CAPITOLO 0

INTRODUZIONE ALL'ELETTRONICA

L'argomento di questo corso è costituito dai *fondamenti* dell'*elettronica moderna*, meglio conosciuta come *microelettronica*. Il termine "microelettronica" si riferisce alla tecnologia dei circuiti integrati (IC), che, attualmente, è in grado di produrre circuiti contenenti più di 1 miliardo di componenti su un piccolo substrato (*chip*) di silicio la cui area è dell'ordine delle decine di mm^2. Un circuito di questo tipo può, per esempio, costituire un computer completo, o, più in generale, un *microprocessore*.

Lo scopo di questo capitolo preliminare è quello di introdurre alcuni concetti basilari, di fissare un'opportuna terminologia, di indicare i prerequisiti necessari per potere affrontare in modo sistematico lo studio dell'elettronica, di fornire alcuni consigli ed espedienti di natura pratica. In particolare ci occuperemo della definizione del concetto di segnale e della sua elaborazione; definiremo inoltre i campi di applicazione dell'*elettronica analogica* e dell'*elettronica digitale* facendo riferimento ai particolari tipi di segnali trattati. Tuttavia, sebbene utile a livello didattico, tale distinzione è ormai anacronistica in quanto la quasi totalità della circuiteria elettronica commerciale è digitale. Soltanto alcuni circuiti periferici (o alcuni sistemi per applicazioni dedicate) sono di tipo analogico. Infatti, il mondo con cui quotidianamente interagiamo è "analogico", pertanto i circuiti elettronici che s'interfacciano con l'ambiente esterno devono "parlare la stessa lingua", cioè essere analogici essi stessi. Ciò sarà più chiaro nei prossimi paragrafi, non appena saranno introdotti i concetti di segnali analogici e digitali.

Poiché tale capitolo non inizia ancora ad affrontare lo studio dell'elettronica ma si limita – per così dire – a delimitarne i confini indicandone gli strumenti, esso è stato indicato come "*capitolo zero*".

0.1 I segnali

I segnali contengono informazioni su vari fenomeni che si svolgono nel mondo fisico. Alcuni esempi: informazioni meteorologiche possono essere riportate mediante segnali che rappresentino la temperatura dell'aria, la pressione atmosferica, la velocità del vento e così via. La voce di un annunciatore radiofonico che legge delle notizie in un microfono può essere considerata come un segnale acustico che contiene delle informazioni sulla situazione mondiale. Per osservare l'evoluzione nel tempo dello stato di un reattore nucleare si usano dei dispositivi per misurare una grande quantità di parametri, e ognuno di questi strumenti produce un opportuno segnale.

Per estrarre le informazioni volute da un insieme di segnali l'osservatore, si tratti di un uomo o di una macchina, ha bisogno di *elaborare* il segnale in qualche modo. Questo processo di *elaborazione del segnale* viene in genere svolto nel modo più conveniente possibile utilizzando sistemi elettronici. Perché questo sia possibile, comunque, il segnale deve essere prima *convertito* in un segnale elettrico, cioè in una tensione o in una corrente. Questo processo di conversione viene di solito svolto da dispositivi chiamati *trasduttori***.** Esistono molti tipi di trasduttori, ognuno dei quali adatto a una particolare categoria di segnali fisici. Ad esempio, le onde sonore della voce umana possono essere convertite in un segnale elettrico usando un microfono, che è, in effetti, un *trasduttore di pressione*. Supporremo d'ora in poi che le grandezze che ci interessano esistano già come segnali elettrici, limitando lo studio dell'acquisizione e dell'elaborazione dei segnali, al Cap. 12. Un segnale verrà rappresentato mediante un generatore di tensione $v_s(t)$, eventualmente provvisto di una sua resistenza interna R_s o, alternativamente, mediante un generatore di corrente $i_s(t)$. Sebbene le due rappresentazioni siano equivalenti, si preferisce usare la prima (conosciuta come forma di *Thevenin*) quando la resistenza R_s è piccola, mentre la seconda (nota come forma di *Norton*) viene usata quando la resistenza R_s è grande.

Da quanto detto finora dovrebbe essere chiaro che un segnale è una grandezza che varia nel tempo e che può essere rappresentata da un grafico come quello di Fig. 0.1. In effetti, il contenuto di informazioni dal segnale è rappresentato dai cambiamenti del suo valore in funzione del tempo; potremmo dire che le informazioni sono contenute nei "serpeggiamenti" della forma d'onda del segnale. In generale è difficile descrivere matematicamente tali forme d'onda. In altre parole non è facile dare una descrizione succinta di una arbitraria forma d'onda quale quella di Fig. 0.1. Naturalmente, una tale descrizione è di grande importanza ai fini della progettazione di un circuito appropriato che elabori il segnale eseguendo su di esso le operazioni desiderate.

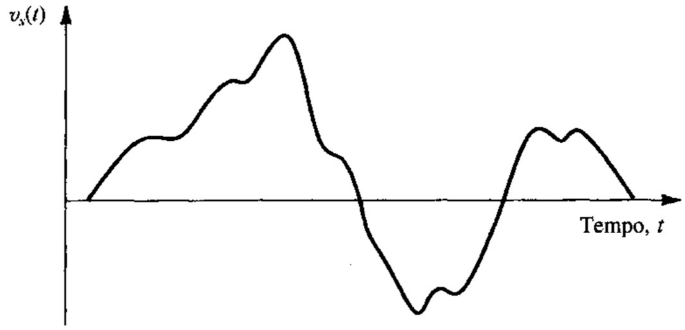

Fig. 0.1 – *Un arbitrario segnale di tensione $v_s(t)$*

0.2 Spettro di frequenza di un segnale

Un segnale può essere caratterizzato per una qualunque arbitraria funzione del tempo, mediante il suo *spettro di frequenza*. Una tale descrizione del segnale viene ottenuta mediante due strumenti matematici: la *serie di Fourier* e la *trasformata di Fourier*. In questa sede non siamo (e non saremo) interessati ai dettagli di queste trasformazioni; è sufficiente dire che esse ci forniscono il modo di rappresentare un segnale di tensione $v_s(t)$ o un segnale di corrente $i_s(t)$ come una *somma di segnali sinusoidali di differenti frequenze e ampiezze*. Questo fa sì che i segnali sinusoidali siano molto importanti nell'analisi, nel progetto e nella prova di circuiti elettronici. Per questa ragione rivedremo brevemente le proprietà delle funzioni sinusoidali.

La Fig. 0.2 mostra un segnale di tensione sinusoidale

$$v_a(t) = V_a \sin(\omega t) \tag{0.1}$$

dove V_a denota il valore dell'ampiezza in volt e ω denota la velocità angolare in radianti al secondo; cioè $\omega = 2\pi f$ rad/s, dove f è la frequenza in Hertz, definita da $f = 1/T$, e T è il periodo in secondi.

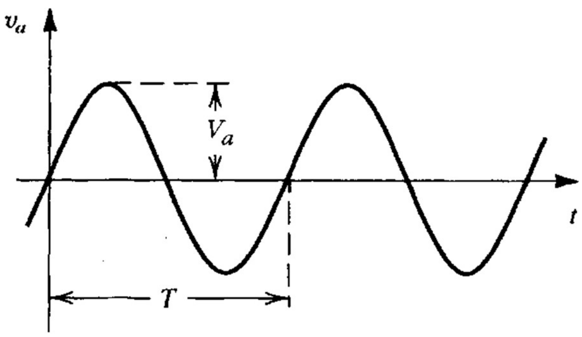

Fig. 0.2 – *Segnale di tensione sinusoidale $v_a(t)$ di ampiezza V_a e frequenza $f = 1/T$*

II segnale sinusoidale è completamente caratterizzato mediante il suo valore di picco V_a, la sua pulsazione ω e la sua fase rispetto ad un arbitrario istante di riferimento. Nel nostro caso l'origine dei tempi è stata scelta in modo tale che l'angolo di fase sia 0.

Ritornando ora alla rappresentazione del segnale come somma di sinusoidi, possiamo dire che la *serie di Fourier* è utilizzata per questo scopo nel caso particolare di un segnale *periodico nel tempo*. La *trasformata di Fourier*, invece, si applica in casi più generali, e può essere utilizzata per ottenere lo spettro di frequenza di un segnale la cui forma d'onda sia una *funzione completamente arbitraria del tempo*.

La serie di Fourier ci permette di esprimere una data funzione periodica del tempo come somma di un numero infinito di sinusoidi le cui frequenze differiscono per multipli interi di una frequenza ω_0. Per esempio, l'onda quadra simmetrica di Fig. 0.3 può essere espressa come

$$v(t) = \frac{4V}{\pi}\left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5}\sin 5\omega_0 t + \ldots\right) \tag{0.2}$$

dove V è l'ampiezza dell'onda quadra e $\omega_0 = 2\pi/T$ (T è il periodo dell'onda quadra) è chiamata la *frequenza fondamentale*. E' da osservare che, dato che l'ampiezza delle varie armoniche diminuisce progressivamente, la serie può essere troncata, fornendo così un'approssimazione dell'onda quadra.

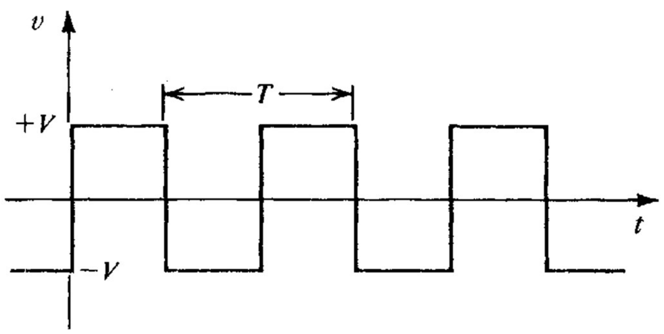

Fig. 0.3 – *Onda quadra simmetrica di ampiezza V*

Le componenti sinusoidali della serie nell'equazione (0.2) costituiscono lo *spettro di frequenza* dell'onda quadra. Tale spettro può essere rappresentato graficamente come in Fig. 0.4, dove sull'asse orizzontale si riporta la frequenza ω in radianti al secondo. Si noti che spesso la pulsazione ω si denota impropriamente "frequenza", data la relazione di proporzionalità diretta tra le due grandezze.

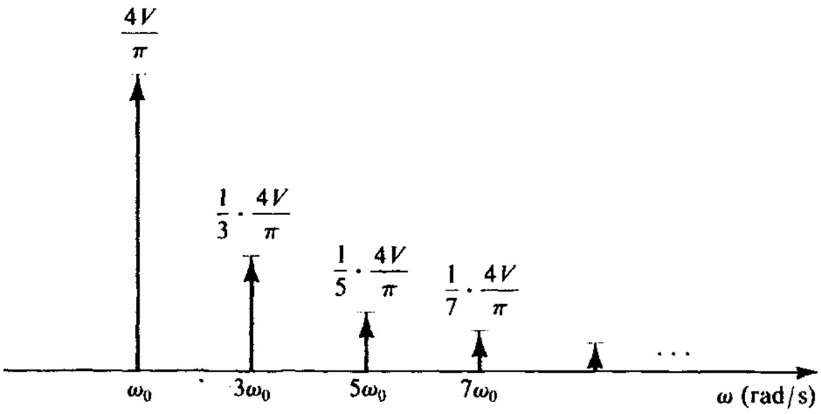

Fig. 0.4 – *Spettro di frequenza dell'onda quadra simmetrica*

La trasformata di Fourier può essere applicata a funzioni non periodiche del tempo, come quella riportata in Fig. 0.1, e fornisce il loro spettro come una funzione *continua* della frequenza, come mostrato in Fig. 0.5. A differenza dei segnali periodici, il cui spettro è costituito da un insieme discreto di frequenze (ω_0 e le sue armoniche), lo spettro di un segnale non periodico contiene, in generale, *tutte* le possibili frequenze. Tuttavia, nella pratica, la parte essenziale dello spettro del segnale è in genere contenuta in segmenti molto piccoli dell'asse delle frequenze angolari (ω), e questa è un'osservazione molto utile nell'elaborazione di tali segnali. Per esempio, lo spettro dei suoni percepibili dall'uomo, come la voce umana e la musica, si estende da 20 Hz a 20 KHz circa; tale intervallo di frequenze è conosciuto come *banda audio*. Va sottolineato che esistono in natura suoni con frequenza superiore a 20 KHz, ma l'orecchio umano non è in grado di percepirli.

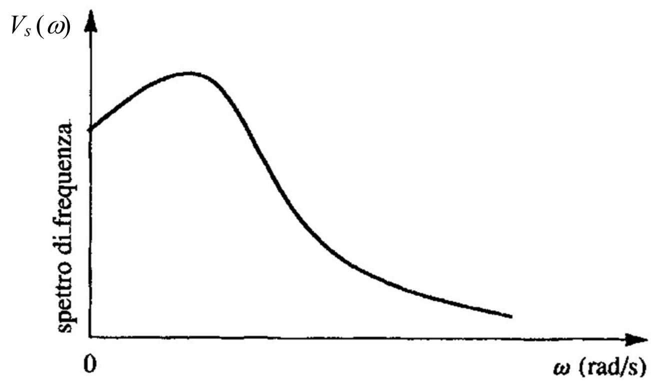

Fig. 0.5 – *Spettro di frequenza di un segnale arbitrario*

Per concludere, vogliamo far notare che un segnale può essere rappresentato sia mediante l'andamento temporale della forma d'onda, come per il segnale $v_s(t)$ mostrato in Fig. 0.1, sia mediante il suo spettro di frequenza, come in Fig. 0.5. Le due rappresentazioni sono definite rispettivamente *rappresentazione nel dominio del tempo* e *rappresentazione nel dominio della frequenza*. La rappresentazione nel dominio della frequenza di $v_s(t)$ sarà indicata col simbolo $V_s(\omega)$.

0.3 Segnali analogici e digitali

II segnale di tensione raffigurato in Fig. 0.1 è chiamato *segnale analogico*. Il nome deriva dal fatto che un segnale di questo tipo è analogo al segnale fisico che esso rappresenta. La funzione che rappresenta un segnale analogico può assumere *qualunque valore*; in altri termini, l'ampiezza di un segnale analogico mostra una *variazione continua* in tutto il suo intervallo di attività. Quasi tutti i segnali che si trovano nella realtà fisica sono analogici. I circuiti elettronici che elaborano tali segnali sono detti *circuiti analogici*.

Alternativamente, un segnale può essere rappresentato mediante una *sequenza di numeri*, ognuno dei quali rappresenta il valore del segnale in un determinato istante di tempo. Il segnale che ne risulta è detto *segnale digitale*. Per vedere come un segnale possa essere rappresentato in quest'ultima forma, cioè come i segnali possano essere convertiti dalla forma analogica a quella digitale, consideriamo la Fig. 0.6*a*. In questa figura, la curva rappresenta un segnale di tensione identico a quello in Fig. 0.1. Ad eguali intervalli sull'asse del tempo abbiamo marcato gli istanti t_0, t_1, t_2, e così via. In ognuno di questi istanti si misura il valore del segnale, con un processo noto come *campionamento*. La figura 0.6*b* mostra una rappresentazione del segnale di Fig. 0.6*a* mediante i suoi campioni. Il segnale in Fig. 0.6*b* è definito soltanto negli istanti in cui è stato eseguito il campionamento, e quindi non è più una funzione del tempo, ma piuttosto un segnale *a tempo discreto*. Siccome ciascun campione può assumere qualsiasi valore in un intervallo continuo, il segnale in Fig. 0.6*b* è ancora un segnale analogico.

Ora, se rappresentiamo l'ampiezza di ciascuno dei campioni di Fig. 0.6*b* mediante un numero con una *quantità finita di cifre* allora il valore del segnale non varierà più con continuità; potremmo piuttosto dire che il segnale è stato *digitalizzato*. Il segnale digitale che ne risulta, allora, è semplicemente una sequenza di numeri che rappresenta il valore dei vari campioni del segnale.

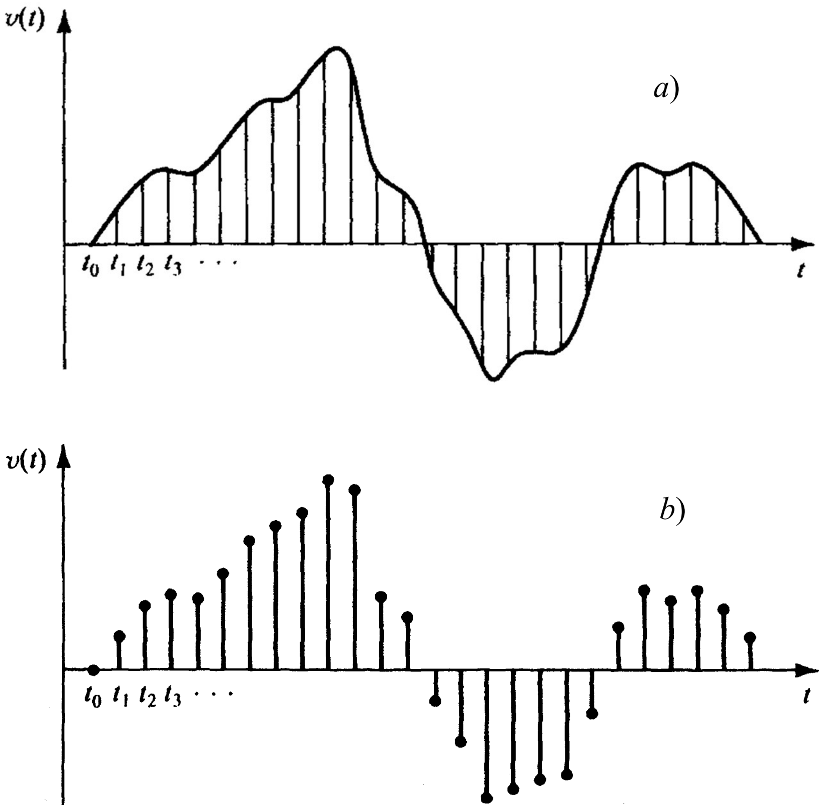

Fig. 0.6 – *Campionando il segnale analogico a tempo continuo in (a) si ottiene il segnale analogico a tempo discreto (b)*

Come digitalizzare un segnale già campionato? Quest'argomento verrà ripreso nel Cap. 12. A titolo di esempio possiamo comunque dire che in genere si adopera un sistema a due livelli di tensione che possono convenzionalmente assumere i valori "0" e "1" (in realtà essi assumeranno due valori di tensione ben precisi, ad esempio 0 V per il livello convenzionale "0" e 5 V per "1").

Per la rappresentazione del segnale si adopera un sistema di rappresentazione binario, cosicché ad esempio il segnale campionato di Fig. 0.7*a* può essere codificato nel segnale digitale di Fig. 0.7*b*. In tale esempio, qualsiasi valore assunto dal segnale quantizzato deve essere trasformato in una sola di quattro possibili sequenze di "0" e "1", vale a dire 00, 01, 10, 11. Evidentemente, per ottenere una rappresentazione più precisa, è possibile utilizzare un maggior numero di "0" e "1", ossia un maggior numero di *bit*.

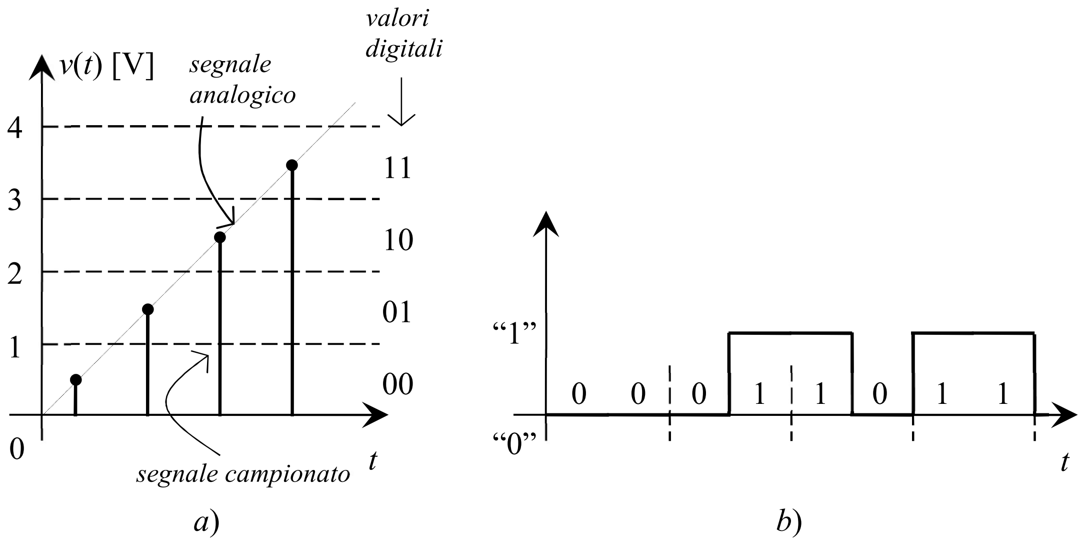

Fig. 0.7 – *a) Segnale campionato e b) relativo segnale digitalizzato*

I circuiti elettronici che elaborano i segnali digitali sono detti *circuiti digitali*. Il computer è un sistema costruito con circuiti digitali. Tutti i segnali interni, in un computer sono segnali digitali.

L'elaborazione digitale dei segnali si è molto diffusa, soprattutto a causa degli enormi progressi fatti nel progetto e nella fabbricazione di circuiti digitali. Un'altra ragione della popolarità dell'elaborazione digitale dei segnali è che, di solito, si preferisce aver a che fare con numeri. Per esempio, senza dubbio la maggior parte di noi trova gli orologi con display digitale più comodi di quelli con display analogico (lancette che si muovono su una scala graduata). Mentre il display del secondo tipo richiede un lavoro d'interpretazione da parte dell'osservatore, il primo è esplicito, eliminando così ogni giudizio soggettivo. Questo è un fatto importante che forse può essere meglio apprezzato nell'ambito di un sistema di strumentazione come quello utilizzato per osservare nel tempo l'evoluzione dello stato di un reattore nucleare. In un sistema del genere, infatti, l'interpretazione umana delle letture degli strumenti e l'inevitabile mancanza di precisione ad essa associata, potrebbe essere rischiosa.

In realtà, in tali sistemi di strumentazione, di solito i risultati delle operazioni di misura devono essere inviati ad un computer per successive analisi. A tal fine sarebbe conveniente che i segnali ottenuti dagli strumenti di misura fossero già in forma digitale.

L'elaborazione digitale dei segnali è economica ed affidabile. Inoltre, consente d'effettuare una gran quantità di funzioni di elaborazione, funzioni che non sarebbe possibile o pratico implementare mediante sistemi analogici. Altri vantaggi dell'elaborazione digitale sono l'elevata immunità al rumore, la versatilità e la standardizzazione.

Tuttavia, come abbiamo già detto, la maggior parte dei segnali del mondo fisico sono analogici ed esistono molte operazioni di elaborazione del segnale che vengono ancora eseguite nel modo migliore utilizzando circuiti analogici. Inoltre, i dati elaborati digitalmente vengono poi eventualmente riconvertiti in forma analogica per comandare dispositivi attuatori o, comunque, per essere utilizzati. Ne consegue che un buon ingegnere deve essere abile in entrambe le forme di elaborazione del segnale.

Per concludere, vogliamo far notare che non tutti i segnali trattati dai sistemi elettronici hanno origine nel mondo fisico. Per esempio, le calcolatrici elettroniche ed i computer eseguono operazioni matematiche e logiche per risolvere problemi. È chiaro che i segnali digitali che rappresentano le variabili e i parametri di questi problemi internamente a tali sistemi elettronici non provengono direttamente da segnali fisicamente esistenti.

0.4 Amplificatori

Una funzione fondamentale di elaborazione dei segnali, usata sotto varie forme in quasi tutti i sistemi elettronici, è l'amplificazione.

Da un punto di vista concettuale, la prima necessità che s'incontra nell'elaborare i segnali è quella di *amplificarli*. Questa necessità deriva dal fatto che i trasduttori forniscono segnali piuttosto "piccoli", cioè dell'ordine di microvolt o di millivolt, e dotati di energie molto basse. Tali segnali sono troppo piccoli perché siano sottoposti ad un'elaborazione attendibile e l'elaborazione stessa è molto più semplice se si rende maggiore l'ampiezza del segnale. Il blocco funzionale che realizza questa funzione è l'*amplificatore di segnale*.

Un amplificatore deve conservare nei dettagli la forma d'onda del segnale d'ingresso. Esso è caratterizzato da una relazione del tipo $v_o(t) = A\, v_i(t)$, dove v_i e v_o sono, rispettivamente, i segnali in ingresso e in uscita e A è una costante che rappresenta il valore dell'amplificazione, chiamata *guadagno dell'amplificatore*. Poiché tale relazione è di tipo lineare, l'amplificatore da essa caratterizzato è detto *amplificatore lineare*. Dovrebbe essere chiaro che se la relazione tra v_i e v_o contiene potenze di v_i più elevate, la forma d'onda di v_o non sarà più uguale a quella di v_i. In tal caso, si dice che l'amplificatore mostra una *distorsione non lineare*.

Gli amplificatori descritti fin qui sono di solito destinati a funzionare con segnali molto piccoli in ingresso. Il loro scopo è quello di rendere maggiore l'ampiezza del segnale, e quindi sono considerati *amplificatori di tensione*. Il *preamplificatore* di un sistema stereo è un esempio di amplificatore di tensione.

E' necessario menzionare ora un altro tipo di amplificatore, l'*amplificatore di potenza*. Questo dispositivo fornisce una modesta amplificazione di tensione ma una sostanziosa amplificazione di corrente. Quindi, pur assorbendo poca energia dal generatore di segnale al quale è connesso, che spesso è un preamplificatore, fornisce una grossa quantità di energia al suo carico. Un esempio può essere costituito dall'*amplificatore di potenza di un sistema stereo hi-fi*, il cui scopo è quello di erogare una potenza sufficiente per pilotare gli altoparlanti, i quali rappresentano il trasduttore di uscita del sistema, poiché convertono il segnale elettrico fornito in uscita dal sistema in un segnale acustico.

0.5 Circuiti integrati e a componenti discreti

Un dispositivo elettronico moderno è in realtà un insieme di dispositivi elementari fabbricati sullo stesso *chip* di silicio, cablati tra loro tramite micrometallizzazioni effettate sullo stesso *chip*. In pratica un dispositivo elettronico commerciale è già un circuito in piena regola e si presenta come una sorta di "scarafaggio" con un numero di "zampette" che va da una decina sino a superare il centinaio (un *millepiedi* – dunque – più che uno scarafaggio!). Ciò che si vede esternamente ovviamente è il contenitore, plastico o metallico, al cui interno risiede il *chip*, che prende il nome di *circuito integrato*.

Un moderno circuito elettronico è pertanto realizzato tramite connessioni elettriche di diversi circuiti integrati. Ma evidentemente nel passato le cose erano più complesse: sino a cinquant'anni fa la maggior parte dei dispositivi elettronici ed elettrici elementari non erano *integrabili* su un unico *chip*, pertanto i sistemi elettronici erano molto più complessi ed ingombranti, dato che era necessario connettere tra loro più dispositivi elementari per realizzare le stesse funzioni che oggi sono svolte da un solo circuito integrato di pochi mm^2 di dimensioni[♠]. Questi circuiti, detti *a componenti discreti*, si ritrovano ormai soltanto in qualche semplice sistema elettronico, o in qualche zona periferica di circuiti complessi e sono praticamente inesistenti in apparati digitali. Il loro studio è però importante, in quanto qualsiasi sistema integrato è sempre rappresentabile tramite un circuito a componenti discreti. È altresì vero che le soluzioni topologiche dei dispositivi integrati non sempre coincidono con quelle di sistemi a componenti discreti, ma sono in genere riconducibili ad esse.

Si noti infine, che lo sviluppo dei circuiti integrati e la relativa rapidità con cui essi si sono imposti sul mercato sono dovuti da un lato all'invenzione dei dispositivi MOSFET (cfr. Cap. 7), più facilmente integrabili rispetto ad altri dispositivi elementari, e dall'altro al progresso delle tecnologie di fabbricazione dei dispositivi elettronici su *chip* di silicio, che ha permesso l'estrema miniaturizzazione dei dispositivi stessi.

[♠] Il primo circuito integrato fu fabbricato da *Jack Kilby* della *Texas Instruments* nel 1958. Tale invenzione gli valse il *Premio Nobel* per la Fisica nel 2000.

0.6 Prerequisiti indispensabili per lo studio dei fondamenti di elettronica

Sicuramente la conoscenza e l'assimilazione dei contenuti dell'elettromagnetismo e della teoria dei circuiti lineari, affrontati rispettivamente nei corsi di *Fisica* ed *Elettrotecnica* costituiscono una base indispensabile per lo studio dell'elettronica in modo critico e consapevole.

Riportiamo di seguito una serie di prerequisiti considerati fondamentali per potere affrontare con successo il corso.

- *primo e secondo principio di Kirchoff*;
- *bipoli e quadripoli*;
- *calcolo delle resistenze d'ingresso e d'uscita di un bipolo*;
- *resistenze e legge di Ohm*;
- *tensione e corrente nei condensatori e nelle induttanze*;
- *circuiti equivalenti di Thevenin e Norton e teorema di Millman*;
- *reattanze e impedenze*.

Tali argomenti verranno più volte utilizzati durante il corso e *non* costituiranno oggetto di richiami e approfondimenti in alcun caso. *Ergo*, chi ha vuoti di memoria o semplicemente la coscienza un po' sporca… vada a studiare!

2.6 L'arte di evitare i tranelli delle approssimazioni, *ovvero* piccolo sì… ma quanto?

A differenza di quanto avviene in Elettrotecnica, i valori dei parametri circuitali con cui ci si trova a lavorare sono *reali*. In pratica, non incontreremo mai resistenze da 0,01 Ω, o condensatori da 1 F – comuni nelle esercitazioni di Elettrotecnica – semplicemente perché questi valori sono troppo piccoli o troppo grandi e componenti di tal tipo non sono commercialmente disponibili.

Tutto ciò ci permetterà – quando possibile – di semplificare i circuiti. L'analisi manuale (cioè senza l'uso di calcolatori elettronici) dei circuiti elettronici, inoltre, richiede quasi imperativamente il ricorso a tecniche di semplificazione (talora *estreme*) delle relazioni circuitali. Si noti che sebbene oggi l'analisi e il progetto dei circuiti elettronici vengano effettuata al calcolatore, l'approccio iniziale e l'impostazione del problema è sempre di tipo "manuale".

Notiamo, infine, che una certa propensione alla semplificazione dei problemi dovrebbe essere un'attitudine quasi *naturale* di ogni ingegnere. Essa si applica non solo ai circuiti elettronici, ma anche a sistemi fisici *reali* di qualsiasi tipo. Noti che siano i vincoli teorici e le leggi fondamentali che regolano un determinato *sistema*, un buon ingegnere dovrebbe riuscire subito ad individuare le eventuali scorciatoie che permettano di comprendere il funzionamento del sistema senza effettuare uno studio teorico "tradizionale" (un approccio teorico più rigoroso seguirà eventualmente questo prima valutazione approssimata). Insomma, l'*arte di arrangiarsi* elevata al rango di disciplina ufficiale!

Attenzione! Il ricorso ad approssimazioni è lecito soltanto qualora si conoscano bene i *contorni* di un problema. Non basta eliminare una resistenza o semplificare un termine da un'equazione semplicemente perché *troppo piccolo* (o *troppo grande*, dipendentemente dal problema). Bisogna sempre chiedersi: *piccolo (o grande) rispetto a cosa?...* Da qui si comprende l'importanza di conoscere bene le condizioni al contorno.

Un'ulteriore considerazione da effettuarsi è legata alle tolleranze dei componenti elettronici. Le resistenze ad esempio sono disponibili commercialmente con tolleranze tipiche del 20%, del 10%, del 5% e dell'1%. I valori bassi di tolleranza sono destinati ad applicazioni di precisione e strumentazioni elettroniche. Per i nostri scopi, una tolleranza del 10 o del 20% sulle resistenze sarà dunque la norma. Pertanto, è lecito chiedersi ad esempio qual è il senso di eseguire calcoli su una rete elettrica per valutare tensioni e correnti con precisione della sesta cifra decimale, se l'errore dovuto alle tolleranze dei componenti è in ogni caso maggiore?...

Vediamo alcuni esempi, direttamente o indirettamente legati ad alcuni argomenti trattati in questo corso.

1. Supponiamo di disporre di un materiale avente una densità di 10^{16} elettroni liberi (disponibili cioè per la conduzione elettrica) al cm^3; se ad esso riusciamo in qualche modo ad "aggiungere" altri 10^4 elettroni/cm^3, quale sarà la densità finale di elettroni nel materiale?

Risposta: Sinceramente, quanti di voi hanno risposto 10^{20}? Provate a fare il calcolo con una calcolatrice scientifica. Resterete sorpresi come anche le migliori calcolatrici "approssimano" il risultato quando non sono più in grado di rappresentarlo. Per quelli che ancora ci stanno ragionando sopra: $10^{16} + 10^4 \approx 10^{16}$ con ottima approssimazione! E se non siete ancora convinti, utilizzate la notazione decimale invece di quella esponenziale…

2. Quanto vale la tensione d'uscita v_o del seguente partitore?

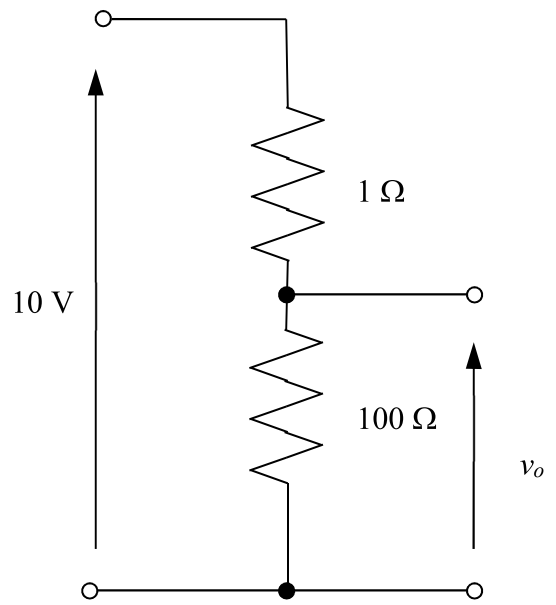

Fig. 0.8 – *Calcolo della tensione d'uscita in un partitore*

Risposta: I più diligenti avranno svolto immediatamente il calcolo:

$$100\ \Omega \times \text{corrente che scorre nella maglia} = 100\ \Omega \times \frac{10\ \text{V}}{100\ \Omega + 1\ \Omega} = 9{,}9\ \text{V} \qquad (0.3)$$

I più illuminati avranno invece osservato che la resistenza di 1 Ω è piccola rispetto a quella di 100 Ω ed è quindi trascurabile. Dunque la tensione d'uscita è pressappoco uguale a quella d'ingresso (10 V). L'errore che si commette con l'approssimazione è dell'ordine dell'1 %, più che accettabile nella maggioranza delle applicazioni comuni, se si considera che la tolleranza delle resistenze commerciali è del 20 %.

3. Modifichiamo il partitore come in Fig. 0.9. Calcolate la tensione d'uscita.

Risposta: In questo caso la resistenza non è più piccola, anzi 10 kΩ è un valore di una certa consistenza… Attenzione! Anche in questo caso bisogna chiedersi, *rispetto a quale altro parametro* si valuta la piccolezza o la consistenza della nostra resistenza. Se si deve calcolare la tensione d'uscita – e quindi la corrente che scorre nella maglia – il problema è esattamente analogo a quello di prima: per il calcolo della corrente la resistenza di 10 kΩ può trascurarsi rispetto a quella da 1 MΩ.

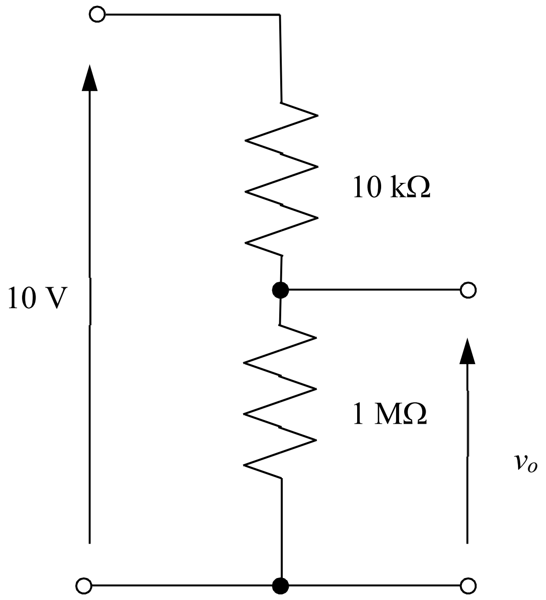

Fig. 0.9 – *Altro esempio per il calcolo della tensione d'uscita in un partitore*

E se le due resistenze fossero da 1 Ω e da 4 Ω, potreste trascurare quella più piccola? Provate adesso voi a rispondere.

4. Esempio riassuntivo: calcoliamo l'andamento della tensione d'uscita v_o del circuito di Fig. 0.10, nell'ipotesi che il segnale d'ingresso v_i sia costituito da una sinusoide di 1 mV d'ampiezza.

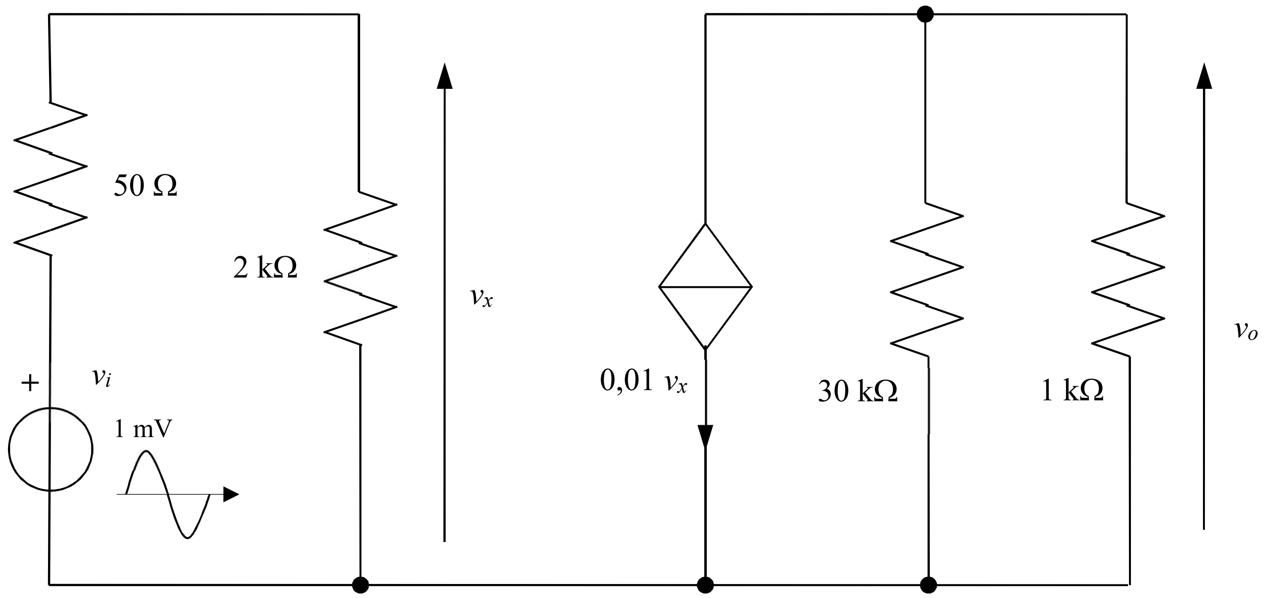

Fig. 0.10 – *Esempio riassuntivo: calcolo della tensione d'uscita*

Risposta: Osserviamo che i due circuiti d'ingresso e d'uscita sono fisicamente separati tra di loro; tuttavia l'uscita risente da ciò che succede in ingresso attraverso il *generatore di corrente pilotato in tensione* 0,01 v_x (ovviamente 0,01 ha le dimensioni di una transconduttanza).

Si rileva immediatamente che in uscita si avrà una sinusoide, sfasata di 180° rispetto a quella d'ingresso, di ampiezza 10 mV. Troppo rapido? Basta semplicemente osservare:

a) che la tensione v_x praticamente è la stessa di quella d'ingresso v_i: il circuito d'ingresso è infatti un partitore dove la resistenza di 50 Ω è trascurabile rispetto a quella da 2 kΩ;

b) che la corrente proveniente dal generatore pilotato passa praticamente tutta sulla resistenza di 1 kΩ, visto che la resistenza da 30 kΩ è molto più grande. In altri termini si può dire che la *resistenza equivalente* data dal *parallelo* tra 1 kΩ e 30 kΩ è pari circa a 1 kΩ: provate a fare il calcolo (vi ricordate la formula?)!

c) che la tensione d'uscita sarà data dal prodotto tra la resistenza da 1 kΩ e la corrente proveniente dal generatore pilotato 0,01 v_x = 0,01 v_i (cfr. punto *a*), ovviamente cambiato di segno dato che nel ramo d'uscita la corrente scorre dal "–" al "+" , cioè $v_o = -10^3 \cdot 0{,}01\, v_i = -10\, v_i$.

Ragionamenti di questo tipo saranno molto frequenti nel corso di elettronica che andiamo ad affrontare.