1

Introduzione alla progettazione elettronica

Contenuti del capitolo

1.1 Introduzione
1.2 Breve storia dell'elettronica
1.3 Sistemi elettronici
1.4 Segnali elettrici e simbologia
1.5 Classificazione dei sistemi elettronici
1.6 Specifiche dei sistemi elettronici
1.7 Progetto di sistemi elettronici
1.8 Progetto dei circuiti elettronici
1.9 Dispositivi elettronici
BIBLIOGRAFIA

1.1 *Introduzione*

Incontriamo "l'elettronica" durante la vita quotidiana nella forma di apparecchi telefonici, apparecchi radio, televisori, sistemi audio, applicazioni domestiche, personal computer e apparecchiature per l'automazione e il controllo industriale. L'elettronica è divenuta stimolo e parte integrante per la crescita e lo sviluppo della tecnologia moderna. Il settore dell'elettronica riguarda il progetto e le applicazioni dei dispositivi elettronici.

Gli obiettivi formativi di questo capitolo sono i seguenti:

- avere una panoramica dello sviluppo storico dell'elettronica;
- conoscere i sistemi elettronici e la loro classificazione;
- capire in cosa consiste un progetto ingegneristico;
- acquisire i concetti di circuito elettronico e di progetto del sistema;
- sviluppare una comprensione di base dei dispositivi elettronici.

1.2 *Breve storia dell'elettronica*

L'epoca dell'elettronica inizia con l'invenzione del primo dispositivo in grado di amplificare: il *tubo a vuoto* detto "*triodo*", scoperto da Fleming nel 1904. Quest'invenzione fu seguita dallo sviluppo *del diodo a stato solido con contatto a punta* (silicio) di Pickard nel 1906, dalla realizzazione dei primi *circuiti radio* a diodi e triodi fra il 1907 e il 1927, dall'introduzione del *ricevitore supereterodina* per merito di Armstrong nel 1920, dalla dimostrazione della realizzabilità della *televisione* e dalla proposta del *dispositivo a effetto*

di campo per merito di Lilienfield nel 1925, dalla scoperta della *modulazione di frequenza* (FM) dovuta ad Armstrong nel 1933 e del *radar* nel 1940.

La prima rivoluzione dell'elettronica inizia nel 1947 con l'invenzione del *transistore al silicio* dovuta a Bardeen, Brattain e Shockley dei Bell Telephone Laboratories. La maggior parte delle tecnologie elettroniche avanzate di oggi si possono far risalire a quest'invenzione, così come la moderna microelettronica si è sviluppata attraverso gli anni dai dispositivi a semiconduttore. Questa rivoluzione fu seguita dalla prima realizzazione della *televisione a colori* nel 1950 e dall'invenzione del *transistore unipolare a effetto di campo* dovuta a Shockley nel 1952.

Il successivo balzo in avanti arrivò nel 1956 quando, presso i laboratori Bell, fu sviluppato il *tiristore o diodo controllato* (SCR). La seconda rivoluzione elettronica inizia con la realizzazione del primo diodo controllato commerciale dovuto alla General Electric nel 1958. Questo fu l'inizio di una nuova era per le applicazioni dell'elettronica nel trattamento e controllo della potenza, chiamata *elettronica di potenza* (Power Electronics). Da allora si sono sviluppati molti tipi di dispositivi di potenza a semiconduttore e molte tecniche di conversione dell'energia elettrica.

Il primo *circuito integrato* (IC) fu sviluppato nel 1958 contemporaneamente da Kilby della Texas Instruments e da Noyce e Moore della Fairchild Semiconductors, segnando l'inizio di una nuova fase nella rivoluzione microelettronica. A questa invenzione fece seguito lo sviluppo del primo *amplificatore operazionale integrato* di tipo commerciale, il µA709, realizzato dalla Farchild Semiconductor nel 1968, del microprocessore 4004 della Intel nel 1971, del microprocessore a 8 bit della Intel nel 1972 e della memoria da un gigabit su singolo chip della Intel nel 1995. L'evoluzione tecnologica dai tubi a vuoto fino alla moderna microelettronica è mostrata in Fig. 1.1. Lo sviluppo dei circuiti integrati continua oggigiorno nel tentativo di realizzare chip a densità sempre più elevata e con minore dissipazione di potenza; nella Tab. 1.1 sono riportati i vari livelli di integrazione raggiunti e le relative date di realizzazione.

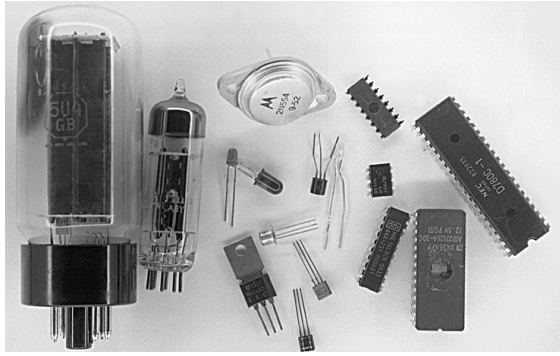


FIGURA 1.1 Evoluzione dai tubi a vuoto alla microelettronica

TABELLA 1.1 Livelli di integrazione

Data	Grado di integrazione	Numero di componenti per chip
1950	Componenti discreti	1 o 2
1960	Piccola scala di integrazione (SSI)	Meno di 10^2
1966	Media scala di integrazione (MSI)	Da 10^2 a 10^3
1969	Grande scala di integrazione (LSI)	Da 10^3 a 10^4
1975	Grandissima scala di integrazione (VLSI)	Da 10^4 a 10^9
1990	Ultra grande scala di integrazione (ULSI)	Più di 10^9

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.2

- Dall'invenzione nel 1904 del primo dispositivo in grado di amplificare, il tubo a vuoto, l'elettronica si è sviluppata rapidamente. Attualmente i circuiti a "ultra grande scala di integrazione" (ULSI) hanno più di 10^9 componenti per chip.

1.3 Sistemi elettronici

Un sistema elettronico è un insieme di dispositivi elettronici e componenti elettrici, opportunamente interconnessi, caratterizzato da un insieme di ingressi e di uscite. Utilizzare i transistori (trans-resistori) come dispositivi vuol dire introdurre dell'informazione nel sistema attraverso i segnali d'ingresso (o semplicemente ingressi), eseguire un'elaborazione di essa e quindi generare i segnali d'uscita (o semplicemente uscite). I sistemi elettronici si possono classificare in funzione delle applicazioni nelle quali sono impiegati, come i sistemi di comunicazione, l'elettronica medica, la strumentazione, i sistemi di controllo o i sistemi di elaborazione (calcolatori).

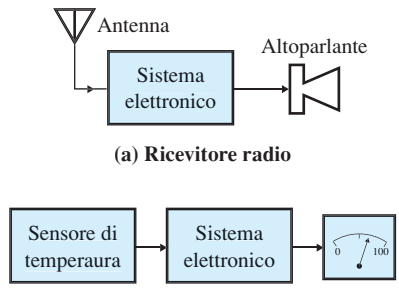
In Fig. 1.2(a) è riportato lo schema a blocchi di un ricevitore radio FM. L'antenna funge da sensore; il segnale d'ingresso dall'antenna è piccolo, di solito dell'ordine di grandezza dei microvolt, la sua ampiezza e potenza vengono quindi amplificati dal sistema elettronico prima che il segnale sia inviato all'altoparlante. In Fig. 1.2(b) si può osservare lo schema a blocchi di uno strumento per la misura di temperatura. L'uscita pilota lo strumento indicatore; il sensore di temperatura fornisce una piccola tensione, solitamente alcuni millivolt per grado centigrado nell'intorno di 0 °C (per esempio 1 mV/°C). Entrambi i sistemi ricevono il segnale da un sensore, lo elaborano e producono un segnale d'uscita in grado di pilotare l'attuatore.

Un sistema elettronico deve comunicare con i dispositivi d'ingresso e d'uscita. In generale gli ingressi e le uscite sono segnali elettrici. I segnali d'ingresso si possono ottenere dalla misura di grandezze fisiche quali la temperatura, oppure il livello di un liquido in un serbatoio; i segnali d'uscita possono essere usati per variare altre grandezze fisiche, come per esempio l'indicazione di uno strumento di visualizzazione o la temperatura di un ambiente mediante un elemento riscaldatore. I sistemi elettronici usano *sensori* per rivelare le caratteristiche di ingressi esterni e usano gli *attuatori* per controllare le caratteristiche di uscite esterne. I sensori e gli attuatori sono spesso chiamati *trasduttori*. L'altoparlante è un esempio di trasduttore che converte un segnale elettrico in uno sonoro.

Sensori

Ci sono molti tipi di sensori, fra i quali:

- termistori e termocoppie per la misura della temperatura;
- fototransistori e fotodiodi per la misura della luce;
- estensimetri (*strain gauges*) e materiali piezoelettrici per la misura di forza;



(a) Ricevitore radio

(b) Termometro elettronico

FIGURA 1.2 Sistemi elettronici

- potenziometri, sensori induttivi, codificatori di posizione assoluta per la misura di spostamenti;
- generatori tachimetrici, accelerometri e sensori a effetto Doppler per misure di movimenti;
- microfoni per la misura del suono.

Attuatori

Gli attuatori forniscono un'uscita non elettrica da un segnale elettrico; ci sono molti tipi di attuatori, fra questi:

- riscaldatori a resistenza ohmica per produrre calore;
- diodi emettitori di luce (LED) e variatori di luce per controllare la luminosità;
- solenoidi per produrre forze;
- strumenti indicatori per mostrare spostamenti;
- motori elettrici per produrre movimenti;
- altoparlanti e trasduttori ultrasonici per produrre suoni.

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.3

- Un sistema elettronico è costituito da dispositivi e componenti elettronici. Esso elabora segnali elettrici, agendo da interfaccia tra i sensori (ingressi) e gli attuatori (uscite).
- I sensori trasformano grandezze fisiche in segnali elettrici, mentre gli attuatori trasformano segnali elettrici in grandezze fisiche. I sensori e gli attuatori sono chiamati comunemente *trasduttori*.

1.4 *Segnali elettrici e simbologia*

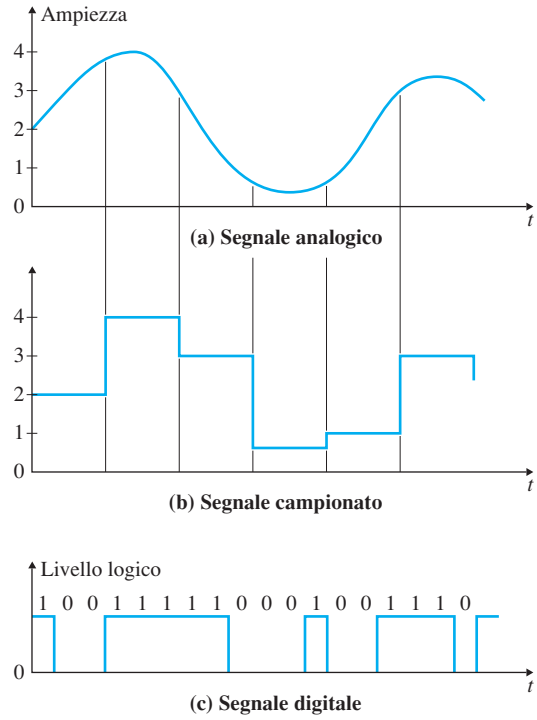
I segnali elettrici si possono dividere in due categorie: analogici e digitali. Un segnale analogico ha un'ampiezza che varia con continuità nel tempo, come mostrato in Fig. 1.3(a). Un segnale digitale può assumere solo due valori che rappresentano il valore logico binario 1 (livello alto) e il valore logico binario 0 (livello basso). Al fine di ridurre gli effetti delle variazioni dei valori dei componenti, della temperatura e del rumore (o dei segnali esterni), al livello logico 1 è normalmente assegnata qualunque tensione compresa tra 2 e 5 V e al livello logico 0 è assegnata qualunque tensione compresa tra 0 e 0.8 V (livelli di tensione TTL).

Il segnale di uscita di un sensore è solitamente di tipo analogico e gli attuatori spesso richiedono un segnale d'ingresso analogico e generano un'uscita proporzionale. Un segnale analogico si può convertire in un segnale digitale e viceversa. I circuiti elettronici che operano questa conversione si chiamano *convertitori analogico-digitale* (A/D) e *digitale-analogico* (D/A).

Convertitori analogico-digitale

Un convertitore A/D trasforma un segnale analogico in una opportuna codifica digitale e rappresenta il collegamento fra il mondo analogico e quello digitale. Si consideri la tensione analogica riportata in Fig. 1.4(a), che è il segnale d'ingresso al convertitore. Tale segnale è campionato a intervalli fissi determinati dal *tempo di campionamento* T_s per cui si assegna un numero binario di n bit ($b_1 b_2 \ldots b_n$) a ciascun campione, come mostrato in Fig. 1.4(b) per $n = 3$. Il numero binario di n bit è la frazione binaria che rappresenta il rapporto tra la tensione incognita d'ingresso v_I e la tensione di fondo scala V_{FS} del convertitore. Per $n = 3$, ciascun livello binario corrisponde a $V_{FS}/2^n = V_{FS}/8$. La tensione d'uscita di un convertitore A/D a 3 bit è riportata in Fig. 1.4(c).

FIGURA 1.3
Segnali elettrici



La relazione ingresso-uscita mostrata in Fig. 1.4(c) indica che mentre la tensione d'ingresso cresce in maniera continua da 0 fino al valore di fondo scala, l'uscita binaria aumenta a passi unitari da 000 fino a 111. Il numero binario rimane costante in un intervallo di variazione della tensione d'ingresso pari a $V_{FS}/2^n$ (cioè $V_{FS}/8$ per $n = 3$) che corrisponde al valore del bit meno significativo (LSB) del convertitore A/D. Ovvero, mentre la tensione d'ingresso aumenta, l'uscita binaria sarà inizialmente affetta da un errore negativo e poi da un errore positivo, come mostrato in Fig. 1.4(d). Questo errore, chiamato *errore di quantizzazione*, può essere ridotto aumentando il numero n di bit. In base a ciò, l'errore di quantizzazione è legato al valore della tensione minima in grado di modificare il bit meno significativo dell'uscita binaria. Tale tensione è detta anche *risoluzione* del convertitore e si può trovare nella forma

$$V_{LSB} = V_{FS}/2^n; V_{error} = \pm V_{LSB}/2 \tag{1.1}$$

dove V_{FS} è la tensione di fondo scala del convertitore. Per esempio, V_{LSB} per un convertitore a 8 bit con 5 V di fondo scala ha il valore

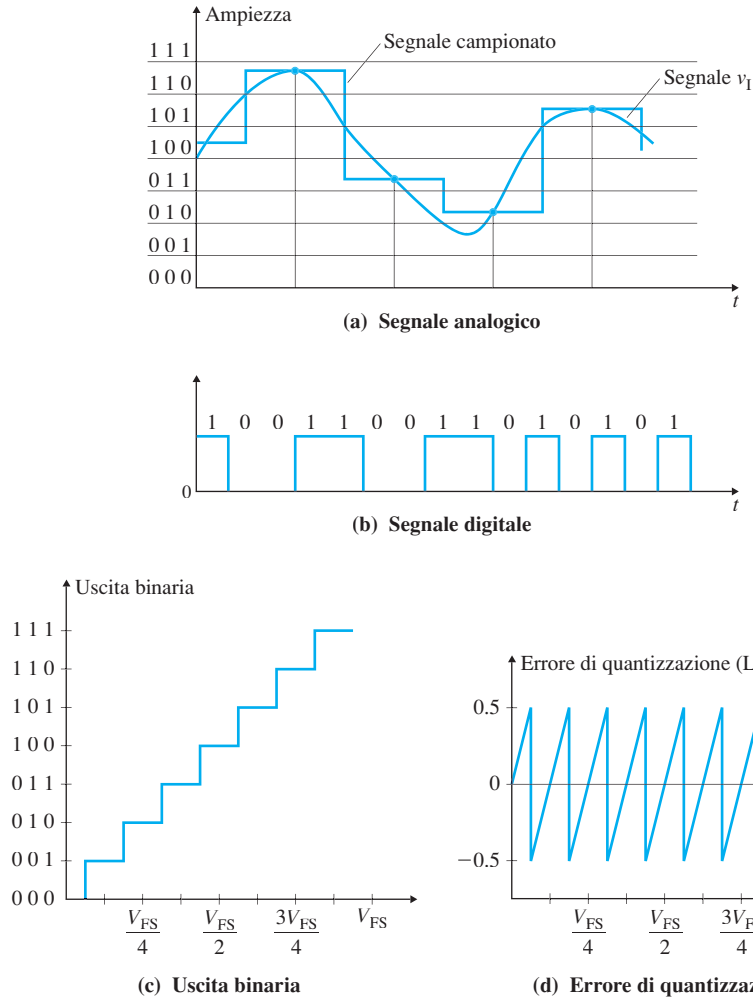
$$V_{LSB} = V_{FS}/2^n = 5/2^8 = 19.53 \text{ mV} \approx 20 \text{ mV}$$

Convertitori digitale-analogico

Un convertitore D/A ha in ingresso un segnale in forma binaria e fornisce in uscita una tensione o una corrente analogica (o continua). In Fig. 1.5 è riportato lo schema a blocchi di un convertitore D/A a n bit ($b_1 b_2 \ldots b_n$) Si assuma che il convertitore generi la frazione binaria, che è moltiplicata per la tensione di fondo scala V_{FS} per dare la tensione d'uscita, espressa da

$$V_O = (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + b_3 2^{-3} + \ldots + b_n 2^{-n}) V_{FS} \tag{1.2}$$

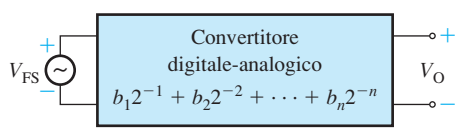
FIGURA 1.4
Conversione analogico-digitale



dove la i-esima cifra binaria può assumere il valore $b_i = 0$ o $b_i = 1$ e b_1 è il bit più significativo (MSB). Per esempio, per $V_{FS} = 5$ V, $n = 3$ e per la parola binaria $b_1b_2b_3 = 110$, l'Eq. (1.2) dà:

$$V_O = (1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 0 \times 2^{-3}) \times 5 = 3.75 \text{ V}$$

FIGURA 1.5
Convertitore digitale-analogico



Simbologia

Un segnale analogico viene normalmente rappresentato da un simbolo con un pedice. Sia il simbolo che il pedice possono essere maiuscoli o minuscoli, secondo la convenzione riportata in Tab. 1.2. Per esempio, si prenda in considerazione il circuito di Fig. 1.6(a), il cui ingresso consta di una tensione continua $V_{DC} = 5$ V e una tensione alternata $v_{ab} = 2 \sin \omega t$. Le tensioni istantanee sono mostrate in Fig. 1.6(b). Le definizioni dei simboli di tensione e corrente sono riportate a pagina seguente.

1. V_{DC}, I_{DC} sono valori continui: variabili maiuscole e pedici maiuscoli

$$V_{DC} = 5 \text{ V}$$
$$I_{DC} = V_{DC}/R_L = 5 \text{ mA}$$

2. v_{ab}, i_a sono valori alternati istantanei: variabili minuscole e pedici minuscoli

$$v_{ab} = v_{ac} = 2 \sin \omega t$$
$$i_a = 2 \sin \omega t \text{ mA} \quad (\text{per } R_L = 1 \text{ k}\Omega)$$

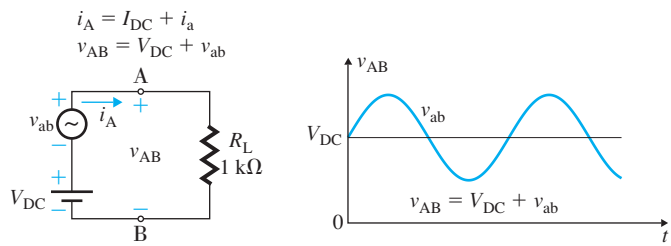
3. v_{AB}, i_A sono valori totali istantanei: variabili minuscole e pedici maiuscoli

$$v_{AB} = V_{DC} + v_{ab} = 5 + 2 \sin \omega t$$
$$i_A = I_{DC} + i_a = 5 \text{ mA} + 2 \sin \omega t \text{ mA} \quad (\text{per } R_L = 1 \text{ k}\Omega)$$

4. V_{ab}, I_a sono valori di ampiezza totale: variabili maiuscole e pedici minuscoli

$$V_{ab} = \sqrt{5^2 + (\sqrt{2})^2} = 5.20 \text{ V}$$
$$I_a = \sqrt{5^2 + (\sqrt{2})^2} = 5.20 \text{ mA}$$

FIGURA 1.6
Simbologia usata per i segnali elettrici



(a) Tensioni continue (dc) e alternate (ac) **(b) Valori istantanei**

TABELLA 1.2
Definizione dei simboli e dei pedici

Definizione	Grandezza	Pedice	Esempio
Grandezza continua	Maiuscolo	Maiuscolo	V_D
Grandezza alternata	Minuscolo	Minuscolo	v_d
Valore istantaneo totale (continua più alternata)	Minuscolo	Maiuscolo	v_D
Grandezze complesse, fasori o valore efficace	Maiuscolo	Minuscolo	V_d

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.4

- Ci sono due tipi di segnali elettronici: analogici e digitali. Un segnale analogico può essere trasformato nella forma digitale e viceversa.
- Un simbolo minuscolo viene utilizzato per rappresentare una quantità istantanea e un simbolo maiuscolo viene usato per valori continui e per il valore efficace. Un pedice minuscolo viene usato per indicare quantità istantanee in alternata e valore efficace, un pedice maiuscolo è usato per indicare il valore totale istantaneo, cioè che include sia la quantità continua che alternata.

1.5 Classificazione dei sistemi elettronici

Il tipo d'elaborazione eseguita da un sistema elettronico dipende dalla natura del segnale d'ingresso, dalle condizioni poste all'uscita dagli attuatori e dall'insieme delle esigenze richieste dalla funzione che deve essere svolta. Tuttavia, ci sono alcune funzioni che sono comuni a un grande numero di sistemi, quali l'amplificazione, la somma e sottrazione di segnali, l'integrazione, la derivazione e il filtraggio. Alcuni sistemi necessitano di un insieme di operazioni quali conteggi, misure di intervalli temporali, il caricamento di valori costanti e scelte logiche. Inoltre, può essere necessario all'interno di un sistema generare segnali sinusoidali o di altra forma.

I sistemi elettronici trovano applicazione nel mercato automobilistico, nelle apparecchiature di intrattenimento domestico, nei sistemi di comunicazione, nelle apparecchiature mediche; in tanti altri settori aiutano a mantenere il nostro tenore di vita a un alto livello tecnologico. I sistemi elettronici sono spesso classificati secondo il tipo di applicazione:

- elettronica per l'automobile;
- elettronica delle telecomunicazioni;
- elettronica di consumo;
- elettronica industriale;
- elettronica per la strumentazione;
- meccatronica;
- elettronica medica;
- elettronica dei servizi.

L'elettronica si divide in tre aree distinte, a seconda dei tipi di segnale e di elaborazione richiesti ai sistemi elettronici.

L'elettronica analogica si occupa prevalentemente del funzionamento e delle applicazioni dei transistori come dispositivi amplificatori. I segnali d'ingresso e d'uscita assumono valori che variano con continuità nel tempo. La funzione dell'elettronica analogica è quella di trasferire ed elaborare l'informazione contenuta in un segnale d'ingresso analogico introducendo la minima distorsione.

L'elettronica digitale si occupa del funzionamento e delle applicazioni dei transistori come dispositivi di commutazione (acceso e spento, *on–off*). Sia i segnali d'ingresso che d'uscita sono di tipo impulsivo e discontinuo, che si presentano con cadenza uniforme nel tempo. La funzione dell'elettronica digitale è quella di trasferire ed elaborare l'informazione contenuta in un segnale d'ingresso digitale con il minimo errore e il più velocemente possibile.

L'elettronica di potenza si occupa del funzionamento e delle applicazioni dei dispositivi a semiconduttore di potenza, inclusi i transistori di potenza, usati in commutazione (*on–off*) per il controllo e la conversione dell'energia elettrica. Sia l'elettronica analogica che quella digitale vengono usate per generare i segnali di controllo dei dispositivi di potenza, al fine di ottenere i tipi di conversione desiderati con il massimo rendimento e la minima distorsione della forma d'onda (per esempio ac/dc, ac/ac, dc/ac, oppure dc/dc). La grandezza d'ingresso di un sistema elettronico di potenza è la tensione (o la corrente) di alimentazione in continua o in alternata. L'elettronica di potenza si occupa principalmente della quantità e della qualità dell'energia, piuttosto che dell'informazione contenuta in un segnale. Per esempio, un circuito elettronico di potenza è in grado di alimentare con una tensione continua stabilizzata di 12 V un sistema analogico e con una tensione di 5 V un sistema digitale, partendo da un'alimentazione in alternata di 220 V a 50 Hz.

La microelettronica ci ha permesso di generare ed elaborare segnali di controllo a una velocità incredibile. L'elettronica di potenza ha reso possibile sviluppare e controllare grandi quantità di energia con elevata efficienza (fra il 94% e il 99%). Molte applicazioni

dell'elettronica di potenza sono attualmente sviluppate grazie al connubio fra elettronica di potenza, analoga alla forza fisica e la microelettronica, analoga alle funzioni cerebrali. Inoltre, l'elettronica di potenza è emersa quale disciplina a sé stante e sta rivoluzionando il concetto di condizionamento ed elaborazione dell'energia per l'automazione e il controllo della potenza in ambito industriale.

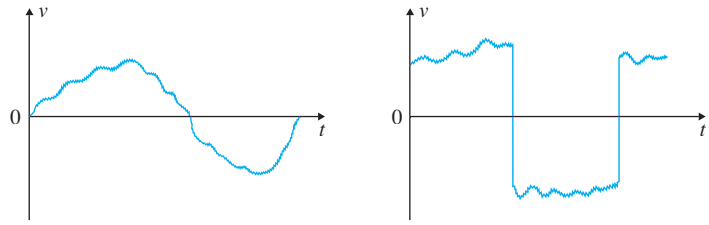
Molti sistemi elettronici fanno uso di entrambe le tecniche, sia analogica che digitale. Ciascun metodo ha i suoi vantaggi e svantaggi che sono riassunti qui di seguito.

- Nei circuiti elettronici è di solito presente il rumore. Esso è definito come un segnale estraneo dovuto all'agitazione termica degli elettroni o ad altri fenomeni casuali presenti nei dispositivi. A esso possiamo associare anche i disturbi dovuti all'accoppiamento induttivo o capacitivo con segnali di altri sistemi, o ad altre sorgenti. Il rumore si somma direttamente ai segnali analogici e quindi altera i segnali stessi, come mostrato in Fig. 1.7(a). Esso viene poi amplificato dai successivi stadi amplificatori. Poiché i segnali digitali ammettono solo due valori (alto o basso), il rumore non altera l'uscita digitale, come mostrato in Fig. 1.7(b) e quindi può essere eliminato facilmente nei sistemi digitali.
- Un circuito analogico richiede un numero minore di componenti rispetto a un circuito digitale per realizzare una data funzione. Tuttavia, in un circuito analogico sono spesso presenti dei grossi condensatori o induttanze che non possono essere realizzati in forma integrata.
- Un circuito digitale è solitamente più facile da realizzare in forma integrata rispetto a un circuito analogico, anche se il circuito digitale risulta più complesso. Tuttavia, i circuiti digitali consentono una elaborazione del segnale più precisa e più veloce.
- I sistemi analogici sono progettati per realizzare funzioni specifiche, mentre i sistemi digitali si adattano a più tipi di applicazioni.
- I segnali di un sistema elettronico provenienti da sensori e che pilotano attuatori sono generalmente analogici. Se un segnale d'ingresso è piccolo e deve essere elaborato ad altissima frequenza, allora è necessario usare la tecnica analogica. Per ottenere sistemi con prestazioni ottimali, sono spesso utilizzati entrambi gli approcci, sia analogico che digitale.

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.5

- L'elettronica può essere classificata secondo tre aree: elettronica analogica, elettronica digitale ed elettronica di potenza. La classificazione si basa principalmente sul tipo di elaborazione del segnale. I sistemi elettronici sono spesso classificati secondo il tipo di applicazione come: elettronica biomedica, elettronica per le telecomunicazioni e similari.

FIGURA 1.7
Effetti del rumore sui segnali analogici e digitali



(a) Segnale analogico più rumore **(b) Segnale digitale più rumore**

1.6 Specifiche dei sistemi elettronici

Un sistema elettronico è normalmente progettato per realizzare funzioni od operazioni ben determinate. Le caratteristiche di un sistema elettronico sono specificate o valutate in termini di tensione, corrente, impedenza, potenza, tempo e frequenza dei segnali d'ingresso e d'uscita. Le caratteristiche includono la risposta ai transitori, la distorsione, le specifiche di frequenza e le specifiche in continua e per piccoli segnali.

Risposta ai transitori

Le risposte ai transitori fanno riferimento al segnale d'uscita da un circuito, generato come risposta a un preciso segnale d'ingresso, di solito un segnale ripetitivo di tipo impulsivo, come mostrato in Fig. 1.8(a). Il segnale d'uscita in ogni ciclo è solitamente caratterizzato da un tempo di ritardo t_d (delay time), da un tempo di salita t_r (rise time), da un tempo in cui è attivo t_{on}, da un tempo di discesa t_f (fall time) e da un tempo durante il quale non è attivo t_{off}, come mostrato in Fig. 1.8(b). La risposta può mostrare una sovraelongazione (overshoot) in funzione del fattore di smorzamento del circuito, prima di stabilizzarsi nella condizione stazionaria, come mostra la curva tratteggiata in Fig. 1.8(b). I tempi caratteristici associati al segnale di uscita sono così definiti:

- *tempo di ritardo* t_d (delay time): tempo che si deve attendere prima che il circuito inizi a rispondere al segnale d'ingresso;
- *tempo di salita* t_r (rise time): tempo necessario all'uscita per salire dal 10% al 90% del suo valore finale (alto);
- *tempo di segnale attivo* t_{on}: tempo durante il quale il circuito è attivo;
- *tempo di discesa* t_f (fall time): tempo necessario all'uscita per scendere dal 90% al 10% del suo valore iniziale (alto);
- *tempo di segnale non attivo* t_{off}: tempo durante il quale il circuito è non operativo.

Quindi il periodo di commutazione T è:

$$T \approx t_d + t_r + t_{on} + t_f + t_{off} \tag{1.3}$$

e la frequenza di commutazione è $f = 1/T$. Questi tempi limitano la massima frequenza (velocità) di funzionamento f_{max} del circuito. Per esempio, la massima frequenza di funzionamento di un circuito con $t_d = 1\ \mu s$ e $t_r = t_f = 2\ \mu s$ è

$$f_{max} = 1/(t_d + t_r + t_f) = 1/5\ \mu s = 200\ \text{kHz}$$

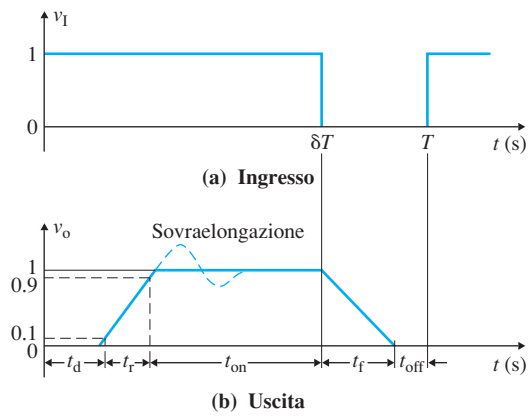


FIGURA 1.8 Risposta impulsiva di un circuito

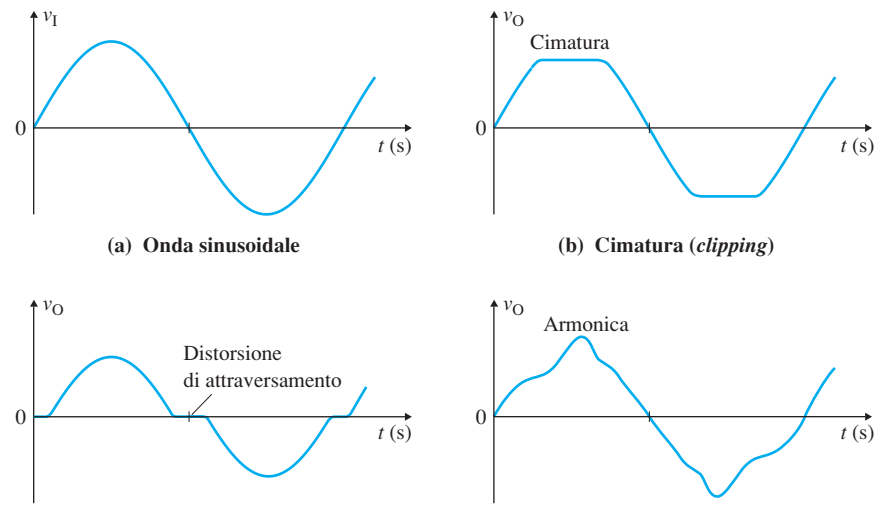
Distorsione

Un segnale viene spesso distorto nel passaggio attraverso i vari stadi di un sistema elettronico. La distorsione può assumere molte forme e può essere la causa dell'alterazione della forma, dell'ampiezza, della frequenza o della fase di un segnale. Alcuni esempi di distorsione sono riportati in Fig. 1.9: la parte (b) mostra il fenomeno di cimatura (clipping) della forma d'onda sinusoidale originale, riportata nella parte (a), dovuta ai limiti della tensione di alimentazione; la parte (c) mostra una distorsione d'attraversamento di zero e la parte (d) mostra una distorsione armonica dovuta alle caratteristiche non lineari dei dispositivi elettronici. Di solito, all'ingresso di un circuito viene posto un segnale sinusoidale di frequenza specificata e poi si misurano la fondamentale e le componenti armoniche del segnale di uscita. L'entità della distorsione, definita come la *distorsione armonica totale* (THD), è il rapporto tra il valore efficace delle componenti armoniche e il valore efficace della componente fondamentale (relativamente alla frequenza del segnale sinusoidale d'ingresso). La THD dovrebbe essere la più piccola possibile.

Specifiche di frequenza

Il campo delle frequenze dei segnali elettronici è molto ampio, dipendendo dall'applicazione come mostrato in Tab. 1.3. Le specifiche di frequenza possono essere fornite come grafico del rapporto fra segnale d'uscita e il segnale d'ingresso in funzione della frequenza. Un grafico tipico per un sistema come quello in Fig. 1.10(a), è riportato in Fig. 1.10(b). Per frequenze minori di f_L e maggiori di f_H l'uscita è attenuata, ma per frequenze tra f_L e f_H l'uscita rimane quasi costante. Il campo di frequenza da f_L a f_H è chiamato *larghezza di banda* BW del circuito, cioè $BW = f_H - f_L$. Un sistema con una larghezza di banda come

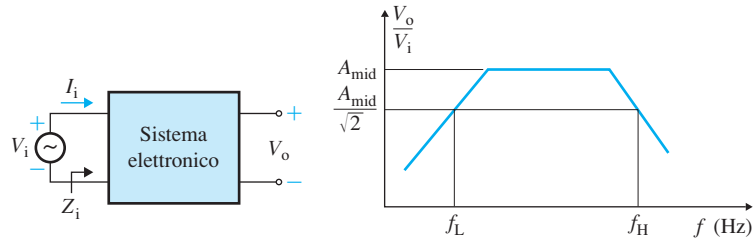
FIGURA 1.9
Esempi di distorsione



(a) Onda sinusoidale **(b) Cimatura (*clipping*)**

(c) Distorsione di attraversamento (*crossover*) **(d) Distorsione armonica**

FIGURA 1.10
Caratteristica di frequenza



(a) Circuito **(b) Risposta in frequenza**

TABELLA 1.3
Larghezze di banda dei segnali elettronici

Tipo di segnale	Larghezza di banda
Segnali sismografici	Da 1 a 200 Hz
Segnali elettrocardiografici	Da 0.05 a 100 Hz
Segnali audio	Da 20 Hz a 15 kHz
Segnali video	dc a 4.2 MHz
Segnali radio a modulazione di ampiezza (AM)	Da 540 a 1600 kHz
Segnali radar	Da 1 a 100 GHz
Segnali televisivi VHF	Da 54 a 60 MHz
Segnali radio a modulazione di frequenza (FM)	Da 88 a 106 MHz
Segnali televisivi UHF	Da 470 a 806 MHz
Segnali per telefonia cellulare	Da 900 a 1800 MHz
Segnali televisivi via satellite	Da 3.7 a 4.2 GHz
Segnali per comunicazioni a microonde	Da 1 a 50 GHz

quella mostrata in Fig. 1.10(b) si dice che ha una caratteristica passa-banda. Se $f_L = 0$ si dice che il sistema ha una caratteristica passa-basso, se invece $f_H = \infty$ si dice che il sistema ha una caratteristica passa-alto.

Se la frequenza di funzionamento giace all'interno della banda, il guadagno di tensione è definito come

$$A_{mid} = \frac{V_o}{V_i} \tag{1.4}$$

dove V_i e V_o sono rispettivamente i valori efficaci delle tensioni di ingresso e di uscita. L'impedenza d'ingresso è definita come

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \tag{1.5}$$

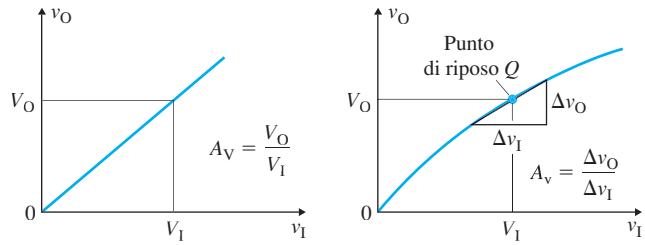
dove I_i è il valore efficace della corrente d'ingresso del circuito. Spesso Z_i viene a coincidere con la resistenza d'ingresso per piccoli segnali R_i, in quanto l'uscita è quasi indipendente dalla frequenza nella zona di centro banda. Idealmente, R_i dovrebbe tendere all'infinito. La resistenza equivalente di Thevenin vista dall'uscita è indicata come la resistenza di uscita R_o, che dovrebbe idealmente essere nulla.

Specifiche in continua e per piccoli segnali

Le specifiche in continua e per piccoli segnali comprendono la tensione continua d'alimentazione V_{CC}, le correnti di polarizzazione (necessarie ad alimentare e far funzionare i transistori) e la potenza dissipata P_D (potenza fornita dal generatore d'alimentazione). Comunemente viene fornito anche il guadagno di tensione (il rapporto tra la tensione di uscita v_O e la tensione d'ingresso v_I). Se la relazione fra v_O e v_I è lineare, come mostrato in Fig. 1.11(a) e il circuito lavora in un punto di riposo Q, il guadagno di tensione è dato da

$$A_V = \frac{v_O}{v_I} \tag{1.6}$$

A_V è chiamato *guadagno di tensione per grandi segnali*. La caratteristica ingresso-uscita di un sistema a transistori è tipicamente non lineare, come mostrato in Fig. 1.11(b). Se il circuito lavora in un punto di riposo Q e il segnale d'ingresso varia in un piccolo intervallo, allora la relazione fra v_O e v_I è approssimata da un andamento lineare. Si può quindi definire il guadagno di tensione per piccoli segnali A_v, espresso da



(a) Andamento lineare (b) Andamento non lineare

FIGURA 1.11 Caratteristiche per piccoli e grandi segnali

$$A_v = \left.\frac{\Delta v_O}{\Delta v_I}\right|_{\text{punto di riposo } Q} \tag{1.7}$$

I circuiti elettronici, specialmente gli amplificatori, operano in una zona praticamente lineare della caratteristica e per frequenze interne alla banda BW il guadagno è costante, $A_v \equiv A_{mid}$, dove A_{mid} è il guadagno a centro banda dell'amplificatore.

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.6

- I parametri che descrivono le prestazioni di sistemi e circuiti elettronici di solito includono specifiche per i transitori, distorsioni, comportamento in frequenza e specifiche per grandi e piccoli segnali.

1.7 *Progetto di sistemi elettronici*

I sistemi ingegneristici stanno diventando sempre più complessi. È quindi auspicabile che gli ingegneri siano in grado di analizzare, sintetizzare e progettare sistemi complessi. Progettare significa trasformare le specifiche in circuiti che siano in grado di soddisfare le specifiche di partenza. Progettare un sistema è quindi una sfida che coinvolge molte variabili. Siccome si possono ottenere soluzioni diverse in grado di soddisfare le stesse specifiche, nella progettazione è necessario prendere molte decisioni.

Nella realizzazione pratica di un progetto si usa affrontare e risolvere prima i problemi più impegnativi e poi quelli più semplici. Operando in questo modo, se non si può trovare una soluzione accettabile ai problemi difficili, non si sprecano tempo e denaro nel risolvere quelli più facili. Così, il processo di progettazione segue una gerarchia in cui si progettano per primi i sistemi attraverso diagrammi funzionali a blocchi, quindi i circuiti e poi i dispositivi. Questo metodo è l'opposto di ciò che si insegna di solito nei corsi accademici. Il progetto a livello di sistema si concretizza ed esprime in termini di blocchi funzionali e di integrazione di sistema [1]. I passi più importanti del processo di progettazione, mostrato in Fig. 1.12, sono i seguenti:

1. descrizione generale del sistema;
2. definizione delle specifiche;
3. progetto di sistema attraverso diagrammi a blocchi funzionali;
4. definizione delle specifiche dei blocchi funzionali per la sintesi e la realizzazione a livello di circuito;
5. integrazione di sistema;
6. modellazione e simulazione;
7. collaudo e verifica.

FIGURA 1.12
Flusso progettuale di un sistema elettronico

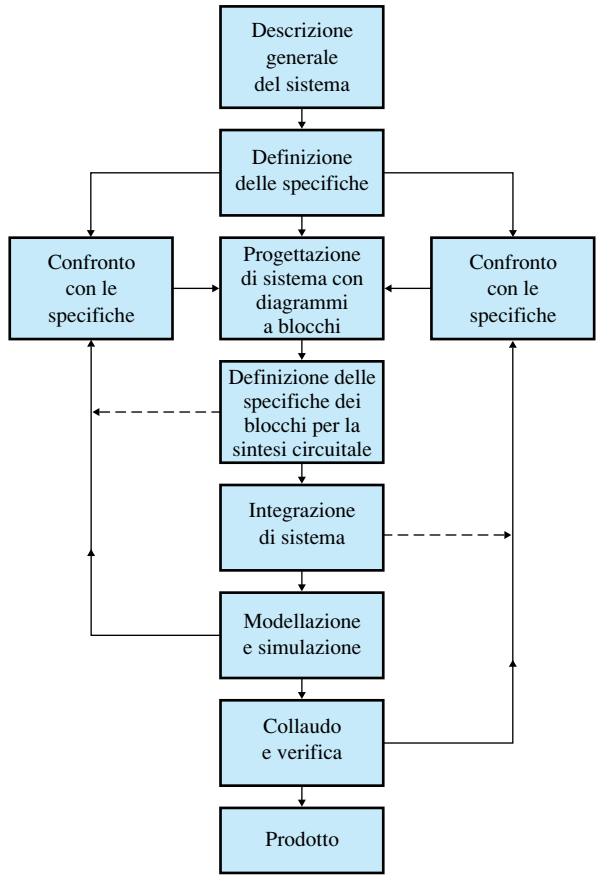
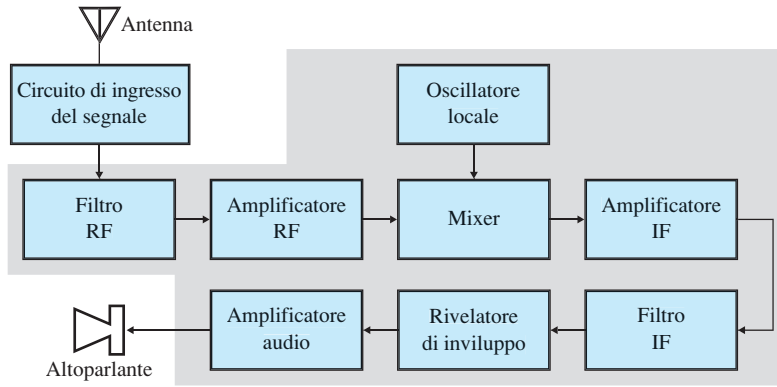


FIGURA 1.13
Schema a blocchi ad alto livello di un ricevitore radio



La soluzione a livello di sistema per progettare il ricevitore radio di Fig. 1.2(a) è riportata in Fig. 1.13; essa comprende gli amplificatori a radio frequenza (RF), a frequenza intermedia (IF) e a frequenza audio (AF). L'oscillatore locale serve ad accordare il ricevitore radio per ricevere il segnale della stazione desiderata.

In precedenza sono state date soltanto delle linee guida generali del flusso progettuale; i dettagli dipendono dal tipo di sistema che viene progettato. Il processo di progettazione può essere visto come un mezzo per compiere i passi di seguito riportati [2].

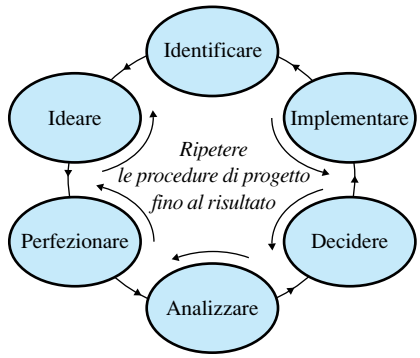


FIGURA 1.14
Iterazioni nel flusso progettuale. (J. Burkhard, "Lecture Notes on the Art of Design", Fort Wayne: The Indiana University, Purdue University, Forth Wayne, 1996)

1. Identificare il problema.
2. Concepire le idee per risolvere il problema.
3. Perfezionare le idee.
4. Analizzare tutte le possibili soluzioni.
5. Decidere le azioni da compiere.
6. Mettere in atto le decisioni prese.

Questi passi sono mostrati in Fig. 1.14. Essi sono ripetuti fintantoché le specifiche desiderate sono state soddisfatte. Ciascuno di questi sei passi può essere ulteriormente suddiviso come mostrato in Fig. 1.15. Essa evidenzia che un progetto ingegneristico coinvolge molte discipline e che un ingegnere progettista deve essere in grado di operare in un gruppo multidisciplinare e di comunicare in maniera efficiente con gli altri membri del gruppo.

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.7

- Nella realizzazione pratica di un progetto, i compiti più difficili vengono affrontati per primi, quindi vengono affrontati quelli più semplici. Il processo di progettazione segue una gerarchia in cui viene prima descritto l'intero sistema mediante diagrammi a blocchi, dopo vengono progettati i vari circuiti e infine i dispositivi.

1.8 *Progetto dei circuiti elettronici*

Un progetto a livello di circuito si realizza e si esprime in termini di componenti, dispositivi e relazioni fra tensioni e correnti. Il livello più basso è il progetto a livello di dispositivi, che comporta la scelta dei vari dispositivi. Prima di iniziare questa fase progettuale si deve avere una buona conoscenza dei dispositivi elettronici e delle loro caratteristiche, parametri e modelli.

Confronto tra analisi e progetto

L'analisi è il processo che consente di trovare le caratteristiche o proprietà peculiari di un dato circuito. Il progetto, invece, è il processo creativo che dà luogo allo sviluppo della soluzione di un problema. Iniziamo con un insieme di specifiche o proprietà desiderate e terminiamo trovando un circuito che le soddisfa. La soluzione non è unica e trovarla richiede un processo di sintesi. Per esempio, la corrente che scorre in un carico resistivo di 5 Ω alimentato da una batteria di 12 V è di 2.4 A. Tuttavia, se venisse richiesta la realizzazione di un carico che assorbe una corrente di 2.4 A da una batteria di 12 V, si potrebbero utilizzare varie combinazioni di resistenze in serie e in parallelo. La Fig. 1.16 mostra un confronto fra analisi e progetto.

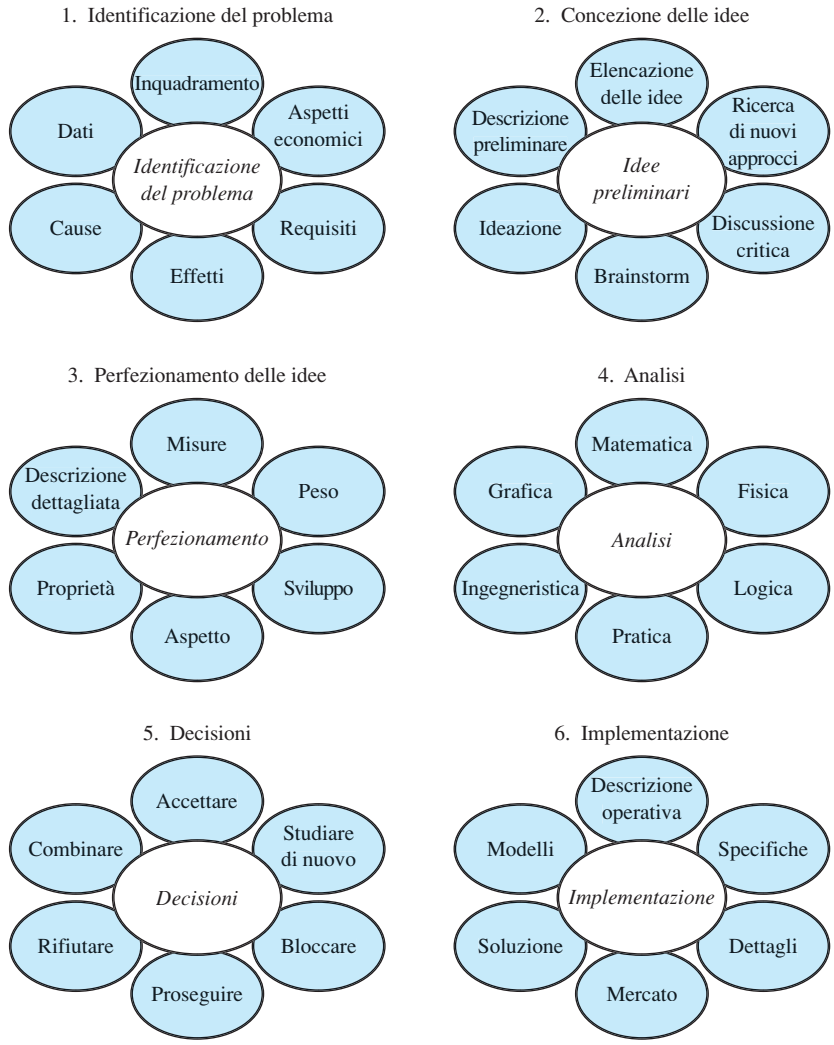


FIGURA 1.15 Elementi del flusso di progetto. (J. Burkhard, "Lecture Notes on the Art of Design", Fort Wayne: The Indiana University, Purdue University, Forth Wayne, 1996)

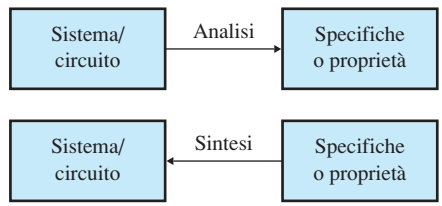


FIGURA 1.16 Analisi e Sintesi

Definizione di progetto ingegneristico

Che cosa è il progetto ingegneristico? Se facessimo questa domanda a molti ingegneri diversi, probabilmente otterremmo parecchie definizioni diverse. Il Comitato di Accreditamento per l'Ingegneria e la Tecnologia (ABET) dà la seguente esauriente definizione [3]:

> Il progetto ingegneristico è il procedimento tramite il quale si concepisce un sistema, un componente o un processo che consente di raggiungere gli scopi desiderati. È un procedimento (spesso iterativo) che comporta il prendere decisioni, in cui si applicano sia le scienze di base che quelle matematiche e ingegneristiche, per trasformare le risorse in modo ottimale al fine di raggiungere un obiettivo predeterminato. Tra gli elementi fondamentali del flusso progettuale ci sono lo stabilire gli obiettivi e i criteri, la sintesi, l'analisi, la costruzione, il collaudo e la veri-

fica. Il curriculum formativo di un progettista deve includere la maggior parte delle seguenti componenti: lo sviluppo della creatività, saper affrontare problemi aperti, lo sviluppo e l'uso delle teorie e delle metodologie di progetto, la formulazione dei passi e delle specifiche di progetto, la valutazione di soluzioni alternative, considerazioni sulla fattibilità, conoscenza dei processi produttivi, la progettazione concorrente e la descrizione dettagliata dei sistemi. Inoltre, è essenziale tenere presente un insieme di vincoli pratici quali: fattori economici, sicurezza, affidabilità, estetica, etica e impatto sociale.

Progettazione a livello di circuito

I passi più importanti della progettazione a livello di circuito, il cui flusso è mostrato in Fig. 1.17, sono i seguenti.

Passo 1. Studiare il problema.

Passo 2. Determinare gli obiettivi del progetto, cioè stabilire i parametri da conseguire in termini di prestazione.

Passo 3. Stabilire la strategia del progetto e trovare la soluzione a livello di schema a blocchi funzionali.

Passo 4. Scegliere la topologia o configurazione del circuito, dopo aver valutato le soluzioni alternative possibili.

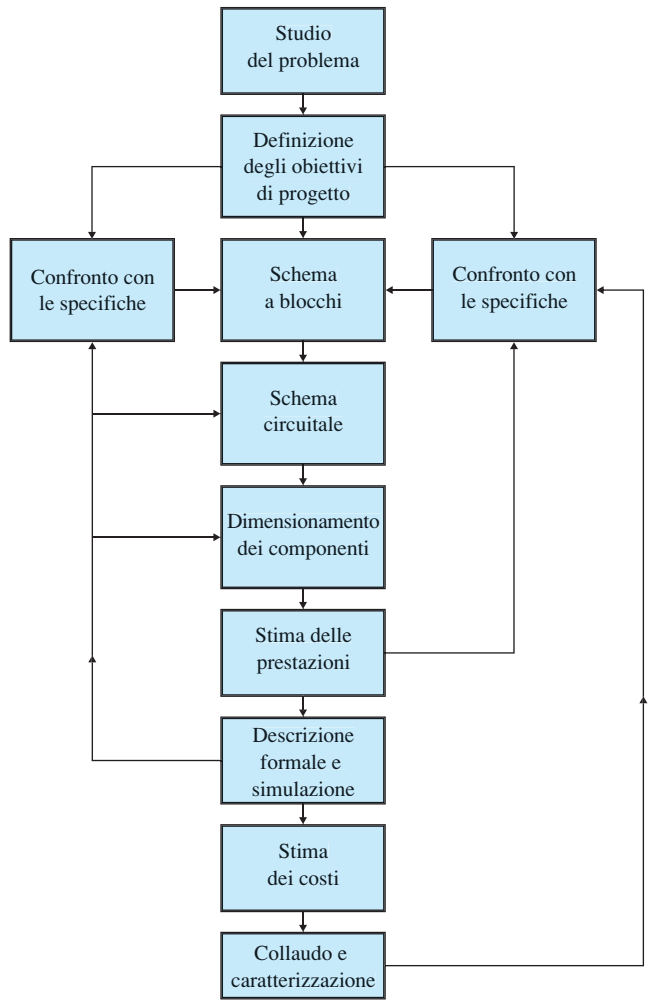


FIGURA 1.17 Flusso progettuale a livello circuitale

Passo 5. Scegliere i valori dei componenti e i dispositivi. Per trovare i valori dei componenti possono essere necessarie l'analisi e la sintesi, così come l'uso di modelli semplificati dei vari dispositivi per ridurre le complessità delle derivazioni analitiche.

Passo 6. Valutare il progetto e stimare le sue prestazioni, modificando i valori di progetto se necessario.

Passo 7. Modellare e simulare il circuito usando modelli dei dispositivi più realistici (o complessi). Valutare la soluzione nel caso peggiore dovuto alle variazioni dei componenti e modificare il progetto se necessario.

Passo 8. Fare un preventivo del costo del progetto, se il costo è un vincolo fondamentale. Pianificare la disposizione dei componenti in modo che il progetto richieda il minimo tempo di fabbricazione e sia il meno costoso possibile.

Passo 9. Costruire un prototipo in laboratorio, collaudarlo e utilizzare le misure per verificare il progetto. Modificare il progetto se necessario.

ESEMPIO 1.1 ▶ *D*

Esecuzione di un progetto. Progettare un circuito per misurare una tensione continua nel campo da 0 a 20 V. Lo strumento indicatore dà luogo a una deflessione di fondo scala quando è percorso da una corrente di 100 μA e la caduta di tensione ai suoi capi è di 1 V. La corrente assorbita dall'alimentazione continua non deve superare 1 μA.

SOLUZIONE

Passo 1. Studiare con attenzione il problema in modo da poter determinare concisamente gli obiettivi del progetto in termini ingegneristici.

Passo 2. Stabilire gli obiettivi del progetto enunciando una definizione dello stesso, i requisiti di prestazione, i vincoli e i criteri di progetto.

La *definizione del progetto* esprime l'obiettivo in una sola frase con pochi valori numerici o nessuno, per esempio:

Progetto di uno strumento indicatore per tensione continua.

I *requisiti di prestazione* devono essere specifici e correlati alle caratteristiche della realizzazione richiesta, in termini di tensione, corrente, impedenza, potenza, tempo, frequenza, ecc. I valori si riferiscono ai terminali d'ingresso e di uscita del circuito e, di solito, sono espressi da disuguaglianze matematiche, per esempio:

corrente nello strumento $I_M \leq 100\ \mu A$

I *vincoli di progetto* sono i limiti che vengono imposti dalla progettazione a livello di sistema, per esempio:

tensione di alimentazione in continua V_{DC} compresa tra 0 e 20 V

corrente di alimentazione in continua $I_{DC} \leq 1$ mA

tensione massima ai capi dello strumento $V_M = 1$ V

Al progettista non è consentito modificare questi vincoli.

I *criteri di progetto* sono quelli adottati per giudicare la qualità di un progetto e possono includere fattori quali accuratezza, costo, affidabilità, efficienza, tempo di risposta, larghezza di banda e dissipazione di potenza, per esempio:

- Il valore di I_M non dovrebbe eccedere il massimo consentito 100 μA se non di una quantità minima, per esempio del 5%:

  $\Delta I_M \leq 5\ \mu A$

- Il valore di I_{DC} può scendere sotto il valore suo massimo 1 mA per esempio del 15%:

  $\Delta I_{DC} \leq 150\ \mu A$

- Il costo deve essere il minimo possibile.

FIGURA 1.18 Schema a blocchi della soluzione al problema proposto

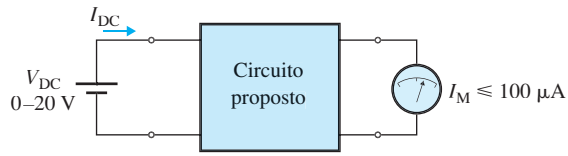
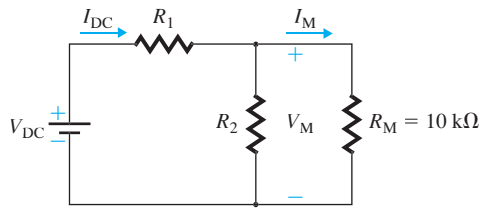


FIGURA 1.19 Configurazione circuitale proposta



Passo 3. Stabilire la strategia di progetto e trovare la soluzione a livello di schema a blocchi funzionali. Questa soluzione è mostrata in Fig. 1.18.

Passo 4. Scegliere la configurazione del circuito dopo aver valutato le soluzioni alternative. Configurazioni circuitali diverse (per esempio utilizzando dei diodi zener) potrebbero dar luogo alla stessa corrente nello strumento con la stessa tensione applicata. Per questo esempio useremo un semplice circuito che utilizza il principio del partitore di tensione, circuito che è mostrato in Fig. 1.19. Si noti comunque che questa non è l'unica soluzione possibile. Potremmo eliminare R_2 e soddisfare ancora le specifiche.

Passo 5. Scegliere i valori dei componenti dopo aver analizzato il circuito. Lo strumento può essere rappresentato con una resistenza R_M:

$$R_M = V_M/I_M = 1\ V/100\ \mu A = 10\ k\Omega$$

Il valore della resistenza R_1 può essere determinato dalla relazione

$$R_1 \geq (V_{DC} - V_M)/I_{DC} = (20 - 1)/1\ mA = 19\ k\Omega$$

Per mantenere basso il costo, usiamo resistenze a carbone con tolleranza del 5%. Dalla tabella dei valori commerciali delle resistenze riportata in Appendice E, troviamo che 20 kΩ è il valore immediatamente superiore a quello prima determinato per resistenze a carbone al 5%. Cioè

$$R_1 = 20\ k\Omega \pm 5\%$$

Dall'equazione del partitore di tensione, V_M è legato a V_{DC} da

$$V_M = \frac{R_M \| R_2}{R_1 + (R_M \| R_2)} V_{DC} \tag{1.8}$$

che, per $V_M = 1$ V, $V_{DC} = 20$ V, $R_1 = 20$ kΩ e $R_M = 10$ kΩ, fornisce $R_2 = 1.18$ kΩ. Troviamo che 1.2 kΩ è il valore più vicino a quello prima determinato per resistenze a carbone al 5%. Cioè $R_2 = 1.2\ k\Omega \pm 5\%$.

Passo 6. Valutare il progetto e stimare le sue prestazioni. Utilizzando l'Eq. (1.8) si ottiene che

$$V_M = \frac{R_M \| R_2}{R_1 + (R_M \| R_2)} V_{DC} = 1.01695\ V$$

che a sua volta ci dà $I_M = 1.01695/10\ k = 102\ \mu A$, valore che rientra nelle specifiche. Inoltre

$$I_{DC} = (V_{DC} - V_M)/R_1 = (20 - 1.01695)/20\ k = 949\ \mu A$$

che rientra anch'esso nei valori delle specifiche. La potenza dissipata da R_1 è

$$P_{R1} = (V_{DC} - V_M) \times I_{DC} = (20 - 1.01695) \times 949\ \mu = 18\ mW$$

per cui scegliamo la classe di potenza più piccola possibile, 1/8 W. La potenza dissipata da R_2 è

$$P_{R1} = V_M^2/R_2 = 1.01695^2/1.2\ \text{k}\Omega = 862\ \mu\text{W}$$

per cui anche per essa si sceglie la classe di potenza più piccola, 1/8 W.

NOTA: Può essere necessario dover modificare il progetto a questo passo, perché non sono stati presi in considerazione gli effetti sulla prestazione del circuito della tolleranza delle resistenze.

Passo 7. Simulare il circuito. Si utilizzerà PSpice per trovare la corrente dello strumento. Il circuito completo per la simulazione con PSpice è mostrato in Fig. 1.20. Rbreak è il nome di modello delle resistenze che consente di assegnare loro una tolleranza. Si consulti l'Appendice A *Introduzione a PSpice* e la bibliografia di Tuinenga [7], Rashid [8] e Herniter [9]. Di seguito è riportato il listato di descrizione del circuito.

```
Esempio 1.1 Progetto di un voltmetro dc
VDC    1    0    20V
Rm     0    2    10k
R1     1    2    Rbreak    20k
R2     0    2    Rbreak    1.2k
.MODEL Rbreak RES (R=1 DEV=5%) ; parametri del modello di resistenza
.DC LIN VDC 0 20V 0.01  ; scansione di VDC da 0 a 20 V a passi di 0.01
.WCASE DC I(Rm) YMAX           ; analisi nel caso peggiore per trovare
                               ; la differenza maggiore YMAX
.PROBE                         ; chiama il post processore grafico
.END
```

Il grafico PSpice della corrente nello strumento indicatore I(Rm) in funzione della tensione continua di alimentazione VDC è riportato in Fig. 1.21. Il progetto soddisfa le specifiche nel caso di valori nominali, mentre ciò non si verifica nel caso peggiore. Saranno necessari vari aggiustamenti dei valori e parecchie modifiche, per trovare la soluzione finale. Questo è ciò che generalmente accade in progetti con problemi aperti. Si potrebbe tentare di cambiare il valore di R_1 o R_2 in modo da soddisfare le specifiche nelle condizioni peggiori. Naturalmente, si potrebbero soddisfare le specifiche facilmente, ma a un costo più elevato, se si scegliessero resistenze con l'1% di tolleranza.

Passo 8. Fare una stima dei costi. Dalle tabelle dei costi delle resistenze fornite dai costruttori si ha

R_1: 20 kΩ, 1/8 W \$ 0.05 (approssimativamente)

R_2: 1.2 kΩ, 1/8 W \$ 0.04 (approssimativamente)

che dà un costo complessivo dei componenti di \$ 0.09. Si noti che questa stima non prende in considerazione i costi legati alla produzione, fabbricazione o alle spese generali dell'azienda.

FIGURA 1.20
Circuito per la simulazione PSpice

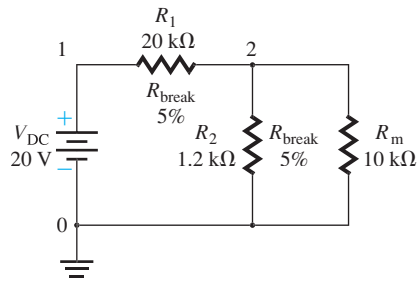
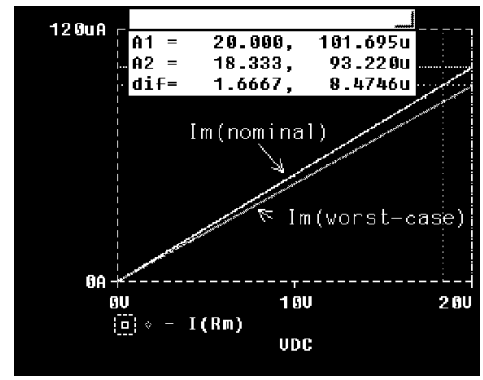


FIGURA 1.21 Grafico PSpice della corrente nello strumento di misura



I vantaggi di studiare con un'ottica progettuale

In concreto, utilizzare il flusso progettuale sopra descritto aiuta a convertire in maniera sistematica le complesse operazioni di progetto in circuiti semplici. Esso aiuta anche a stabilire le procedure necessarie per sviluppare i vari blocchi del sistema, i circuiti o sottocircuiti e a trovare, usare e integrare informazioni attinte da varie fonti, come le caratteristiche e i modelli forniti dai costruttori e le simulazioni.

A livello più astratto, il progetto richiede di decidere tra compromessi e soluzioni alternative e quindi sfida il progettista a scegliere la risposta migliore fra un gran numero di risposte accettabili. Così rafforza l'abilità nel saper prendere decisioni, accresce il discernimento, incoraggia anche l'autostima e la competenza nell'applicare la teoria per risolvere i problemi reali. Progettare dà al progettista l'opportunità di risolvere i problemi in modo personale e quindi motiva e sviluppa la creatività come anche lo spirito critico. La creatività è molto importante nella progettazione, dove è necessario andare oltre ciò che s'impara nelle lezioni scolastiche.

Poiché il progetto integra argomenti diversi di elettronica come pure materiale di altri corsi su circuiti di base, fisica, matematica, simulazione e modellazione e tecniche di laboratorio, l'ottica progettuale evidenzia che è essenziale un'ampia conoscenza di base per il progetto ingegneristico. Non soltanto il progetto a livello di sistema esige la conoscenza delle metodologie del sistema, quali l'analisi e il progetto dall'alto al basso e delle caratteristiche del sistema, quali sicurezza e affidabilità; esso esige anche abilità comunicative, quali quelle necessarie per preparare relazioni e presentare i dati e capacità direttive e organizzative, necessarie a coordinare lo sviluppo del prodotto e scoprire perché i progetti non soddisfano le specifiche.

Tipi di progetto

Il progetto ingegneristico si occupa di risolvere problemi aperti, i cui obiettivi sono definiti soltanto in parte. La definizione del problema e l'identificazione dei vincoli sono necessari per ottenere una soluzione soddisfacente. Spesso è necessaria una notevole ingegnosità per trovare una soluzione accettabile tra diverse vie alternative e, in genere, sono necessarie varie iterazioni prima di raggiungere la soluzione. È necessario anche verificare la soluzione per mezzo della simulazione e/o il collaudo, per assicurare che gli obiettivi del progetto siano stati soddisfatti. I progetti presentati in questo testo sono di varie complessità; il tempo necessario a completarli varia da un'ora a un mese. I progetti si possono classificare in quattro categorie, a seconda del tempo richiesto: progetti brevi, progetti mini, progetti medi e progetti grandi.

Progetti brevi I progetti brevi possono essere completati in una o due ore. Alcuni dei problemi alla fine di ciascun capitolo rientrano in questa categoria, inclusi i seguenti:

1. definire le specifiche dei circuiti raddrizzatori (Capitolo 3);
2. definire le specifiche degli amplificatori (Capitolo 4);
3. progetto di circuiti di polarizzazione di un transistore (Capitolo 5);
4. progetto di semplici circuiti con amplificatore operazionale (Capitolo 6);
5. progetto per la minimizzazione dello sbilanciamento di circuiti con amplificatori operazionali (Capitolo 7);
6. progetto di semplici generatori di corrente per circuiti di polarizzazione (Capitolo 13).

Progetti mini I progetti mini si possono completare in una settimana circa. Di seguito sono riportati alcuni problemi presenti nel testo alla fine di ogni capitolo che rientrano in questa categoria:

1. progetto di raddrizzatori a semplice e doppia semionda con filtro d'uscita (Capitolo 3);
2. progetto di circuiti sagomatori d'onda a diodi (Capitolo 3);
3. progetto di integratori e derivatori con amplificatori operazionali (Capitolo 6);
4. progetto di amplificatori di potenza (Capitolo 14);

5. progetto di comparatore a soglia (Trigger di Schmitt) (Capitolo 16);
6. progetto di circuiti di campionamento e tenuta (sample and hold) (Capitolo 16);
7. progetto di circuiti di temporizzazione (Capitolo 16).

Progetti medi I progetti medi possono essere completati in due o tre settimane circa. Di seguito sono riportati alcuni problemi presenti nel testo alla fine di ogni capitolo che rientrano in questa categoria:

1. progetto di amplificatori a transistori a singolo stadio (Capitolo 5);
2. progetto di filtri attivi (Capitolo 9);
3. progetto di amplificatori per strumentazione (Capitolo 6);
4. progetto di amplificatori a transistori per soddisfare particolari specifiche di frequenza (Capitolo 8);
5. progetto di amplificatori reazionati a singolo stadio (Capitolo 10);
6. progetto di oscillatori (Capitolo 11);
7. progetto di generatori di corrente attivi (Capitolo 13);
8. progetto di amplificatori differenziali con polarizzazione a generatore di corrente (Capitolo 13);
9. progetto di circuiti elettronici che utilizzano convertitori A/D e D/A (Capitolo 16);
10. progetto di circuiti elettronici che utilizzano circuiti integrati per anelli ad aggancio di fase (PLL) e oscillatori controllati in tensione (VCO) (Capitolo 16).

Progetti grandi Questi tipi di progetti possono essere completati in quattro o cinque settimane circa. Di seguito sono riportati alcuni problemi presenti nel testo alla fine di ogni capitolo che rientrano in questa categoria:

1. progetto di amplificatori multistadio (Capitolo 8);
2. progetto di filtri attivi di ordine elevato (Capitolo 9);
3. progetto di amplificatori di potenza con polarizzazione a generatore di corrente (Capitolo 14);
4. progetto di amplificatori operazionali (Capitolo 15);
5. progetto di amplificatori reazionati multistadio (Capitolo 10);
6. progetto di porte logiche (Capitolo 12).

Relazione di progetto

Nelle relazioni di progetto si raccomanda di:

- descrivere il progetto completo, includendo le condizioni di funzionamento e i valori di ciascun componente;
- giustificare l'uso di una particolare topologia circuitale;
- verificare gli obiettivi del progetto simulando il circuito mediante l'uso di PSpice/SPICE o Electronics Workbench. Includere un'analisi del caso peggiore (con il 10% di tolleranza per tutti i componenti passivi, se non altrimenti specificata);
- dare una stima dei costi: il progetto dovrebbe essere il più economico possibile.

Un formato suggerito per le relazioni di progetto è il seguente:

1. frontespizio (nel quale sia specificato il nome, il titolo del corso e la data);
2. obiettivi e specifiche del progetto;
3. passi del progetto (inclusa la topologia del circuito);
4. modifiche del progetto;
5. simulazione al calcolatore e verifica del progetto;
6. componenti e costi;
7. diagramma del flusso progettuale seguito;
8. costi in funzione dell'affidabilità e della sicurezza;
9. conclusioni.

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.8

- Il progetto è il processo creativo con cui si sviluppa la soluzione a un problema aperto. Fare pratica con attività di progetto ingegneristico durante il processo formativo degli studenti offre molti vantaggi: esso sviluppa la creatività come pure il pensiero critico, incoraggia a prendere decisioni e sviluppa il giudizio.
- Seguire una procedura di progetto aiuta a trasformare i sistemi complessi in circuiti semplici, in modo sistematico.

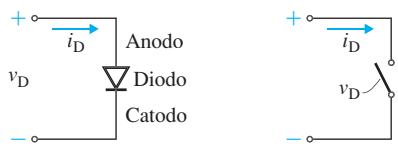
1.9 *Dispositivi elettronici*

I dispositivi elettronici costituiscono il cuore dell'elettronica. I diversi tipi di dispositivi possono essere classificati in tre categorie: diodi a semiconduttore, transistori bipolari a giunzione (BJT) e transistori a effetto di campo (FET). Essi sono tutti dispositivi non lineari.

Diodi a semiconduttore

Un diodo è un dispositivo a semiconduttore dotato di due terminali. Esso manifesta bassa resistenza elettrica in un verso (polarizzazione diretta) ed elevata resistenza nell'altro (polarizzazione inversa). Pertanto un diodo consente il passaggio di corrente in una sola direzione. Il simbolo del diodo è mostrato in Fig. 1.22(a), dove la freccia indica il verso della corrente. Se la tensione v_D tra anodo e catodo è positiva, il diodo si comporta come un corto circuito; se la tensione v_D è negativa, esso equivale a un circuito aperto. Così un diodo è un dispositivo logico e può essere rappresentato da un interruttore controllato, come in Fig. 1.22(b). Lo studio delle caratteristiche e dei modelli dei diodi sarà affrontato nel Capitolo 2, mentre nel Capitolo 3 verranno prese in considerazione le applicazioni dei diodi.

FIGURA 1.22
Diodo ideale



(a) Simbolo **(b) Interruttore controllato**

Transistori bipolari a giunzione

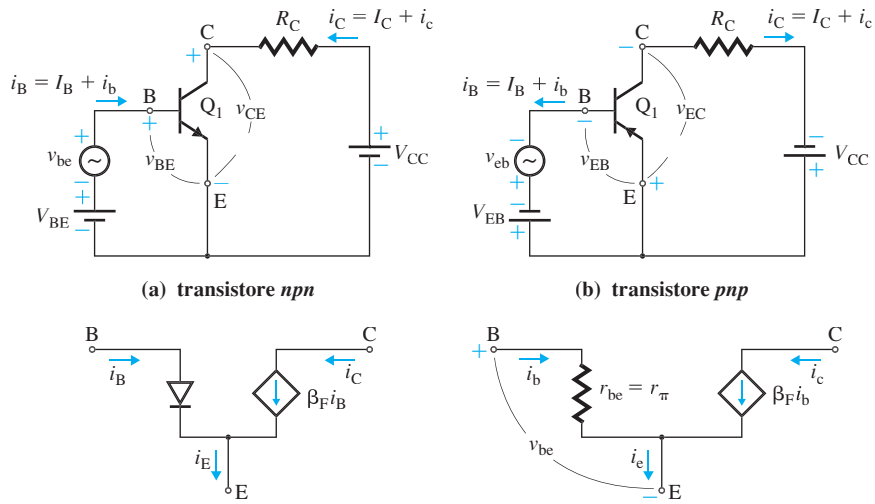
I transistori bipolari a giunzione (BJT), sviluppati negli anni '50, sono stati i primi dispositivi usati per l'amplificazione dei segnali. Ci sono due tipi di transistori: *npn* e *pnp*. I relativi simboli sono rappresentati nelle Figg. 1.23(a) e 1.23(b). Un BJT ha tre terminali, detti *emettitore* (E), *base* (B) e *collettore* (C). Il verso della freccia sul terminale di emettitore permette di distinguere un transistore *npn* da uno di tipo *pnp*. Per attivare il transistore, polarizzandolo opportunamente nelle normali condizioni di funzionamento, sono necessarie le tensioni V_{BE} e V_{CC}.

Un BJT è un dispositivo controllato in corrente e la sua corrente di collettore (corrente di uscita) i_C dipende dalla corrente di base i_B, come è mostrato in Fig. 1.23(c). La giunzione base emettitore si comporta come un diodo e può appunto essere rappresentata come un diodo. Una piccola variazione della corrente di base i_b causa una variazione maggiore della corrente di collettore i_c. Si ha cioè

$$i_c = \beta_F i_b \tag{1.9}$$

in cui β_F è detto *guadagno di corrente diretto* del transistore. Il modello per piccoli segnali di un BJT è mostrato in Fig. 1.23(d). Nel Capitolo 5 verranno descritte le caratteristiche e i modelli dei transistori bipolari.

FIGURA 1.23
Transistore bipolare a giunzione



Transistori a effetto di campo

I transistori a effetto di campo (FET) rappresentano la generazione di transistori successiva ai BJT. Un FET ha tre terminali, detti *drain* (D), *gate* (G) e *source* (S). La corrente di uscita in un FET è controllata da un campo elettrico, determinato da una tensione di controllo applicata sul gate. Un FET è dunque un dispositivo controllato in tensione, in quanto la corrente di drain (corrente di uscita) dipende dalla tensione sul gate (tensione d'ingresso). Ci sono tre tipi di FET: transistori a effetto di campo metallo-ossido-semiconduttore ad arricchimento (MOSFET ad arricchimento), transistori a effetto di campo metallo-ossido-semiconduttore a svuotamento (MOSFET a svuotamento) e FET a giunzione (JFET). Le caratteristiche e i modelli dei FET saranno descritti nel Capitolo 5.

MOSFET ad arricchimento Ci sono due tipi di MOSFET ad arricchimento: MOSFET a canale *n* e MOSFET a canale *p*. I simboli corrispondenti sono mostrati nelle Figg. 1.24(a) e 1.24(b), dove il verso della freccia serve a distinguere il tipo di canale (*n* o *p*). Il substrato (B) è generalmente collegato al terminale di source. Sebbene non esista un canale fisico tra le regioni di drain e di source (come è evidenziato dalla linea tratteggiata nel simbolo di questo dispositivo), l'azione di un campo elettrico determina la formazione di un canale tra i due terminali. Le tensioni $v_{GS} = V_{GS}$ e V_{DD} sono necessarie per attivare il dispositivo, portandolo a lavorare nelle condizioni di funzionamento normali. La corrente di gate i_G è estremamente piccola, praticamente nulla, mentre la corrente di drain i_D (corrente di uscita) dipende dalla tensione tra gate e source V_{GS}, come riportato in Fig. 1.24(c) ed è esprimibile come

$$i_D = K_P(v_{GS} - V_t)^2 \quad \text{per } |v_{GS}| \geq |V_t| \tag{1.10}$$

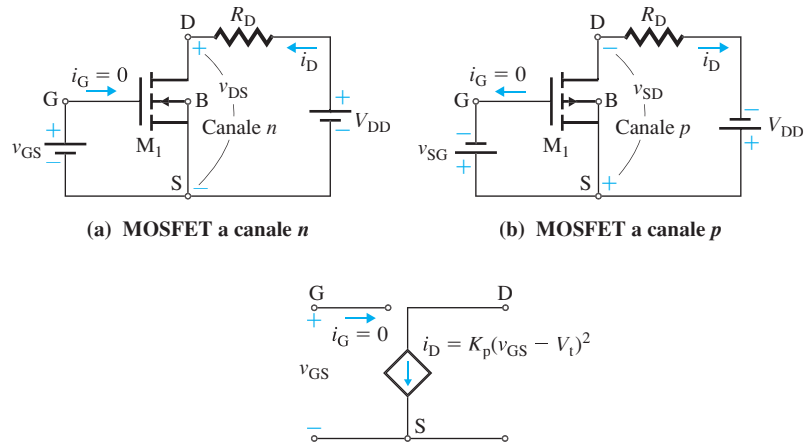
con K_p = costante caratteristica del MOSFET, espressa in A/V^2

V_t = tensione di soglia del MOSFET, espressa in V

v_{GS} e V_t sono positive per i MOSFET ad arricchimento a canale *n* e negative per i MOSFET ad arricchimento a canale *p*. Il valore di v_{GS} deve superare, in modulo, quello di V_t $|v_{GS}| > |V_t|$ affinché si possa avere corrente di drain. Per esempio, con $K_p = 20\ mA/V^2$, $V_t = 1.5$ V (per un MOSFET a canale *n*) e $v_{GS} = 3$ V, l'Eq. (1.10) fornisce

$$i_D = 20\ m \times (3 - 1.5)^2 = 45\ mA$$

FIGURA 1.24
MOSFET
ad arricchimento



(a) MOSFET a canale *n*

(b) MOSFET a canale *p*

(c) modello in corrente continua di un MOSFET a canale *n*

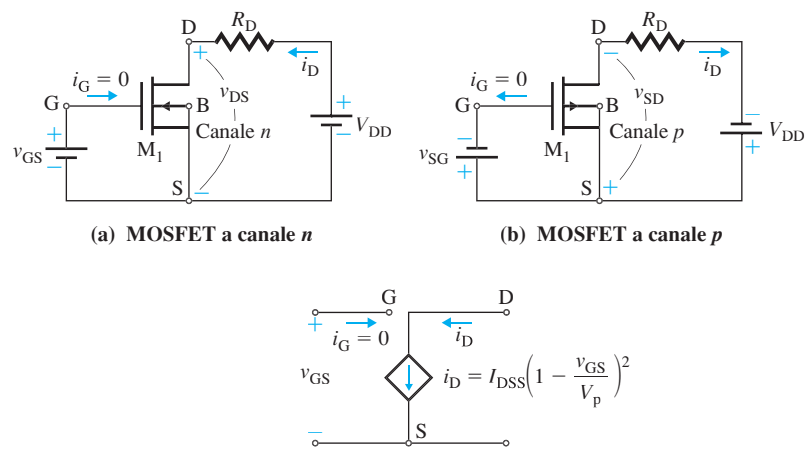
MOSFET a svuotamento Esistono due tipi di MOSFET a svuotamento: MOSFET a canale *n* e MOSFET a canale *p*. I simboli corrispondenti sono mostrati nelle Figg. 1.25(a) e 1.25(b). Come è evidenziato dalla linea continua tra i terminali di drain e di source, in questo dispositivo esiste un canale fisico tra i due terminali; esso può tuttavia essere modulato (arricchito o svuotato) sotto l'influenza di un campo elettrico. Le tensioni v_{GS} (= V_{GS}) e V_{DD} servono a polarizzare opportunamente il FET, portandolo a lavorare nella zona di funzionamento normale. Anche per questo dispositivo la corrente di gate i_G è in sostanza nulla. La corrente di drain i_D (corrente di uscita) dipende della tensione v_{GS} tra gate e source, come riportato in Fig. 1.25(c) ed è data da

$$i_D = K_p(v_{GS} - V_p)^2 \tag{1.11}$$

$$= I_{DSS}\left(1 - \frac{v_{GS}}{V_p}\right)^2 \quad \text{per } |v_{GS}| \le |V_p| \tag{1.12}$$

con K_p = costante caratteristica del MOSFET, espressa in A/V^2;
$I_{DSS} = K_p V_p^2$, corrente di drain per $v_{GS} = 0$, espressa in A;
V_p = tensione di strozzamento (*pinch-off*) del MOSFET, espressa in V;

FIGURA 1.25
MOSFET
a svuotamento



(a) MOSFET a canale *n*

(b) MOSFET a canale *p*

(c) modello in corrente continua di un MOSFET a canale *n*

V_p è la tensione alla quale il canale tra drain e source è effettivamente strozzato e non si ha corrente di drain. V_p è negativa per i MOSFET a svuotamento a canale *n* e positiva per quelli a canale *p*; v_{GS} può invece essere positiva o negativa, ma è comunque sempre minore, in modulo, di $|V_p|$.

FET a giunzione Ci sono due tipi di FET a giunzione: JFET a canale *n* e JFET a canale *p*. I simboli corrispondenti sono mostrati nelle Figg. 1.26(a) e 1.26(b). La giunzione gate-source si comporta come un diodo polarizzato inversamente. Come è evidenziato dalla linea continua da drain a source, esiste un canale fisico tra le due regioni. La corrente di canale è controllata mediante l'azione di un campo elettrico. Le tensioni v_{GS} (= V_{GS}) e V_{DD} servono a polarizzare il JFET opportunamente nella zona di funzionamento normale. Nel JFET fluisce una corrente di gate piuttosto piccola, dell'ordine del microampere. La corrente di drain (corrente di uscita) i_D dipende dalla tensione v_{GS} tra gate e source, come riportato in Fig. 1.26(c) ed è data da

$$i_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{v_{GS}}{V_p}\right)^2 \quad \text{per } |v_{GS}| \le |V_p| \tag{1.13}$$

con I_{DSS} = corrente di drain per at $v_{GS} = 0$, espressa in A
V_p = tensione di *pinch-off* del JFET, espressa in V

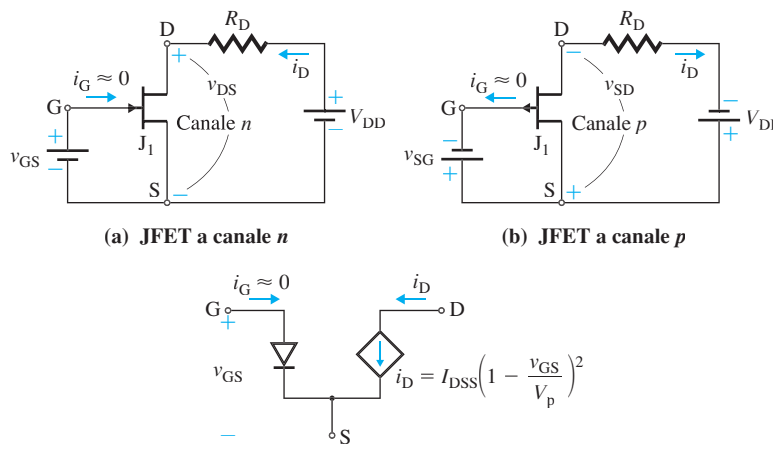
V_p è la tensione per la quale il canale tra drain e source è effettivamente strozzato e non si ha corrente di drain. V_p è negativa per un JFET a canale n e positiva per un JFET a canale *p*; v_{GS} è negativa per un JFET a canale *n* e positiva per un JFET a canale *p*, ma è in modulo sempre minore di $|V_p|$. Per esempio, se I_{DSS} = 20 mA, $V_p = -3\ V$ (per un JFET a canale *n*) e $v_{GS} = -1.5$ V, dalla Eq. (1.13) si ottiene

$$i_D = 20\text{ mA} \times (1 - 1.5/3)^2 = 5\text{ mA}$$

Caratteristiche di trasferimento La caratteristica di trasferimento di un FET descrive la relazione tra la corrente di drain i_D e la tensione v_{GS} tra gate e source. In Fig. 1.27(a) sono rappresentate le caratteristiche di trasferimento per tutti i tipi di FET. La pendenza della caratteristica i_D-v_{GS} rappresenta la transconduttanza per piccoli segnali g_m, definita come

$$g_m = \left.\frac{di_D}{dv_{GS}}\right|_{\text{nel punto } Q} \tag{1.14}$$

FIGURA 1.26
JFET

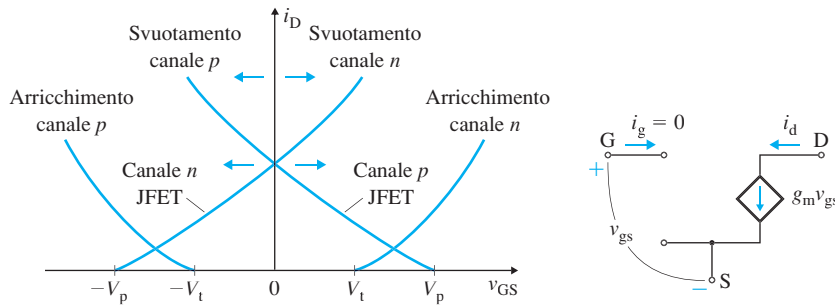


(a) JFET a canale *n*

(b) JFET a canale *p*

(c) modello in corrente continua di un JFET a canale *n*

FIGURA 1.27
Caratteristiche di trasferimento e modello per piccoli segnali dei FET



(a) Caratteristiche di trasferimento **(b) Modello per piccoli segnali di un FET.**

Così, la corrente di drain i_d per piccoli segnali può essere ottenuta come

$$i_d = g_m v_{gs} \tag{1.15}$$

dove v_{gs} è la tensione tra gate e source per piccoli segnali. I FET possono essere rappresentati con un circuito per piccoli segnali, come si vede in Fig. 1.27(b).

RIEPILOGO DEL PARAGRAFO 1.9

- I dispositivi elettronici costituiscono il cuore dell'elettronica. Esistono tre categorie di dispositivi: i diodi a semiconduttore, i transistori bipolari a giunzione (BJT) e i transistori a effetto di campo (FET).
- Un diodo si comporta come un interruttore aperto o chiuso, in funzione della tensione ai suoi terminali. Un BJT è un dispositivo controllato in corrente che può essere usato come interruttore o come amplificatore. Un FET è un dispositivo controllato in tensione che può essere usato come interruttore o come amplificatore.

Bibliografia

1. B.B. Blanchard e W.J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc., 1990.
2. J. Burkhardt, *Lecture Notes on the Art of Design*. Fort Wayne: The Indiana University – Purdue University Fort Wayne, 1996.
3. *Criteria for Accrediting Programs in Engineering in the United States*. Baltimore, MD: Engineering Accreditation Commission of the Accreditation Board for Engineering and Technology (EAC/ABET), 1996.
4. R.L. McConnell, W.L. Cooley e N.T. Middleton, *Electrical Engineering Design Compendium*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing, 1993.
5. J.G. Webster, *Teaching Design in Electrical Engineering*. Piscataway, NJ: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1990.
6. R.C. Jaeger, *Microelectronic Circuit Design*. New York: McGraw-Hill, 1997, Chapter 1.
7. P.W. Tuinenga, *SPICE – A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSpice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc., 1995.
8. M.H. Rashid, *SPICE for Circuits and Electronics Using PSpice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc., 1995.
9. M.E. Herniter, *Schematic Capture with Microsim PSpice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc., 1996.

I problemi relativi a questo capitolo sono disponibili online nel booksite
www.apogeonline.com/libri/00853/allegati/