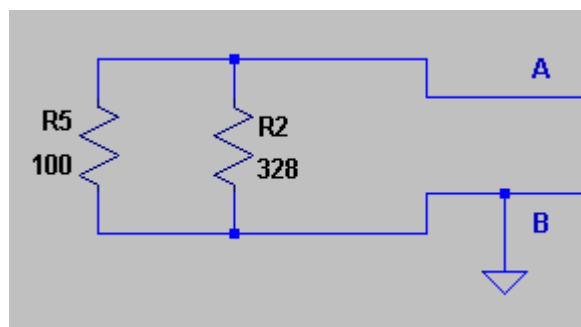
In maniera ancor più semplice possiamo usare la formula del ripartitore di tensione vista prima, $V_{dest}=V_{orig}*R_2/(R_1+R_2)$ per cui otteniamo $12*328/428=9,196V$. Perciò la tensione equivalente di Thevenin (V_{th}) è di $9,196V$. A questo punto dobbiamo calcolarci la resistenza equivalente (R_{th}). Per fare ciò occorre cortocircuitare tutti i generatori, per farlo immaginate di

togliere il generatore V_1 che andiamo a sostituire con un conduttore che collega i due poli. Così facendo, come meglio comprensibile dagli schemi sottostanti, ci ritroviamo con due resistori disposti in parallelo per cui possiamo calcolare la resistenza totale che sarà $R_5//R_1$, ossia $(R_5*R_1)/(R_5+R_1)$ che equivale a $76,63\text{ ohm}$. Se ora provate a simulare il circuito di partenza e quello equivalente di Thevenin con il carico R_c di 120 Ohm collegato, scoprirete che in entrambi i casi ai capi A-B ci sarà una tensione di $5,612V$ ed una corrente di $46,768mA$.

Ritorniamo più avanti sul teorema di Thevenin, in particolare quando parleremo delle reti di polarizzazione dei Bjt.



Calcolo della resistenza equivalente cortocircuitando il generatore V1



Ripiegando il conduttore risulta meglio evidente la disposizione in parallelo delle due resistenze.

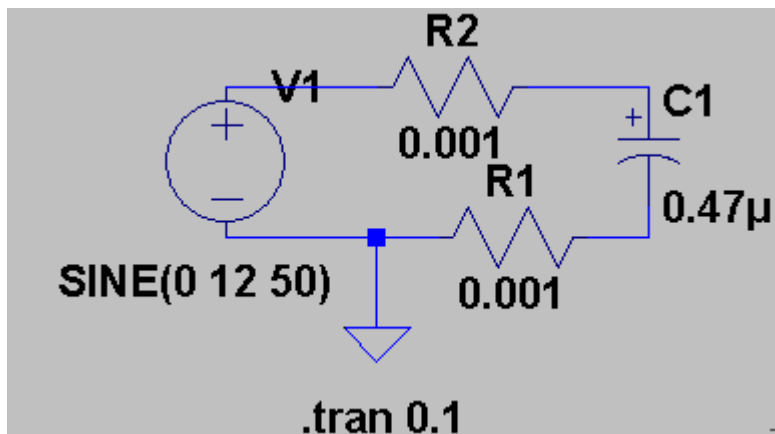
Teorema di Norton

Teorema di Miller

I Condensatori

I condensatori, che in inglese troverete come “capacitor” sono dei componenti che permettono di accumulare cariche elettriche quando glieli forniamo e le restituiscono quando cala il potenziale del circuito in cui sono inseriti. Essi funzionano come una specie di serbatoio d'acqua: quando sono vuoti e c'è un buon flusso alla sorgente, tendono a riempirsi, quando invece si riduce il flusso che li ha riempiti tendono a svuotarsi cedendo il loro contenuto.

Per testare da subito il comportamento di un condensatore disegnate lo schema elettrico qui sotto.

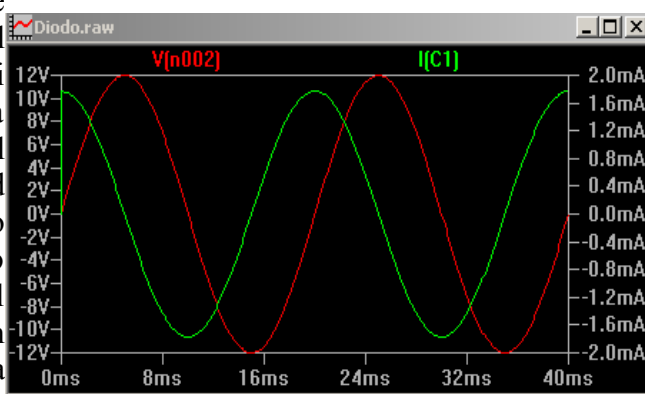


Sulle caratteristiche dell'alimentatore non ci limitiamo a selezionare 12V ma premiamo advanced e selezioniamo SINE, DC offset=0, Amplitude=12, Freq=50 e diamo l'OK, inoltre conviene impostare una simulazione non su un intero secondo come fatto sinora ma su 0.1s: per farlo abbiamo due possibilità. O andiamo sulla scritta presente nello schema precedente “.tran 0.1” e premiamo il pulsante destro del mouse, oppure in alternativa andate

sul menu Simulate -> Edit Simulate Cmd e portate lo “Stop Time” a 0.1 oppure, nello spazio in basso, modificate direttamente il comando SPICE scrivendo .tran 0.1 al posto del vecchio .tran 1. Le due resistenze le ho inserite solo per farvi esercitare e per comodità nelle successive spiegazioni, come vedete dallo schema gli ho assegnato un valore arbitrario di 0.001Ohm. Il condensatore viene applicato sullo schema scegliendo il pulsante

il pulsante destro, selezionate “select capacitor” e scegliete un condensatore. Io ho scelto il primo che ho trovato nella lista (Nichicon UPL1HR47MAH).

Se partiamo da un potenziale zero e cominciamo ad innalzare la tensione, il condensatore comincerà a riempirsi per cui ci troveremo in una fase in cui la V è bassa e la corrente elevata. Aumentando la tensione il condensatore continua a riempirsi sino ad arrivare al punto di massima tensione (in questo caso 12V) ove la corrente è scesa sino al punto 0. Da questo punto la tensione che giunge al condensatore comincia a scendere ed in concomitanza continua a scendere anche la corrente che attraversa il condensatore.



Quest'ultima raggiungerà il minimo valore quando la tensione risulta essere 0. Quando poi la tensione continua a scendere per andare sino a -12V, la corrente che attraversa il condensatore ricomincia ad aumentare: si dice che la corrente è sfasata di 90 gradi in anticipo rispetto alla tensione. Ok, lo so, da questo esempio non si capisce assolutamente nulla sul funzionamento pratico del condensatore ma vedremo di arrivarci.

Un condensatore è formato da due strati di materiale conduttore (armature) separati da uno strato di materiale isolante (dielettrico). Le cariche elettriche vengono immagazzinate all'interno delle armature di materiale conduttore. La capacità del conduttore si misura in Farad ed è caratteristica di ogni tipo di condensatore: essa è paragonabile a quella del recipiente d'acqua, misura infatti la “quantità” di carica elettrica che può essere immagazzinata. Ora facciamo un esempio: prendiamo

un condensatore e colleghiamolo ad una pila. Aspettiamo che il condensatore si carichi e stacciamolo dalla pila stessa. E ora? Ora il condensatore teorico ha dentro di sé una carica che trattiene sino a che non la sprigioniamo. In via teorica questa energia dovrebbe durare all'infinito, in via pratica invece si scarica lentamente anche all'aria. Ora, se colleghiamo il condensatore ad una lampadina (è un esempio puramente teorico, nella pratica non funzionerebbe così come descritto), questa si accenderebbe, dapprima bella luminosa e poi, con la diminuzione della carica elettrica, sempre più flebile sino allo spegnimento. A questo punto il condensatore è del tutto scarico ed ha liberato tutta l'energia accumulata. La quantità di energia accumulabile dal condensatore (Q) è data dal rapporto della tensione di lavoro (V) per la capacità del condensatore stesso (C) $Q=CV$.

Maggiore è questa capacità e maggiore è il tempo necessario per caricarsi, allo stesso modo maggiore è la tensione che raggiunge il condensatore e minore è il tempo di carica dello stesso. La tensione che raggiunge il condensatore può essere modulata con una resistenza posta a monte, risulta inoltre importante sapere che il rapporto di tale resistenza con la capacità del condensatore (RC da cui la definizione di “**circuiti RC**”) prende il nome di “costante di tempo” ed esprime un tempo in secondi che guarda caso è proprio il tempo necessario in quelle condizioni perché il condensatore si carichi completamente, più precisamente indica il tempo affinché il condensatore raggiunga il 63% della sua carica ($t=R*C$ dove t è la costante di tempo tau). La carica segue una legge logaritmica e non lineare, per cui la carica del condensatore viene completata in circa 5t, come meglio comprensibile nella tabellina qui a fianco.

| Tempo | % di carica | % di scarica |
|-------|-------------|--------------|
| 1t | 63% | 37% |
| 2t | 86% | 14% |
| 3t | 95% | 5% |
| 4t | 97% | 3% |
| 5t | 99% | 1% |

Per quanto riguarda il processo di scarica, questo è speculare, per cui a 1t residuerà il 3/5 della carica e a 5t vi sarà la scarica pressoché completa.

Esistono diversi tipi di condensatori. Ad esempio quelli elettrolitici (formati da conduttore-ossido-soluzione elettrolitica), sono polarizzati, perciò possono essere usati solamente con correnti continue e con la giusta polarità. Anche i condensatori al tantalio sono polarizzati e rispetto ai precedenti sono più stabili a temperature e frequenze elevate anche se rispetto ad essi hanno capienze inferiori. NB: nel grafico di sopra ho utilizzato un condensatore elettrolitico in corrente alternata: tranquilli, il grafico sarebbe stato identico, ma da un punto di vista progettuale credo che la realizzazione di quel circuito possa portare all'esplosione del condensatore. A parte i condensatori elettrolitici ed al tantalio, i rimanenti non sono polarizzati per cui possono essere inseriti in qualunque modo e funzionano quindi anche in corrente alternata. Chiaramente ogni tipo di condensatore ha specifici campi di applicazione per cui non sempre sono intercambiabili. Come per le resistenze, i condensatori in serie forniscono una capacità totale pari alla somma delle singole capacità. Allo stesso modo i condensatori in parallelo forniscono una capacità pari al reciproco della somma dei reciproci delle capacità.

Semiconduttori

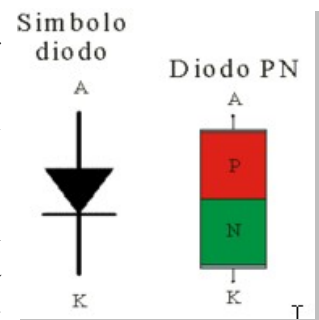
Con il termine “semiconduttori” raggruppiamo una smisurata quantità di componenti. In linea di massima possiamo distinguere i semiconduttori in tre grandi categorie (non aspettatevi che segua questa classificazione alla lettera).:

- 1) Diodi: lo stato di conduzione (on) e di interdizione (off) vengono comandati dal circuito di potenza nel quale si trova il componente.
- 2) Tiristori: lo stato on è comandato da un segnale di controllo mentre lo stato off è controllato dal circuito di potenza nel quale è inserito
- 3) Controllable Switches (interruttori controllabili): sia lo stato on che off dipendono da un segnale di controllo.

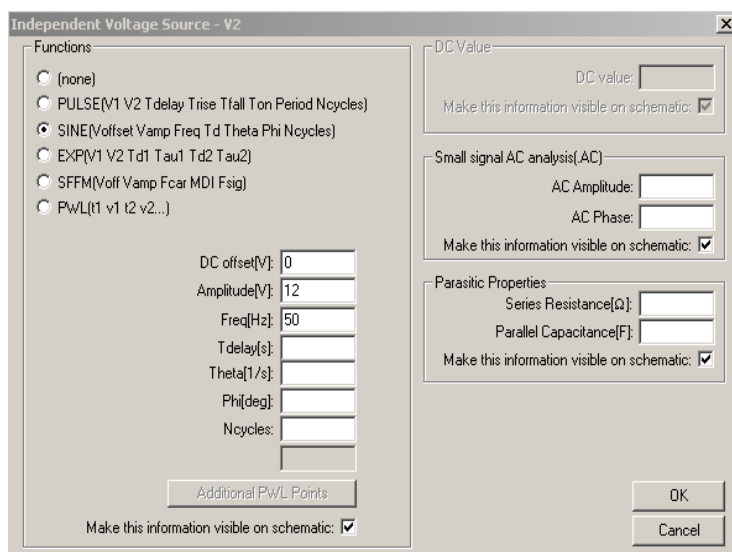
Ma cosa sono i semiconduttori? A cosa servono? In sintesi estrema possiamo dire che i dispositivi a semiconduttore sono dei componenti che dati tensioni, frequenze e fasi in ingresso restituiscono tensioni, frequenze e fasi in uscita modificati in relazione al tipo di semiconduttore utilizzato. Per quanto riguarda il loro funzionamento cercherò di fare un'estrema sintesi di quel che ho capito. Se da un lato gli isolanti sono materiali che non conducono la corrente elettrica ed i conduttori sono quelli che la conducono, possiamo definire grossolanamente i semiconduttori come materiali che la conducono solo in certe condizioni di polarizzazione e con opportuni potenziali e correnti. I semiconduttori sono formati da materiali in parte in eccesso di elettroni (N) ed in parte in deficit di elettroni (P). Le zone P ed N opportunamente mescolate permettono di creare diverse tipologie di componenti.

Diodi

Possiamo definire i diodi come dei conduttori unidirezionali, nel senso che fanno passare la corrente solamente da un lato. Vediamo perché. I diodi sono formati dall'unione di una regione P ed una regione N. La regione P è in deficit di elettroni per cui possiede una carica relativa positiva, mentre la regione N presenta elettroni in eccesso per cui è carica negativamente. Ora immaginiamo di polarizzare inversamente il diodo applicando il polo positivo al catodo e negativo all'anodo. Il catodo con la “corrente positiva” tenderà ad attirare gli elettroni in eccesso della zona N verso di sé. Dall'altro capo si verificherà il fenomeno opposto per cui si viene a formare una zona centrale che si oppone al passaggio di corrente, perlomeno sino ad una certa soglia detta di breakdown che è in grado di distruggere il diodo rendendolo un conduttore (effetto valanga). Polarizzando invece il diodo correttamente gli elettroni che giungono all'anodo sono attratti nella zona P e quelli in eccesso nella zona N sono attratti dal catodo positivo per cui vi è passaggio di corrente. Si noti che il passaggio fra lo stato off e quello on è molto rapido, mentre è decisamente più lento il passaggio dallo stato di conduzione a quello di interdizione. Questo tempo è una caratteristica del diodo ed in base ad essa i diodi stessi sono sotto classificati in alcuni gruppi che tratteremo solo al bisogno. Ma vediamo di simulare un primo circuito. Avete presente il primo circuito, quello con solo una resistenza? Facciamolo uguale, uguale, solo che al posto del resistore ci mettiamo il diodo e lasciamo una piccola resistenza di $1\ \Omega$ in serie. Inoltre sulle caratteristiche dell'alimentatore non ci limitiamo a selezionare 12V ma premiamo advanced e selezioniamo SINE, DC offset=0, Amplitude=12, Freq=50 e diamo l'OK (vedi schermata qui di seguito). Per quanto riguarda il diodo premete il pulsante destro sopra il suo simbolo, allo stesso modo di quanto fatto per le resistenze, scegliete Pick New Diode e vi si aprirà una schermata con i diodi nel database del software. Come per gli altri componenti, la scelta sarà notevolmente ampliata se avete installato le librerie modificate come spiegato all'inizio del testo. In

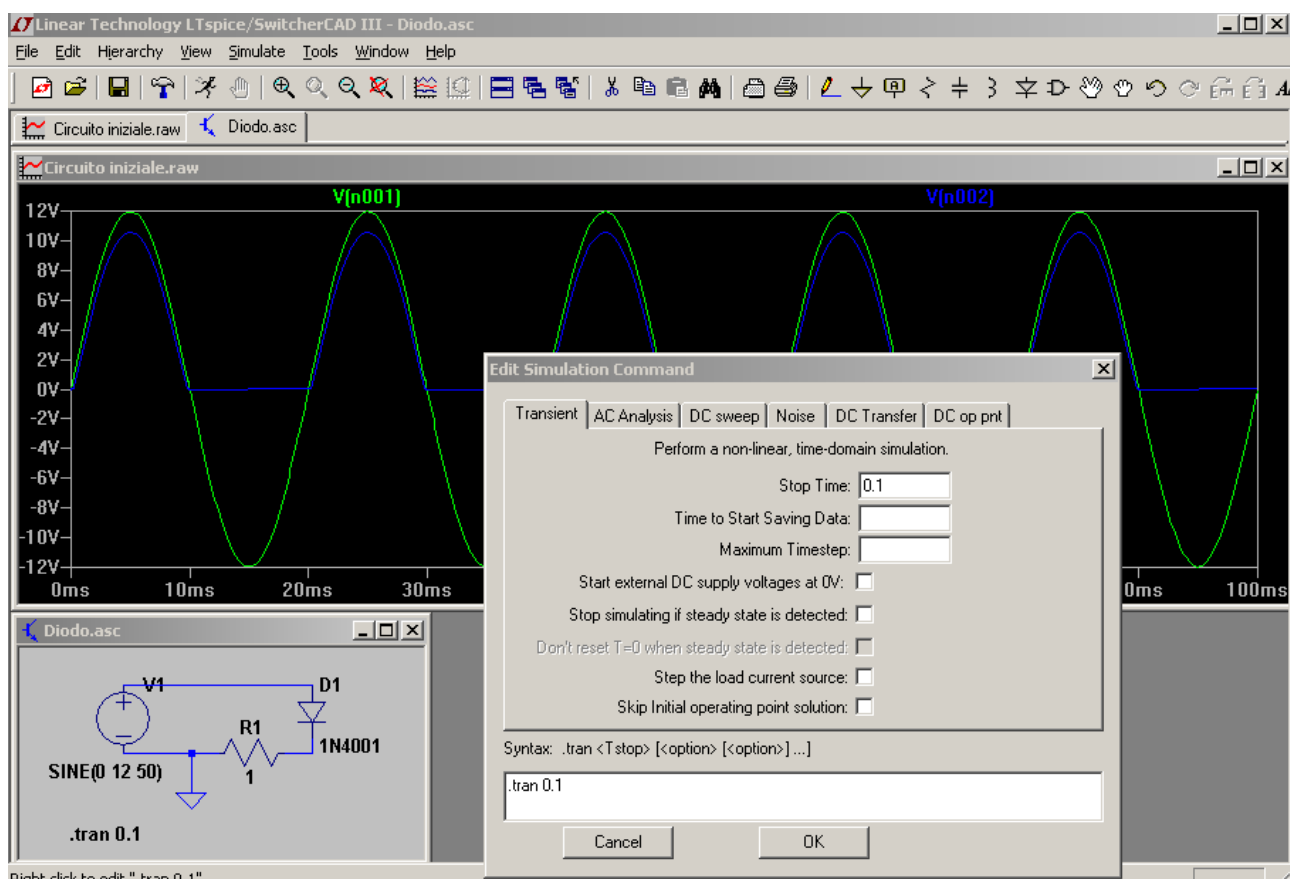


questo caso scegliete pure l'1N4001 (se premete su “part no.” i diodi vengono ordinati in ordine alfabetico e lo troverete per primo).



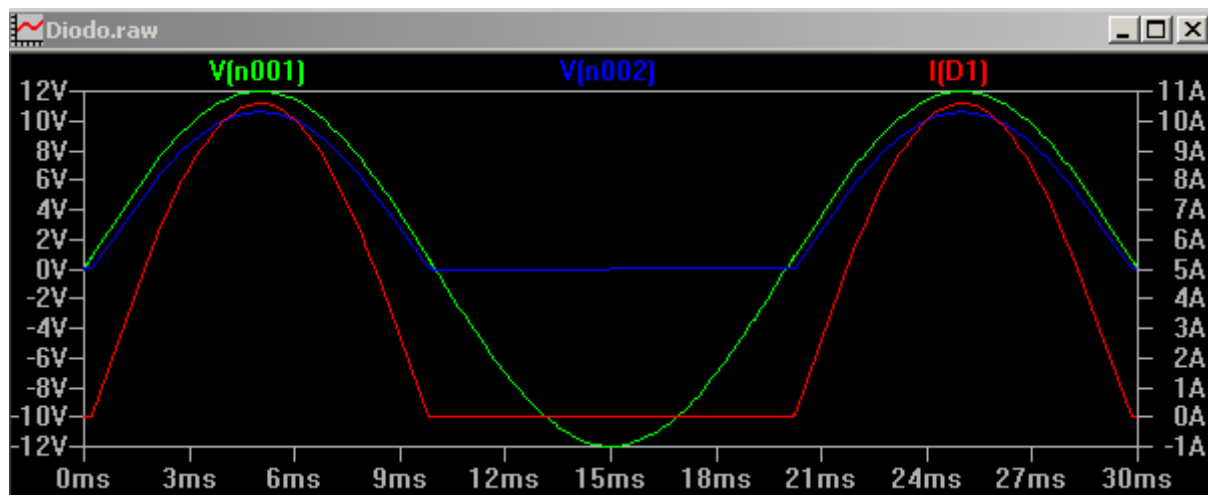
Se siete persone curiose avrete già notato che oltre al nome del diodo c'è una colonna “SPICE Model” che contiene le caratteristiche tecniche del diodo descritte appunto con il linguaggio SPICE di cui parlavamo all'inizio. Un'ultima cosa. Modifichiamo il tempo di simulazione e portiamolo da 1 sec a 0.1sec. Per farlo abbiamo due possibilità. O andiamo sulla scritta presente nello schema “.tran 0.1” e premiamo il pulsante destro del mouse, oppure in alternativa andate sul menu Simulate -> Edit Simulate Cmd e portate lo “Stop Time” a 0.1 oppure, nello spazio in basso, modificate direttamente il comando SPICE scrivendo .tran 0.1 al

posto del vecchio .tran 1. Ora lanciate la simulazione (omino che corre) e visualizzate le tracce prima e dopo il diodo; se tutto è andato per il verso giusto dovrete ottenere quanto segue:

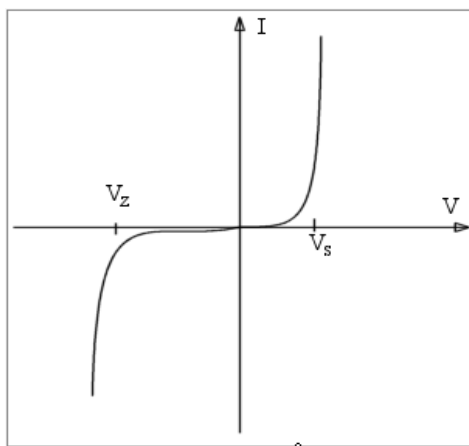


In verde vediamo la traccia del potenziale in uscita dall'alimentatore mentre in blu quella in uscita dal diodo. Ora vediamo di analizzare quanto succede. Innanzitutto dobbiamo ricordarci che l'alimentazione è alternata, per cui abbiamo un potenziale che da 0 sale, arriva a 12V e poi scende passando per lo zero invertendosi sino a -12V dopo di che il ciclo si ripete per 50 volte al secondo (i 50Hz che avevamo inserito a mano nell'alimentatore). Ora, guardiamo il grafico seguente che è quello appena visto a cui ho aggiunto la corrente che attraversa il diodo. Abbiamo quindi tre tracce diverse, in verde il potenziale che esce dall'alimentatore, in blu quello che esce dal diodo ed in rosso la corrente che attraversa lo stesso, attenzione che in quest'ultima traccia dovete guardare la scala in

A che si trova sul lato destro, non confondetevi (come faccio spesso io) con quella a sinistra che misura il potenziale in V delle altre due tracce.



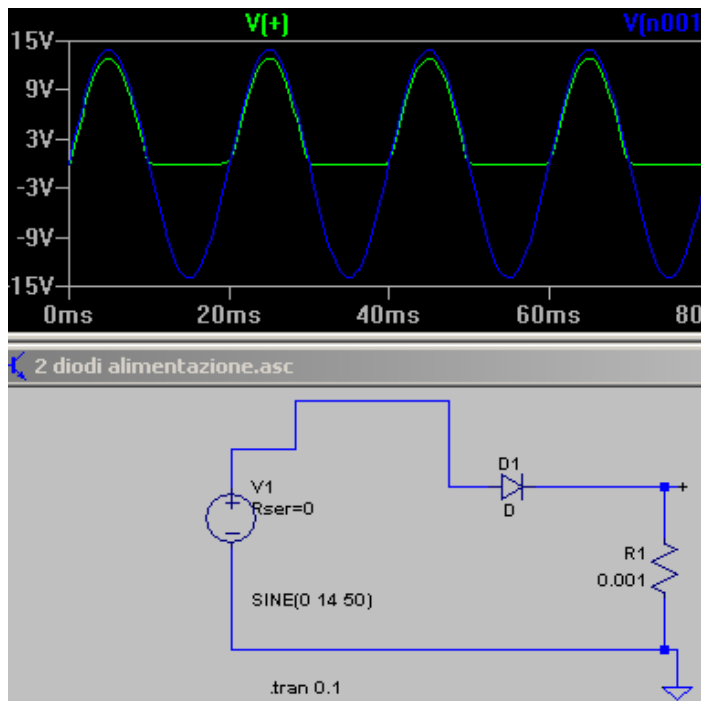
All'inizio il potenziale erogato è 0, il potenziale che esce dal diodo è 0 e la corrente che lo attraversa è anch'essa 0. Nei primi 5ms il potenziale dell'alimentatore sale sino al valore massimo di 12V. Come vediamo dal grafico anche il potenziale che attraversa il diodo sale anche se ad un livello leggermente inferiore a quello dell'alimentatore, in questo specifico caso si fermerà a 11,0686V. Inoltre se osservate con attenzione si nota che l'incremento del potenziale nel diodo avviene con un leggero ritardo rispetto alla crescita del potenziale nell'alimentatore. Con la discesa del potenziale di alimentazione scende anche il potenziale che passa oltre il diodo giungendo a 0 un istante prima del potenziale di alimentazione. Ma qui arriva il bello. Quando il potenziale di alimentazione si inverte diventando negativo, il diodo lo blocca per cui non vi passa corrente attraverso. Da qui abbiamo perciò un tracciato piatto a 0V / 0A anche se in realtà non è proprio zero ma passa una piccolissima



corrente detta "corrente di drift". La corrente che passa per il diodo rimarrà pressoché nulla finché quella di alimentazione non diventa nuovamente positiva. In poche parole il diodo ha "tagliato" tutte le semionde negative lasciando passare solamente quelle positive per cui la corrente non sarà più alternata ma sarà continua anche se con valori decisamente variabili e che per metà del tempo sono quasi uguali a zero. Ecco qui a lato lo schema caratteristico del diodo. Partiamo dallo 0. Aumentando il potenziale vediamo che inizialmente anche la corrente resta pressoché a 0 per poi aumentare e raggiungere il valore di massima conduzione per valori di potenziale che si attestano intorno ai **0.7V** (tensione di lavoro).

Allo stesso modo anche la polarizzazione inversa porta al passaggio di una piccola corrente (drift) sino ad un valore (**Vz: tensione di Zener**) a cui il diodo cede improvvisamente aumentando in modo esponenziale e dando luogo al cosiddetto "effetto valanga - breakdown": la corrente a questo punto passa indisturbata ma, se la potenza dissipata supera quella ammessa per quel diodo, il componente si brucia e deve essere sostituito, infatti i comuni diodi di cui abbiamo parlato sinora (diodi giunzionali) non sono fatti per lavorare in questa zona a differenza ad esempio dei diodi Zener che sono specificatamente studiati per lavorare con l'effetto valanga che quindi non li danneggia. Si noti che la tensione di lavoro di 0.7V è caratteristica dei diodi al silicio, ma essa è variabile, ad esempio è di circa 0.2V per i diodi Schottky e diodi al germanio, 0.5V per i diodi di arseniuro di gallio e 4V per i diodi LED azzurri.

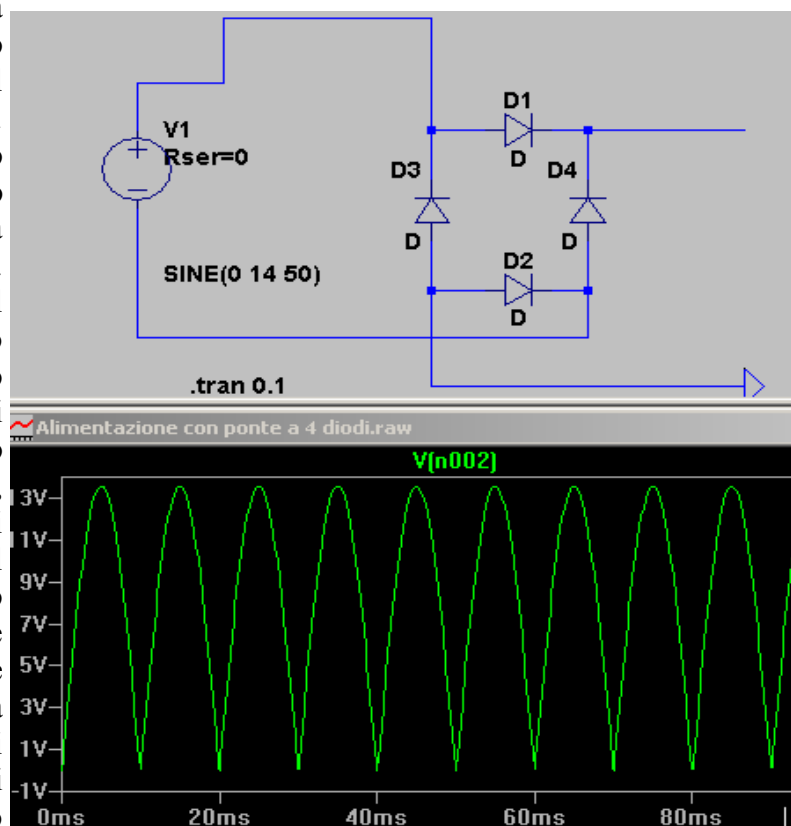
Esempio pratico: condensatori e diodi



Finalmente qualcosa di pratico. Nell'ultimo esempio abbiamo visto come possiamo tagliare, tramite un semplice diodo, le semionde negative della corrente alternata mantenendo solamente quelle positive. Certo, se questo fosse un circuito di alimentazione il nostro "utilizzatore" si troverebbe con una tensione decisamente poco costante. Ecco qui la rappresentazione grafica dell'esempio precedente. Vediamo chiaramente la tensione sinusoidale della traccia blu in ingresso e la tensione priva di semionde negative (verde) tagliate dal diodo. Ora passate allo schema successivo. Guardando il grafico si capisce immediatamente che in questo caso vengono non solo eliminate le semi onde negative, ma anzi, queste vengono "raddrizzate" e trasformate in positive. Vediamo come: Partiamo dal polo +


dell'alimentatore.

Immaginiamo che inizialmente dal polo positivo esca un'onda positiva. Questa giungerà al nodo posto fra i diodi $D1$ e $D3$. $D3$ non sarà attraversabile in quanto polarizzato inversamente, per cui l'onda positiva attraverserà $D1$ giungendo al nodo posto fra $D1$ e $D4$. Anche $D4$ è polarizzato in modo inverso per cui l'onda positiva andrà al polo positivo. E quando l'onda è negativa? Attraverserà il diodo $D3$ ed uscirà dal polo negativo. Ora diamo uno sguardo al polo negativo di alimentazione: quando esce l'onda positiva questa attraversa il diodo $D4$ ed esce sul polo positivo. Se l'onda è negativa attraversa il diodo $D2$ e fuoriesce dal polo negativo. L'utilizzo in questo modo dei quattro diodi prende il nome di **ponte di Graetz**. Benché questo accorgimento sia fattibile con 4 diodi, esistono componenti già assemblati che eseguono lo stesso compito. Nel nostro ipotetico alimentatore il primo problema è risolto ma ciò nonostante la tensione è ancora troppo variabile con oscillazioni che vanno da 12 a 0V. La maggior parte dei componenti non gradirebbe un'alimentazione di questo genere per cui è necessario qualcosa che la stabilizzi. Ah, avete notato che la tensione arriva oltre i 13V? E' dovuto al fatto che l'alimentatore è impostato a 14V, ciò per compensare le perdite di carico legate ai diodi (1,4V) ed altri componenti che nello schema non ci sono ancora. Ora come facciamo a linearizzare la tensione in uscita?. Potremmo usare un componente che accumula carica durante le fasi "ascensionali"



dell'onda di potenziale, e la liberi durante le fasi di “discesa” al fine di livellare il tracciato. Che ne dite? Avete capito? Sì, è proprio il condensatore che fa questo tipo di lavoro. Proviamo ad inserirne uno e vediamo cosa succede:

Nello schema a lato ho messo in grafico sia la tensione in uscita che la corrente che attraversa il condensatore. Vedete che la tensione si è stabilizzata? Anche la corrente all'interno del condensatore è ora stabile, si notano solo minuscoli “picchi”, in particolare sotto i 50ms. Ma attenzione. Se fosse così facile non ci sarebbe gusto. La linearità dei tracciati è legata al fatto che non ci sono carichi applicati al circuito per cui il condensatore, anche se molto piccolo (0.47 microF), riesce a livellare perfettamente la corrente. Se ci fosse però un carico applicato ad un circuito, questo

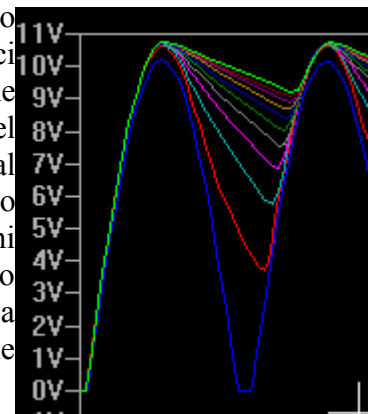
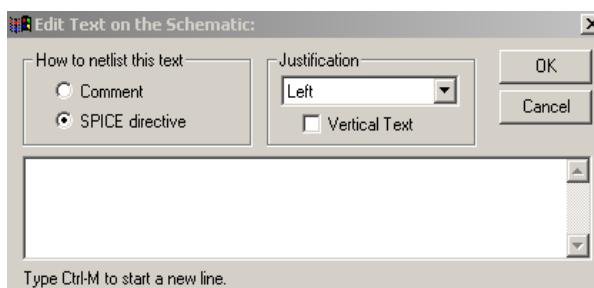
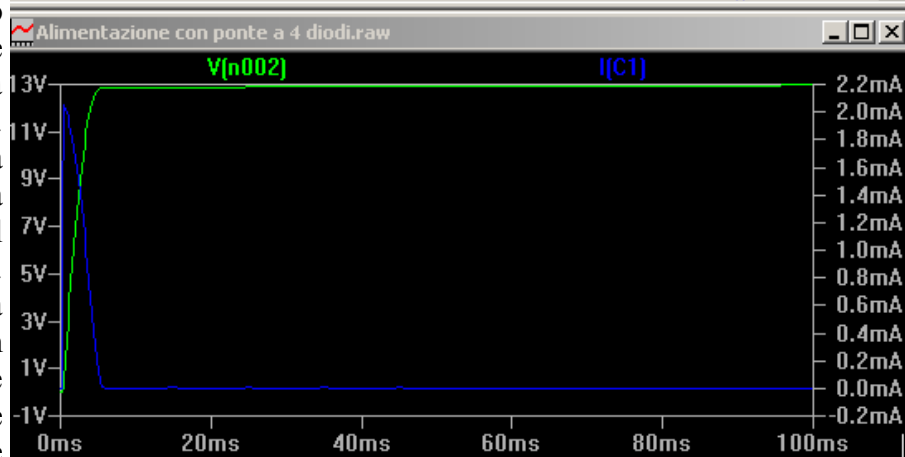
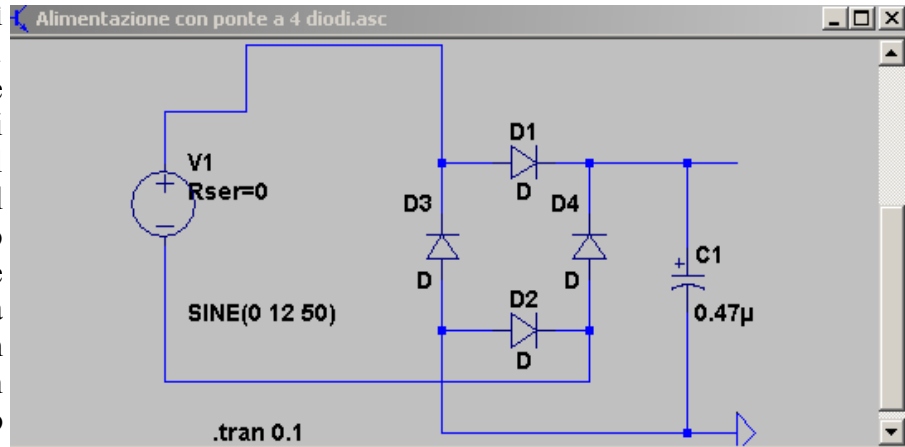
determinerebbe un rapido “scarico” del condensatore nelle fasi di discesa della tensione di alimentazione. Ho fatto una piccola prova ed ho messo in serie una resistenza per simulare il carico assorbito dal circuito. Ho impostato una resistenza variabile da 1Ω a 100KΩ con passi di 10KΩ. Per fare ciò è sufficiente sostituire il valore della resistenza con {R}, che indica R come parametro variabile all'interno della simulazione. Poi dovete aggiungere una direttiva SPICE, per fare ciò potete premere semplicemente il tasto S, o andare sul menu Edit->SPICE Directive o ancora premere sul simbolo . Indipendentemente dalla via scelta vi si apre una

finestra tipo la seguente nella quale, all'interno dello spazio bianco, scrivete la direttiva SPICE in questo modo: .STEP param R 1 100000 10000 (attenzione al puntino iniziale). Questo comando dice

al simulatore che il valore di R deve variare da 1 a 100000 con passi da 10000. Ciò che andremmo ad ottenere è un grafico interessante che ci mostra come all'aumentare del carico applicato al circuito, aumentino anche le oscillazioni

della corrente, chiaro segno che all'aumentare del carico è necessario disporre di un condensatore di capacità superiore. Vedete come la linea blu, corrispondente al massimo carico, sia molto simile a quella che otteniamo in assenza di condensatore.

La linea verde è invece quella che potremmo definire “reale”, cioè

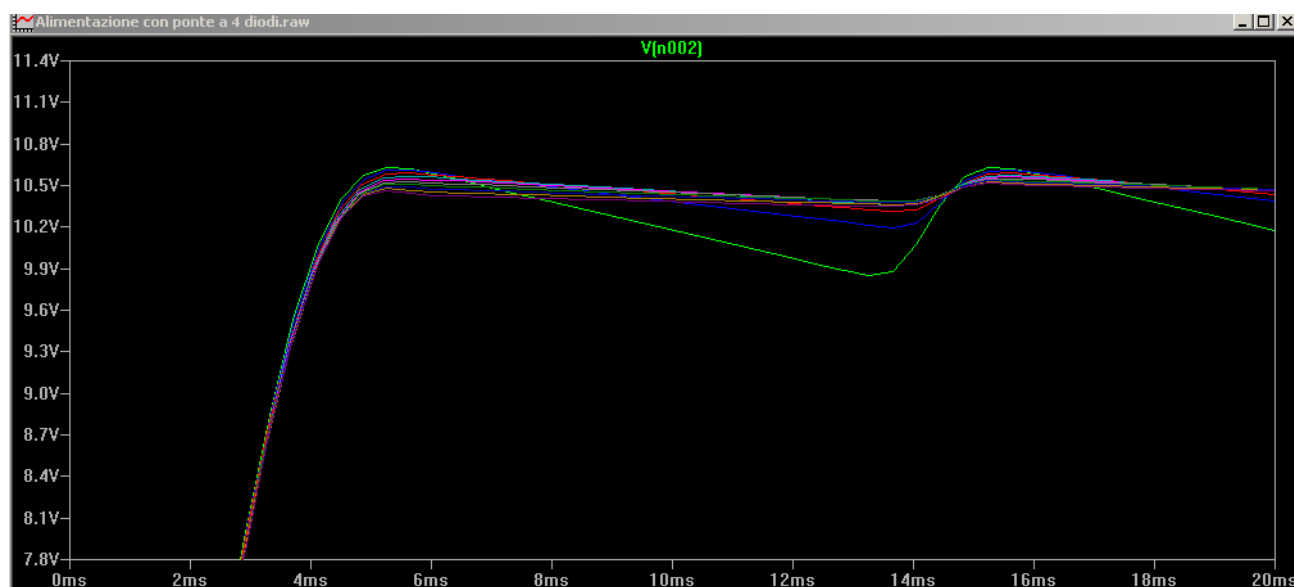


quella che effettivamente otteniamo nei nostri circuiti essendo invece il grafico mostrato inizialmente del tutto teorico e non applicabile nella realtà.

Comunque sia nel grafico sottostante vediamo quello che è il reale tracciato ottenuto con questo tipo di “raddrizzatore a diodi”, in particolare vediamo che pur oscillando la corrente risulta abbastanza lineare, cosa che migliora ulteriormente aumentando la capacità del condensatore. Si noti che il voltaggio ottenuto è inferiore a 12V per l'assorbimento da parte dei diodi, il trasformatore a monte, perciò, dovrà fornire una tensione superiore a quella voluta per ottenere l'uscita desiderata.



Giusto per curiosità vi mostro qui sotto il grafico ottenuto con una resistenza fissa di 10K Ω e con un condensatore che varia da 10 μ F a 100 μ F a passi di 10 μ F.

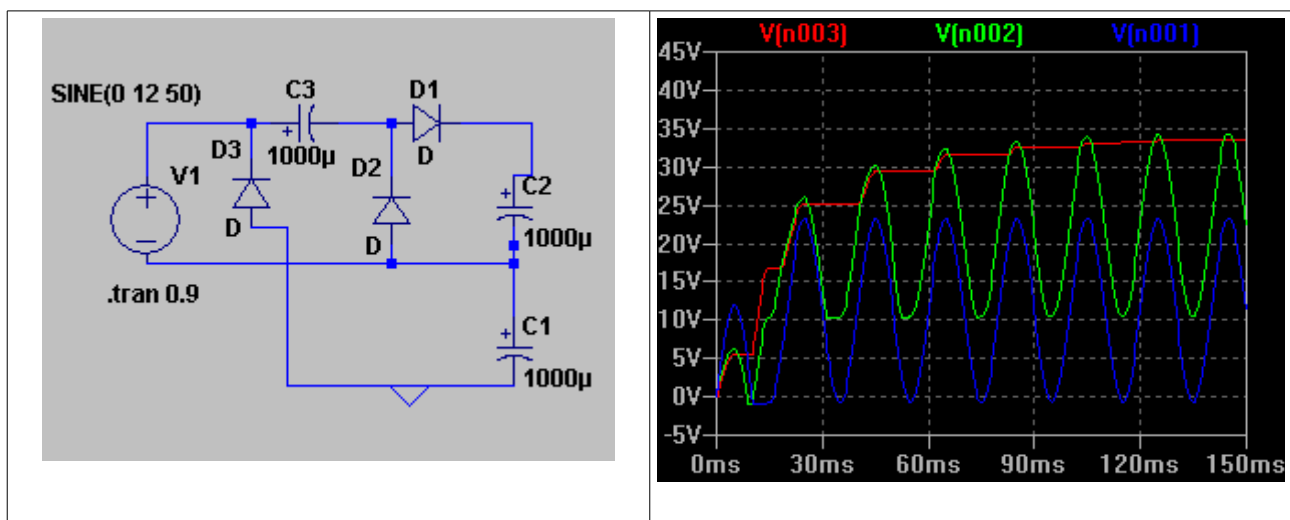
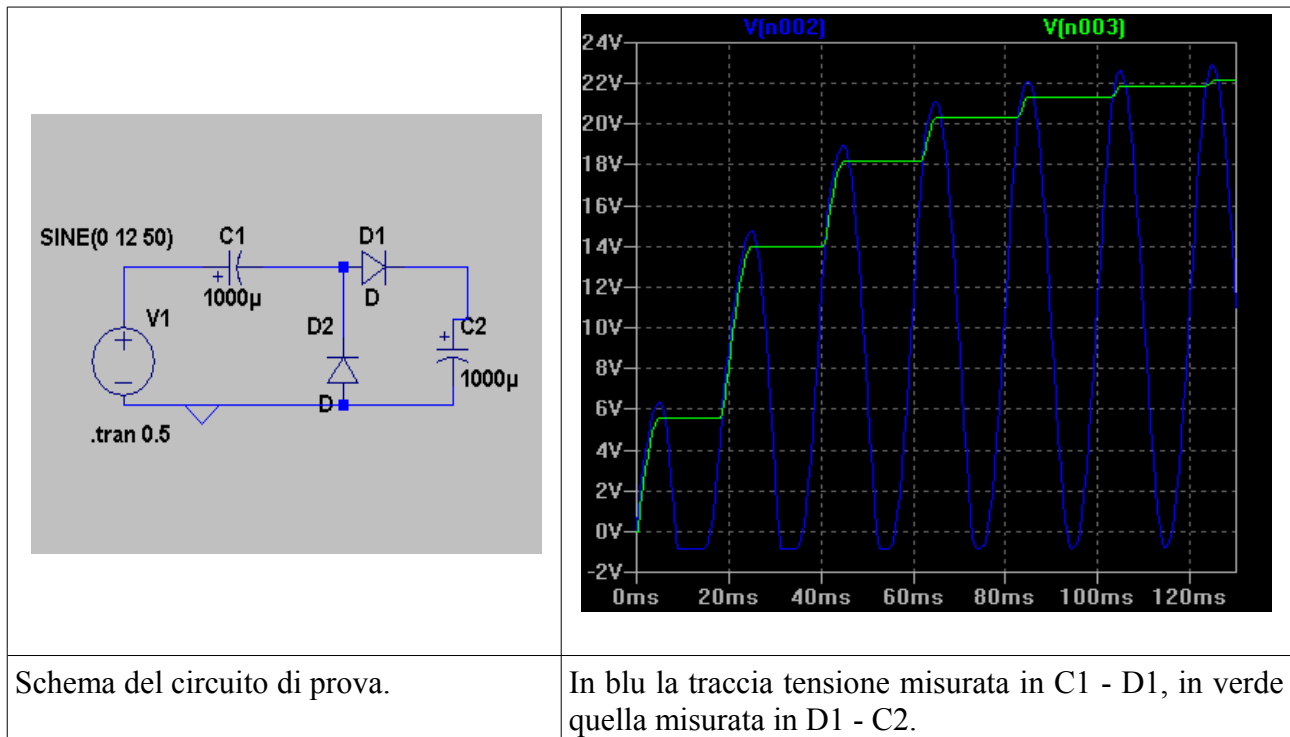


Per calcolare in modo semplice la capacità del condensatore da utilizzare, possiamo utilizzare la formula $20000A/V_{cc}$ dove A è la corrente assorbita dal circuito da alimentare in Ampere e V_{cc} la tensione raddrizzata in uscita; il risultato è la capacità in microfarad del nostro condensatore.

Amplificatore di voltaggio

L'utilizzo combinato di condensatori e diodi ci permette di costruire un circuito in grado di raddoppiare la tensione in ingresso, anche se è possibile mettere circuiti identici in serie per aumentarla di quanti multipli desideriamo. Se prendiamo in considerazione il prossimo grafico possiamo vedere come funziona. Durante la prima semionda positiva il condensatore C1 comincia a caricarsi per cui la tensione in uscita è ridotta. Questa passa dal diodo D1 e va a caricare anche il condensatore C2. Ma cosa succede alla prima semionda negativa? Questa passerà dal diodo D2 e raggiungerà il diodo D1. I nostri $12 - 0,7 = 11,3V$ però andranno a sommarsi alla tensione erogata dal condensatore C1 che nel frattempo si scaricherà per cui giungiamo ad un picco di circa 14V che sono superiori ai 12V di alimentazione. Poi il ciclo si ripete andando a caricare del tutto i condensatori per cui la tensione si stabilizzerà ad un valore prossimo al doppio di quello di alimentazione, nel nostro esempio arriverà a circa 22.6V dopo circa 1 secondo. Con lo stesso principio possiamo costruire un triplicatore di tensione come possiamo vedere nel grafico

successivo.

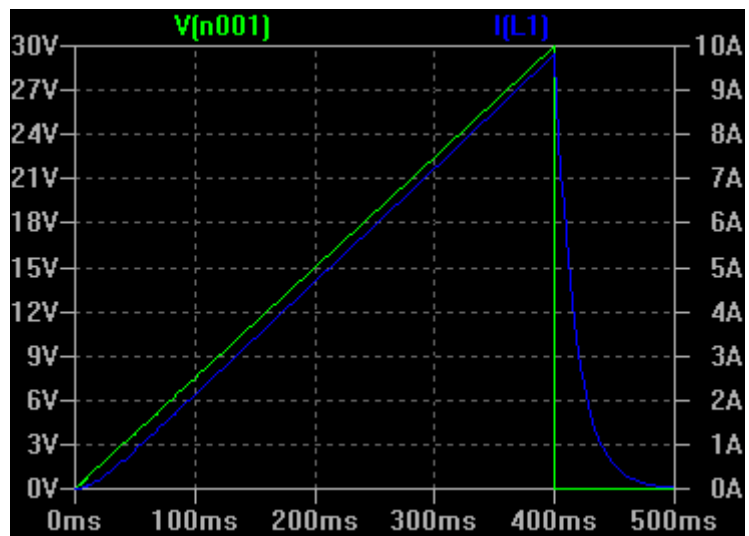
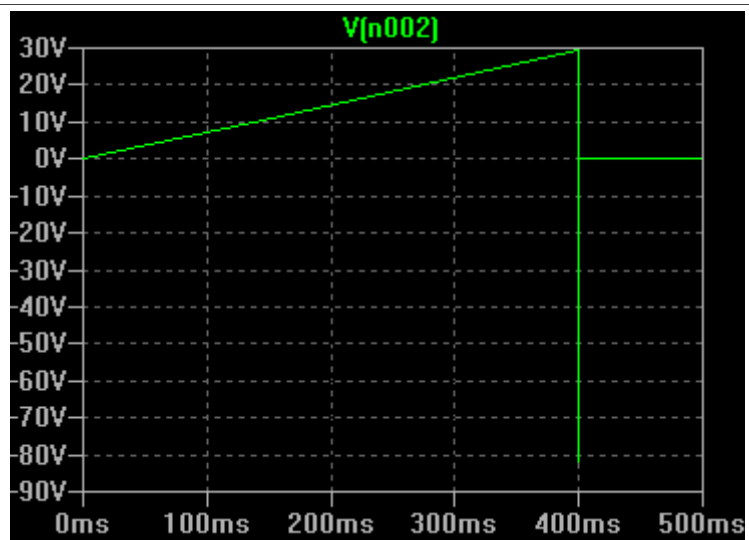
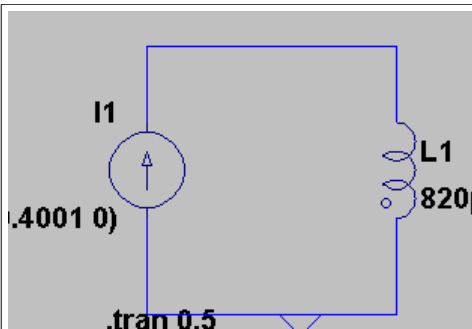


Benché sia abbastanza ovvio, si sottolinea che questi circuiti innalzano la tensione ma forniscono una scarsa corrente.

Mitigare il kickback induttivo

Ecco un'altra applicazione dei diodi. Prima di tutto dobbiamo però capire cos'è un carico induttivo ed il kickback. L'induttore è un componente formato da una spira di materiale conduttore, nel cui nucleo può essere o meno inserito del materiale ad elevata permeabilità magnetica. L'induttore crea una forza, misurata in Henry (H) che si oppone alla variazione di corrente al suo interno. Questo significa che se aumentiamo la corrente tende a non farla aumentare, e se la riduciamo tende a non farla diminuire. Questa forza è legata al campo elettromagnetico che si viene a formare quando circola corrente nelle spire.

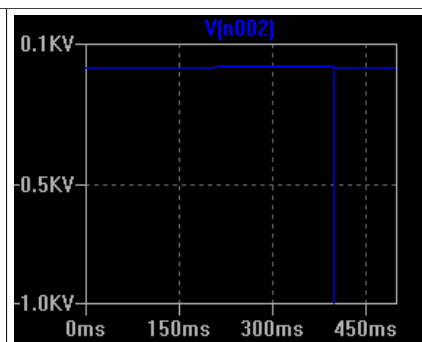
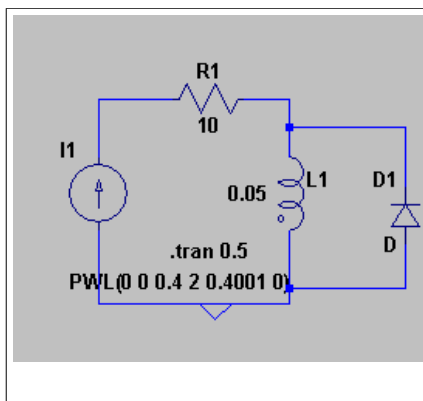
Nel grafico seguente è facile comprendere il funzionamento dell'induttore. Vediamo infatti che al generatore abbiamo creato una tensione che sale sino a 30V e poi si interrompe bruscamente (linea verde) come se avessimo aperto un interruttore.



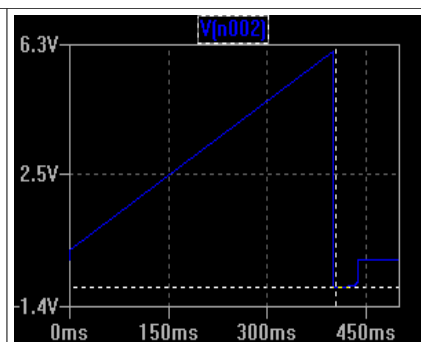
A questo punto vediamo come la tensione non solo giunge allo zero, ma si genera una tensione di segno opposto molto ampia, che nel nostro caso sfiora i -90V. Allo stesso modo vediamo (linea blu) come l'induttore si oppone alla variazione dei flussi di corrente che scorrono al suo interno. All'inizio infatti quando la tensione comincia ad aumentare, la corrente è ancora ferma sullo zero e comincia ad aumentare pochi ms dopo. Allo stesso modo quando l'interruttore viene chiuso, la corrente non crolla istantaneamente ma scende più lentamente e si annulla quasi 100ms dopo.

Questa corrente “extra” può essere notevole e bruciare numerosi componenti elettronici. E' per questo che in tutti i casi in cui si abbia a che fare con un carico induttivo, può essere utilizzato un diodo per dare “sfogo” alla corrente che continua a fluire dopo l'apertura del circuito, ad esempio con un interruttore. Un esempio classico è quello del relè collegato ad un bjt. Un processore in grado di erogare poca corrente, controlla un bjt che controlla a sua volta una corrente maggiore che apre o chiude un relè. Quando il relè viene riportato allo stato di quiescenza, in qualità di induttore, libera un picco di corrente in grado di bruciare il bjt stesso o persino il controllore a monte, motivo per cui viene applicato un diodo in serie.

Nel prossimo grafico vediamo una simulazione con la presenza o meno del diodo. Come possiamo vedere all'apertura del circuito, in assenza del diodo, otteniamo un picco inverso istantaneo di circa 1000 volt, mentre con il diodo in serie questo valore scende a -0.85V.



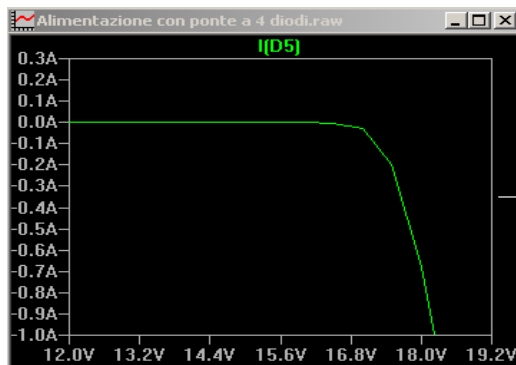
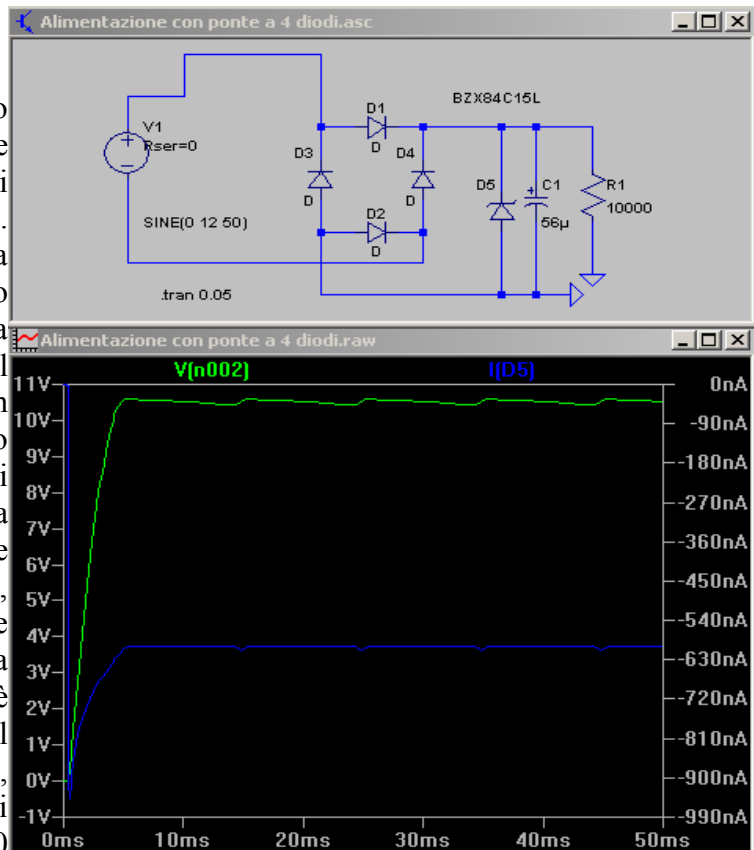
Prima....



...e dopo....

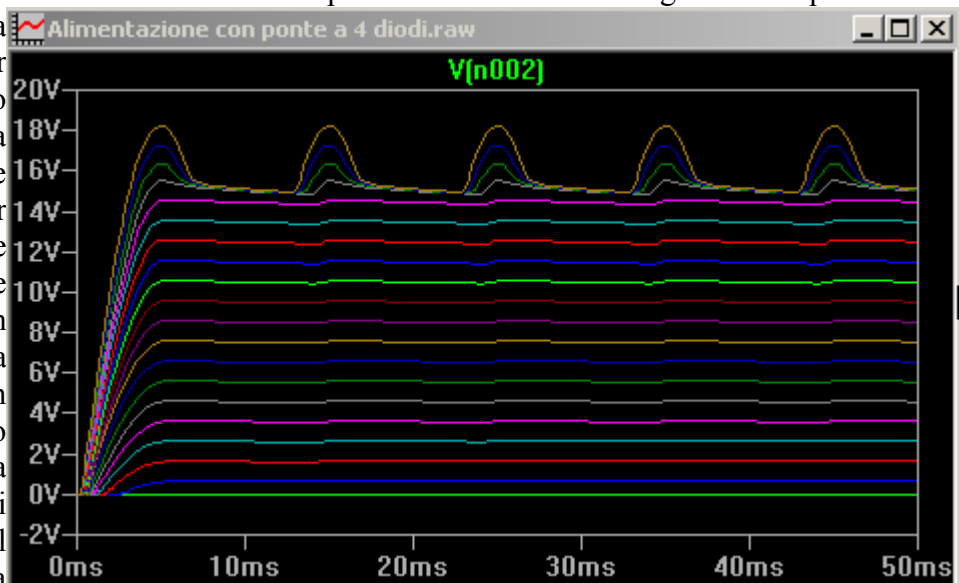
Diodo Zener

Come già accennato questo è un diodo espressamente progettato per funzionare in regime di valanga permettendo di “scaricare” eccessi di tensioni inverse. Qui di seguito ho fatto una piccola modifica al circuito precedente ed ho inserito un diodo di Zener (Motorola BZX84C15L) in parallelo al condensatore che ho fissato a $56\mu\text{F}$. In verde vediamo l'oramai familiare grafico della corrente raddrizzata con le sue lievi oscillazioni. In blu ho messo in grafico la corrente che attraversa il diodo Zener che come vedete si attesta intorno ai 600 nA, ossia nanoAmpere, e quindi una corrente del tutto insignificante. Ora la domanda è: cosa è cambiato? La risposta è decisamente semplice: proprio nulla. Il diodo di Zener utilizzato, infatti, comincia a lavorare dai 15V in su per cui con un'alimentazione compresa fra i 10 ed 11 V non ha nessun effetto. Qui sotto vi faccio vedere il grafico della corrente che attraversa lo

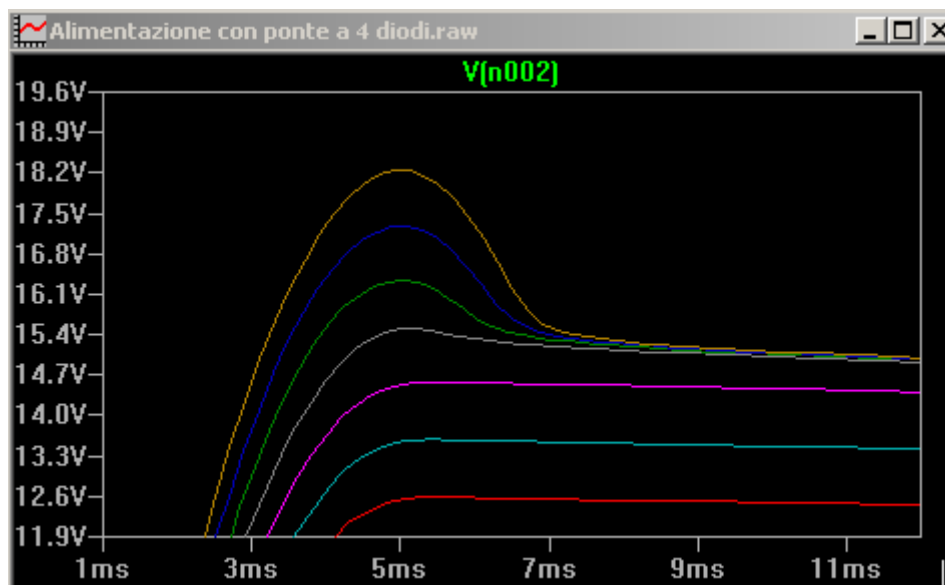


Zener in base alla variazione di tensione: come potete notare la corrente aumenta lentamente dopo i 15V per poi subire un brusco aumento dopo i 16. Chiaramente essendo una “corrente inversa” i valori ottenuti risultano negativi. Ora vi propongo un'altro grafico che dovrebbe fare chiarezza. E' simile a quello visto sopra con la traccia verde che ci mostra la corrente stabilizzata fra 10 e 11 V con lievi oscillazioni. Il nuovo grafico presenta molte tracce che rappresentano una sorgente di alimentazione che varia da 1 a 20 V a passi di 1V. E' decisamente intuitivo capire come funziona lo Zener, infatti nei tracciati al di sopra dei 15V

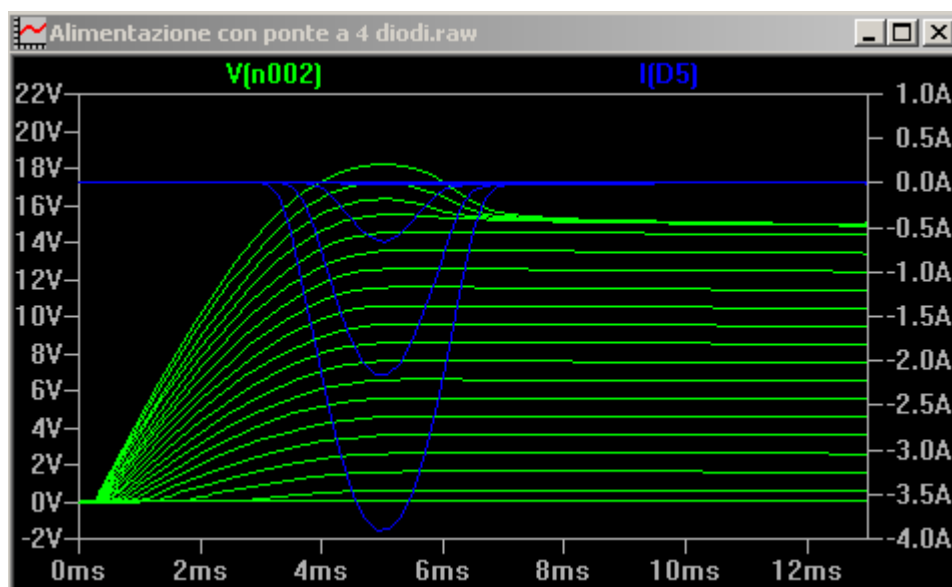
c'è un “tentativo” di riportare in basso la tensione per cui si formano delle “gobbe” non presenti nei tracciati a più bassa tensione. Quindi lo Zener entra in funzione quando viene sorpassata la soglia dei 15V (il componente usato era specifico per questa soglia) per cui se tale limite viene sorpassato, entra in conduzione scaricando “a massa” la tensione in eccesso riportando nuovamente la tensione a 12V. Ciò permette quindi di “stabilizzare” il circuito per evitare che la



tensione superi certi livelli preimpostati. E' chiaro che questo è un sistema rudimentale, ma permette comunque un primo livello di protezione dei circuiti a valle. Qui sotto vi propongo l'ingrandimento del grafico appena visto.

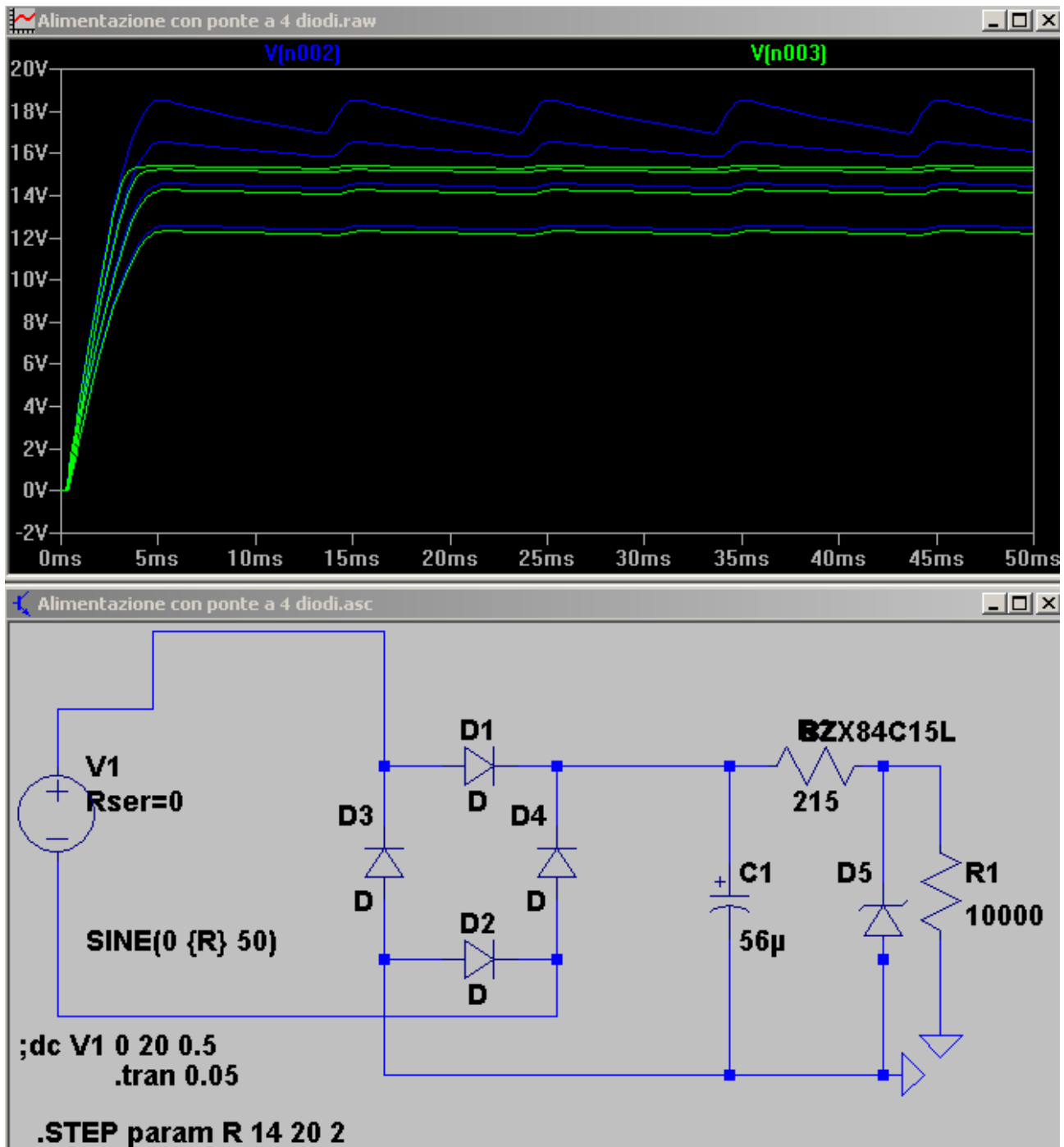


Ed ora un grafico simile in cui vedete in verde le tensioni come sopra e sovrapposte in blu le correnti che attraversano lo Zener:



Si noti che a 20V lo Zener si trova a dissipare la bellezza di 4A con potenze dissipate dell'ordine dei 70W mentre in media i diodi Zener sopportano correnti inverse di circa 5-10mA con potenze variabili da 0.3 a 2W....insomma....l'abbiamo bruciato!!!! Questa è una cosa importante: lo SC3 non ci dice se bruciamo un componente, dobbiamo essere noi ad interpretare i contenuti dei grafici. Dobbiamo trovare altre soluzioni. Mi sorge spontanea una domanda. Cambia qualcosa se invertiamo lo Zener ed il condensatore? No. Ho provato ma non ho notato differenze rilevanti. Ma una soluzione in realtà c'è. E' sufficiente infatti mettere per primo il condensatore e poi, prima dello Zener, interporre una resistenza che deve essere calcolata sul tipo di Zener e di carico del circuito che abbiamo intenzione di alimentare. La resistenza infatti fa sì che all'aumentare della tensione in ingresso vi sia un taglio proporzionale della tensione in uscita, infatti maggiore è l'aumento della tensione in ingresso e maggiore sarà la porzione tagliata dalla resistenza. Lo svantaggio sarà ovviamente legato al fatto che la resistenza determina un consumo da parte del circuito ed un abbassamento di tensione in uscita, tutti fattori che dovranno essere tenuti in debita considerazione. Vediamo ora la simulazione del circuito, in blu sono tracciate le tensioni prima della resistenza

mentre quelle in verde rappresentano le stesse tracce dopo lo Zener. Le 4 tracce rappresentano rispettivamente i 14,16,18 e 20 volt. Vediamo chiaramente come nonostante l'applicazione di una tensione in ingresso di 20V vi sia un'uscita stabilizzata a 15V, ricordando che lo Zener utilizzato è predisposto per questa tensione. Con questo circuito la corrente massima nello Zener risulta di soli 13mA quando abbiamo la tensione a 20V, ossia 5V superiori ai voluti che corrisponde al 25%. In questa condizione lo Zener dissipa 200mW quindi nel range di funzionamento. Confrontate con il circuito precedente, una semplice resistenza aggiuntiva ha modificato profondamente il funzionamento del nostro alimentatore.



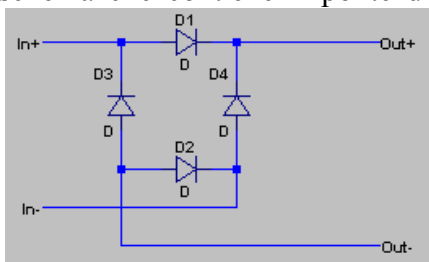
LED (Light Emitting Diode)

Chi non conosce il LED? Sono quelle specie di piccole lampadine che troviamo in ogni sorta di apparecchio elettronico, per intenderci, la classica "lucetta rossa" del televisore in stand-by. I LED

sono dei diodi che se polarizzati correttamente e con i giusti valori di tensione e corrente producono luce. I LED tradizionali sono fatti per funzionare approssimativamente fra 1 e 3V con correnti comprese fra 10 e 40mA. E' comunque necessario conoscere i LED che vogliamo utilizzare per valutare i parametri corretti caso per caso, anche perché oggi esistono nuovi tipi di LED che assorbono meno corrente delle precedenti generazioni, o altri cosiddetti "ad alta luminosità" utilizzabili per produrre luce visibile per illuminazione. Usare un LED è quantomai banale, basta infatti anteporre una resistenza per ottenere i corretti valori di tensione ed il LED si accenderà se risulta inserito con la corretta polarità. In caso contrario la bassa tensione di breakdown lo brucerà con un sonoro scopietto :-). Approfondiremo ulteriormente l'argomento LED.

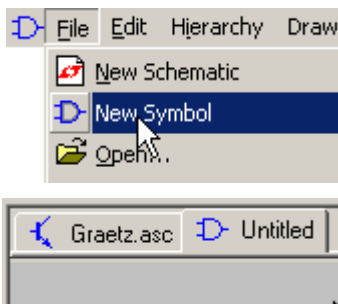
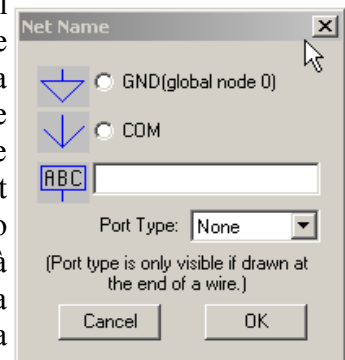
Switchercad: costruiamoci degli schemi preimpostati

Man mano che si avanza con la sperimentazione dei diversi circuiti, diventa utile tenere da parte dei "pezzi" già pronti da riutilizzare in un secondo momento. Ad esempio potremmo crearci uno schema che contiene il ponte di Graetz visto sopra per riutilizzarlo in futuro ogni qualvolta ci



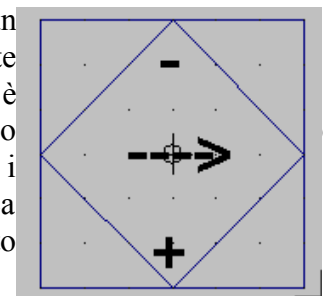
occorra raddrizzare una corrente alternata. Quello che presenterò qui è quanto di più semplice possibile, tanto per cominciare a far pratica con il software. In realtà sono possibili applicazioni ben più sofisticate, si possono creare "persino" nuovi componenti come ad esempio relè, pannelli solari e quant'altro. Prepariamo intanto lo schemino con il ponte:

Rispetto a quanto visto sinora si noti subito l'unica differenza. Al posto dell'alimentatore ho inserito le due "scritte" In+ ed In-, inoltre in uscita troviamo rispettivamente Out+ ed Out-. Per inserire queste "scritte" andate sul capo dei fili e premete il tasto destro: dal menu che appare scegliete "Label Net" (o premete direttamente F4). Vi apparirà una schermata come quella qui vicino. Nello spazio vicino a "ABC" scrivete le rispettive In+ In- Out+ ed Out-. Mi raccomando, è importante scrivere delle cose sensate in quanto successivamente verranno riprese. Port Type può tranquillamente restare "none". In questo modo abbiamo dato un nome ai capi di ingresso e di uscita del circuito per cui sarà possibile usare questi riferimenti nel secondo step che andiamo a vedere ora. Intanto salvate lo schema in una directory vuota. Ora



andiamo sul menu "file" dello SC3 e selezioniamo la voce "New Symbol". Si aprirà un nuovo foglio che sembra del tutto identico a quello usato sinora per inserire gli schemi, si nota solamente il diverso "tab" che appare diverso da quello visto sinora. In realtà anche i menù proposti sono totalmente diversi rispetto a quelli visti sinora. Ora andiamo nel menu "Draw" e selezionando di volta in volta i vari tools di disegno, costruiamoci un disegno da utilizzare per simboleggiare il ponte di Graetz nei futuri circuiti. Quello qui a lato è

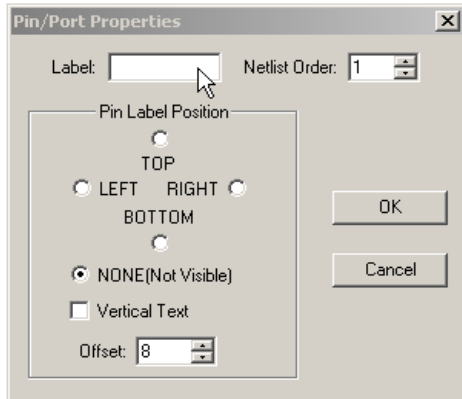
lo schemino che ho preparato, si lo so che è orribile ma per questo esempio è più che sufficiente. Il simbolo meno indicherà che in alto ci saranno i poli negativi, ed il "più" indicherà che in basso ci saranno i positivi. La freccia centrale indica il verso della corrente. Salviamo intanto quanto fatto sinora.



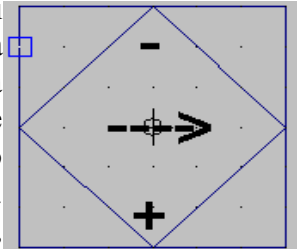
Importante è usare lo stesso nome usato per il circuito fatto prima, quindi se quello si chiamava Graetz.asc, il simbolo ora creato si chiamerà Graetz.asy e mi raccomando mettetelo nella stessa

directory. Manca una cosa fondamentale. Se questo è il simbolo dove colleghiamo i fili in ingresso ed uscita? Premendo P, oppure selezionando il menu “Edit->Add Pin/Port” vi si apre una nuova schermata come quella qui a lato.

Questa schermata ci permette appunto di inserire i “punti di contatto”. Nella voce label dovremmo scrivere gli stessi punti usati nello schema di prima e quindi In+ In- Out+ ed Out-. Cominciamo intanto con In-, diamo l'OK e lo posizioniamo sul bordo sinistro dello schema in alto, rispettando quindi l'ingresso negativo.



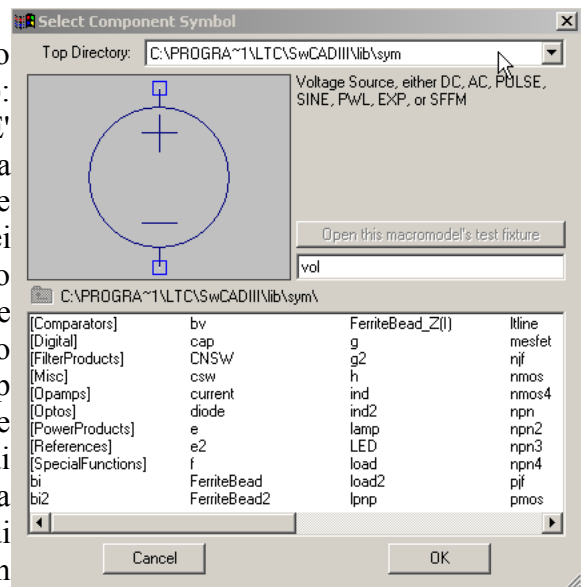
Un piccolo quadratino azzurro ci indicherà il pin appena inserito. Ora facciamo lo stesso con In+ (da posizionare sul lato sinistro in basso) e poi Out- ed Out+ da mettere sul lato destro rispettivamente in alto e basso. Se non ricordate cosa avete inserito,



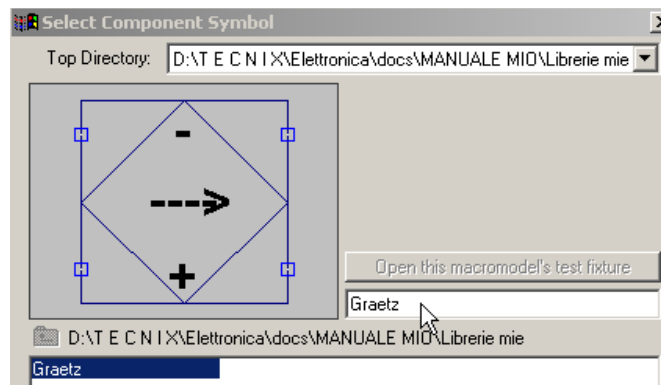
andate sui pin e premete il pulsante destro: si riapre la finestra permettendovi anche di modificare quanto scritto se ad esempio avete sbagliato o cambiato idea. Salvate il tutto.

Chiudete lo SC3 e riapritelo (giusto per vedere cosa fare aprendo da zero). Create un nuovo schema, inserite il solito alimentatore e salvate il circuito (chiamatelo “test”) nella stessa directory ove avete salvato precedentemente i due files Graetz.

Se mi avete seguito alla lettera avrete uno schemino con il solo alimentatore (mi raccomando in alternata): è arrivato il momento di inserire il nostro ponte. E' importante che abbiate salvato lo schema nella stessa directory del ponte di Graetz ed adesso capirete perché. Andate sulla schermata per l'inserimento dei componenti, troverete i soliti noti ma non il vostro ponte. Io inizialmente sono impazzito per superare questo banale problema. Vedrete che in alto, dove ho lasciato la freccia del cursore, c'è l'indicazione “Top Directory”. Se premete sulla freccetta vedrete che oltre alla directory dei componenti c'è anche quella in cui avete salvato il vostro circuito. Se selezionate quella comparirà magicamente il vostro Graetz con tanto di anteprima del simbolo. Ora selezionatelo come un qualunque componente e collegatelo al resto del

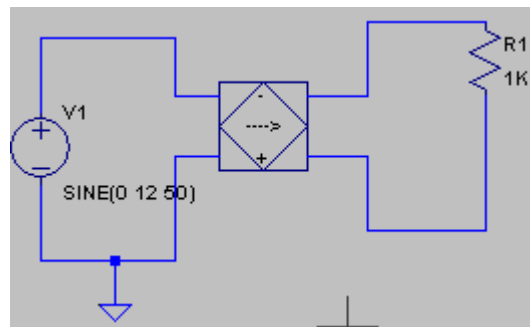


circuito. A questo punto, tanto per provare, mettiamo una bella resistenza all'uscita per simulare un carico e vediamo la simulazione del circuito. Avete provato a premere con il pulsante destro sul

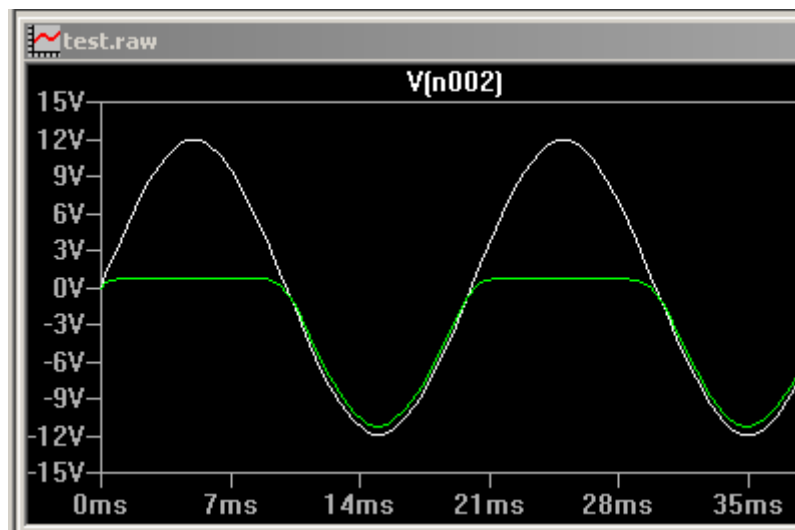


nuovo simbolo?. Vedrete che a differenza di quanto visto sinora, non si apre una schermata per scegliere componenti simili come diverse resistenze o condensatori. C'è una schermata che permette di aprire in una finestra separata, sia il simbolo che il relativo schema per poterli eventualmente modificare.

Non c'è però nessun parametro modificabile cosa che in questo specifico caso non ha alcuna importanza ma che in casi più complessi lo è. Ad esempio, se avessimo incluso nello schema anche il condensatore, sarebbe stato utile poter modificare il valore dello stesso in base ai singoli casi, senza dover modificare il circuito di partenza. Nel seguito di questo testo vedremo come sia possibile fare ciò e non solo.



Se tutto è andato liscio dovreste avere un circuito come quello qui sopra e la simulazione dovrebbe darvi qualcosa del tipo:

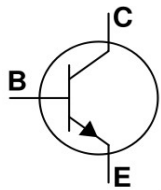


Com'è che sono tagliate le semi onde positive invece che le negative? E' questa la domanda che vi stavate facendo?...MALE!!! Dovevate accorgervi prima che ho collegato le polarità invertite!. Se non ve ne siete accorti significa che state leggendo troppo superficialmente per cui forse è l'ora di una pausa.

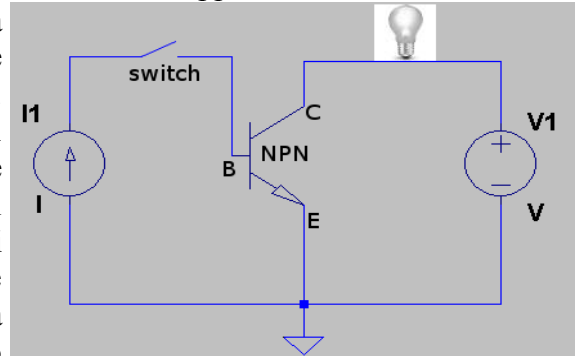
Se durante la simulazione premete con il destro sul ponte e selezionate "Open schematic", si apre lo schema fatto prima e potete simulare anche i pezzi di questo circuito in contemporanea al resto.

I Transistor (TRANSfer resISTOR)

Transistor a giunzione bipolare (bipolar junction transistor / BJT)



I transistor a giunzione bipolare sono componenti che hanno 3 contatti chiamati rispettivamente **collettore**, **base** ed **emettitore**. Essendo dei semiconduttori sono anch'essi formati dall'alternanza di regioni P ed N, in particolare esistono due forme di transistor che prendono il nome di **NPN** (figura a lato) e **PNP** (vedi appendice simboli). Vediamo a grandi linee il suo funzionamento. In uno stato “basale” in cui alla base non c'è viene fornita alcuna corrente, fra collettore ed emettitore (CE) c'è un'elevata resistenza per cui non circola corrente fra di essi. Quando invece si applica una corrente alla base, questa circola verso l'emettitore riducendo la resistenza CE per cui avremmo in CE una corrente proporzionale a quella BE anche se molto più elevata. Nei transistor PNP collettore e base sono collegati al polo negativo, viceversa negli NPN collettore e base sono collegati al polo positivo. Queste due tipologie di transistor permettono grande flessibilità. Il circuito qui a lato permette di capire il primo concetto importante dei transistor BJT: se alla base non giunge una corrente (si noti che l'interruttore è aperto), attraverso il transistor (collettore-emettitore: CE) la corrente non passa, o meglio passa qualche pA ossia una quantità talmente piccola da poter tranquillamente essere approssimata allo zero. Questo fa sì che il BJT possa essere utilizzato come un “interruttore” il cui stato on/off è determinato dalla presenza o meno di corrente alla base del transistor. Se fra l'alimentatore ed il transistor ponessimo una lampadina questa sarebbe perciò spenta. Se ora facciamo passare una determinata corrente chiudendo lo switch, fra collettore ed emettitore passerà una corrente e l'ipotetica lampadina si accenderà. Ovviamente all'emettitore ci sarà la somma delle correnti presenti alla base ed al collettore (legge di Kirchhoff). Si noti che alla sinistra del nostro schema ho usato un generatore di corrente, che ci semplifica il disegno del circuito, ma nella realtà dovrà essere poi sostituito da un generatore di tensione a cui andranno di volta in volta applicate le necessarie resistenze per ottenere la corrente voluta.



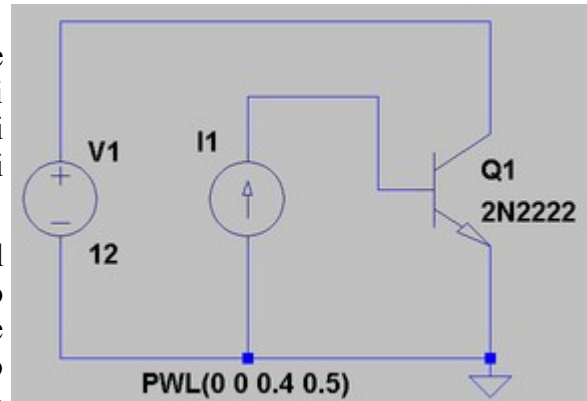
Il BJT funziona in maniera differente in base a come viene utilizzato nel contesto del circuito. Ci sono tre tipologie di utilizzo del BJT, ossia a collettore, base o emettitore comune. Infatti se deve esserci un circuito di ingresso ed uno di uscita, la natura a tre terminali del BJT implica che uno dei tre dovrà essere comune fra i due. A seconda della configurazione scelta ci saranno diversi comportamenti del circuito:

| Configurazione | Collettore comune | Base comune | Emettitore comune |
|------------------------|-------------------|-------------|-------------------|
| Fase | 0° | 0° | 180° |
| Terminale di ingresso | Base | Emettitore | Base |
| Terminale di uscita | Emettitore | Collettore | Collettore |
| Guadagno di voltaggio | BASSO | ALTO | MEDIO |
| Guadagno di corrente | ALTO (e-b) | BASSO (c-e) | MEDIO (c-b) |
| Guadagno di potenza | MEDIO | BASSO | ALTO |
| Resistenza di ingresso | ALTO | BASSO | MEDIO |
| Resistenza di uscita | BASSO | ALTO | MEDIO |

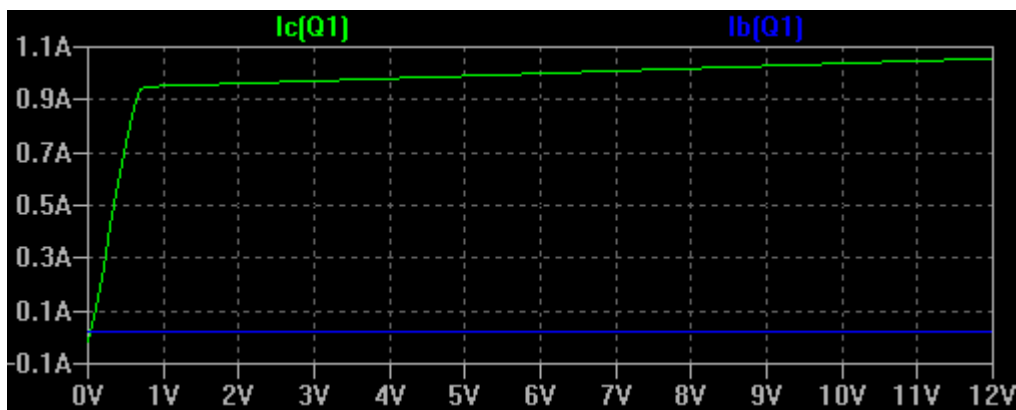
Configurazione ad emettitore comune.

Rappresenta esattamente lo schema visto all'inizio e che riproponiamo qui con il bjt npn, il generatore di corrente collegato alla base ed il generatore di tensione collegato al collettore. Notiamo che entrambi sono collegati all'emettitore del bjt.

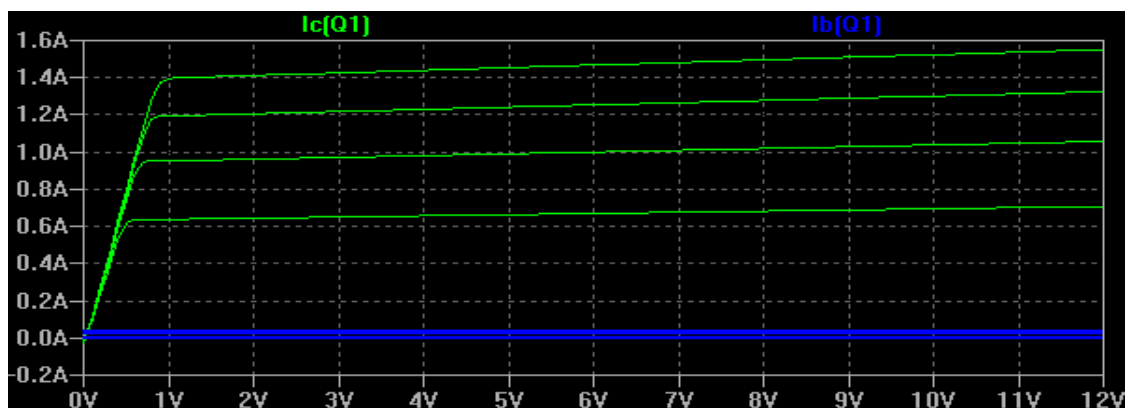
Cominciamo subito con un esempio pratico. Nel primo tracciato proviamo ad inserire un valore statico di 20mA al generatore di corrente (linea blu) mentre al generatore di tensione applichiamo un voltaggio crescente da 0 a 12V. Nel grafico vediamo rappresentate in verde la corrente al collettore, in blu quella fissa di 20mA alla base, all'aumentare della tensione al generatore, sull'asse X.



Alla base in realtà non serviva fare alcun grafico in quanto il valore l'abbiamo stabilito a priori e sappiamo essere di 20mA lungo tutta la simulazione. Invece al collettore cosa succede? Come detto applicando una corrente alla base la resistenza collettore-emettitore cala rapidamente per cui la corrente che lo attraversa cresce molto rapidamente (curva verde). Vediamo che la curva si impenna in modo molto rapido, sino a circa 950mA e poi si stabilizza crescendo molto lentamente (effetto Early) in maniera lineare con l'aumento della tensione erogata. Questo aumento è comunque nettamente meno importante dell'incremento iniziale tant'è che per semplificazione troverete molti grafici in rete che mostrano una linea retta orizzontale (equazioni di Ebers-Moll), ma sinceramente a me questa rappresentazione ha creato non poca confusione in quanto non riuscivo a replicare i grafici con lo SC.



Cosa succede se modifichiamo la corrente alla base? Secondo quanto detto aumentandola ci sarà un maggior passaggio di corrente anche attraverso il collettore-emettitore (CE), mentre riducendola ci dovrebbe essere una consensuale riduzione.



Nel secondo grafico abbiamo impostato alla base una corrente di 10, 20, 30 e 40mA. Vediamo in modo molto chiaro che all'aumentare della corrente alla base aumenta quella che passa fra emettitore e collettore (I_{CE}), ma in maniera esponenzialmente aumentata, infatti a piccole variazioni della corrente alla base corrispondono grosse variazioni della corrente al collettore. Il rapporto delle correnti fra collettore e base si chiama β (beta o Hfe) ed è una caratteristica fondamentale di ogni bjt.

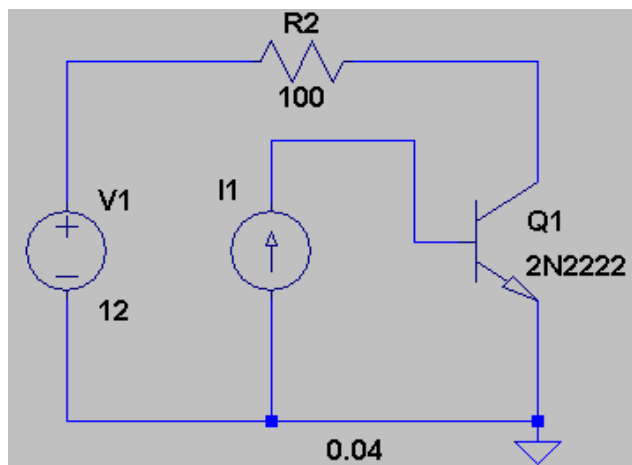
$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

Beta rappresenta perciò il cosiddetto “**coefficiente di amplificazione del transistor**”. E'

detto così proprio perché fornendo una corrente piccola alla base ne restituisce una grande all'emettitore; ovviamente la corrente non viene creata dal nulla ma viene prelevata dall'alimentazione fornita al collettore. Visto che da principianti potrebbe esserci oscura l'utilità di questo processo facciamo un semplice esempio. Potremmo avere da una parte un piccolo dispositivo, magari funzionante a 5V, a celle solari o a batteria, che tramite un bjt permette di far scattare un relè alimentato a 12V da una fonte esterna che a sua volta accende o spegne una lampadina a 220V. Questo è uno scenario tutt'altro che ipotetico visto che è utilizzato in tantissime applicazioni reali, infatti ad un piccolo integrato in grado di erogare piccole correnti, possiamo collegare un bjt per pilotare il relè che assorbe correnti maggiori, ed il gioco è fatto: il piccolo integrato sarà in grado di accendere una luce a 220V.

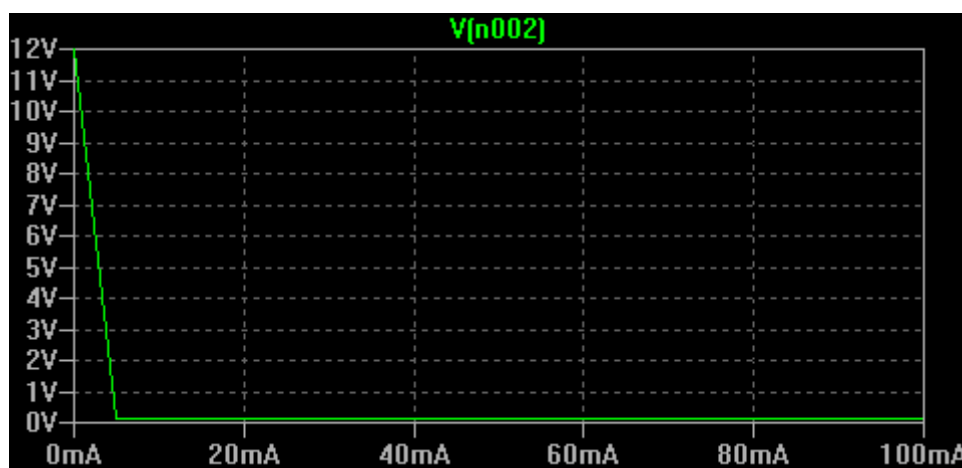
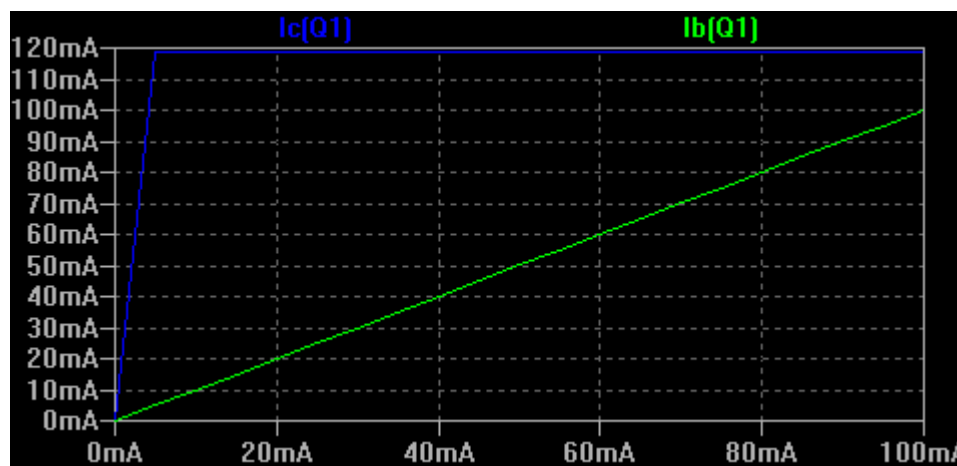
Ora andiamo avanti. Notiamo dal grafico di prima che all'aumentare della corrente alla base, le “linee verdi” tendono ad avvicinarsi l'una all'altra, ciò significa che il fattore di amplificazione β si riduce leggermente con l'aumentare della corrente applicata alla base. E' inoltre importante sapere che il fattore β può variare notevolmente in base alla temperatura di esercizio ma anche fra un transistor e l'altro anche se del medesimo tipo per cui nel campo reale quando si utilizza un transistor con β teorico di 100 occorre progettare il circuito per variazioni di 3 grandezze, ossia da 50 a 200.

E' chiaro che il parametro β è valido solamente nell'area rettilinea delle curve viste sopra, detta anche “**regione di saturazione**”. Quando invece non abbiamo corrente alla base si parla di regione di “**cut-off**” (interdizione). La regione che si trova fra le due è detta “**zona attiva**” (conduzione).



La configurazione ad emettitore comune può essere utilizzata non solo per il controllo di una corrente ma anche per il controllo di una tensione. Per far ciò è sufficiente apporre una resistenza in serie prima del collettore, e prelevare l'alimentazione ai due capi del bjt. Nell'esempio a lato ho inserito una resistenza da 100Ω. A questo punto la corrente che raggiunge il collettore sarà limitata dalla resistenza. Essendo $I=V/R$ e quindi $12/100$ avremo una corrente massima di 120mA. Quindi, all'aumentare della corrente alla base, al collettore la corrente potrà aumentare come

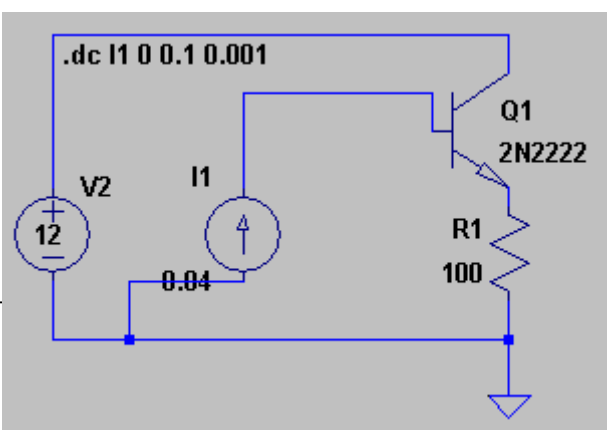
visto sinora, ma sino alla soglia di 120mA. Qui sotto vediamo il grafico ottenuto impostando 12V fissi al generatore di tensione e un valore di corrente crescente da 0 a 100mA alla base (asse X). Come vediamo la corrente misurata al collettore aumenta sino alla soglia di 120mA, anche se la corrente alla base (linea verde) continua a crescere. La grossa differenza rispetto a prima è la variazione della tensione. Nell'esempio precedente essa non variava e nell'esempio visto restava fissa a 12V. Ora invece la differenza di potenziale dai 12V iniziali decresce con l'aumentare della corrente e diventa quasi nullo al raggiungimento dei fatidici 120mA (vedi grafico successivo). Con questo stratagemma abbiamo utilizzato il BJT per controllare una differenza di potenziale anziché una corrente. Si noti però che la relazione fra corrente alla base e differenza di potenziale è **inversa**, infatti all'aumentare della corrente alla base, la differenza di potenziale diminuisce.



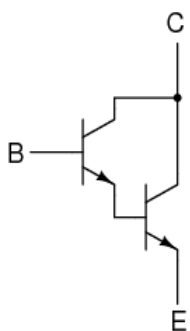
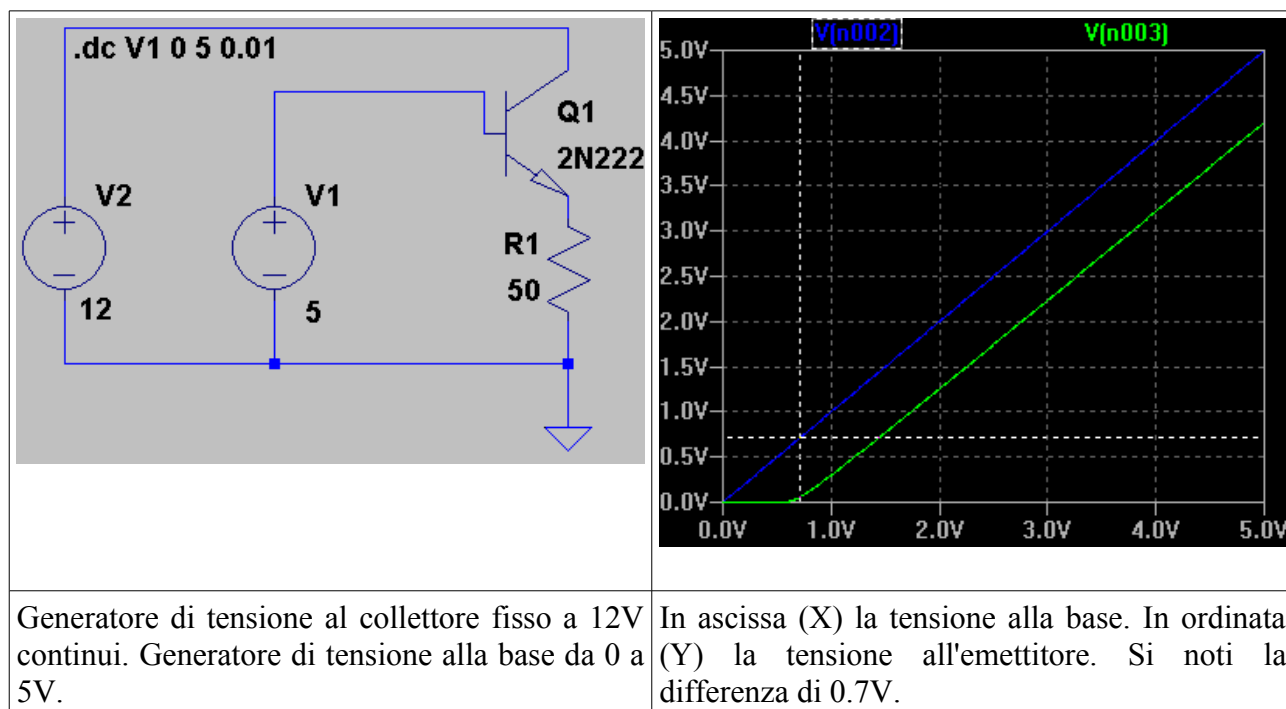
Configurazione a collettore comune (*inseguitore di tensione (voltage follower o emitter follower)*)

Per ottenere la configurazione a collettore comune dobbiamo porre una resistenza in serie all'emettitore. In questo modo le correnti provenienti da base ed emettitore dovranno confluire insieme attraverso la resistenza al collettore. In questa configurazione il bjt permette di avere la massima amplificazione della corrente ed è pari a $\beta+1$.

A differenza della configurazione precedente la relazione fra corrente alla base e tensione all'uscita è diretta e non inversa, per cui all'aumentare della corrente alla base abbiamo un aumento anche della tensione in uscita. Inoltre se osserviamo la tensione in ingresso e in uscita, noteremo che la differenza è minima ed è di circa 0.7V, ossia la tensione di innescò della giunzione PN (come visto per i diodi). Tale valore tende a ridursi leggermente con l'aumento della resistenza di carico (quella posta in serie all'emettitore). Abbiamo quindi confermato che l'amplificazione di tensione è molto scarso con questo tipo di configurazione. Si noti, al fine di non generare confusione, che essendo il collettore comune, i parametri di amplificazione saranno cercati



nell'accoppiata base emettitore, come nel caso precedente dove era l'emettitore ad essere comune, l'amplificazione riguardava l'accoppiata collettore-emettitore.



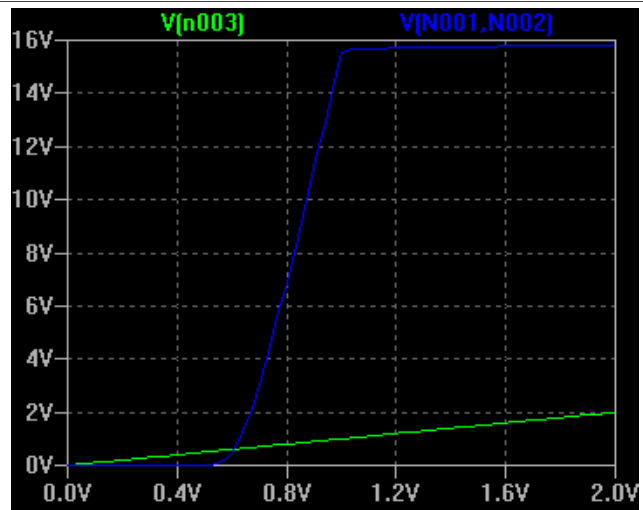
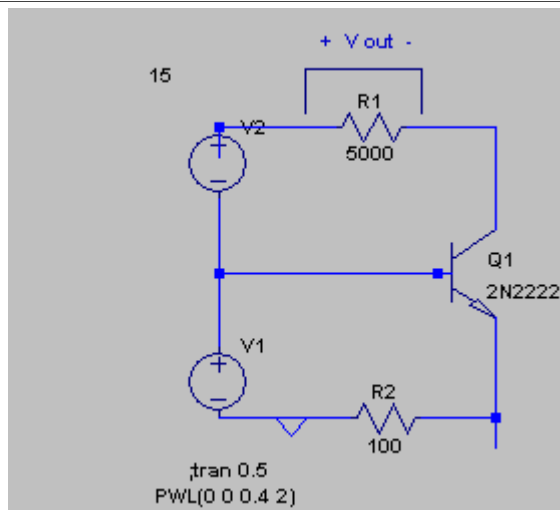
Ci sono casi in cui il singolo bjt non riesce a fornire la necessaria amplificazione di corrente, per cui esiste un tipico utilizzo del BJT con configurazione a collettore comune detta coppia di **Darlington** che prevede l'utilizzo in serie di due bjt in cui l'emettitore del primo si collega alla base del secondo nel seguente modo. Chiaramente in questa configurazione la caduta di tensione sarà di circa 1.4V. L'amplificazione sarà data dal prodotto delle singole amplificazioni per cui:

$$\beta_t = (\beta_1 + 1) + (\beta_2 + 1)$$

Configurazione a base comune.

Delle tre questa è la configurazione meno utilizzata. La base è comune al circuito di ingresso e quello di uscita per cui l'amplificazione sarà da cercarsi fra collettore ed emettitore. Dal grafico che segue vediamo che con un piccolo incremento della tensione alla base otteniamo, a partire da circa 0.55-0.6V un'impennata della tensione in uscita che giunge quasi alla massima amplificazione a circa 1V per cui con una variazione di circa soli 0.4-0.5 V alla base, portiamo l'uscita da 0 a 16V con un grosso guadagno di tensione. Avevamo infatti riportato nello schema iniziale che questo tipo di configurazione è quello con il massimo coefficiente di amplificazione di tensione.

Il rapporto fra corrente al collettore ed emettitore è detto anche **alfa (α)** ed è minore di uno.

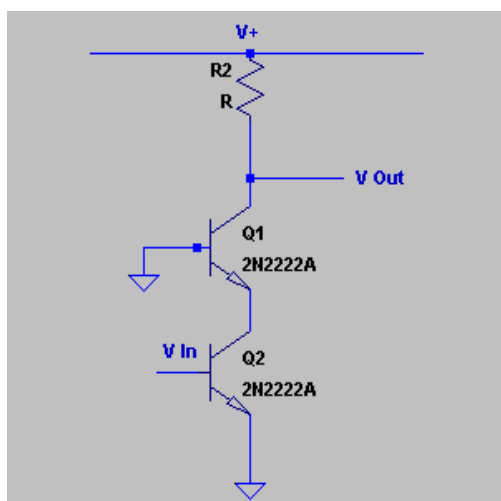


Si noti che ho evidenziato con Vout il punto di misurazione in uscita. Su V2 ho fissato una tensione di 15V mentre su V1 c'è una tensione che da 0 arriva sino a 2V.

Sull'asse X la tensione applicata alla base. Sull'asse Y quella prelevata su "V out"

Configurazione cascode

Non è nominata in precedenza in quanto è l'unione di due delle configurazioni che abbiamo visto sinora, ossia un emettitore comune accoppiato ad una base comune. Più precisamente il collettore del pnp ad emettitore comune, è collegato all'emettitore del pnp configurato in base comune.



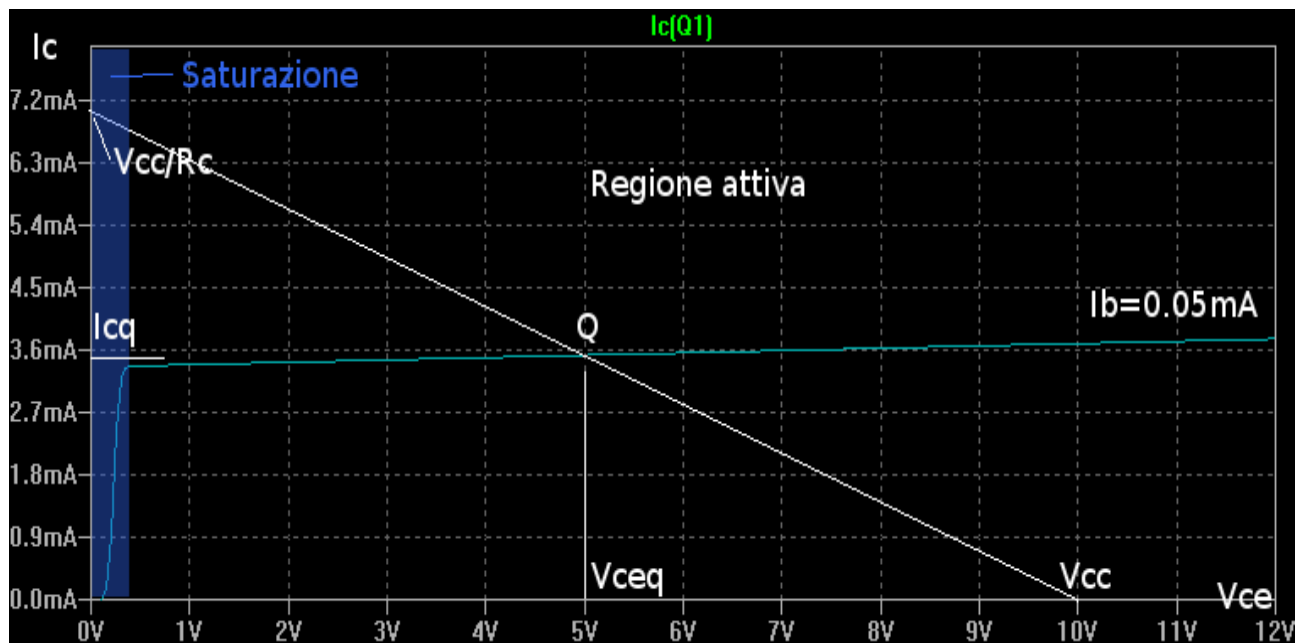
Configurazione Cascode

...ma per ora non ho capito un fico secco....

Polarizzazione del bjt

Sinora abbiamo visto come funzionano i bjt, ma non abbiamo ancora visto in modo approfondito come integrarli nel resto del circuito. I prossimi grafici sono stati fatti sulla base di un BJT 2N2369 della Philips. Come primo passo vediamo come polarizzare un bjt ad emettitore comune. Per farlo

dobbiamo decidere in che parte delle curve caratteristiche deve lavorare il nostro BJT. Questo punto prende il nome di “punto operativo (Q)”. Prendiamo ad esempio un circuito che lavora a 10V. E' buona norma, vista la variabilità di funzionamento di cui abbiamo già accennato, far funzionare il bjt in un punto intermedio quindi, nell'esempio, se la nostra tensione (V_{cc}) è di 10V, applicheremo una tensione al collettore di 5V (V_{ce}). La corrente al collettore dipenderà dallo scopo per cui stiamo utilizzando il bjt, che arbitrariamente impostiamo a 3,55mA. Assumiamo un valore beta del bjt di 71. Qui sotto possiamo vedere in forma grafica la curva caratteristica del BJT con la selezione del punto Q. Tracciando la retta che esce con i dati discussi sopra, otteniamo quella che è la cosiddetta “retta di carico” che incrocia gli assi X ed Y rispettivamente alla massima tensione e corrente applicabili al collettore in base alle condizioni operative scelte. La retta di carico è quella su cui “scorrerà” il punto Q se applichiamo una corrente alternata alla base.



Come facciamo a fissare il punto Q per far funzionare il BJT come desideriamo? Guardate il prossimo schema. Si tratta di applicare due resistenze che a loro volta termineranno al collettore ed alla base. Sulla destra dello schema ci sono le formule che regolano il tutto.

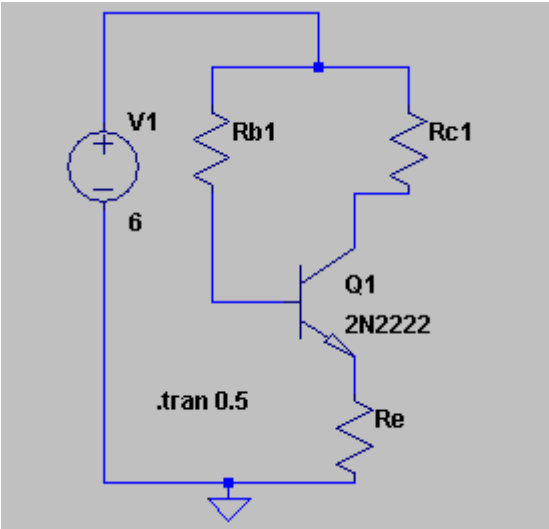
| | |
|--|---|
| | <p>Nei grafico a lato vediamo il circuito preso ad esempio. Qui sotto sono riportate le formule necessarie per i calcoli.</p> $\beta = I_c / I_b$ $V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} \quad (V_{be} = 0,7V)$ $V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ce}$ |
|--|---|

Il nostro scopo è perciò calibrare le resistenze in modo da operare nel punto Q.

Dato che abbiamo fissato la corrente al collettore nel punto Q (I_{cq}) pari a 3,55mA, grazie alla formula $\beta = I_c / I_b$ possiamo calcolare la corrente alla base che sarà di 50μA. Calcolata la corrente alla base possiamo calcolare la relativa resistenza (R_b) grazie alla formula $V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be}$ ($10V = R_b \cdot 50\mu A + 0,7$). Otteniamo un valore di 186kΩ. Ora con l'ultima formula ($V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ce}$) possiamo calcolare anche R_c ($10V = R_c \cdot 3,35mA + 5V$) ed otteniamo 1.4kΩ.

Il sistema di polarizzazione appena visto è il più semplice, ma ha un grosso difetto. Dato che il bjt dissipa una certa quantità di potenza, variabile in base al punto di funzionamento, esso si riscalda. Come già detto in questo testo, l'aumento di temperatura aumenta il passaggio di corrente al collettore (I_c) che a sua volta aumenta la dissipazione di potenza ed il riscaldamento con ulteriore incremento della I_c in un circolo vizioso che prende il nome di “**fuga termica**” che può portare alla distruzione del bjt stesso. Per questo motivo lo schema appena visto benché molto utile per fare i primi calcoli e capire i passi successivi, non trova una reale applicazione pratica. Dobbiamo trovare un sistema che eviti questo problema.

Per far ciò lo è sufficiente aggiungere una resistenza in serie all'emettitore e le formule caratteristiche diventeranno:

| | |
|--|--|
|  | <p>Formule per il calcolo del circuito qui vicino.</p> $\beta = I_c / I_b$ $V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} + R_e \cdot I_e$ $V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ce} + R_e \cdot I_e$ <p>Semplificando, con introduzione di alcune approssimazioni ($I_e \approx I_c$), abbiamo che:</p> $V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} + R_e \cdot I_c$ $V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ce} + R_e \cdot I_c$ $I_b = (V_{cc} - V_{be} - R_e \cdot I_c) / R_b$ |
|--|--|

Se prendiamo le formule qui sopra, vediamo che
$$I_b = \frac{V_{cc} - V_{be} - R_e \cdot I_c}{R_b}$$

La cosa importante da notare è che essendo V_{cc} e V_{be} costanti, se la temperatura del bjt aumenta, anche I_c incrementa, esattamente come nell'esempio precedente. Ma ora l'incremento di I_c comporta una conseguente riduzione di I_b che a sua volta ridurrà la I_c andando perciò ad auto-stabilizzare il circuito. Questo circuito è chiamato infatti “di **auto-polarizzazione**”

Ora ripetiamo i calcoli sul medesimo esempio e vediamo come cambiano i valori delle resistenze con la nuova configurazione. Ricordiamo i valori del nostro esperimento che sono:

$$V_{ceq} = 5V - V_{cc} = 10V - \beta = 71 - I_{cq} = 3.55mA$$

Per prima cosa con $\beta = I_c / I_b$ ci ricaviamo I_b che è $3.55/71 = 50\mu A$, ossia lo stesso valore dell'esempio precedente, cosa piuttosto ovvia visto che per mantenere lo stesso punto operativo dobbiamo erogare la stessa corrente alla base.

Ora calcoliamo V_{re} , ossia la tensione che deve giungere alla resistenza R_e , che sarà pari a $V_{cc}/10$. Da quel che ho trovato in giro, pare che questo valore permetta di mantenere stabile il punto di lavoro, ma nel momento in cui scrivo non ho trovato spiegazioni in merito.

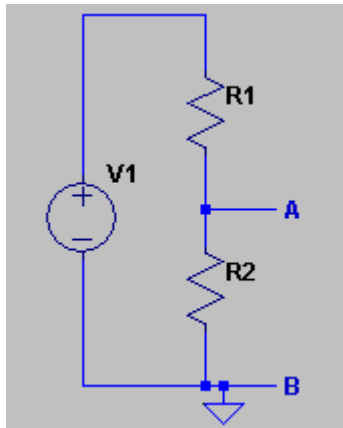
$$V_{re} = V_{cc}/10 \text{ perciò } V_{re} = 1V$$

Essendo $V_{re} = R_e \cdot I_e$ (legge di Ohm), $R_e = V_{re} / I_e$. Ricordando l'approssimazione $I_e \approx I_c$, sarà $R_e = V_{re} / I_c$ per cui $R_e = 1V / 3.55mA = \mathbf{282\Omega (R_e)}$

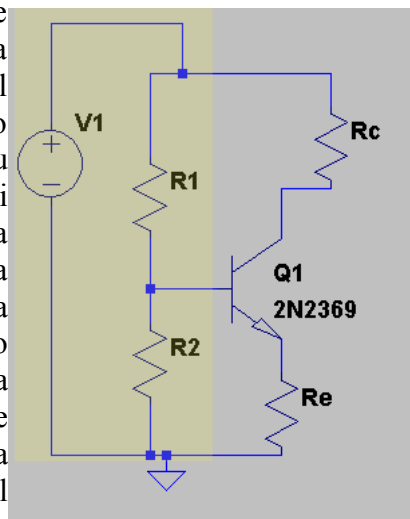
$$\text{Essendo } V_{cc} = R_b \cdot I_b + V_{be} + R_e \cdot I_c \quad 10V = R_b \cdot 50\mu A + 0.7 + 282\Omega \cdot 3.55mA = \mathbf{166k\Omega (R_b)}.$$

$$\text{Essendo } V_{rc} = R_c \cdot I_c = V_{cc} - V_{ce} - V_{re} = 10 - 5 - 1 \text{ abbiamo } R_c \cdot I_c = 4 \text{ e quindi } R_c = \mathbf{1127\Omega (R_c)}.$$

L'ultima configurazione, la più utilizzata, prevede un partitore resistivo alla base per cui lo schema diventa come quello qui a lato. Si noti che al posto della resistenza R_b si è inserito il ripartitore composto da R_1 ed R_2 . Si noti che nello schema a lato ho risaltato in giallo la porzione sinistra dello schema in quanto su di essa ora andiamo ad applicare il teorema di Thevenin, dove i terminali di riferimento saranno la base e l'uscita dalla resistenza



R_e . Di fatto la porzione di circuito da ricalcolare è quella dello schema qui a sinistra, ed i terminali di riferimento sono quelli segnati con A e B. Guarda caso lo schema da risolvere per trovare V_{th} e R_{th} , ossia la tensione e resistenza dell'equivalente di Thevenin, è del tutto identico a quello usato come esempio nella spiegazione del teorema di Thevenin qualche capitolo più indietro per cui una ripassata veloce ci permetterà di comprendere senza problemi i passi successivi. Le equazioni che descrivono la tensione e la resistenza dell'equivalente di Thevenin saranno:

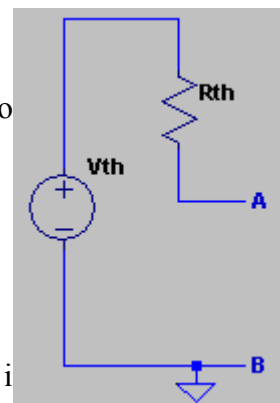


$$R_{th} = R_1 // R_2 \rightarrow \frac{1}{R_{TH}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \rightarrow \frac{1}{R_{TH}} = \frac{(R_1 + R_2)}{(R_1 * R_2)} \rightarrow \frac{1}{R_{TH}} = \frac{1}{R_1} * \left[\frac{(R_2 + R_1)}{R_2} \right]$$

V_{th} , grazie alla formula del partitore di tensione sarà:

$$V_{TH} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \text{ che guarda caso è uguale alla porzione che abbiamo isolato nell'equazione precedente.}$$

$$\text{Ne deriva che } R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{TH}} * R_{TH}$$



Ora abbiamo tutto ciò che ci serve per fare i nostri calcoli. Ricordiamo i valori di base del nostro circuito che erano:

$$V_{CC} = 10V \text{ (nello schema indicato come V1)} - \beta = 71 - I_{CQ} = 3.55mA$$

Come negli esempi precedenti utilizziamo un V_{ceq} (tensione collettore-emettitore del punto Q) pari a 5V. Tale valore non è scelto a caso ma è semplicemente $V_{CC}/2$ valore che massimizza la lontananza del punto Q dalle zone di saturazione e interdizione (guardate la retta bianca del grafico in cui abbiamo disegnato il punto Q sulla curva caratteristica del transistor).

$$\text{Perciò } V_{ceq} = 5V$$

Allo stesso modo poniamo V_{re} (caduta di tensione attraverso il resistore posto in serie all'emettitore) pari a un decimo (1/10) di V_{CC} . Anche in questo caso il valore non è casuale, ma riassumendo abbiamo una V_{re} di 1V.

Secondo la legge delle maglie di Kirchhoff abbiamo $V_{CC} - V_{rc} - V_{ce} - V_{re} = 0$ per cui $V_{rc} = V_{CC} - V_{ce} - V_{re} \rightarrow V_{rc} = 10 - 5 - 1 = 4V$. Avendo sia I_c ($I_{CQ} = 3.55mA$) che la V_{rc} appena calcolata, possiamo calcolarci R_c che corrisponde a $4/3.55 = 1126,76\Omega$.

Essendo I_e e I_c , ossia le correnti al collettore e all'emettitore, pressoché uguali in quanto il contributo all'emettitore di I_b (I_{th}) è trascurabile, per la legge di Ohm possiamo dire che $R_e = V_{re}/I_c$ e quindi $R_e = 1/3.55 = 281,69\Omega$.

A questo punto stabiliamo che $R_{th} = R_e * 9$, ossia **2535,21Ω**. Ora vi chiederete “perché per 9?”. Il

nove deriva dal cosiddetto fattore di stabilità, ossia quella regola che correla R_b ed R_e per ottenere la stabilità della polarizzazione. Il fattore di stabilità S è calcolato come $1+(R_b/R_e)$ e deve essere compreso fra 5 e 20. Nel nostro esempio sostituendo $9R_e$ nella formula, otteniamo un valore di 10.

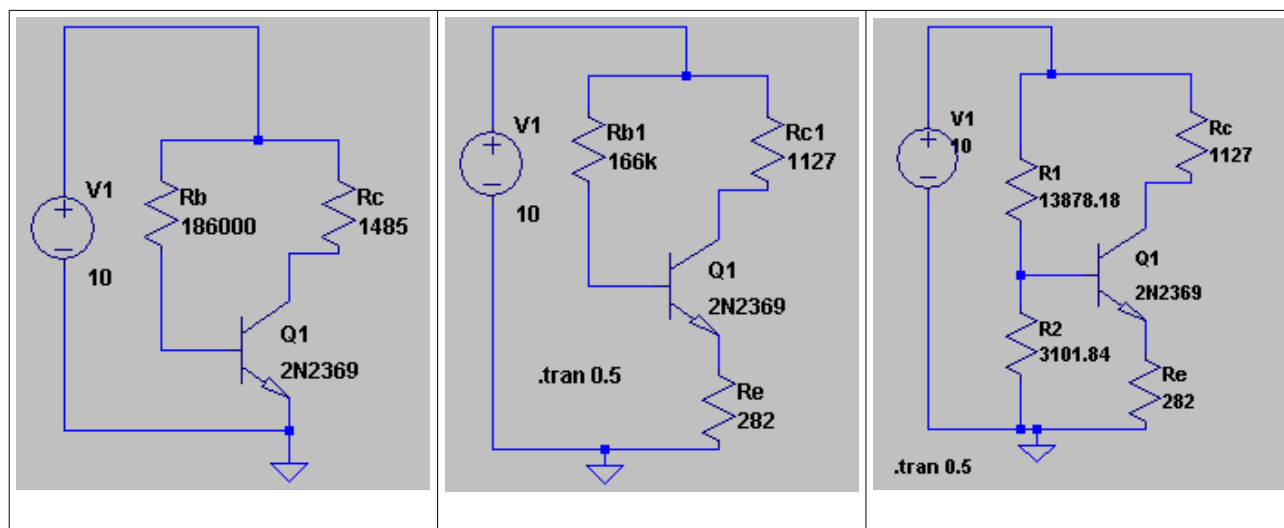
Avendo sia I_c (stabilito da noi) e β , possiamo calcolarci I_b che sarà $3.55/71=0,05mA$ (I_{th} visto che stiamo operando sull'equivalente di Thevenin). Ora abbiamo tutti i dati per operare sulla maglia in ingresso del nostro equivalente di Thevenin, per cui $V_{th}=R_{th}*I_{th}+V_{be}+R_e*I_c$ (ricorda che abbiamo approssimato I_c a I_e). Perciò $V_{th}=2535,21\Omega*0,05mA+0,7+281,69\Omega*3,55mA=1,827V$

Ora che abbiamo calcolato tutti i dati dell'equivalente di Thevenin del nostro circuito dobbiamo fare l'ultimo passo e passare dalla V_{th} e R_{th} al calcolo di R_1 e R_2 del circuito originario. Per farlo usiamo le formule calcolate prima:

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{TH}} * R_{TH} \rightarrow R_1 = 10 * 2535,21\Omega / 1,827V = 13,876\Omega.$$

Ora possiamo calcolare anche R_2 , per cui da $\frac{1}{R_{TH}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ otteniamo $R_2=3101,84\Omega$.

La conclusione è che i tre circuiti riproposti nella tabellina riassuntiva qui sotto presentano correnti e tensioni ai capi del bjt che in condizioni statiche sono quasi del tutto sovrapponibili.



Usiamo il Bjt come interruttore.

Tutto questa lunghissima premessa ha trattato essenzialmente l'uso del bjt nell'amplificazione di segnali in corrente continua. Si noti che non è stato quasi nemmeno accennato il più complesso caso di amplificazione di segnali alternati ed abbiamo visto solo l'uso del bjt come amplificatore ma non come interruttore. Avevamo infatti accennato che un bjt può essere anche usato come interruttore per carichi maggiori a quello sorgente, facendolo funzionare alternativamente in zona di interdizione e saturazione in base alle necessità. Ora facciamo un esempio pratico.

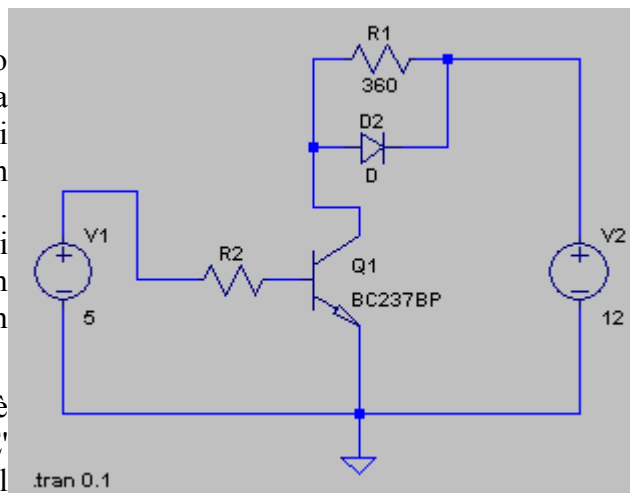
Facciamo conto di avere una "fonte di alimentazione" in grado di erogare 5V ad un massimo di 40mA. Non ha importanza se chi fornisce questa alimentazione è un circuito analogico, un integrato, o altro, ma non a caso ho indicato i dati di corrente e tensione di una famosa scheda nota col nome di Arduino (<http://www.arduino.cc/>) che è molto conosciuta fra gli appassionati. Questa scheda permette di acquisire input e comandare output sia analogici che digitali, il tutto programmando il processore che la controlla con il linguaggio C da PC, in modo molto semplice.

Ora, facciamo conto di voler pilotare un relè a 12V per comandare carichi a 220V, come lampade o altro. In casa ho ad esempio dei relè F31-51 della "italiana relè" che ho acquistato tempo fa' ma mai utilizzati e rimasti nel dimenticatoio. La domanda è: come li collego?

Tanto per cominciare partiamo dall'uscita di Arduino che ha, come detto, una tensione di 5V e una corrente massima di 40mA. Come per tutti i circuiti integrati, è opportuno usare un fattore di sicurezza 2, ciò significa che se la corrente massima è di 40mA, dobbiamo cercare di far funzionare la porta a non più di 20mA per avere dei margini di sicurezza in caso di sbalzi e non sovraccaricare l'integrato stesso che potrebbe surriscaldarsi.

Poi passiamo al relè (relay in inglese). Nel mio caso vedo già sul sito le caratteristiche della bobina, infatti mi viene indicata una resistenza di 360ohm e un assorbimento di 33mA. Nel caso non si riesca a risalire a questi dati, possiamo ricavarli. Sul relè infatti c'è sempre scritto il voltaggio di funzionamento che in questo caso è 12V, con un multimetro possiamo verificare la resistenza e con la legge di Ohm ci ricaviamo l'assorbimento.

Nello schema a lato abbiamo semplificato il relè con un semplice carico resistivo di 360Ohm. E' un'approssimazione, ma più che sufficiente per il tipo di calcoli che stiamo andando ad eseguire. Si noti il diodo per la riduzione del kickback induttivo.



Ora abbiamo i dati dell'uscita di Arduino, i dati del relè, ci manca solamente la scelta del transistor e la scelta della resistenza in R2, indispensabile per limitare la corrente che entra alla base secondo le nostre esigenze. Il transistor che andiamo a scegliere dovrà lavorare in saturazione con un massimo di 5V/20mA alla base, inoltre dovrà permettere il passaggio CE di almeno 33mA in queste condizioni. Credo che la cosa più difficile sia proprio scegliere un componente in un momento in cui, come ora, non abbiamo la più pallida idea di come fare. Ho cercato diversi circuiti in rete per fare il lavoro che vi sto proponendo e non ne ho trovato uno uguale ad un altro. Come esempio ho preso il BC237. Se andiamo a vedere il datasheet, ossia l schema con tutti i dati tecnici che reperite facilmente su internet, vediamo che supporta un massimo voltaggio collettore emettitore di 45V, decisamente sufficiente per il nostro scopo dove ne servono 12. Il picco di corrente al collettore è di 100mA (e picco di 200) quando il nostro relè ne assorbe 33. Il beta minimo è di 120 (attenzione che nel disegno c'è la versione B che ha un beta minimo di 200).

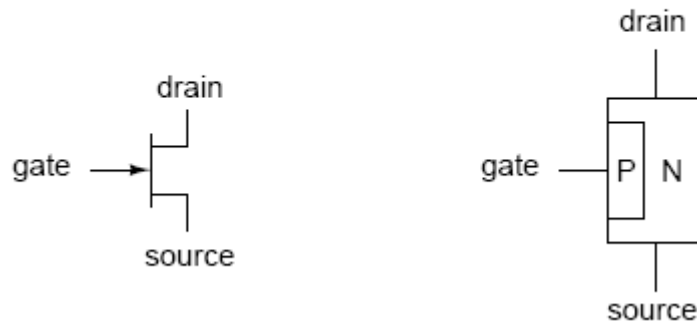
Se il beta minimo è di 120, se $I_c=33\text{mA}$ abbiamo $I_b=0,275\text{mA}$ che però andremo a triplicare in quanto si applica sempre un fattore di sicurezza pari a 2-3 per le variazioni del beta discusse precedentemente in base sia ai lotti di produzione che alla temperatura. Quindi I_b dovrà essere di almeno 0,825mA e non dovrà superare la soglia massima impostata di 20mA.

Per calcolare la resistenza R2 non facciamo altro che applicare la legge di Ohm. Il voltaggio è 5-0,7 ossia 4,3V in quanto dobbiamo tenere in considerazione la caduta di tensione base-emettitore per cui $R_b=4,3\text{V}/0,825\text{mA}=5212\text{Ohm}$. Questo sarà il valore massimo della resistenza che vndo possiamo abbassare sino ad un minimo di 2150hm, valore al quale la corrente alla base raggiungerà i fatidici 20mA che ci siamo imposti come massimo.

JFET: JUNCTION FIELD-EFFECT TRANSISTORS (Transistor ad effetto di campo)

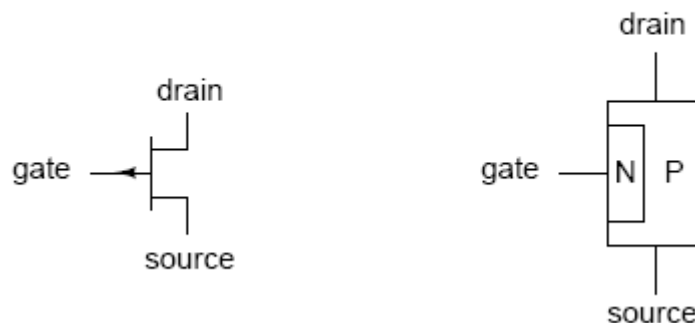
Nel precedente capitolo abbiamo visto i transistor bipolari che in estrema sintesi permettono il controllo di una grossa **corrente** tramite una piccola **corrente** (applicandola alla base). Invece i

N-channel JFET



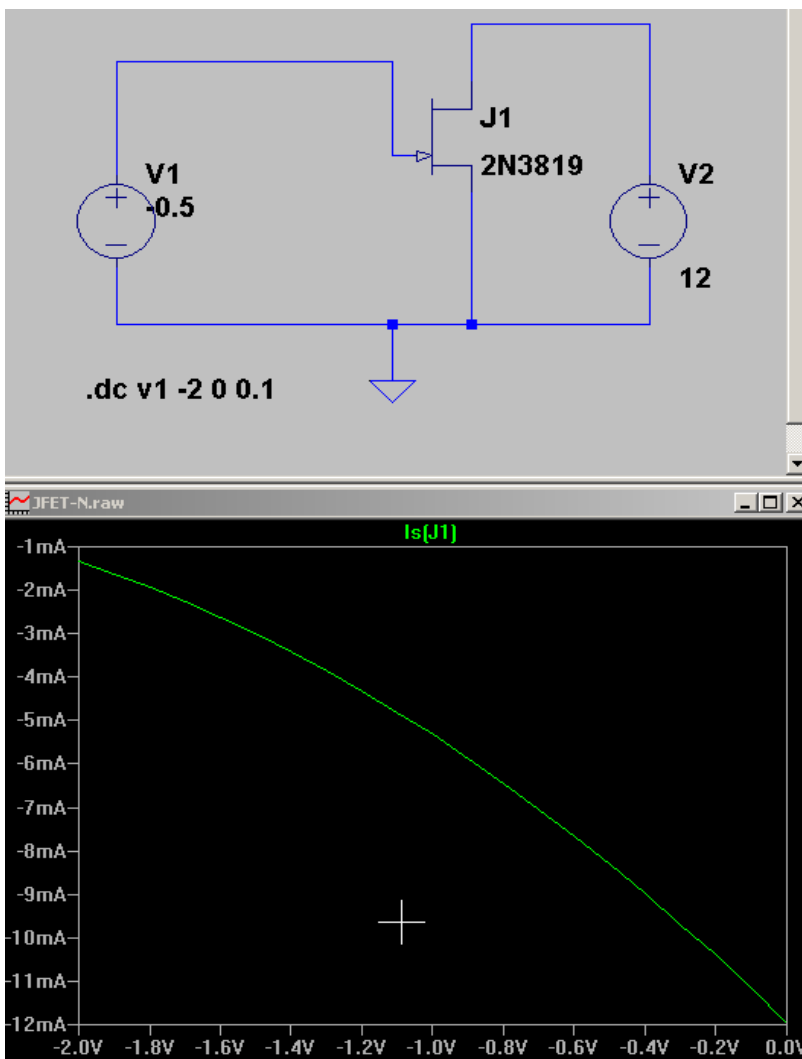
transistor ad effetto di campo, utilizzano un piccolo **voltaggio** per controllare una **corrente**. Come vediamo dalle figure in questa pagina vi sono 2 tipi di JFET, ossia l'N-channel ed il P-channel, quest'ultimo il meno utilizzato. Si noti che entrambi presentano un gate (gate-source) che è deputato al controllo della corrente, ed un drain-source che permette lo scorrimento della corrente in un verso o nell'altro. Si noti che la corrente per passare da drain a source o viceversa, non attraversa nessuna giunzione PN, si tratta infatti di un blocchetto unico di materiale semiconduttore.

P-channel JFET



In assenza di correnti applicate fra gate e source, gli elettroni sono liberi di passare fra drain e source, non per niente si definisce “canale”. Quando invece viene applicata una tensione di polarità inversa rispetto la giunzione PN, fra gate e source, la corrente drain-source viene limitata fino ad interromperla del tutto quando la tensione gate-source è massima. Rispetto al transistor bipolare c'è perciò un comportamento inverso, infatti il JFET allo stato basale è in massima conduzione mentre il bipolare è in stato “off”. Si noti però nuovamente la grossa differenza, ossia il bipolare è comandato da una corrente mentre il JFET da una tensione.

Nota. Nello SC3 troverete i JFET con il nome di njf per quelli n-channel e pjf per quelli p-channel. Si noti inoltre come il simbolo grafico non permetta di distinguere drain da source, ciò dipende dal fatto che si tratta appunto di un “canale” e quindi la corrente passa indistintamente in un senso o nell'altro per cui sono del tutto intercambiabili.



In assenza di tensione a polarità invertita fra gate e source, il JFET permette il passaggio indisturbato degli elettroni fra drain e source, per cui possiamo dire che il “canale” risulta completamente aperto. Aumentando invece la **tensione** V_{gs} (gate-source) determiniamo quello che possiamo immaginare come ad un “restringimento” del canale, per cui la **corrente** che attraversa il canale si riduce progressivamente fino alla chiusura completa, evento per cui il JFET non fa passare alcuna corrente indipendentemente dalla tensione V_{ds} (drain-source) applicata..

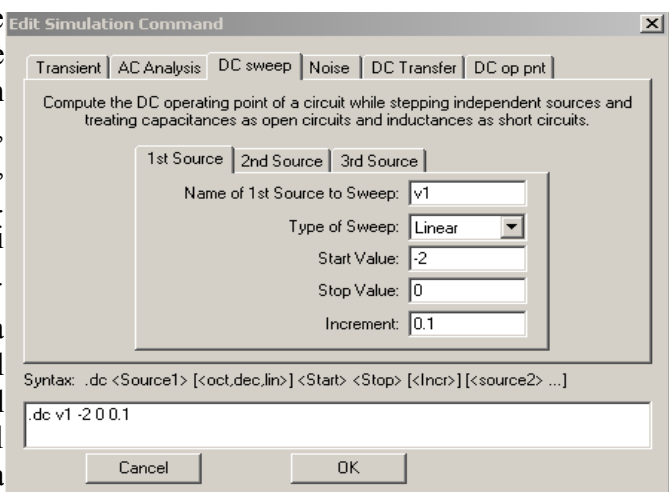
Ora vediamo nel concreto come si comporta il JFET: In questo primo esempio ho utilizzato due generatori distinti, uno collegato al gate, e l'altro al drain. Il source è in comune e va a massa. Si noti che nella simulazione non è stato usato il solito `.trans 0.5` che normalmente vedevamo scritto in basso a sinistra dello schermo, ma abbiamo un criptico `.dc v1 -2 0 0.1`. Per far ciò potete inserire direttamente la

direttiva SPICE così com'è scritta nell'immagine (con il tasto S, ricordate?), oppure andate nel menu Simulate, scegliete il sottomenu “Edit simulation cmd”. Da qui potete scrivere la stringa nello spazio bianco in fondo, oppure inserite i singoli valori numerici negli appositi spazi, come nella figura qui vicino. In questo modo l'analisi non sarà fatta tenendo sull'asse orizzontale il tempo che scorre, ma il voltaggio di alimentazione del gate.

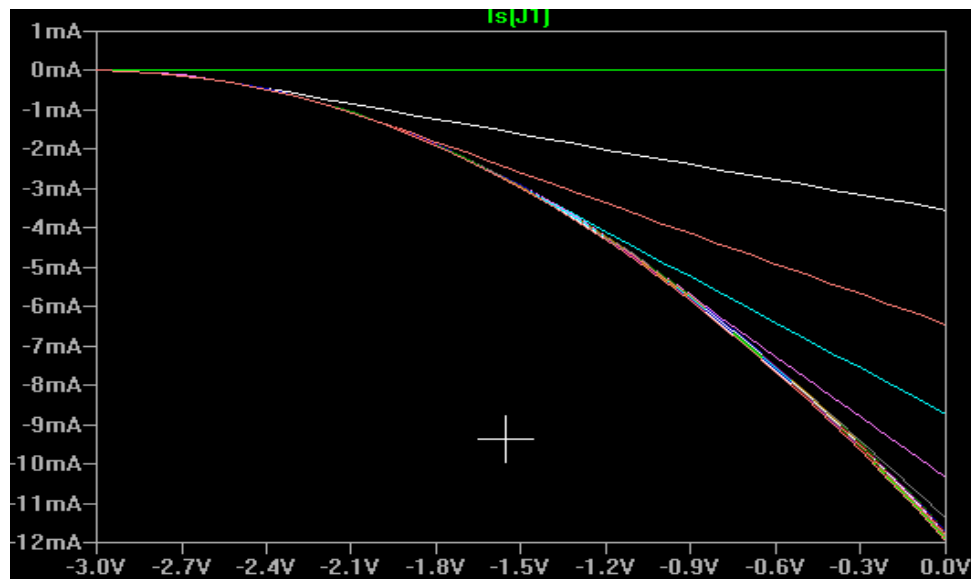
Nel grafico vediamo infatti i valori compresi fra -2 e 0 che corrispondono alle tensioni applicate al gate. La linea verde rappresenta la corrente che “fuoriesce” dal source. Come potete vedere è chiaro che la corrente massima si ha con un voltaggio del gate a 0 (nessuna “restrizione”), mentre questa diminuisce, in modo non lineare, all'aumentare della tensione applicata al gate. Quest'ultima deve essere negativa nei canali di tipo N, mentre sarà positiva per quelli di tipo P.

Ora se proviamo a variare in contemporanea anche il voltaggio del generatore collegato al drain (prossimo grafico) vediamo come il valore visto prima sia un valore soglia oltre il quale non è possibile andare. C'è quindi una soglia di corrente massima che può attraversare

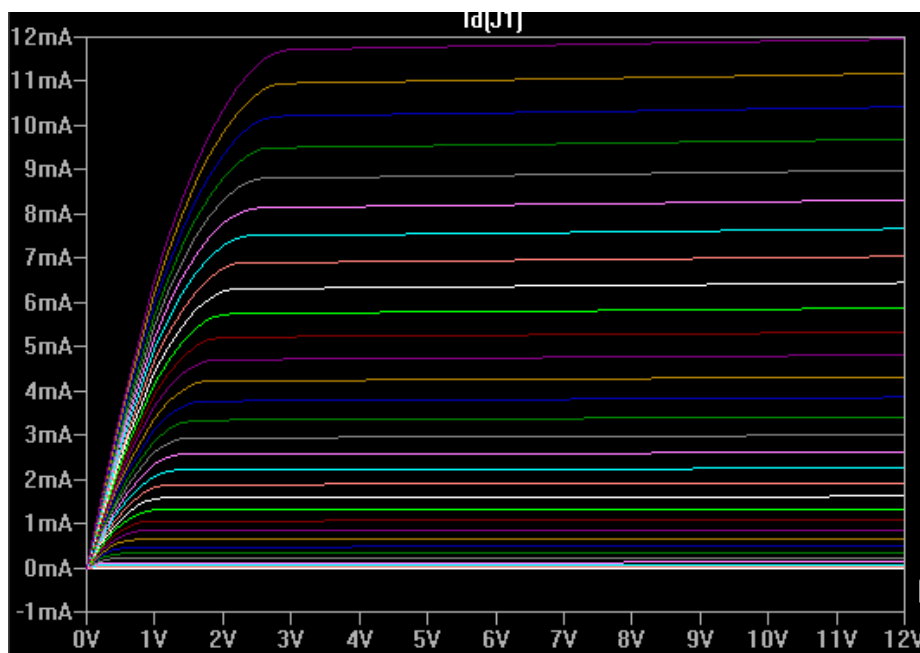
il JFET oltre il quale c'è solo un aumento di dissipazione termica in assenza di un aumento della corrente che passa. Resta valido il fatto che per valori pari a 0 al gate c'è il massimo passaggio di



corrente che poi si riduce all'aumento della tensione al gate fino allo “strozzamento” oltre cui non passa ulteriore corrente aggiuntiva.

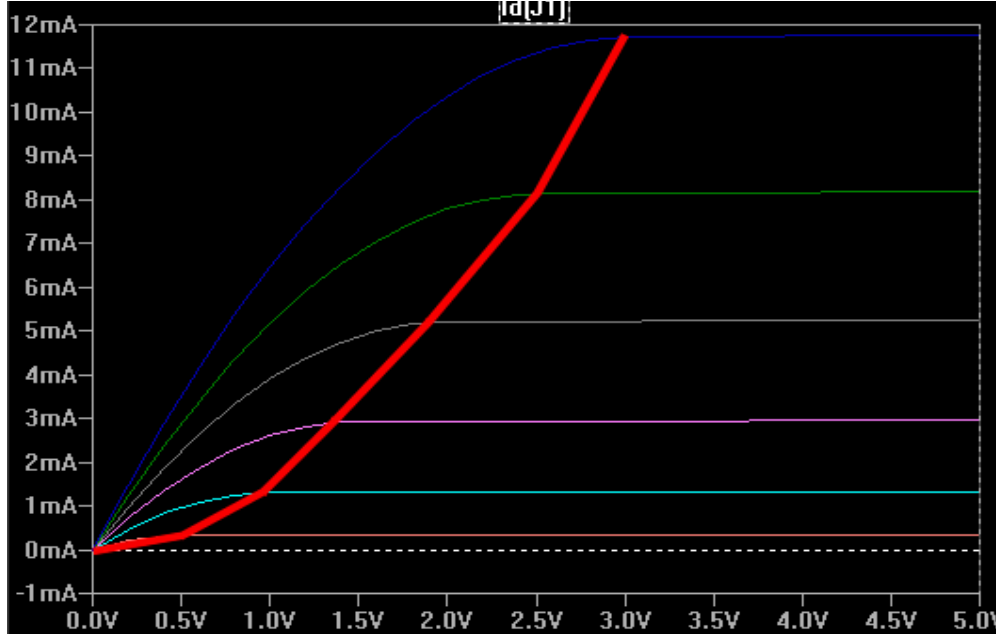


Ora vediamo la stessa cosa da un'altro punto di vista.



Nel grafico qui sopra ho messo in ascissa il valore di tensione del generatore collegato al drain, ogni linea rappresenta una diversa corrente in ingresso (all'uscita è speculare di segno negativo) al JFET al variare della tensione al gate, da -3 a 0V. Chiaramente la linea viola (la prima dall'alto) indica i 0V sul gate, infatti a parità di tensione sul drain, c'è la maggior corrente che passa attraverso il JFET. Dopo una parte di ascesa rapida, la corrente è pressappoco stabile ed aumenta di poco all'aumentare della tensione in ingresso. Tale corrente è detta “pinch off”.

Se per i diversi valori di corrente al source (la varie linee) uniamo i punti di passaggio fra la



componente
“ascendente” e quella
di pitch-off,
otteniamo la
cosiddetta **curva di saturazione** che nel
grafico qui vicino ho
segnato con una
grossa linea rossa. Si
noti che questa linea
è in realtà curva per
cui non c'è una
relazione lineare fra
la tensione applicata
al gate e la corrente
che attraversa il
transistor. Questa è
un'altra importante

differenza del JFET rispetto al BJT. L'area del grafico a sinistra della curva rossa è detta regione “ohmica”, o anche “triode region” (zona di triodo) mentre quella a sinistra è detta “regione di saturazione”.

Nel JFET non è possibile esprimere un coefficiente di amplificazione β come nel BJT in quanto il JFET è controllato da una tensione e non è quindi possibile un rapporto fra correnti. In questo caso esistono valori differenti come la transconduttanza, ma non sono fedeli alla realtà per cui li tralasciamo.

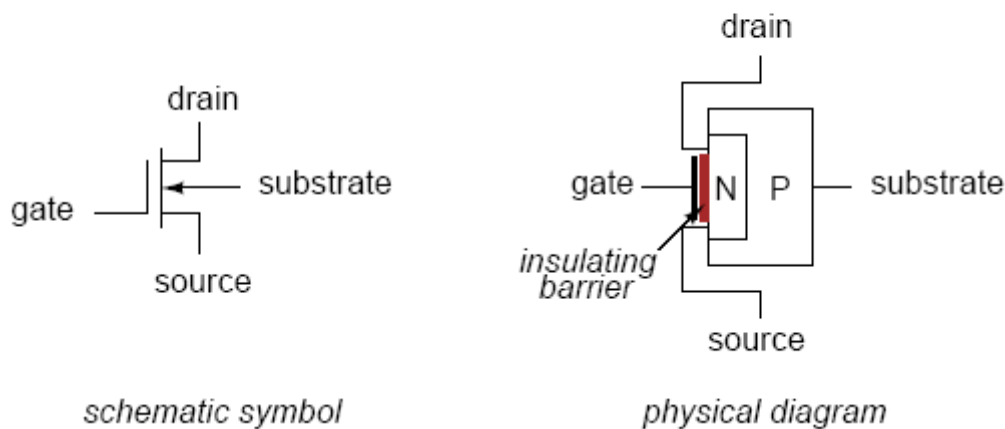
Ora facciamo un esempio puramente teorico per introdurre un'altra caratteristica del JFET: pensiamo ad un banale circuito in cui c'è una sorgente di corrente, una lampadina ed uno switch (interruttore). Se l'interruttore è aperto la lampadina è spenta, se invece è chiuso la lampadina si accende. Ora sostituiamo lo switch con un JFET. Se questo non è alimentato la corrente passa attraverso il JFET per cui la lampadina è accesa. Ora diamo tensione al JFET, questo offre resistenza alla corrente DS (drain-source) e la lampadina si spegne. Togliamo ora l'alimentazione al gate e ci aspetteremmo che la lampadina si riaccenda. Ciò **non avviene** in quanto la giunzione PN ha accumulato una sorta di carica per cui impedisce alla corrente di passare attraverso il canale sinché non si scarica. Per far sì che ciò avvenga istantaneamente sarà necessario applicare una resistenza che permetta di scaricare il “gate” e quindi la giunzione PN a massa.

IGFET: INSULATED GATE FIELD-EFFECT TRANSISTORS (Transistor ad effetto di campo)

La sostanziale differenza fisica rispetto al JFET, sta nel fatto che il gate non è direttamente collegato al corpo del transistor ma è isolato da esso per cui il controllo del canale non avviene per via diretta, ma la giunzione PN è assimilabile ad un condensatore. Oltre ad esserci i IGFET a canale P ed N, ci sono i due tipi “enhancement” (arricchimento) e “depletion” (impoverimento), quest'ultimo è quello che più somiglia ai JFET.

L'IGFET più comunemente viene chiamato **MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

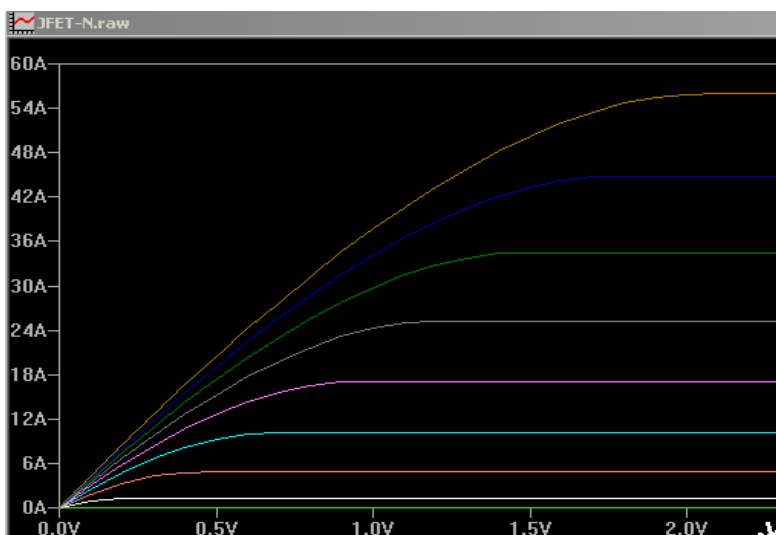
N-channel, D-type IGFET



Ecco la schematizzazione del MOSFET N-channel ad impoverimento.

NB: nell'SC3 trovate i MOSFET sotto il nome di nmos e pmos.

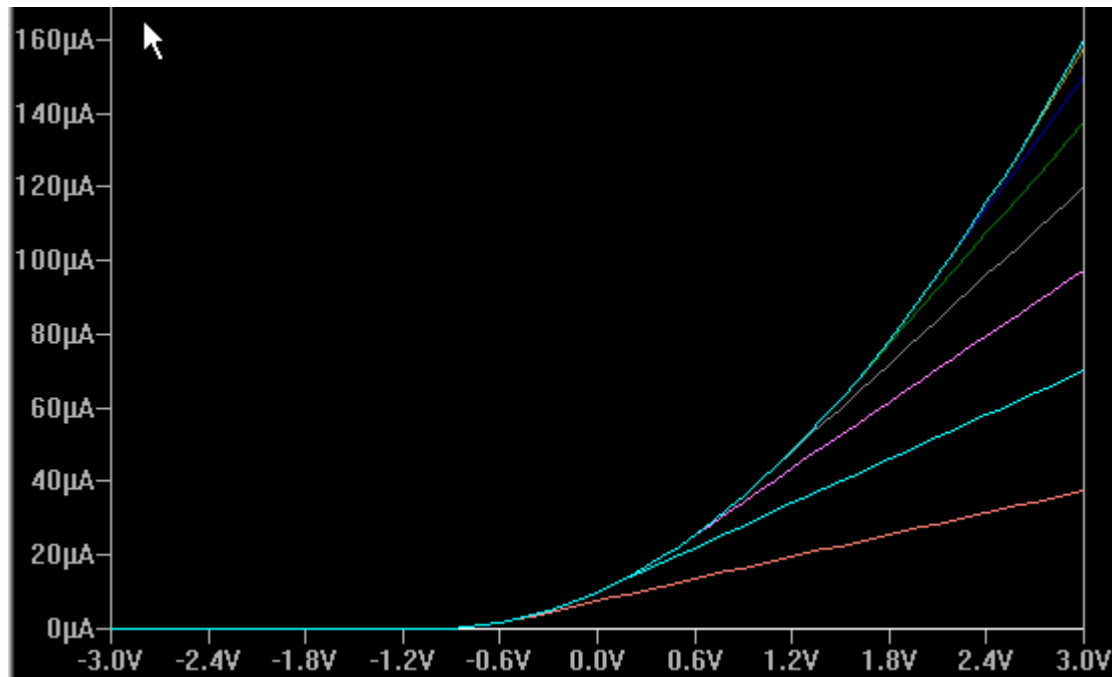
In questo caso il funzionamento è simile al JFET. Senza andare nei dettagli, una differenza sostanziale sta nel fatto che il canale non solo può essere ristretto ma anche allargato rispetto ai “valore basali”. Tale comportamento dipende dalla polarità della tensione applicata al gate oltre che chiaramente dal tipo di canale P o N. E' abbastanza semplice ricordare il tipo di associazione, infatti nei canali di tipo N (quindi drogato negativamente) un voltaggio negativo (nota lo stesso segno) permette un aumento della conduttività del canale stesso e viceversa.



Chiaramente anche il MOSFET conduce quando la tensione al gate è pari a zero, ma conduce meno di quando il canale viene portato nella zona di arricchimento ossia quando viene applicata una tensione che permette un “allargamento” del canale.

Ora ripetiamo un test già eseguito nella valutazione dei JFET: Come vediamo dal prossimo grafico il comportamento del MOSFET è del tutto simile a quello visto prima. In particolare sull'asse orizzontale troviamo la tensione di alimentazione, sull'asse verticale

troviamo la corrente in ingresso e le varie linee rappresentano il comportamento al variare della tensione al gate, in particolare ho scelto il range fra -3 e 3V. I valori di corrente variano moltissimo in base al MOSFET scelto, in particolare devo aver scelto un "MOSFET di potenza" visti i 60A raggiunti, ma basta sceglierne un'altro e vediamo che al posto di 60A troviamo magari 8mA. Allo stesso modo che con i JFET vediamo che la relazione fra la corrente che passa il canale e la tensione del gate non è lineare.



Nel grafico ho messo le tensioni al gate in orizzontale e la corrente in ingresso al MOSFET in verticale. Le diverse linee rappresentano le diverse tensioni di alimentazioni che raggiungono il transistor.

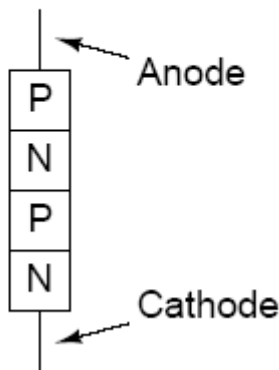
Per ora penso che possa bastare, torneremo sui MOSFET quando ve ne sarà necessità in qualche applicazione pratica. Per ora cambiamo argomento

I Tiristori

I tiristori a differenza dei transistor, presentano una caratteristica peculiare: l'isteresi. Ciò significa che quando lo stato del dispositivo è on, esso tende a restare on, mentre se lo stato è off esso tende a restare off, potremmo dire che “si oppone ai cambiamenti”. Ciò è in contraddizione con i transistor che seguono delle leggi lineari o curve che siano, passando da un punto all'altro in un senso o in quello opposto. Fra i “componenti” che fanno parte di questa famiglia troviamo anche i tubi al neon.

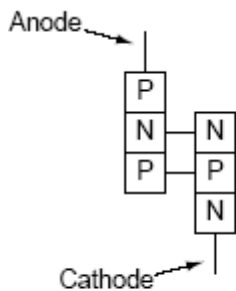
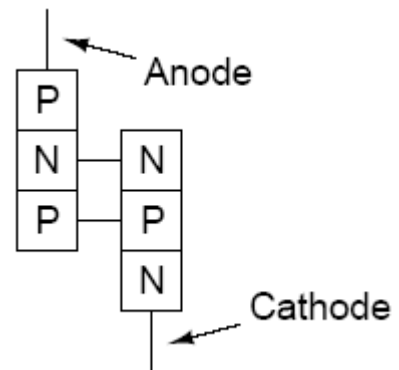
Diodo di Shockley

Shockley, or 4-layer, diode

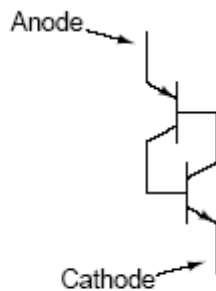


Cominciamo subito col dire che non ha nulla a che vedere con il diodo di Schottky di cui abbiamo già parlato brevemente ma che ricordiamo essere contraddistinto da ridotti tempi di passaggio fra gli stati on ed off. Lo Shockley è composto dall'impilamento di giunzioni PNPN e quindi da 4 strati di materiale semiconduttore.

Se lo scomponiamo, però, ci risulta ben più chiaro come tale componente possa essere in realtà considerato come due transistor PNP ed NPN collegati fra di loro. Un'altra schematizzazione possibile è infatti la seguente che mette appunto in collegamento due transistor differenti:



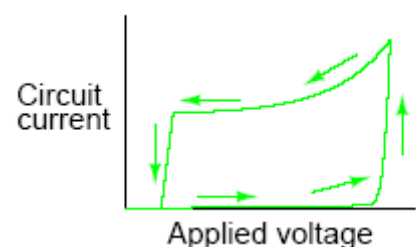
Physical diagram

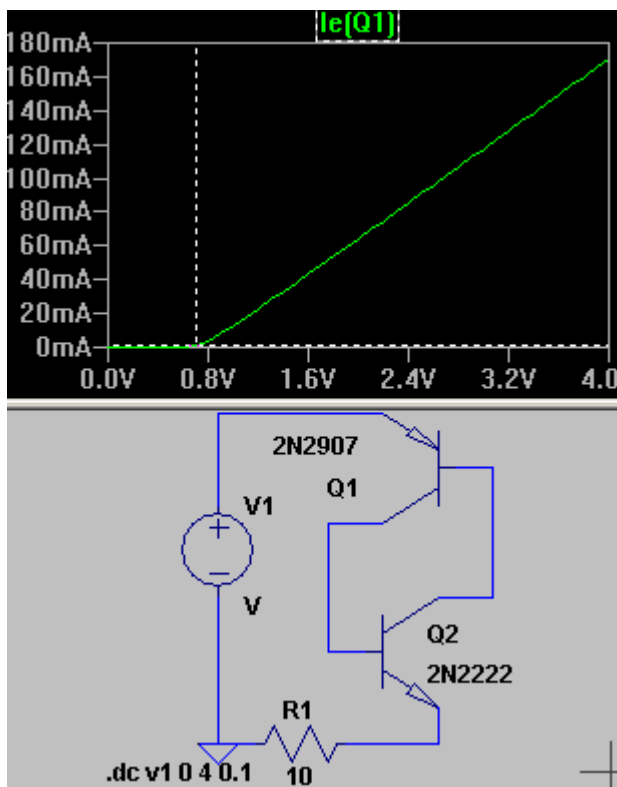


Equivalent schematic

Ora però, schemi a parte, dobbiamo capire come funziona tale configurazione. Se applichiamo un voltaggio pari a 0 non passa alcuna corrente. Aumentando questo voltaggio la situazione rimane stabile in quanto ognuno dei due transistor può attivarsi solo se si attiva anche l'altro. Allora com'è possibile mettere in conduzione lo Shockley? La verità è che non dobbiamo riferirci al modello puramente ideale dei BJT, ma dobbiamo riferirci ai modelli reali nei quali aumentando oltre una certa soglia il voltaggio

emettitore-collettore si determina il passaggio di corrente attraverso il transistor. Perciò se uno dei due transistor viene forzato porterà una certa corrente anche all'altro transistor per cui entrambi entreranno in uno stato di conduzione. A tal punto se riduciamo nuovamente il voltaggio il diodo continuerà comunque a condurre in quanto alle basi c'è comunque una corrente sufficiente a tenerli in conduzione, motivo per cui tornando sotto la soglia di attivazione il diodo continua a condurre. Risulta chiaro che il comportamento è diverso aumentando o diminuendo la tensione. Infatti per riportare allo stato di off il diodo, dovremmo scendere al di sotto della minima corrente necessaria per mantenere in conduzione la base dei transistor. Il comportamento di tale componente è riassunto nel grafico qui vicino.



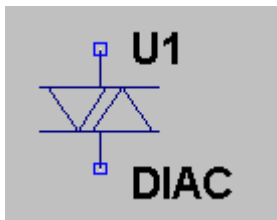


Nel prossimo grafico ho simulato tale tipo di circuito, si vede chiaramente come con i 2 transistor scelti (presi a caso) non ci sia corrente che li attraversa, o sia comunque minima, finché non viene raggiunto un voltaggio di circa 0.7V. A tal punto la corrente che attraversa i due transistor aumenta in maniera considerevole. Si noti che la soglia cambia in base ai transistor PNP ed NPN selezionati. Si noti anche il prossimo grafico, in particolare si vede chiaramente come la corrente che passa attraverso il primo transistor sia pressoché nulla fino al raggiungimento della fatidica soglia, valore oltre il quale c'è un brusco, breve aumento della corrente dovuto all'entrata in conduzione dei transistor, e poi un aumento proporzionale all'aumentare della tensione di alimentazione. Ecco qui il simbolo elettrico del diodo di Shockley

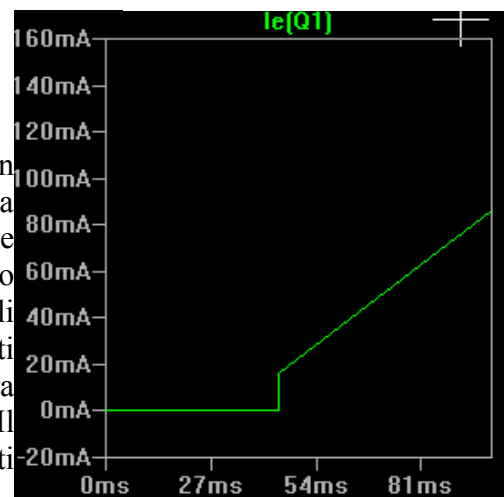


DIAC

Il diac corrisponde a due Shockley messi in parallelo con polarità invertita, cosa che permette la conduzione della corrente in entrambi i versi e viene rappresentato con un simbolo composto da due triangoli contrapposti affiancati. Con le correnti continue funziona in maniera pressoché identica ad un Shockley. Il funzionamento muta con le correnti

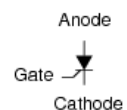
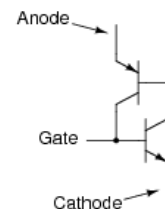
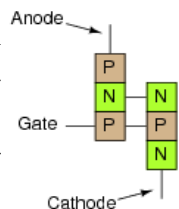


alternate ma per ora non ne parleremo.



SCR (Silicon Controlled Rectifier)

E' simile ad un Shockley ma presenta un gate aggiuntivo per cui facendo passare una piccola tensione fra gate e catodo otteniamo l'attivazione del secondo transistor che a sua volta mette in conduzione il primo



Physical diagram

Equivalent schematic

Schematic symbol

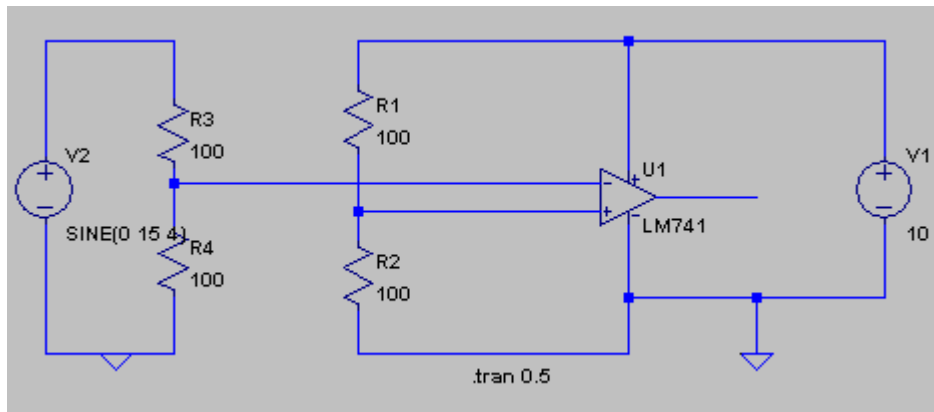
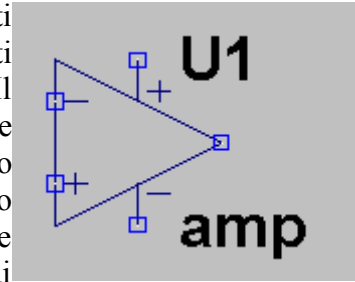
TRIAC

E' composto da due SCR posti back to back in parallelo cosa che permette di far scorrere la corrente da ambo i lati (potremmo dire che il triac sta all'scr come il diac allo Shockley).

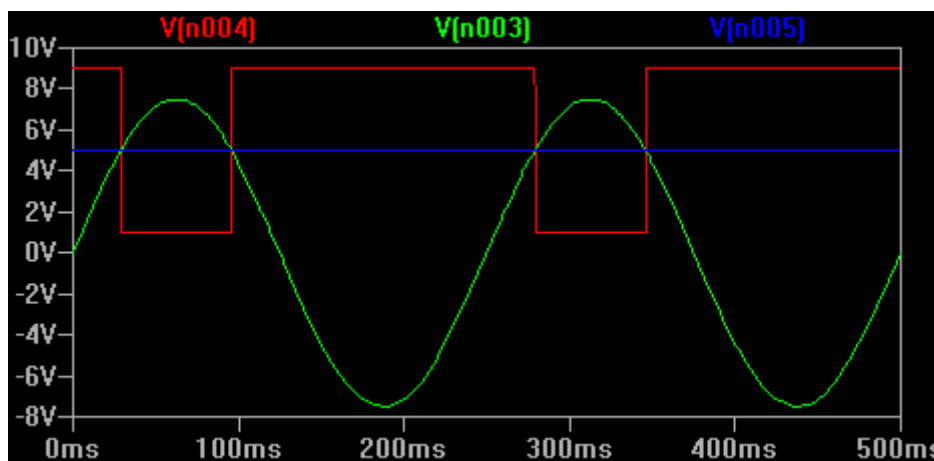
Esistono altri tipi di tiristori come gli optotiristori, (LASCR, Opto-triac), gli UJT (Unijunction Transistor), gli SCS (Silicon Controlled Switch) o gli MCT (MOS gated thyristor) ma probabilmente non troveranno impieghi in questo testo. Nel caso in futuro verranno approfonditi se vi sarà la necessità.

Amplificatori Operazionali (Op-Amp)

Gli amplificatori operazionali rappresentano una classe di componenti molto importante ed usata che in combinazione a pochi componenti esterni è in grado di svolgere tutta una serie di possibili operazioni. Il termine operazionale ha solo ragioni storiche in quanto nato per eseguire operazioni matematiche nei primordiali elaboratori analogici. Sono rappresentati con lo schema riportato qui a lato: sul lato sinistro troviamo gli ingressi + (non invertente) e - (invertente). A destra invece abbiamo l'output sulla punta, e i terminali + e - per l'alimentazione sui lati del triangolo. Da notarsi che questi due terminali spesso non vengono riportati in alcuni schemi elettronici per semplificazione. Gli OpAmp si compongono da numerosi componenti integrati insieme fra i quali numerosi BJT; ad esempio l'LM741, uno dei più usati e fra i primi sviluppati, ne contiene una ventina, oltre a varie resistenze. Gli operazionali hanno in comune una resistenza in ingresso molto alta, una resistenza in uscita molto bassa ed un grosso fattore di amplificazione della tensione con una corrente generalmente molto limitata, ma vedremo in seguito cosa comportano tali caratteristiche.



Come prima regola potremmo dire che se la tensione che raggiunge il polo positivo è superiore a quella che giunge al negativo avremmo in uscita una tensione vicina a quella di alimentazione, mentre nel caso inverso avremo una tensione prossima a 0. Anche pochi microvolt di differenza fanno passare l'Op-Amp da uno stato all'altro, come possiamo vedere nei grafici qui vicino.



Si vede infatti che non appena la tensione al polo positivo (linea blu) scende al di sotto di quella negativa (linea verde), l'uscita (linea rossa) passa dai quasi 10V dell'alimentazione (9.03V) a quasi 0V (0.97V). Perciò se il polo positivo ha una tensione superiore a quello negativo, la tensione sarà “a livello alto” ossia prossima a quella di alimentazione. Se invece la tensione al polo negativo è superiore a quella del polo positivo, la tensione si inverte e diventa prossima allo 0. Modificando la frequenza dell'onda all'ingresso invertente ed il punto di intersezione fra le due tensioni, otteniamo

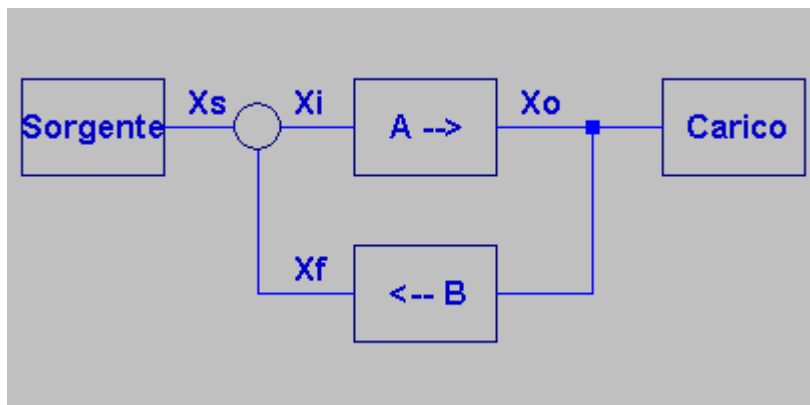
onde quadre con differenti ampiezze e frequenze. Visto che bastano pochi microvolt per far passare l'op-amp da uno stato di quiescenza alla massima tensione, il fattore di amplificazione è molto alto in quanto pochi microvolt in ingresso possono essere portati alla tensione di alimentazione, infatti un guadagno tipico degli operazionali è intorno a 100.000. Si noti che il guadagno calcolato in questa maniera, ossia senza ulteriori "direzioni" all'uscita, viene chiamato guadagno "open loop" (ad anello aperto) e vedremo successivamente il motivo di tale precisazione. Inoltre si specifica che è caratteristico dell'operazionale il prodotto "larghezza di banda X guadagno", il che significa che possiamo avere un alto guadagno con una banda passante limitata o viceversa ottenere un ridotto guadagno ma su una banda passante più ampia.

Visto in questo modo l'op-amp non fa altro che produrre onde quadre ed amplificare ad un valore fisso il segnale di ingresso, ma con gli opportuni aggiustamenti di contorno si possono eseguire operazioni diverse. Si noti inoltre che rispetto al segnale di ingresso al polo -, l'onda quadra che otteniamo è sfasata di 180° , ossia è allo stato alto quando il segnale in ingresso è allo stato basso e viceversa, per questo motivo l'ingresso negativo a cui abbiamo applicato il segnale è detto "invertente" in contrapposizione a quello positivo che, si intuirà, è detto "non invertente". Se invertissimo i due poli in ingresso nell'esempio precedente, otterremmo un'onda quadra esattamente speculare a quella vista. L'esempio iniziale potrebbe essere utilizzato per costruire un termostato: In ingresso poniamo da una parte una tensione da una parte una tensione di riferimento collegata ad una resistenza variabile che appunto verrà modificata con la "manopola del termostato", e dall'altra una tensione proporzionale ad un sensore di temperatura. All'uscita controlliamo un BJT a sua volta collegato ad un relè e a grosse linee il gioco è fatto. Quando la temperatura sale o scende sotto il livello prefissato con la "manopola" ci sarà l'apertura o chiusura del relè che a sua volta controllerà la caldaia.

Di base la tensione di uscita V_o è data dal fattore di amplificazione A per la differenza dei due poli in ingresso per cui $V_o = A(V_+ - V_-)$ per cui $V_o = A \cdot V_d$ (d =differenziale). Essendo A estremamente elevato (infinito nell'OpAmp ideale) si spiega perché l'uscita senza ulteriori componenti aggiunti presenta solamente valori prossimi alla saturazione o allo zero, ossia i due estremi dell'alimentazione.

La retroreazione.

Per rendere più graduale e precisa la risposta dell'operazionale si usa la cosiddetta controreazione (feedback), ossia dall'output si preleva una parte del segnale che viene riportata all'input. In questo modo l'ingresso e l'uscita sono dipendenti l'uno dall'altro e variazioni in uscita produrranno variazioni in entrata che a loro volta determineranno una nuova variazione in uscita. Ma come funziona la retroreazione?



Guardiamo lo schema generico qui sopra. Con X la grandezza fisica in esame che potrebbe essere la tensione anche se discorsi analoghi potrebbero essere fatti con le correnti. X_s (S =source) è la sorgente del segnale in ingresso, X_i (I =In) il segnale che entra nell'amplificatore, X_o (O =Out) il segnale in uscita e X_f (f =feedback) la porzione di segnale che dall'uscita viene riportato all'ingresso.

Con A è indicato il “guadagno” in ingresso, e con B la frazione di feedback, ossia la parte di segnale che dall'uscita rientra all'ingresso. Perciò, nel feedback negativo che è il più utile ed utilizzato, X_i sarà dato dal segnale sorgente X_s meno X_f , ossia la frazione di segnale riportata indietro. Ne deriva che essendo $X_o = A * X_i$ (guadagno per segnale di ingresso), $X_o = A(X_s - X_f)$. A sua volta X_f è data dal segnale di output per la frazione “prelevata”, ossia $X_o * B$ e quindi $X_o = A(X_s - B * X_o)$. Tralasciando noiosi passaggi matematici, otteniamo che in queste condizioni il guadagno, detto anche di feedback (A_f) per differenziarlo come detto da quello a “circuitto aperto”, è dato da:

$$A_f = \frac{A}{(1 + AB)}$$

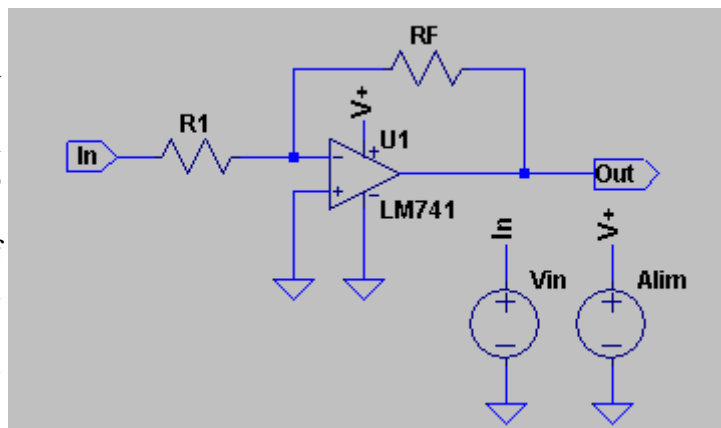
Risulta importante notare che all'aumentare del guadagno A, il guadagno “ad anello chiuso” A_f tende a $1/B$ ed essendo B il fattore di retroazione ne deriva che determinando questo parametro possiamo stabilire il guadagno del nostro circuito. Si noti che il guadagno A_f corrisponde al rapporto X_o/X_i per cui con elevati livelli di guadagno (A) otteniamo che $X_o/X_i = 1/B$ ossia $X_o = X_i/B$.

Il meccanismo di feedback viene sempre usato con l'utilizzo dei semiconduttori, in quanto come visto in precedenza, questi hanno caratteristiche differenti in base ai lotti di produzione e alle variazioni di temperatura. In questi casi il meccanismo di feedback permette di regolarizzarne il funzionamento. Manca solo una cosa da capire. Da cosa è rappresentato il fattore “B”? E' presto detto, vengono infatti utilizzati resistori e talora condensatori, comunque componenti passivi il cui funzionamento non è influenzato particolarmente dalla temperatura o dai lotti di produzione.

..... in progress.....

Amplificatore invertente

Nell'amplificatore invertente il segnale da amplificare sarà collegato al relativo ingresso invertente del nostro op-amp con interposizione della resistenza R_1 . Il polo non invertente è invece collegato a massa. Si noti, importantissima, la resistenza R_f (di feedback o retroazione) interposta al collegamento presente tra l'uscita (Out) e l'ingresso invertente stesso, creando così un “anello chiuso” da cui il nome di configurazione “closed-loop o appunto “ad anello chiuso” che si contrappone alla configurazione open-loop (ad anello aperto) vista prima.



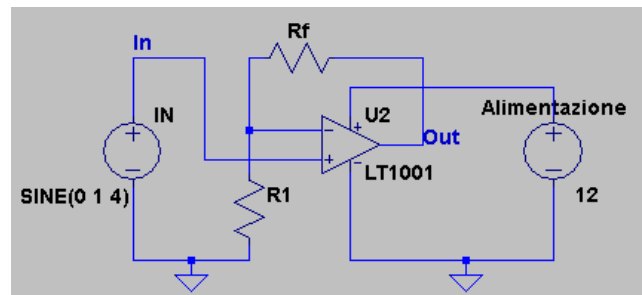
Si noti che per semplificare il disegno, sia il generatore di ingresso che quello di alimentazione sono stati disegnati a parte, e sono “collegati” tramite le etichette In e V+ al resto del circuito. L'equazione chiave che definisce il funzionamento di questo circuito è:

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right) * V_{in} \text{ dove il rapporto } R_f/R_1 \text{ definisce il guadagno. Tale guadagno è detto}$$

“guadagno closed loop” ed è dipendente esclusivamente dal rapporto fra le due resistenze, da differenziarsi perciò dal guadagno “open loop” dell'operazionale fatto lavorare a “circuitto aperto”.

Amplificatore non invertente

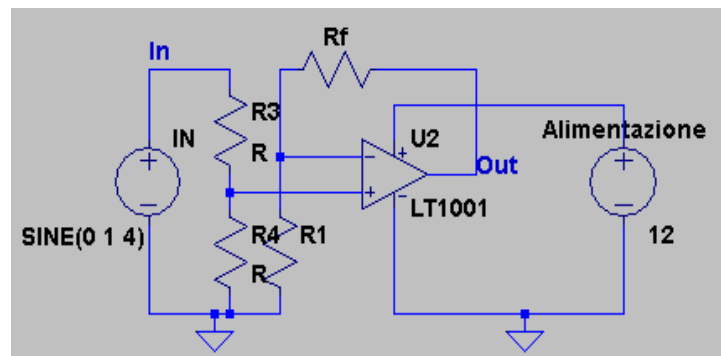
Chiaramente in questo caso dobbiamo collegare il segnale da amplificare all'ingresso non invertente, ossia quello di segno positivo.



$$V_{out} = V_{in} * (1 + R_f/R_1)$$

oppure.....

$$V_{out} = V_{in} (R_f/R_1) * R_4/R_3 + R_4$$



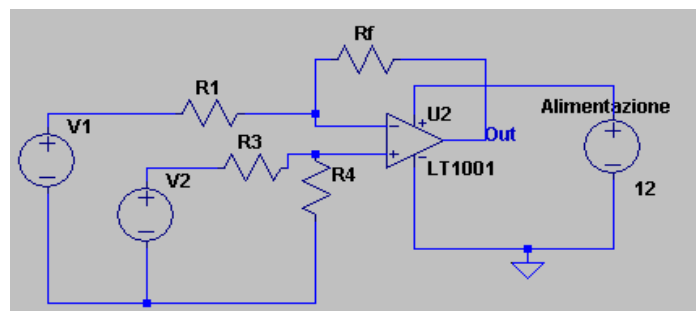
.....

Amplificatore differenziale

$$V_{out} = V_2 * (R_4/(R_3 + R_4)) * (1 + R_f/R_1) - V_1 * (R_f/R_1)$$

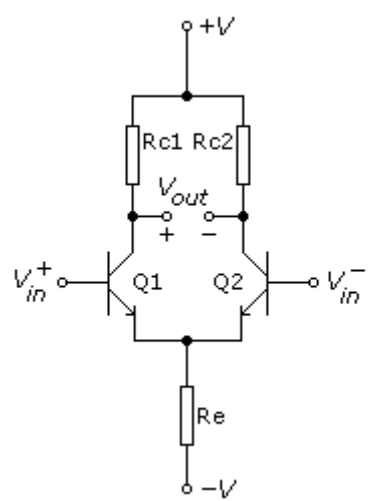
usando $R_f = R_4$ e $R_1 = R_3$

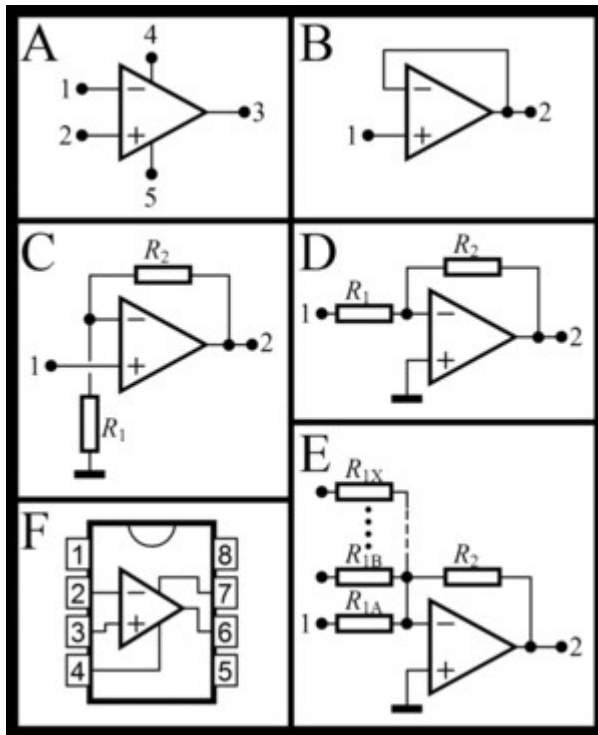
$$V_{out} = V_2 * (R_f/R_1) - V_1 * (R_f/R_1)$$



dove R_f/R_1 è il fattore di amplificazione (A) per cui $V_{out} = A(V_2 - V_1)$.

.....





Simbolo circuitale (A) e circuiti applicativi: inseguitore (B), amplificatore non invertente (C), amplificatore invertente (D), Sommatore invertente (E), pinout di un amplificatore operazionale integrato (F)

L'amplificatore operazionale è prima di tutto un **amplificatore differenziale**, ciò significa che il segnale d'uscita non dipende solo da un ingresso (+ o – che sia) ma da entrambi o, più precisamente, dalla differenza dei due segnali. Bastano pochi microvolt di differenza fra i due segnali di ingresso per modificare in maniera radicale i valori in uscita.

.....CONTINUA.....

{R}

.STEP param R 1 100000 10000

| Leading Character | Type of line |
|-------------------|----------------------------------|
| | |
| * | Comment |
| | |
| A | Special function device |
| | |
| B | Arbitrary behavioral source |
| | |
| C | Capacitor |
| | |
| D | Diode |
| | |
| E | Voltage dependent voltage source |
| | |
| F | Current dependent current source |
| | |
| G | Voltage dependent current source |
| | |
| H | Current dependent voltage source |
| | |
| I | Independent current source |
| | |
| J | JFET transistor |
| | |
| K | Mutual inductance |
| | |
| L | Inductor |
| | |

| | |
|----------|---|
| M | MOSFET transistor |
| O | Lossy transmission line |
| Q | Bipolar transistor |
| R | Resistor |
| S | Voltage controlled switch |
| T | Lossless transmission line |
| U | Uniform RC-line |
| V | Independent voltage source |
| W | Current controlled switch |
| X | Subcircuit Invocation |
| Z | MESFET transistor |
| . | A simulation directive, For example: .options reltol=1e-4 |
| + | A continuation of the previous line. The "+" is removed and the remainder of the line is considered part of the prior line. |

I Tiristori

$\Omega\mu$

.DCV1 -100 100 10m

.

{R}

STEP param R 1 100000 10000

;.STEP temp 10 50 5

APPENDICI




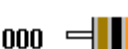





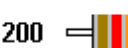
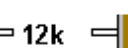
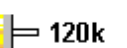



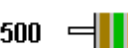





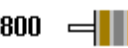




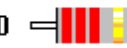
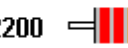
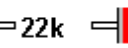
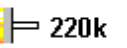



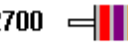
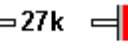
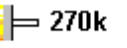



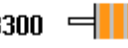
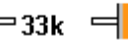
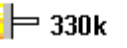



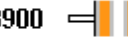
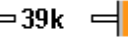




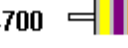
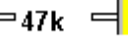
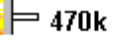



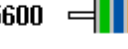
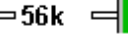




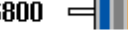





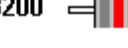
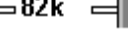
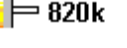
elettronica

per cominciare

di Raffaele Ilardo

IL CODICE A COLORI DELLE RESISTENZE

VALORI DELLE RESISTENZE IN COMMERCIO E LORO CODICE A COLORI

| | | | | | | | | | | | |
|---|----|---|-----|---|------|---|-----|--|------|---|------|
|  | 10 |  | 100 |  | 1000 |  | 10k |  | 100k |  | 1M |
|  | 12 |  | 120 |  | 1200 |  | 12k |  | 120k |  | 1,2M |
|  | 15 |  | 150 |  | 1500 |  | 15k |  | 150k |  | 1,5M |
|  | 18 |  | 180 |  | 1800 |  | 18k |  | 180k |  | 1,8M |
|  | 22 |  | 220 |  | 2200 |  | 22k |  | 220k |  | 2,2M |
|  | 27 |  | 270 |  | 2700 |  | 27k |  | 270k |  | 2,7M |
|  | 33 |  | 330 |  | 3300 |  | 33k |  | 330k |  | 3,3M |
|  | 39 |  | 390 |  | 3900 |  | 39k |  | 390k |  | 3,9M |
|  | 47 |  | 470 |  | 4700 |  | 47k |  | 470k |  | 4,7M |
|  | 56 |  | 560 |  | 5600 |  | 56k |  | 560k |  | 5,6M |
|  | 68 |  | 680 |  | 6800 |  | 68k |  | 680k |  | 6,8M |
|  | 82 |  | 820 |  | 8200 |  | 82k |  | 820k |  | 8,2M |

I valori sono espressi in ohm

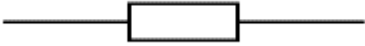



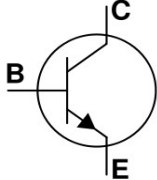
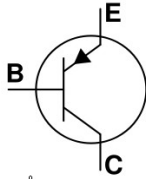
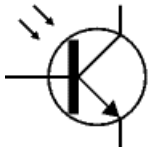
La lettera "k" sta per 1000 (esempio: 120k = 120.000 ohm)

La lettera "M" sta per 1.000.000 (esempio: 1,2M = 1,2 milioni di ohm)

SIMBOLI

Provenienza:

<http://www.kpsec.freeuk.com/symbol.htm>

| <i>Tipo</i> | <i>Simbolo</i> | <i>Commento</i> |
|------------------------|---|---|
| Resistore / Resistenza |  | Talora viene ancora usato il vecchio simbolo:  |
| | | |
| | | |
| Diodo |  | |
| Diodo Zener |  | Progettato per sfruttare l'effetto valanga |
| Transistor NPN |  | |
| Transistor PNP |  | |
| Foto transistor |  | |