

**DANILO TOMASSINI**

# **TECNOLOGIE ELETTRICO-ELETTRONICHE E APPLICAZIONI**

Per l'indirizzo Manutenzione  
e assistenza tecnica

**3**



 EDIZIONE MISTA  
+ LIBRO DIGITALE

**HOEPLI**

DANILO TOMASSINI

# **Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni**

**Per l'indirizzo  
Manutenzione e assistenza tecnica**

Volume 3



EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

# INDICE

## PARTE PRIMA Analisi dei processi

### MODULO A • Analisi dei segnali 5

#### unità A1

#### PROPRIETÀ DEI SEGNALI 6

A1.1	Segnali e sistemi	6
A1.2	Rappresentazione dei segnali	6
A1.3	Classificazione dei segnali	7
A1.4	Segnali determinati	8
A1.5	Proprietà dei segnali determinati	8
	Periodicità	8
	Simmetria	9
	Causalità	9
	Durata	10
	Valore medio	10
	Alternatività	10
A1.6	Esempi di segnali determinati	11
	Segnale costante	11
	Segnale a gradino	11
	Segnale sinusoidale	11
	Impulso rettangolare	12
	Impulso ideale o di Dirac	13
	Segnali discreti	13
A1.7	Rappresentazione dei segnali determinati in funzione della frequenza	14



Segnali aleatori: il rumore

#### unità A2

#### SEGNALI DIGITALI 15

A2.1	Sorgenti di informazione	15
A2.2	Codifica delle informazioni digitali	16
A2.3	Codifica dei caratteri: codice ASCII	16
A2.4	Codifica di segnali analogici	17
A2.5	Codifica delle immagini	19
	Caratteristiche dei pixel	19

A2.6	Compressione dei dati	20
A2.7	Codifica di linea	20
A2.8	Vantaggi dei segnali digitali	21
	Miglior comportamento nei confronti del rumore	21
	Integrazione dei sistemi di trasmissione	22
	Maggiore efficienza e flessibilità dei sistemi	23
	Facilità di elaborazione in tempo reale dei segnali digitali	23
	Compressione	23
	Crittografia	23
	Semplice memorizzazione	23
	Convenienza economica dei sistemi digitali	23



Codifica e compressione audio  
Immagini digitali

<i>Esercitazioni</i>	24
----------------------	----

### MODULO B • Sistemi 31

#### unità B1

#### RICHIAMI DI TEORIA DEI SISTEMI 32

B1.1	Definizione di sistema	32
B1.2	Esempi di sistemi	33
B1.3	Sottosistemi	33
B1.4	Ingressi, uscite e stato interno	33
B1.5	Rappresentazione dei sistemi	34
B1.6	Analisi dei sistemi	34
B1.7	Controllo di processo	35
B1.8	Sistemi a catena aperta e chiusa	35
B1.9	Classificazione dei sistemi	38



Sistemi a catena chiusa digitale

**unità B2****SISTEMI DI ACQUISIZIONE DATI**

B2.1	Misurazione delle grandezze fisiche	39
B2.2	Misure dirette e misure indirette	40
B2.3	Valore vero di una grandezza fisica	40
B2.4	Errore assoluto ed errore relativo	41
B2.5	Struttura di un sistema di acquisizione dati	41
	Sensore e trasduttore	42
	Blocco di condizionamento	42
	Blocco di conversione	42
	Blocco di trasmissione dati	43
	Blocco di elaborazione dati	43
	Blocco di visualizzazione	43



Grandezze fisiche

Esercitazioni

44

**MODULO C • Trasduttori**

47

**unità C1****CARATTERISTICHE FONDAMENTALI DEI TRASDUTTORI**

C1.1	I trasduttori nell'industria	49
C1.2	Sensore o trasduttore?	50
C1.3	Il ruolo del trasduttore in un sistema di misura	50
C1.4	Classificazione dei trasduttori	51
C1.5	Rappresentazione matematica del trasduttore	52
C1.6	Campi di variabilità dei segnali	52
C1.7	Caratteristiche funzionali del trasduttore	52
	Caratteristiche generali	52
	Caratteristiche in regime stazionario	53
	Caratteristiche in regime dinamico	55
C1.8	Tipologie di trasduttori	56



Strumenti di misura

**unità C2****TRASDUTTORI DI POSIZIONE**

C2.1	Introduzione	57
C2.2	Potenziometro	57
	Potenziometri a filo metallico	59
	Potenziometri a film metallico	59
	Potenziometri a plastica conduttiva	59
	Interfacciamento del potenziometro	59
	Caratteristiche del potenziometro	59
	Considerazioni generali	60

C2.3	Trasformatore lineare differenziale	60
C2.4	Resolver	62
C2.5	Encoder	63
	Encoder incrementale	63
	Encoder assoluto	64



Syncro

**unità C3****TRASDUTTORI DI VELOCITÀ**

C3.1	Introduzione	66
C3.2	L'encoder incrementale come trasduttore di velocità	66
C3.3	Dinamo tachimetrica	67



Particolari costruttivi della dinamo

**unità C4****TRASDUTTORI DI DEFORMAZIONE, FORZA E PRESSIONE**

C4.1	Introduzione	69
C4.2	Estensimetro	69
	Principio di funzionamento	69
	Acquisizione del segnale estensimetrico	70
C4.3	Cella di carico	71
	Cella di carico estensimetrica	71
	Cella di carico piezoelettrica	72
	Cella di carico induttiva	73
C4.4	Trasduttori di pressione	74
	Trasduttori di pressione estensimetrici	74
	Trasduttori di pressione a LVDT	74
	Trasduttori di pressione a potenziometro	74
C4.5	Trasduttori di accelerazione	74



Il ponte di Wheatstone

**unità C5****TRASDUTTORI DI TEMPERATURA**

C5.1	Introduzione	76
C5.2	Termoresistenze	76
	Ponte di Wheatstone	77
	Autoriscaldamento	78
C5.3	Termocoppie	78
	Interfacciamento delle termocoppie	79
C5.4	Termistori	80
	Termistori NTC	80
	Termistori PTC	81
	Interfacciamento dei termistori	81



Effetto termoelettrico

**unità C6****TRASDUTTORI DI CORRENTE  
A EFFETTO HALL**

C6.1	Introduzione	83
C6.2	Effetto Hall	83
C6.3	Trasduttori di corrente a misura diretta del campo	84
C6.4	Trasduttori a compensazione di campo	85



Pinza amperometrica

**unità C7****TRASDUTTORI DI PROSSIMITÀ**

C7.1	Introduzione	86
C7.2	Trasduttori di prossimità induttivi	87
	Trasduttori induttivi passivi	87
	Trasduttori induttivi attivi	87
C7.3	Trasduttori di prossimità capacitivi	88
C7.4	Trasduttori di prossimità optoelettronici	89
	Cellula fotoelettrica	90
	Classificazioni dei trasduttori optoelettronici	91
C7.5	Trasduttori a ultrasuoni	91
C7.6	Trasduttori di prossimità magnetici	92
	Trasduttori di prossimità a contatto Reed	92
	Trasduttori di prossimità a effetto Hall	92



Comparatori e trigger di Schmitt

**unità C8****TRASDUTTORI DI IMMAGINI**

C8.1	Trasduttori CCD	93
C8.2	Principio di funzionamento di un CCD	94
C8.3	Generazione delle cariche per effetto fotoelettrico e raccolta delle cariche nei pozzi di potenziale	95
C8.4	Trasferimento delle cariche	95
C8.5	Estrazione delle cariche	95
C8.6	Risoluzione di un CCD	96



Dispositivi fotoemittenti

**unità C9****TRASDUTTORI DI SUONI**

C9.1	Il suono	97
C9.2	Trasduzione acustico-elettrica	98
C9.3	Microfoni a spostamento	98
	Microfono a condensatore	98
	Microfono piezoelettrico	99
	Microfono ceramico	99
	Microfono a transistor	99
C9.4	Microfoni a velocità	100

Microfono a bobina mobile	100
Microfono a nastro	100



Microfoni a carbone e radiomicrofoni

*Esercitazioni*

101

**MODULO D • Sistema  
di elaborazione dati**

111

**unità D1****L'ELABORATORE ELETTRONICO**

112

D1.1	Introduzione	112
D1.2	Il computer	113
D1.3	L'architettura di von Neumann	113
D1.4	Struttura di un computer	114
D1.5	La scheda madre	114
	Il microprocessore	114
	La ROM del BIOS	115
	Bus di sistema e bus di espansione	115
	RAM di sistema	116
	Memoria cache	116
	Le porte I/O	117
	Porta seriale RS-232	117
	Porta parallela	118
	Le porte USB e firewire	118



Il microprocessore

**unità D2****MEMORIA DI MASSA**

120

D2.1	Introduzione	120
D2.2	L'hard disk	120
	Piatti del disco	121
	Il motore	121
	Testine di lettura/scrittura	121
	Processo di memorizzazione dei dati	121
	Attuatore della testina	122
	Filtri d'aria	122
	Scheda logica	122
	Logica di lettura e scrittura	122
	Caratteristiche dell'hard disk	123
D2.3	Dischi a stato solido	123
D2.4	CD	124
	Lettore CD	125
	CD-R e CD-RW	125
D2.5	DVD	126
	Confronto tra DVD e CD	127
	Formati dei DVD	128
D2.6	Dischi blu-ray	128
D2.7	USB Flash Drive	128



Le memorie

*Esercitazioni*

129

## PARTE SECONDA

### Affidabilità e qualità

#### MODULO E • La produzione industriale

##### unità E1

#### CICLO DI VITA DI UN PRODOTTO INDUSTRIALE

E1.1	LCA	136
E1.2	Origini della LCA	137
E1.3	Obiettivi e finalità della LCA	137
E1.4	Struttura di uno studio LCA	138
	Definizione degli obiettivi ( <i>goal definition and scoping</i> )	138
	Unità funzionale	139
	Metodo di allocazione delle risorse	139
	Definizione dei confini del sistema	139
	Analisi di inventario ( <i>inventory analysis</i> )	139
	Valutazione degli impatti ambientali	140
	Interpretazione e analisi dei risultati	140
E1.5	Organizzazioni ed enti attivi nel campo LCA	142
	AILCA	142
	ANIE	142
	ANPA	142
	APME	142
	CEI	142
	ENEA	142
	IEC	143
	IEFE	143
	4.2.9 IJLCA	143
	ISO	143
	LCANET	143
	SETAC	143
	SPOLD	143
	Alcune sedi universitarie attive nello sviluppo della LCA	143
E1.6	Esempio di LCA applicata a un motore elettrico	143
	Obiettivi dello studio	143
	Prodotto in esame e sue caratteristiche	144
	Unità funzionale	144
	Descrizione del sistema e dei suoi confini	144
	Analisi di inventario del ciclo di vita	144



Politiche integrate di prodotto e certificazione ambientale

##### unità E2

#### IL SISTEMA PRODUTTIVO

E2.1	Definizione di sistema produttivo	146
------	-----------------------------------	-----

E2.2	Classificazione dei sistemi produttivi	147
	Classificazione secondo il volume di produzione	147
	Classificazione rispetto al modo di rispondere alla domanda commerciale	148
	Classificazione secondo il modo di realizzare il prodotto	148
E2.3	Classificazione delle modalità produttive	148
E2.4	Il sistema produttivo e i prodotti che vengono realizzati	149
E2.5	Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti di catalogo	150
	Raccolta e selezione delle idee	150
	generazione del concept del prodotto	150
	Progettazione del prodotto	150
	Scelta del sistema di produzione	152
E2.6	Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti su commessa	152
E2.7	Esempio di produzione su commessa: l'impianto elettrico	153
	Il ciclo di vita di un impianto elettrico	153
	Progettazione	154
	Installazione	154
	Vita utile: esercizio e manutenzione	155
	Fine vita utile: revamping o rimozione	155



Sistemi di produzione job-shop

##### unità E3

#### LA GESTIONE DEI MATERIALI NEL SISTEMA PRODUTTIVO

E3.1	Introduzione	156
E3.2	Il metodo MRP	157
E3.3	La distinta base	157
	Struttura dei dati di una distinta base	158
	Tipologie della distinta base	159




Scorte di magazzino

##### unità E4

#### SMALTIMENTO DEI RIFIUTI DI LAVORAZIONE

E4.1	Introduzione	160
E4.2	Definizione e classificazioni dei rifiuti	160


E4.3	Attribuzione codice CER ai rifiuti speciali	162
E4.4	Divieti (art. 187 e art. 192 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)	162
E4.5	Il deposito temporaneo (art. 183, comma 1, lettera BB, del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)	162
E4.6	Formulario di identificazione del rifiuto (art. 188 e art. 193 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i. e del D.M. 145 del 01/04/1998)	164
E4.7	Il Registro di Carico e Scarico dei rifiuti (art. 190 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)	164
E4.8	Il modello unico di dichiarazione ambientale (art. 189 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)	165
	Rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAAE)	

Esercitazioni 166

## MODULO F • Affidabilità e sicurezza 171

### unità F1 AFFIDABILITÀ DI UN SISTEMA 172

F1.1	Introduzione	172
F1.2	Obiettivi dell'affidabilità Costi di gestione	173
F1.3	L'affidabilità come strumento di progettazione	174
F1.4	Definizione quantitativa dell'affidabilità	174
F1.5	Tipologie di affidabilità	175
F1.6	I guasti Cause di guasto Tasso di guasto Guasti in funzione del tempo	175
F1.7	Parametri di affidabilità	177
F1.8	Affidabilità durante il periodo di vita utile	177
F1.9	Sistemi composti Sistemi in serie Sistemi in parallelo	178
F1.10	Ridondanza	179

 Manutenzione dei sistemi

### unità F2 SICUREZZA SUL LUOGO DI LAVORO 180

F2.1	Il Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro	180
F2.2	Il datore di lavoro	181
F2.3	Il dirigente	181
F2.4	Il preposto	182
F2.5	I lavoratori	182
F2.6	Il medico competente	183
F2.7	Il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza	183
F2.8	Il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione	184
F2.9	Le squadre di emergenza Addetti antincendio Addetti al primo soccorso	185
F2.10	La formazione dei lavoratori	186

 Dispositivi di protezione individuale

Esercitazioni 187

## MODULO G • Azionamenti e attuatori

### unità G1 AZIONAMENTI ELETTRICI

G1.1	Introduzione
G1.2	Azionamenti elettrici
G1.3	Convertitore statico di potenza
G1.4	Attuatori elettrici

### unità G2 AZIONAMENTI IDRAULICI

G2.1	Introduzione
G2.2	Azionamenti idraulici
G2.3	Oli idraulici
G2.4	Pompe idrauliche
G2.5	Attuatori idraulici
G2.6	Valvole

### unità G3 AZIONAMENTI PNEUMATICI

G3.1	Introduzione
G3.2	Azionamenti pneumatici
G3.3	Il compressore
G3.4	Attuatori pneumatici

Esercitazioni





# PRESENTAZIONE

L'opera si compone di **tre volumi**, dedicati al secondo biennio e al quinto anno dell'indirizzo *Manutenzione e assistenza tecnica*, integrati da due fascicoli aggiuntivi, destinati al quarto e quinto anno dell'opzione *Apparati, impianti e servizi tecnici industriali e civili*.

La disciplina di riferimento è **Tecnologie elettrico-elettroniche e applicazioni** che, nel caso dell'opzione *Apparati*, è denominata **Tecnologie elettrico-elettroniche, dell'automazione e applicazioni**.

I suddetti fascicoli aggiuntivi sono dedicati all'automazione e sono consigliati anche per l'indirizzo base di *Manutenzione e assistenza tecnica*.

Ciascun volume è suddiviso in **Parti, Moduli e Unità**.

Le Parti, che individuano i macroargomenti proposti dalle linee guida ministeriali, sono a loro volta suddivise in Moduli e, ancora, in Unità.

Ciò consente di fornire allo studente una metodologia di studio snella e puntuale per affrontare la disciplina in tutti i suoi aspetti.

Ogni argomento trattato nelle Unità è corredato di più **esempi commentati** e al termine di ogni Modulo sono riportate le **esercitazioni di verifica**.

Il **terzo volume**, rivolto agli studenti del **quinto anno**, sia per l'indirizzo base di *Manutenzione e assistenza tecnica* che per l'opzione *Apparati*, è suddiviso in due Parti.

- La Parte Prima, **Analisi dei processi**, si compone di quattro Moduli e tratta le proprietà fondamentali dei segnali, dei sistemi digitali di acquisizione dati e dei trasduttori, nonché dei sistemi di elaborazione delle informazioni. Particolare attenzione è stata dedicata ai trasduttori di grandezze fisiche, focalizzando l'attenzione sulla struttura, sul principio di funzionamento e sulle loro applicazioni pratiche. Per quanto riguarda i sistemi di elaborazione dati è stato preso in considerazione l'elaboratore elettronico, del quale sono state descritte l'architettura e la funzionalità dei singoli componenti.
- La Parte Seconda, **Affidabilità e qualità**, costituita da due Moduli, propone lo studio dei sistemi di produzione industriale, dal ciclo di vita di un prodotto, alla gestione dei materiali impiegati nella produzione, allo smaltimento dei rifiuti post-produzione, all'affidabilità del prodotto. Particolare attenzione, infine è stata dedicata alla sicurezza sul lavoro, argo-


mento molto importante, oggetto di costante impegno anche in ambito istituzionale, per una piena tutela della salute, dell'integrità e della dignità dei lavoratori in ogni ambiente di lavoro. La norma di riferimento presa in considerazione è il **Testo Unico della sicurezza sul lavoro** (D.Lgs. n. 81/08), elaborato in base alle direttive comunitarie incentrate sul principio della partecipazione di tutti i soggetti coinvolti sul luogo di lavoro.

Gli argomenti trattati sono il frutto di un approfondito esame delle linee guida ministeriali, tenendo conto della preparazione acquisita dagli studenti durante il primo e secondo biennio, evitando di appesantire la trattazione dal punto di vista matematico.

Sono state tenute in considerazione le inevitabili interazioni con le altre discipline di indirizzo, in particolare **Tecnologie e tecniche di installazione e manutenzione**, al fine di evitare ripetizioni e sovrapposizioni e consentire alle varie materie di proseguire in parallelo.

Un particolare ringraziamento va ad Alfredo Tomassini per il prezioso lavoro svolto nella realizzazione del testo.

DANILO TOMASSINI

Attraverso l'icona  è possibile accedere ad approfondimenti disponibili nella versione digitale del libro.

# PARTE PRIMA

## Analisi dei processi

# PARTE PRIMA

## Analisi dei processi

### MODULO A • Analisi dei segnali

#### unità A1: Proprietà dei segnali

- A1.1 Segnali e sistemi
- A1.2 Rappresentazione dei segnali
- A1.3 Classificazione dei segnali
- A1.4 Segnali determinati
- A1.5 Proprietà dei segnali determinati
- A1.6 Esempi di segnali determinati
- A1.7 Rappresentazione dei segnali determinati in funzione della frequenza

#### unità A2: Segnali digitali

- A2.1 Sorgenti di informazione
- A2.2 Codifica delle informazioni digitali
- A2.3 Codifica dei caratteri: codice ASCII
- A2.4 Codifica di segnali analogici
- A2.5 Codifica delle immagini
- A2.6 Compressione dei dati
- A2.7 Codifica di linea
- A2.8 Vantaggi dei segnali digitali

### MODULO B • Sistemi

#### unità B1: Richiami di teoria dei sistemi

- B1.1 Definizione di sistema
- B1.2 Esempi di sistemi
- B1.3 Sottosistemi
- B1.4 Ingressi, uscite e stato interno
- B1.5 Rappresentazione dei sistemi
- B1.6 Analisi dei sistemi
- B1.7 Controllo di processo
- B1.8 Sistemi a catena aperta e chiusa
- B1.9 Classificazione dei sistemi

#### unità B2: Sistemi di acquisizione dati

- B2.1 Misurazione delle grandezze fisiche
- B2.2 Misure dirette e misure indirette

- B2.3 Valore vero di una grandezza fisica
- B2.4 Errore assoluto ed errore relativo
- B2.5 Struttura di un sistema di acquisizione dati

### MODULO C • Trasduttori

#### unità C1: Caratteristiche fondamentali dei trasduttori

- C1.1 I trasduttori nell'industria
- C1.2 Sensore o trasduttore?
- C1.3 Il ruolo del trasduttore in un sistema di misura
- C1.4 Classificazione dei trasduttori
- C1.5 Rappresentazione matematica del trasduttore
- C1.6 Campi di variabilità dei segnali
- C1.7 Caratteristiche funzionali del trasduttore
- C1.8 Tipologie di trasduttori

#### unità C2: Trasduttori di posizione

- C2.1 Introduzione
- C2.2 Potenzziometro
- C2.3 Trasformatore lineare differenziale
- C2.4 Resolver
- C2.5 Encoder

#### unità C3: Trasduttori di velocità

- C3.1 Introduzione
- C3.2 L'encoder incrementale come trasduttore di velocità
- C3.3 Dinamo tachimetrica

#### unità C4: Trasduttori di deformazione, forza e pressione

- C4.1 Introduzione
- C4.2 Estensimetro
- C4.3 Cella di carico

- C4.4 Trasduttori di pressione
- C4.5 Trasduttori di accelerazione

### **unità C5: Trasduttori di temperatura**

- C5.1 Introduzione
- C5.2 Termoresistenze
- C5.3 Termocoppie
- C5.4 Termistori

### **unità C6: Trasduttori di corrente a effetto Hall**

- C6.1 Introduzione
- C6.2 Effetto Hall
- C6.3 Trasduttori di corrente a misura diretta del campo
- C6.4 Trasduttori a compensazione di campo

### **unità C7: Trasduttori di prossimità**

- C7.1 Introduzione
- C7.2 Trasduttori di prossimità induttivi
- C7.3 Trasduttori di prossimità capacitivi
- C7.4 Trasduttori di prossimità optoelettronici
- C7.5 Trasduttori a ultrasuoni
- C7.6 Trasduttori di prossimità magnetici

### **unità C8: Trasduttori di immagini**

- C8.1 Trasduttori CCD
- C8.2 Principio di funzionamento di un CCD
- C8.3 Generazione delle cariche per effetto fotoelettrico e raccolta delle cariche nei pozzi di potenziale

- C8.4 Trasferimento delle cariche
- C8.5 Estrazione delle cariche
- C8.6 Risoluzione di un CCD

### **unità C9: Trasduttori di suoni**

- C9.1 Il suono
- C9.2 Trasduzione acustico-elettrica
- C9.3 Microfoni a spostamento
- C9.4 Microfoni a velocità

## **MODULO D • Sistema di elaborazione dati**

### **unità D1: L'elaboratore elettronico**

- D1.1 Introduzione
- D1.2 Il computer
- D1.3 L'architettura di von Neumann
- D1.4 Struttura di un computer
- D1.5 La scheda madre

### **unità D2: Memoria di massa**

- D2.1 Introduzione
- D2.2 L'hard disk
- D2.3 Dischi a stato solido
- D2.4 CD
- D2.5 DVD
- D2.6 Dischi blu-ray
- D2.7 USB Flash Drive



# MODULO A

## Analisi dei segnali

### Unità A1: Proprietà dei segnali

- A1.1 Segnali e sistemi
- A1.2 Rappresentazione dei segnali
- A1.3 Classificazione dei segnali
- A1.4 Segnali determinati
- A1.5 Proprietà dei segnali determinati
- A1.6 Esempi di segnali determinati
- A1.7 Rappresentazione dei segnali determinati in funzione della frequenza

### Unità A2: Segnali digitali

- A2.1 Sorgenti di informazione
- A2.2 Codifica delle informazioni digitali
- A2.3 Codifica dei caratteri: codice ASCII
- A2.4 Codifica di segnali analogici
- A2.5 Codifica delle immagini
- A2.6 Compressione dei dati
- A2.7 Codifica di linea
- A2.8 Vantaggi dei segnali digitali

### Obiettivi

- Conoscere il significato di segnale
- Saper rappresentare un sistema in funzione del tempo e della frequenza
- Saper classificare i segnali in base alle loro caratteristiche
- Conoscere le proprietà dei segnali determinati
- Conoscere le caratteristiche dei segnali analogici
- Conoscere le caratteristiche dei segnali digitali

# unità **A1**

## CONTENUTI

- A1.1** Segnali e sistemi
- A1.2** Rappresentazione dei segnali
- A1.3** Classificazione dei segnali
- A1.4** Segnali determinati
- A1.5** Proprietà dei segnali determinati
- A1.6** Esempi di segnali determinati
- A1.7** Rappresentazione dei segnali determinati in funzione della frequenza



Segnali aleatori: il rumore

# PROPRIETÀ DEI SEGNALI

## A1.1 Segnali e sistemi

I concetti di segnale e di sistema sono presenti in una vasta gamma di discipline scientifiche e tecnologiche come le telecomunicazioni, la progettazione di circuiti, il controllo di processi industriali, l'acustica, l'elaborazione della voce e delle immagini.

I segnali sono grandezze che variano in funzione del tempo e contengono informazioni sullo stato di un fenomeno, mentre i sistemi generano in uscita segnali in funzione dei segnali applicati al loro ingresso.

Esempi di segnali sono le tensioni e le correnti in ingresso e in uscita a un circuito elettrico, mentre il circuito è un sistema.

Esistono due modalità di approccio allo studio di un sistema: l'analisi e la progettazione.

L'analisi studia il comportamento del sistema quando esso è sottoposto a una sollecitazione al suo ingresso, la progettazione, invece, si propone di identificare, se esiste, un sistema che ha un dato comportamento.

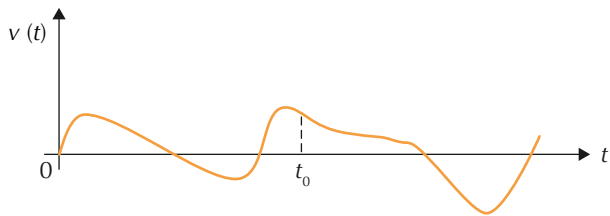
## A1.2 Rappresentazione dei segnali

Per indicare che un segnale  $K$  varia nel tempo, è consuetudine utilizzare la forma  $k(t)$ ; pertanto una tensione variabile nel tempo si indica con  $v(t)$ , una corrente con  $i(t)$ .

Un segnale che assume valori variabili con continuità non può essere definito con un numero, ma può essere rappresentato o con un grafico che ne riporta l'andamento nel tempo, o tramite una funzione matematica.

Nella **figura A1.1** è mostrato un grafico che rappresenta una tensione variabile nel tempo.





**Figura A1.1** Rappresentazione grafica di una tensione variabile nel tempo.

In questo caso è possibile ricavare il valore che il segnale assume in un certo istante  $t_0$  misurando l'ordinata in corrispondenza di quell'istante, come mostrato nella **figura A1.1**: tale valore è detto **istantaneo**.

Nel caso il segnale sia rappresentato con una funzione matematica, il valore istantaneo si ottiene sostituendo l'istante considerato nella formula stessa.

Per esempio, una tensione variabile secondo la funzione  $v(t) = 2t + 3$ , nell'istante  $t = 5$  s assume il valore:

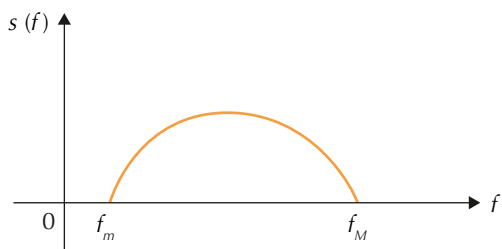
$$v(5) = 2 \cdot 5 + 3 = 10 + 3 = 13V \quad (1.1)$$

Il grafico di **figura A1.1** costituisce la **forma d'onda** del segnale  $v(t)$ : un diagramma cartesiano nel quale sono riportati i valori istantanei che  $v(t)$  assume in funzione del tempo.

Oltre che in funzione del tempo un segnale può anche essere rappresentato in funzione della frequenza ( $f$ ).

In tal caso il segnale viene rappresentato in un diagramma cartesiano, denominato **spettro**, nel quale sono riportati i valori istantanei che assume in funzione della frequenza.

Nella **figura A1.2** è riportato un esempio di spettro: si può osservare che esso è delimitato da due frequenze, indicate con  $f_m$  e  $f_M$ , che rappresentano rispettivamente la massima e la minima frequenza del segnale.



**Figura A1.2** Rappresentazione di un segnale in funzione della frequenza.

L'intervallo:

$$B = f_M - f_m \quad (1.2)$$

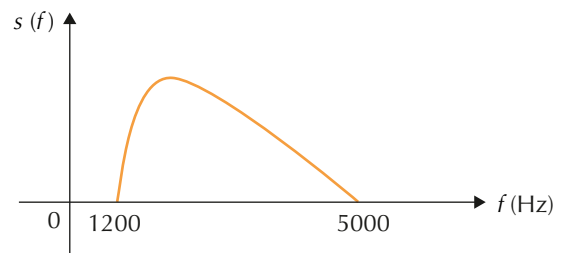
è detto **larghezza di banda** o semplicemente **banda** del segnale.

Le rappresentazioni nel dominio del tempo e della frequenza sono strettamente legate tra di loro, tanto che, come si vedrà in seguito, è possibile ricavare la composizione spettrale di un segnale, nota la sua forma d'onda e viceversa.

**ESEMPIO**

Nella **figura A1.3** è riportato lo spettro di un segnale.

Quanto vale la sua banda?



**Figura A1.3**

Essendo  $f_M = 5000$  Hz e  $f_m = 1200$  Hz, la banda per la 1.2 risulta:

$$B = f_M - f_m = 5000 - 1200 = 3800 \text{ Hz}$$

**A1.3 Classificazione dei segnali**

Qualsiasi sia la loro natura, i segnali possono essere classificati in funzione della variazione delle loro caratteristiche nel tempo: nel caso se ne conosca l'andamento in ogni istante sono detti **determinati**, mentre se sono note solo le loro caratteristiche statistiche sono detti **aleatori**.

Data la natura profondamente diversa delle due tipologie di segnali, per ognuna di esse occorre utilizzare un approccio diverso: i segnali determinati vengono infatti studiati con i tradizionali mezzi matematici, mentre quelli aleatori con metodologie statistiche.

Tipici segnali aleatori sono il rumore e i disturbi di ogni genere che, sovrapponendosi al segnale utile, possono dar luogo a interpretazioni errate durante l'elaborazione.

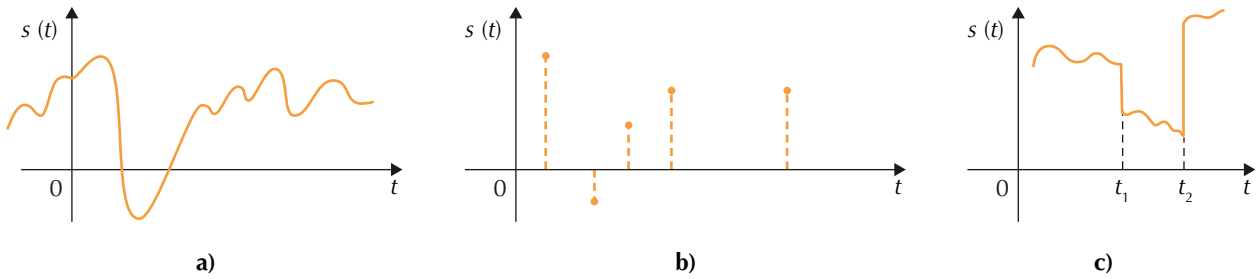


Figura A1.4 Esempio di segnali continui (a), discreti (b) e discontinui (c).

## A1.4 Segnali determinati

In base alla propria forma d'onda un segnale determinato può essere distinto in **continuo** o **discreto**.

Un segnale è detto continuo o analogico, se la sua forma d'onda è una funzione continua nel tempo, cioè se può assumere in ogni istante un qualsiasi valore compreso tra un massimo e un minimo [fig. A1.4a].

Un segnale è detto invece discreto se può assumere un valore numerico, a istanti prefissati, tra un numero determinato di valori, detti livelli [fig. A1.4b].

Essendo possibile associare un valore numerico a ogni livello, i segnali discreti vengono chiamati anche **numerici** o **digitali** (dall'inglese *digit*, che significa cifra).

Occorre però sottolineare che esistono segnali che non appartengono né all'una né all'altra delle due tipologie descritte: è questo il caso dei segnali del tipo mostrato in figura A1.4c, in cui la relativa forma d'onda presenta uno o più punti di discontinuità dove varia istantaneamente tra due diversi valori.

Il segnale di figura A1.4c non può essere considerato continuo in quanto presenta punti di discontinuità e non può essere considerato nemmeno discreto poiché la sua forma d'onda ha un andamento

continuo tranne nei punti di discontinuità. Non essendo quindi classificabili né continui né discreti, tali segnali sono denominati **discontinui**, proprio per evidenziare le discontinuità che essi presentano.

## A1.5 Proprietà dei segnali determinati

### Periodicità

Un segnale determinato  $s(t)$  è detto periodico se, a intervalli di tempo costanti, riprende a variare con le stesse modalità, cioè se esiste un tempo finito  $T$  tale che:

$$\begin{aligned} s(t) &= s(t + T) = s(t + 2T) = s(t + 3T) = \\ &= s(t + nT) \end{aligned} \quad (1.3)$$

La caratteristica di periodicità deriva dal fatto che il segnale assume valori uguali a intervalli di tempo  $T$  uguali, come mostrato nella figura A1.5.

L'intervallo di tempo  $T$  (misurato in secondi) è detto **periodo** del segnale, mentre il numero di periodi al secondo costituisce la sua frequenza  $f$ ; si ha quindi:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.4)$$

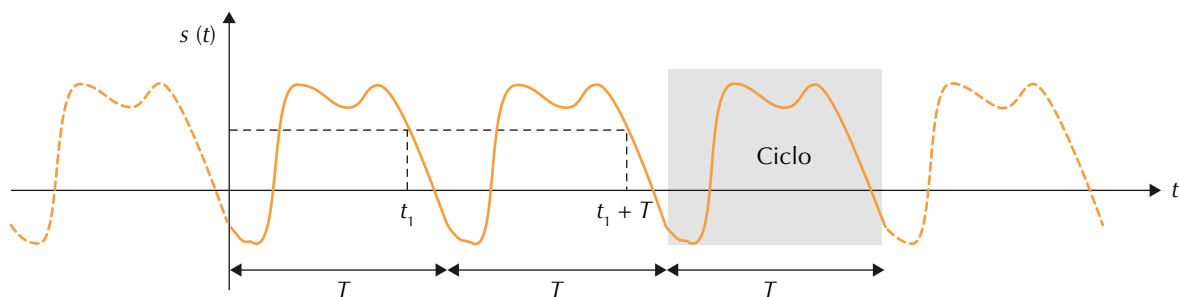


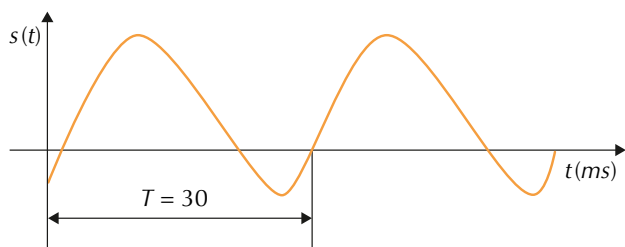
Figura A1.5 Segnale periodico.

Per un segnale periodico è pertanto sufficiente conoscere l'andamento di un singolo periodo, poiché la forma d'onda degli altri è identica. Un segnale che non soddisfa l'equazione 1.4, cioè che non prevede periodi ripetuti è detto **aperiodico**.

**ESEMPIO**

Consideriamo il segnale periodico di **figura A1.6**.

Quanto vale la sua frequenza?



**Figura A1.6**

Il segnale è periodico di periodo  $T = 30 \text{ ms}$ ; per la 1.4, allora, la sua frequenza è:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{30 \cdot 10^{-3}} = 33,3 \text{ Hz}$$

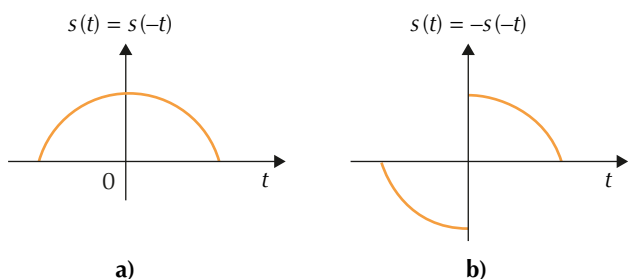
**Simmetria**

Un segnale determinato  $s(t)$  si dice **simmetrico pari** rispetto all'origine dei tempi se per ogni istante di tempo risulta **[fig. A1.7a]**:

$$s(t) = s(-t) \tag{1.5}$$

mentre si dice a **simmetria dispari** **[fig. A1.7b]** se:

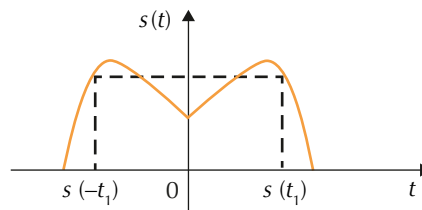
$$s(t) = -s(-t) \tag{1.6}$$



**Figura A1.7** Segnale pari (a) e segnale dispari (b).

**ESEMPIO**

Il segnale di **figura A1.8** è a simmetria pari o dispari?



**Figura A1.8**

Il segnale è a simmetria pari poiché risulta:

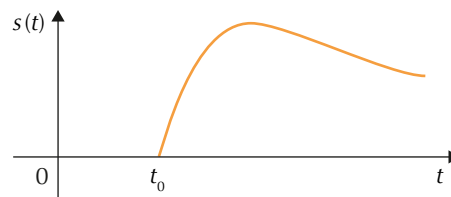
$$s(t) = s(-t)$$

**Causalità**

Un segnale  $s(t)$  determinato è causale quando:

$$s(t) = 0 \text{ per } t < t_0 \tag{1.7}$$

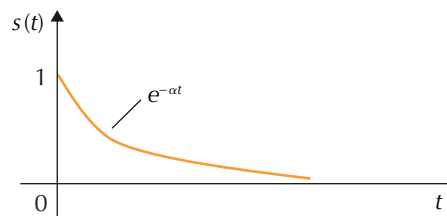
dove  $t_0$  è un qualsiasi istante temporale. In sostanza la causalità esprime la caratteristica di un segnale di annullarsi sotto un prefissata soglia temporale, mentre al di sopra di essa assume valori non nulli **[fig. A1.9]**.



**Figura A1.9** Segnale causale.

**ESEMPIO**

Il segnale esponenziale  $e^{-at}$  **[fig. A1.10]** è causale poiché è nullo per  $t < 0$ , mentre per  $t > 0$  assume valori diversi da zero.



**Figura A1.10**

### Durata

Un segnale determinato  $s(t)$  si dice a durata limitata se esiste un intervallo di tempo finito ( $t_1 \div t_2$ ) tale che è nullo fuori da tale intervallo [fig. A1.11], cioè:

$$s(t) = 0 \quad \text{per} \quad t < t_1 \text{ e } t > t_2 \quad (1.8)$$

In pratica esistono segnali che al di fuori di un prefissato intervallo temporale assumono valori talmente piccoli, rispetto a quelli assunti al suo interno, da poter essere trascurati: in questi casi si considerano nulle le ampiezze inferiori a una prefissata soglia  $\gamma$  che può essere definita in funzione del livello del rumore che è sempre sovrapposto al segnale.

Si può allora supporre che la durata del segnale sia limitata all'intervallo considerato, con l'equazione 1.8 che rimane valida.

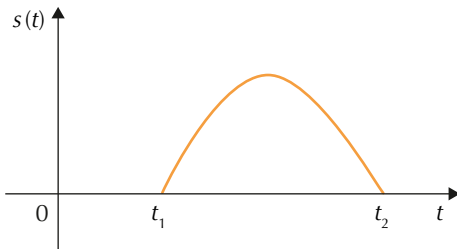


Figura A1.11 Segnale a durata limitata.

### Valore medio

Il valore medio di un segnale determinato, calcolato nell'intervallo di tempo finito  $\Delta T = t_2 \div t_1$  (con  $t_2 > t_1$ ), rappresenta il valore che *mediamente* il segnale assume in tale intervallo.

In sostanza il valore medio rappresenta l'ordinata  $V_m$  che moltiplicata per il segmento  $\Delta T$  fornisce un'area  $V_m \Delta T$  uguale a quella individuata dalla forma d'onda di  $s(t)$  nell'intervallo  $\Delta T$  [fig. A1.12].

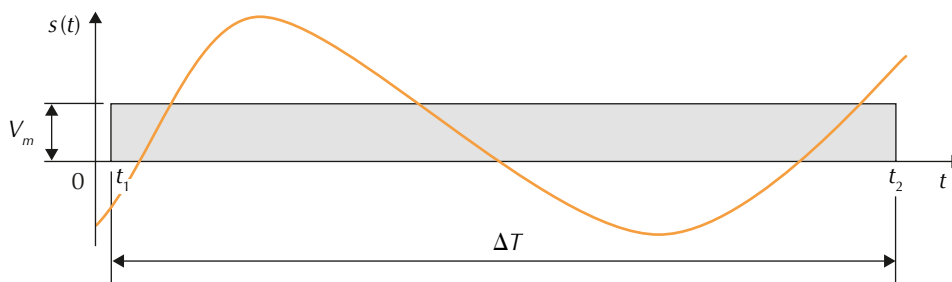


Figura A1.12 Valore medio di un segnale.

### Alternatività

Un segnale determinato  $s(t)$  si dice alternativo quando è periodico e ha valore medio nullo ( $V_m = 0$ ). La sua forma d'onda pertanto, in un intervallo di tempo uguale al periodo  $T$ , rispetto all'asse dei tempi determina aree positive uguali a quelle negative, come mostrato in figura A1.13.

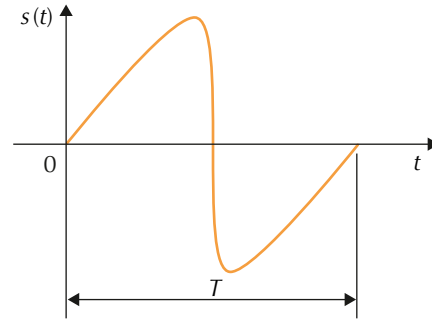


Figura A1.13 Segnale alternativo.

### ESEMPIO

Qual è il valore medio del segnale di figura A1.14?

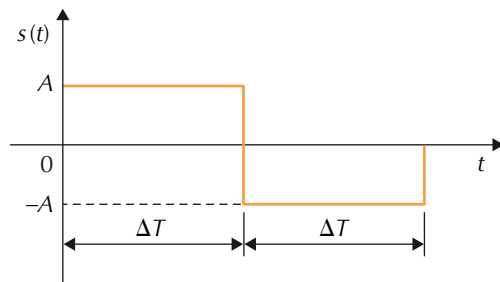


Figura A1.14

Rispetto all'asse dei tempi il segnale determina aree positive e negative uguali. Infatti di ha:

$$\begin{aligned} \text{Area positiva} &= A \cdot \Delta T \\ \text{Area negativa} &= -A \cdot \Delta T \end{aligned}$$

Il valore medio del segnale è pertanto nullo e quindi è alternativo.

### A1.6 Esempi di segnali determinati

In questo paragrafo verranno analizzati i segnali determinati più importanti per lo studio dei sistemi elettrici ed elettronici.

#### Segnale costante

È del tipo:

$$s(t) = A \quad \text{con } A \text{ costante e } -\infty < t < \infty \quad (1.9)$$

e può essere considerato periodico con periodo  $T_0$  qualsiasi [fig. A1.15].

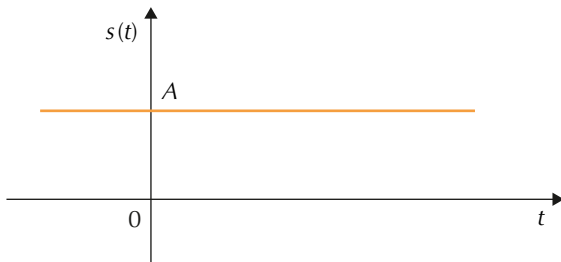


Figura A1.15 Segnale costante.

#### Segnale a gradino

Assume un valore costante  $A$  a partire da una soglia temporale  $t_0$ , mentre prima di questa è nullo [fig. A1.16].

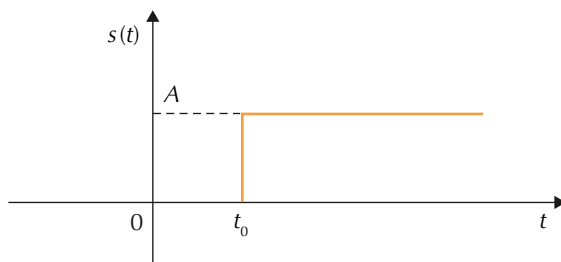


Figura A1.16 Segnale a gradino.

Il segnale a gradino di figura A1.12 è una pura astrazione matematica, in quanto varia istantaneamente da un valore nullo a un valore costante ben definito e ciò non è fisicamente possibile.

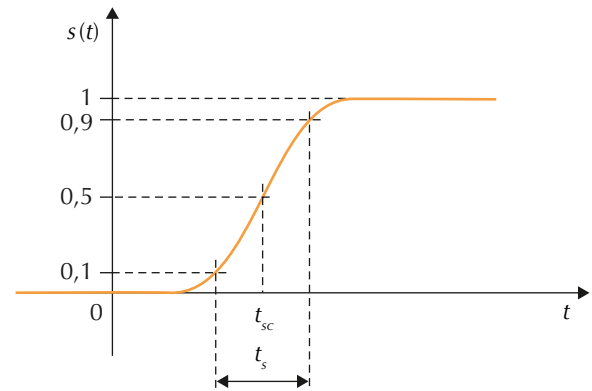


Figura A1.17 Segnale a gradino reale.

I segnali a gradino che si riescono a generare nella realtà sono del tipo mostrato in figura A1.17 in cui il passaggio dal valore nullo al valore costante non è istantaneo, ma avviene in un intervallo temporale ben determinato.

Data la difficoltà di descrivere matematicamente la curva di raccordo tra i due tratti orizzontali (quello a valore nullo e quello a valore costante), le caratteristiche del gradino sono definite convenzionalmente fornendo i seguenti due parametri:

- il **tempo di salita**  $t_s$ , cioè l'intervallo temporale necessario affinché il segnale passi dal 10% al 90% del valore costante  $A$ ;
- l'**istante di scatto**  $t_{sc}$ , cioè l'istante in cui il segnale raggiunge il 50% del valore costante  $A$ .

#### Segnale sinusoidale

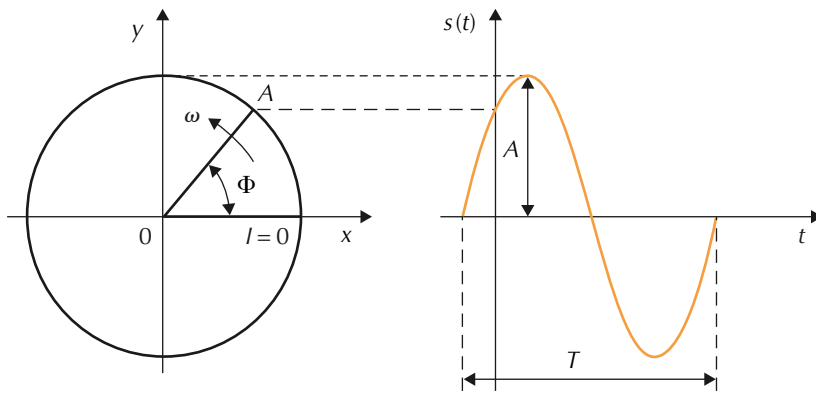
È un segnale periodico, alternativo (quindi a valore medio nullo), caratterizzato da una forma sinusoidale del tipo:

$$s(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1.10)$$

dove:

- $A$  è il valore massimo o ampiezza del segnale;
- $\omega$  è la pulsazione (che si misura in rad/s), funzione della frequenza  $f$  secondo la relazione  $\omega = 2\pi f$ ;
- $\phi$  la fase iniziale.

In figura A1.18 è mostrato un segnale sinusoidale: si può osservare che, considerando un sistema di assi coordinati  $xy$ , i relativi valori istantanei possono essere ottenuti dalla proiezione, sull'asse delle  $y$  (ordinate), di un vettore avente modulo pari ad  $A$  e ruotante con una velocità angolare uguale alla pulsazione del segnale sinusoidale  $s(t)$ .



**Figura A1.18** Segnale sinusoidale ottenuto dalla proiezione, sull'asse delle ordinate, di un segmento ruotante con velocità angolare  $\omega$ .

### ESEMPI

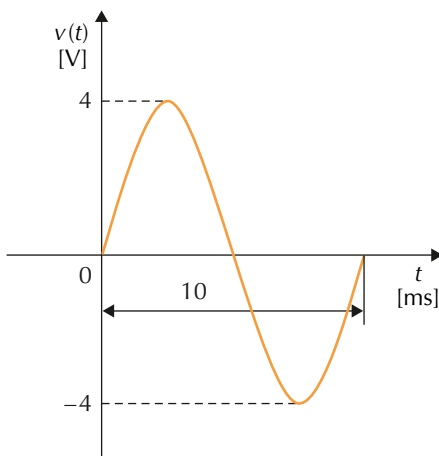
1. Considerata la tensione sinusoidale di **figura A1.19**, determinarne:

- il valore massimo;
- il valore medio;
- il periodo;
- la frequenza.

Dalla **figura A1.19** si può dedurre che il valore massimo di  $v(t)$  risulta:

$$V_M = 4V$$

Essendo una grandezza sinusoidale e quindi alternativa, il valore medio di  $v(t)$  è nullo.



**Figura A1.19**

Sempre dalla **figura A1.19** il periodo  $T$  di  $v(t)$  vale:

$$T = 10 \text{ ms}$$

Per la 1.4 la frequenza risulta:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ Hz}$$

2. Considerata la tensione sinusoidale:

$$v(t) = 5\text{sen}(31415,93 + 0,87) \text{ (V)}$$

determinarne:

- il valore massimo;
- la frequenza;
- la fase iniziale;
- il valore che assume nell'istante  $t = 1$  s.

Confrontando l'espressione di  $v(t)$  con la 1.10 si può dedurre che il valore massimo di  $v(t)$  vale 5 V, la pulsazione 3141,93 rad/s e la fase iniziale 0,87 rad =  $50^\circ$  (1 rad =  $57^\circ$ ). Essendo la pulsazione  $\omega$ :

$$\omega = 2\pi f$$

la frequenza  $f$  risulta:

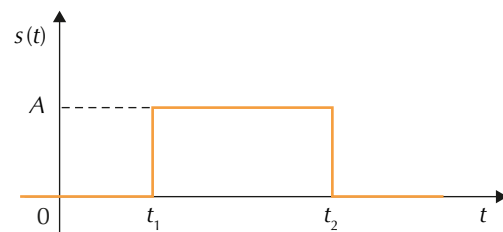
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{31415,93}{2\pi} = 5 \text{ KHz}$$

### Impulso rettangolare

Un impulso rettangolare di durata finita  $T$  e ampiezza costante  $A$  è definito dalla seguente relazione:

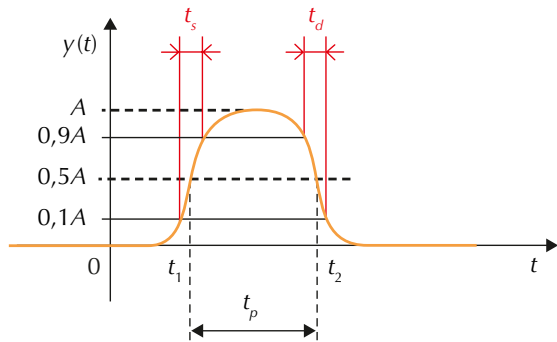
$$s(t) = A \quad \text{per} \quad t_1 < t < t_2 \quad (1.11)$$

L'impulso rettangolare è pertanto caratterizzato da un valore costante  $A$  all'interno dell'intervallo temporale  $t_1 \div t_2$  [**fig. A1.20**].



**Figura A1.20** Impulso rettangolare.

Analogamente a quanto visto per il gradino, l'impulso rettangolare è una pura astrazione matematica, in quanto passa in un tempo nullo da un valore pari a zero a un valore costante definito, per poi ritornare a zero istantaneamente. Nella realtà gli impulsi rettangolari sono del tipo mostrato in **figura A1.21**.



**Figura A1.21** Impulso rettangolare reale: il passaggio dal valore nullo al valore costante e viceversa non è istantaneo, ma avviene in un certo intervallo temporale.

Anche in questo caso, data la difficoltà di descrivere matematicamente la curva di raccordo tra i due tratti orizzontali (nullo e pari ad  $A$ ), le caratteristiche dell'impulso vengono convenzionalmente definite con i parametri di seguito indicati:

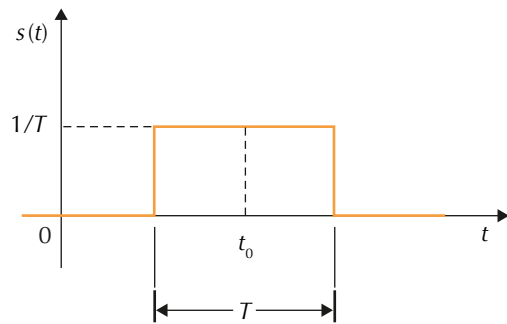
1. **tempo di salita**  $t_s$ : intervallo temporale nel quale il segnale passa dal 10% al 90% del valore costante  $A$ ;
2. **tempo di discesa**  $t_d$ : intervallo temporale nel quale il segnale passa dal 90% al 10% del valore costante  $A$ ;
3. **durata dell'impulso**  $t_p$ : intervallo temporale determinato dagli istanti  $t_1$  e  $t_2$  in cui il segnale raggiunge, sia nella fase di salita che in quella di discesa, il 50% del valore costante  $A$ .

### Impulso ideale o di Dirac

Si consideri l'impulso rettangolare di **figura A1.22**, avente durata  $T$  e ampiezza pari a  $1/T$ ; esso sottende, con l'asse dei tempi  $t$ , un'area  $S$  pari a:

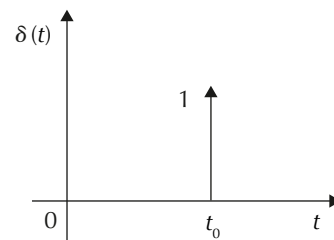
$$S = \frac{1}{T} T = 1 \quad (1.12)$$

Facendo tendere a zero la durata dell'impulso si ottiene un segnale centrato su  $t_0$  di durata nulla e area pari a 1, denominato **impulso ideale ad area costante** o di **Dirac**, che si indica con  $\delta(t)$ .



**Figura A1.22** Impulso rettangolare centrato sull'origine.

Convenzionalmente l'impulso  $\delta(t)$  si rappresenta con una freccia applicata nel punto  $t = t_0$  di ampiezza unitaria **[fig. A1.23]**.



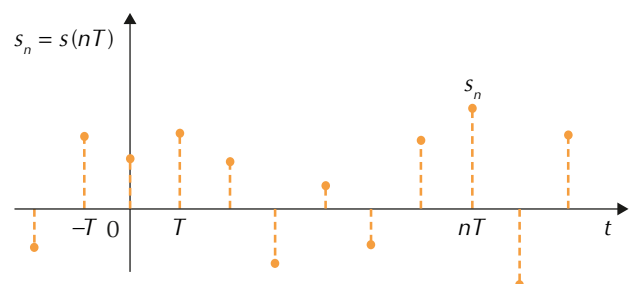
**Figura A1.23** Impulso di Dirac.

### Segnali discreti

Un segnale discreto ha la caratteristica di assumere determinati valori in corrispondenza di istanti  $t_n$  definiti, la cui distanza temporale può essere qualsiasi, ma in questa sede verrà considerato il caso di maggior interesse in cui gli istanti  $t_n$  sono equidistanti **[fig. A1.24]**, cioè tali che la successione dei vari  $t_n$  sia:

$$s_n = s(nT) \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.13)$$

dove  $T$  è un intervallo temporale costante.



**Figura A1.24** Esempio di segnale discreto con istanti di definizione equidistanti.

Anche per i segnali discreti si possono estendere le proprietà e le considerazioni valide per i segnali analogici, considerando in questo caso la variabile discreta  $nT$  in luogo della variabile continua  $t$  [quindi  $s(nT)$  al posto di  $s(t)$ ].

Per esempio, un segnale discreto  $s(nT)$  è detto periodico quando esiste un numero intero  $N$  tale che:

$$s(nT + NT) = s(nT) \quad (1.14)$$

## A1.7 Rappresentazione dei segnali determinati in funzione della frequenza

Come anticipato nel paragrafo A1.2, un segnale determinato può essere rappresentato anche in funzione della frequenza riportando in un grafico, denominato *spettro*, i valori istantanei  $s(f)$  che esso assume in funzione della frequenza.

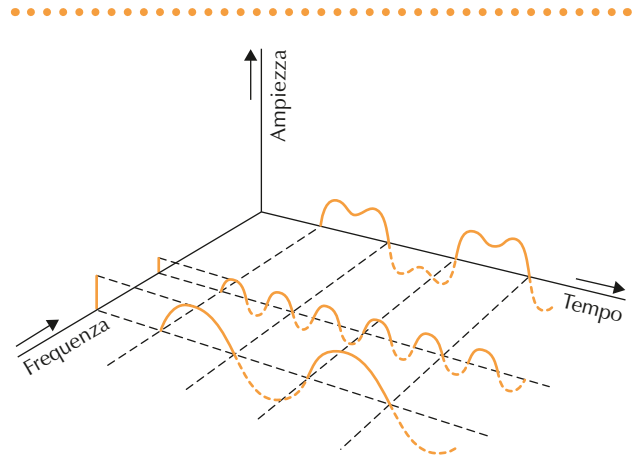
La rappresentazione in funzione della frequenza poggia i suoi fondamenti sullo **sviluppo in serie di Fourier** che, a partire dalla forma d'onda di un segnale periodico, consente di ricavare la relativa composizione spettrale.

Infatti, secondo il teorema di **Fourier**, un segnale periodico  $s(t)$  di pulsazione  $\omega$  (e quindi frequenza  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ), può essere scomposto nella somma di un termine costante e di infiniti segnali sinusoidali, denominati **armoniche**, dei quali il primo ha la stessa frequenza  $f$  di  $s(t)$  e gli altri frequenze multiple di  $f$  ( $2f, 3f, 4f\dots$ ), ovvero:

$$s(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(2\omega t) + A_3 \cos(3\omega t) + \dots A_n \cos(n\omega t) \quad (1.15)$$

Il coefficiente  $A_0$ , che rappresenta il termine costante, costituisce il valore medio di  $s(t)$ , mentre i coefficienti  $A_1, A_2, A_3, A_n$  rappresentano le ampiezze delle armoniche.

Ogni armonica viene rappresentata con un segmento (riga), di lunghezza proporzionale alla sua



**Figura A1.25** Rappresentazione nel dominio del tempo e della frequenza di un segnale periodico composto da due armoniche.

ampiezza, in corrispondenza del proprio valore di frequenza: l'insieme delle righe, ciascuna corrispondente alla propria frequenza, costituisce lo spettro del segnale, il quale è perciò costituito da tante righe quante sono le armoniche che lo compongono.

Un segnale sinusoidale, pertanto, ha uno spettro composto da una sola riga, essendo caratterizzato da una sola frequenza.

Nella **figura A1.25** è mostrato un esempio di segnale costituito solo dalle prime due armoniche, rappresentato sia in funzione del tempo, sia in funzione della frequenza in un grafico tridimensionale.

Poiché le ampiezze delle singole armoniche decrescono con la frequenza, il loro contributo diminuisce con l'aumentare di quest'ultima e pertanto è sufficiente considerare solo le prime.

In generale, non è possibile definire il numero delle armoniche necessarie per riprodurre con una determinata precisione il segnale originale, ma si può affermare che il loro numero è tanto più elevato quanto più il segnale da riprodurre ha carattere impulsivo.



# unità **A2**

## CONTENUTI

- A2.1 Sorgenti di informazione
- A2.2 Codifica delle informazioni digitali
- A2.3 Codifica dei caratteri: codice ASCII
- A2.4 Codifica di segnali analogici
- A2.5 Codifica delle immagini
- A2.6 Compressione dei dati
- A2.7 Codifica di linea
- A2.8 Vantaggi dei segnali digitali



Codifica e compressione audio  
Immagini digitali

# SEGNALI DIGITALI

## A2.1 Sorgenti di informazione

Le sorgenti di informazioni sono entità che possono essere analogiche, se rappresentano una funzione continua nel tempo, numeriche o digitali, se costituite da una serie di simboli localizzati in corrispondenza di prefissati intervalli temporali.

Il concetto di analogico si basa sulla somiglianza e continuità: una rappresentazione analogica cerca di riprodurre le caratteristiche del fenomeno in ogni loro minima variazione (riproduzione fedele), stabilendo quindi un rapporto continuo tra il fenomeno rappresentato e il vettore di trasporto (segnale), tale che per ogni variazione di stato della sorgente si ha una corrispondente variazione di stato del vettore.

Per esempio, in un collegamento telefonico tra due soggetti, le vibrazioni generate nell'aria dalla voce umana arrivano al microfono della cornetta del telefono, sono convertite in variazioni di corrente elettrica e vengono inviate sulla linea che collega l'altro apparecchio, dove avviene il processo inverso.

Nell'elaborazione digitale, invece, le informazioni della sorgente, che possono essere già in formato digitale, oppure digitalizzate successivamente, sono veicolate in un segnale che può assumere solo due stati, ai quali viene associata una cifra binaria: il **bit**, che può assumere soltanto i valori "0" o "1".

Il bit può essere rappresentato mediante diversi tipi di segnale: per esempio, due livelli distinti di tensione elettrica, oppure due frequenze, o ancora due impulsi luminosi emessi da un laser (dipende dal sistema di trasmissione utilizzato).

La codifica dei bit può essere effettuata in diversi modi.

Nel caso più semplice, a ogni bit corrisponde un

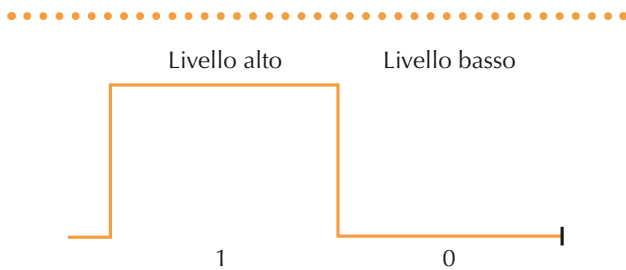


Figura A2.1 Rappresentazione del bit.

livello del segnale: per esempio, allo 0 corrisponde un livello di tensione elettrica basso, all'1 un livello alto [fig. A2.1].

## A2.2 Codifica delle informazioni digitali

Le informazioni sono di diversa natura (come numeri, caratteri, immagini, suoni), ma devono assumere una forma idonea a essere trattata dai sistemi di elaborazione digitali, i quali sono in grado di interpretare soltanto informazioni costituite da sequenze di bit, poiché i loro circuiti interni possono gestire segnali che assumono soltanto due valori.

Il processo che trasforma un'informazione in una sequenza di bit è detto di **codifica**; il processo inverso, invece, cioè quello che dalla la sequenza di bit ricava l'informazione nella sua forma originale, è detto di **decodifica**.

Con un solo bit è possibile distinguere fra due stati diversi, uno associato allo "0" e l'altro all'"1", con 2 bit è possibile distinguere e quindi codificare 4 ( $=2^2$ ) stati, con 3 bit 8 ( $=2^3$ ) stati e così via. Pertanto, con  $n$  bit è possibile codificare  $2^n$  stati distinti: ogni combinazione di 0 ed 1 è associata a un distinto stato in modo convenzionale (per esempio attraverso una tabella) o utilizzando leggi matematiche.

Il processo di codifica varia a seconda della natura dell'informazione (testi, numeri, immagini, filmati).

### ESEMPI

1. Per associare un codice identificativo alle seguenti quattro città:

"Napoli", "Roma", "Milano", "Torino"

si può utilizzare un codice a due bit ed eseguire la seguente codifica: 00=Napoli, 01=Roma, 10=Milano, 11=Torino.

2. Con 3 bit si possono codificare i primi otto simboli dell'alfabeto, ponendo, per esempio, 000=A, 001=B, 010=C, 011=D, 100=E, 101=F, 110=G, 111=H

3. Con 7 bit si possono codificare  $2^7=128$  caratteri distinti della tastiera, con 8 bit  $2^8=256$  distinti "livelli di grigio" nella rappresentazione codificata di un disegno in bianco e nero, con 16 bit  $2^{16}=65\,536$  distinti numeri interi.

## A2.3 Codifica dei caratteri: codice ASCII

L'insieme dei caratteri comprende le lettere maiuscole e minuscole dell'alfabeto, le cifre decimali, i caratteri di interpunzione e alcuni "caratteri di controllo" (come fine riga, cancella carattere).

Per realizzare una corretta codifica dei caratteri, pertanto, occorrono almeno 7 bit ( $2^7=128$ ), la cui rappresentazione si traduce in una tabella che convenzionalmente stabilisce una corrispondenza fra una sequenza di 7 bit e un carattere.

La prima realizzazione di un simile codice fu realizzata da Samuel Morse che ideò l'omonimo codice a punti e linee.

Altri tipi di codici sorgente sono l'ASCII (American Standard Code for Information Interchange), il BCD (Binary Codel Decimal) e l'EBCDIC (Extended BDC Interchange Code).

Il più importante tra questi è il **codice ASCII**, ideato dall'ingegnere dell'IBM Bob Bemer nel 1961 e successivamente normalizzato come standard internazionale con il nome di **Alfabeto Internazionale N5** [tab. A2.1].

È un codice a 7 bit per un totale di  $2^7 = 128$  combinazioni, ma in realtà viene considerato a 8 bit perché a ogni combinazione viene sistematicamente aggiunto un **bit di controllo** che può assumere il valore 1 o 0 a seconda che la combinazione di codice contenga un numero dispari o pari di bit, facendo quindi in modo che tutte le combinazioni contengano un numero pari di bit 1.

Ciò è particolarmente utile nei sistemi di trasmissione delle informazioni, poiché consente una verifica degli errori in quanto, se in ricezione viene ricevuta una combinazione di codice che contiene un numero dispari di bit 1, essa è sicuramente errata e quindi può essere corretta con adeguate metodologie di correzione degli errori.

Le 128 combinazioni sono suddivise in quattro gruppi da 32 che comprendono:

- il primo gruppo (1° e 2° colonna) i segnali di comando (interlinea, ritorno carrello e altri) e una serie di caratteri di controllo impiegati nella trasmissione dati;
- il secondo gruppo (3° e 4° colonna) le cifre, i segni d'interpunzione (., , ? ecc.), gli operatori matematici (+, - e altri) e caratteri vari;

**Tabella A2.1** Alfabeto internazionale n. 5

1 2 3 4	5 6 7 000	5 6 7 100	5 6 7 010	5 6 7 110	5 6 7 001	5 6 7 101	5 6 7 011	5 6 7 111
0000	NUL	DLE	SPACE	0	(0)	P	`	p
1000	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0100	STX	DC2	-	2	B	R	b	r
1100	EXT	DC3	L (#)	3	C	S	c	s
0010	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
1010	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0110	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
1110	BELL	ETB	'	7	G	W	g	w
0001	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1001	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
0101	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1101	VT	ESC	+	;	K	(l)	k	()
0011	FF	FS	,	<	L	()	l	()
1011	CR	GS	-	=	M	(l)	m	()
0111	SO	RS	.	>	N	^	n	~
1111	SI	US	/	?	O	-	o	Delete
<span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">1</span> Imp. di RIPOSO <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">0</span> Imp. di LAVORO              () Per uso nazionale								

- il terzo gruppo (5° e 6° colonna) le lettere maiuscole;
- il quarto gruppo (7° e 8° colonna) le lettere minuscole.

**ESEMPIO**

Nel codice ASCII la lettera A è rappresentata dalla combinazione 1000001, la lettera B da 0100001.

**A2.4 Codifica di segnali analogici**

La maggior parte delle informazioni sono costituite da segnali analogici: tipico esempio è il suono raccolto da un microfono, che riproduce la variazione nel tempo della pressione che le onde sonore esercitano sulla sua membrana.

La caratteristica fondamentale di un segnale analogico è la continuità nel tempo e quindi la possibilità di assumere infiniti valori in ogni istante. Affinché un segnale analogico possa essere elaborato mediante un calcolatore elettronico, è necessario

che sia trasformato in un segnale digitale, cioè in sequenze di bit, effettuando una conversione **analogico-digitale**, basata su tre operazioni fondamentali: **campionamento**, **quantizzazione** e **codifica**. L'argomento è già stato trattato nel volume 2 e quindi in questa sede ne effettueremo soltanto una breve descrizione, utile per affrontare gli argomenti che seguiranno.

Il campionamento consiste nel prelevare dal segnale analogico un sufficiente numero di campioni dai quali sia poi possibile ricostruire il segnale originario.

Si può dimostrare che un segnale analogico avente larghezza di banda finita, compresa tra le frequenze  $f_1$  e  $f_2$  (con  $f_2 > f_1$ ), può essere rappresentato mediante una successione di campioni prelevati a una frequenza, detta **frequenza di campionamento** ( $f$ ), pari ad almeno  $2f_2$  (teorema del campionamento di **Shannon**).

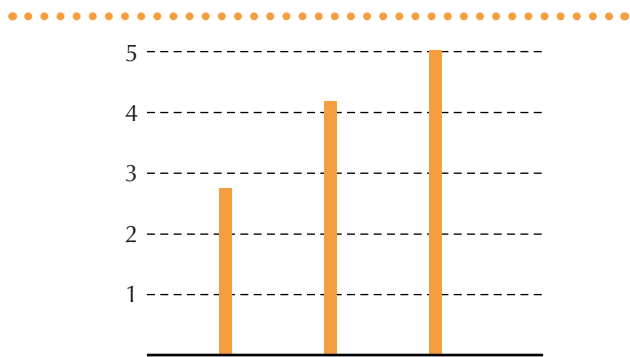
I campioni ottenuti con questo processo devono essere codificati sotto forma di codice binario.

Tuttavia, essi sono di tipo analogico, cioè possono assumere uno degli infiniti valori compresi tra la massima e la minima ampiezza del segnale analo-

gico da digitalizzare: in tal caso sarebbero necessarie infinite combinazioni di codice, condizione in pratica non realizzabile.

Per tale ragione si ricorre alla **quantizzazione**, che riduce a un numero finito i valori delle ampiezze dei campioni, detti **livelli di quantizzazione**.

Nella **figura A2.2** è rappresentato un esempio di quantizzazione di tre campioni utilizzando per semplicità 5 livelli.



**Figura A2.2** Esempio di quantizzazione di tre campioni in una codifica a 5 livelli.

Si può osservare che il primo e il secondo campione sono rispettivamente approssimati ai livelli 3 e 4, essendo essi i più vicini previsti dalla codifica, mentre il campione 3 non necessita di alcuna approssimazione, poiché la sua ampiezza coincide con quella del livello 5.

L'approssimazione introdotta dalla quantizzazione impedisce una perfetta ricostruzione del segnale originario: la conseguente deformazione che

il segnale presenta in ricezione è interpretabile come sovrapposizione al segnale utile di un disturbo detto **rumore di quantizzazione**, tanto più intenso quanto più ampi sono gli intervalli fra i successivi livelli di quantizzazione.

Una volta quantizzati, i campioni sono pronti per la **codifica**, che consiste nell'associare a ciascun campione una sequenza di bit, detta **parola** o **carattere** secondo un determinato codice [fig. A2.3]. La lunghezza della parola con cui ciascun campione viene codificato dipende dal numero dei livelli di quantizzazione; se questi sono  $N$ , il numero  $M$  dei bit necessari per codificare ciascun campione quantizzato deve essere tale che risulti  $N = 2^M$ , cioè:

$$M = \log_2 N \quad (2.1)$$

### ESEMPIO

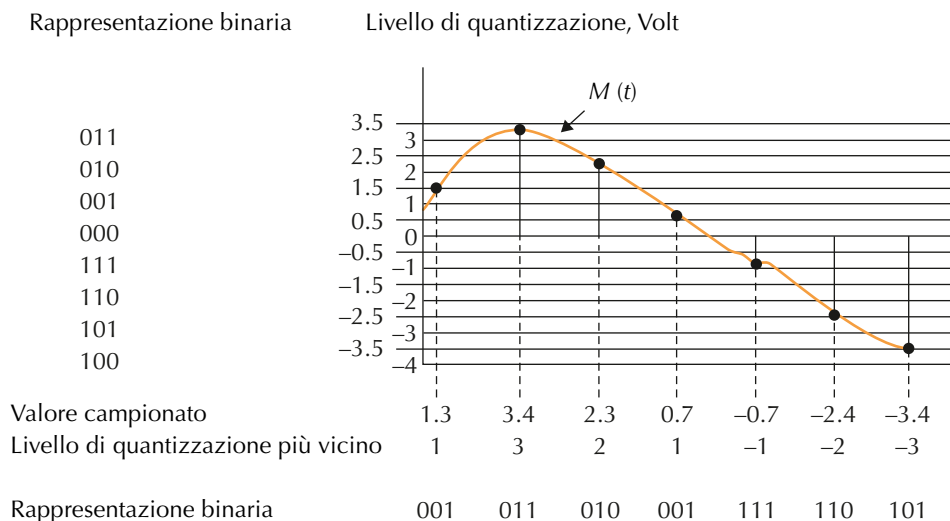
Un brano musicale masterizzato su CD audio in genere presenta le seguenti caratteristiche:

- frequenza di campionamento pari a 44,1 KHz (44100 campioni al secondo);
- codifica a 16 bit (65536 livelli di quantizzazione);
- 2 canali di uscita audio (per un flusso audio di tipo stereo).

Pertanto, la dimensione  $D$  in byte occupata dal brano per ogni minuto sono:

$$D = 44\,100 \text{ campioni/secondo} \cdot 60 \text{ secondi} \cdot 2 \text{ byte/campione} \cdot 2 \text{ canali} = 10\,584\,000 \text{ byte}$$

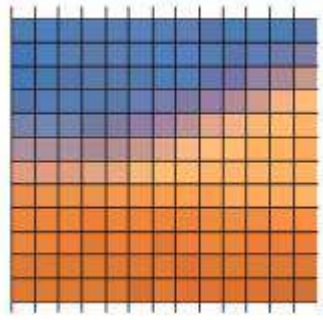
quantificabili approssimativamente in 10 MB.



**Figura A2.3** Processo di conversione analogico-digitale.

## A2.5 Codifica delle immagini

La rappresentazione di un'immagine in digitale può essere concettualmente effettuata sovrappo-  
nendo all'immagine stessa un reticolo  $n \cdot m$ , che  
individua  $n \times m$  elementi denominati **pixel** (*picture  
element*), come mostrato nella **figura A2.4**.



**Figura A2.4** Pixel che costituiscono un'immagine digitale a colori.

Il numero dei pixel costituisce la dimensione dell'immagine, la quale viene generalmente espressa indicando il numero dei pixel orizzontali e quello dei pixel verticali: per esempio,  $810 \times 1020$  pixel significa che l'immagine è composta da una matrice formata da 810 righe e 1020 colonne per un totale di  $810 \times 1020 = 826\,200$  pixel.

Il numero dei pixel per unità di lunghezza costituisce la risoluzione dell'immagine, che si misura in pixel/cm o, più comunemente, in punti/pollice (dpi). A parità di superficie, tanto maggiore è il valore della risoluzione quanto maggiore è il numero dei pixel che costituiscono l'immagine: in altre parole, la risoluzione fornisce una misura della densità dei pixel.

Ogni singolo pixel può essere rappresentato da un numero (espresso da una sequenza di bit) che ne indica il "livello di grigio" se l'immagine è in bianco e nero, la "profondità di colore" se è a colori.

Una espressione di immagini in questa forma è detta in **tecnologia Raster** (lo standard **Bitmap** della Microsoft è una particolare realizzazione della Raster). Per i disegni geometrici, invece, si utilizza un'altra tecnica, detta **vettoriale**: l'immagine è ottenuta compo-

nendo figure geometriche elementari fondamentali di differenti tipologie, come segmenti, poligoni, archi di circonferenze, dette **primitive**, ciascuna delle quali è individuata mediante appositi parametri.

In ogni caso, la rappresentazione di una immagine richiede molti bit e quindi occupa in memoria molto spazio.

### ESEMPI

1. Una semplice rappresentazione in bianco e nero può prevedere 8 bit per pixel; si possono così rappresentare per ogni pixel dell'immagine  $2^8 = 256$  livelli di grigio.
2. Supponendo di utilizzare un reticolo di 1024 colonne e 768 righe, la rappresentazione di un'immagine in bianco e nero con 256 livelli di grigio richiede  $8 \times 1024 \times 768 = 6\,291\,456$  bit.

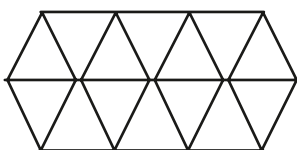
### Caratteristiche dei pixel

In realtà un pixel non rappresenta un punto dell'immagine, ma piuttosto una piccola regione rettangolare coincidente con una cella della griglia: il valore associato al pixel rappresenta pertanto l'intensità media del colore della cella.

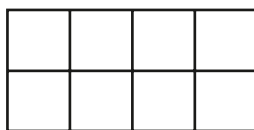
La dimensione dei pixel, insieme al loro numero, determina la qualità dell'immagine: con pixel di grande dimensione, non solo la risoluzione spaziale è scadente, ma appaiono ben visibili le discontinuità di grigio al confine tra di essi.

Man mano che la dimensione dei pixel si riduce, l'effetto diventa meno visibile, fino a quando l'immagine appare continua: è da osservare che in questa situazione la dimensione dei pixel è più piccola della risoluzione spaziale del sistema visivo umano. Poiché quest'ultima dipende dalla distanza a cui si trova l'osservatore e altre condizioni di osservazione, in generale non è definibile a priori il numero di pixel necessari a garantire una buona qualità dell'immagine, ma si può affermare che la dimensione dei pixel deve essere piccola in relazione alla scala degli oggetti rappresentati nell'immagine.

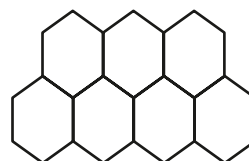
È infine importante ricordare che, oltre alla forma rettangolare, sono possibili anche altre forme dei pixel, le più importanti delle quali sono quella triangolare, quadrata e esagonale [fig. A2.5].



a)



b)



c)

**Figura A2.5**

- a) Pixel triangolari;
- b) pixel quadrati;
- c) pixel esagonali.

Il pixel, anche se definito come il più piccolo elemento dell'immagine, è a sua volta formato da tre componenti, dette **subpixel** o **sottopixel**: una rossa, una verde e una blu.

I colori dei tre subpixel determinano il colore del pixel, creando l'illusione ottica di un pixel avente un unico colore e non di tre colori distinti.

Il colore di ciascun pixel è individuato da tre numeri, ciascuno dei quali identifica il colore di un subpixel: il bianco, per esempio, è dato dalla presenza dei tre colori alla massima intensità.

Ogni pixel è caratterizzato dalla posizione sul monitor, dal colore e dall'intensità del colore stesso.

## A2.6 Compressione dei dati

Comprimere un'informazione digitale significa ridurre il numero di bit a essa associati eliminando le "ridondanze", cioè i bit relativi a informazioni non indispensabili o esprimibili in forma più sintetica: è la stessa metodologia che si adotta quando studiando un libro si sottolineano le informazioni più importanti e si trascurano quelle ridondanti.

Per comprendere l'importanza della compressione si pensi al segnale televisivo digitale: se esso venisse trasmesso senza essere sottoposto a compressione, occuperebbe una banda molto più larga di quella del corrispondente segnale analogico e ciò renderebbe impronibile la televisione digitale.

In generale, ogni metodo di compressione utilizza un algoritmo che dipende dal tipo e dalle caratteristiche dei dati da comprimere: per esempio, non si può comprimere nello stesso modo un'immagine e un file audio o video.

Naturalmente, per ricostruire i dati originali è necessario effettuare l'operazione inversa alla compressione, decomprimendo i dati con un algoritmo complementare a quello di compressione.

Le tecniche di compressione possono essere divise in due grandi categorie: **lossless** e **lossy**.

Nel primo caso (compressione lossless) dall'informazione compressa è possibile ricostruire esattamente l'informazione originale (cioè il messaggio della sorgente) e pertanto il processo è reversibile; nel secondo caso (compressione lossy), invece, il processo è irreversibile, cioè dall'informazione compressa non è più possibile ricostruire esattamente quella originale, ma soltanto approssimata. Esempi tipici di compressione lossless sono costituiti dai formati Zip, Gzip, Bzip2, Rar, 7z, generalmente impiegati per testi o programmi per i quali non è accettabile nessuna perdita di informazione. Con le tecniche lossy si ottengono compressio-

ni molto spinte a scapito dell'integrità dei file: in questo caso il file originale (prima della compressione) e quello ottenuto dopo la decompressione sono simili ma non identici, senza però perdere informazioni "irrinunciabili".

Ciò è possibile poiché le compressioni lossy, in generale, tendono a scartare le informazioni ridondanti che sono poco rilevanti: per esempio, comprimendo un brano audio con la codifica dell'MP3, vengono scartati i suoni non udibili o che incidono marginalmente sulla qualità audio, consentendo così di ridurre le dimensioni dei file senza compromettere in modo sostanziale la qualità dell'informazione.

Le compressioni lossless sono ampiamente utilizzate in molti settori dell'elettronica: per esempio su Internet, nell'ambito dello streaming dei media e nella videotelefonata, per la compressione di immagini o altri oggetti multimediali.

Qualunque sia il tipo di tecnica adottato (lossy o lossless), per ciascuna applicazione il processo di compressione deve comunque soddisfare i seguenti requisiti:

- la quantità di dati ridotta deve essere inferiore o uguale alla massima quantità di dati supportabile dall'applicazione;
- deve essere garantita una qualità delle informazioni decomprese accettabile.

## A2.7 Codifica di linea

Una volta che le informazioni sono state codificate con le tecniche viste nei paragrafi precedenti, occorre trasformare i corrispondenti bit in impulsi elettrici, idonei a essere trattati dai sistemi di elaborazione.

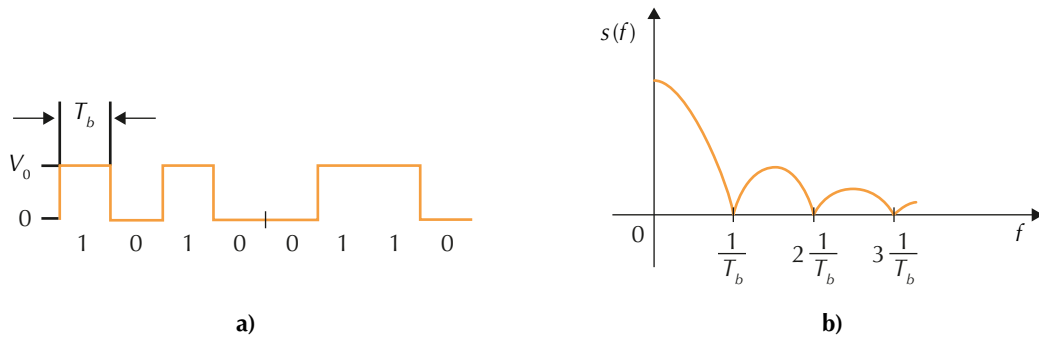
L'operazione che consente tale trasformazione è detta **codifica di linea**.

Si tratta di un'operazione che associa agli stati 0 e 1 due valori di tensione, come per esempio  $V = 0$  per lo stato logico 0 e  $V = V_0$  per lo stato logico 1.

I codici impiegati nella codifica di linea possono essere classificati nei seguenti due gruppi fondamentali:

- **NRZ (NonReturn to Zero);**
- **RZ (Return to Zero).**

Nella **figura A2.6a** è indicata una possibile configurazione di codice NRZ, nella quale  $T_b$  rappresenta la durata dell'impulso corrispondente a uno stato logico.



**Figura A2.6**  
a) Codifica NRZ;  
b) spettro del codice NRZ.

Si può osservare che nel caso di due o più stati logici uguali consecutivi il segnale elettrico rimane allo stesso valore di tensione: è da questa caratteristica che deriva la denominazione NRZ.

Lo spettro [fig. A2.6b] è costituito da un lobo principale, che partendo dalla frequenza zero (contiene quindi una componente continua), si annulla in corrispondenza di  $1/T_b$ , e da una serie di lobi secondari che si annullano in corrispondenza di multipli interi di  $1/T_b$ .

Il codice RZ si ottiene riducendo a metà la durata dell'impulso corrispondente allo stato logico "1", come mostrato nella figura A2.7a.

Lo spettro che ne risulta è indicato nella figura A2.7b, dalla quale si può osservare che è costituito da un lobo principale che si estende dalla componente continua sino a  $2/T_b$  (dove si annulla) e una serie di lobi secondari che si annullano in corrispondenza di multipli pari di  $1/T_b$ ; lo spettro, pertanto, occupa una banda superiore rispetto al codice NRZ (nella codifica NRZ il lobo principale si estende da 0 a  $1/T_b$ , mentre in quella RZ da 0 a  $2/T_b$ ).

### A2.8 Vantaggi dei segnali digitali

Le più importanti motivazioni che hanno portato a un graduale passaggio dalle tecniche analogiche a quelle digitali sono le seguenti:

1. migliore protezione dal rumore;
2. possibilità di integrare in un unico sistema di trasmissione l'invio di informazioni di diversa natura (audio, video, dati);
3. maggiore efficienza e flessibilità dei sistemi;
4. possibilità di elaborazione del segnale in tempo reale;
5. facilità di memorizzazione;
6. minor costo dei sistemi;

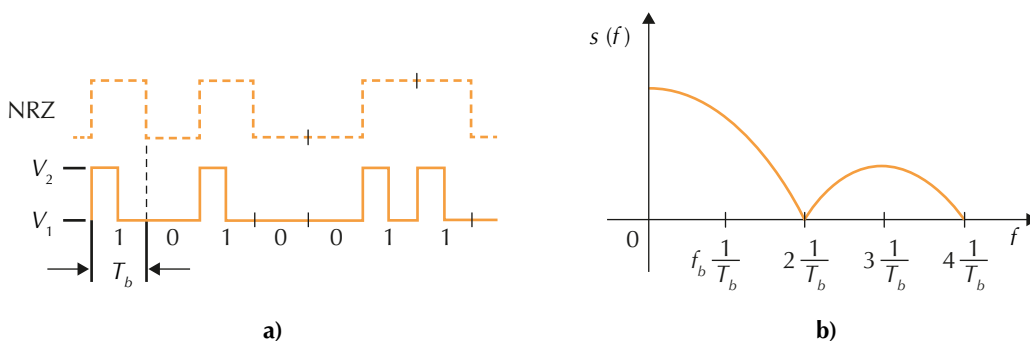
#### Miglior comportamento nei confronti del rumore

Si supponga di trasmettere un segnale da un trasmettitore A a un ricevitore B.

Rumore e disturbi, per quanto possano essere limitati, sono sempre presenti, sia nel trasmettitore che nel ricevitore, ma soprattutto lungo il mezzo trasmissivo.

In una trasmissione analogica nel caso, per esempio, venga trasmessa una tensione che può assumere i valori 2V e 6V, se il rumore avesse un'intensità media pari a 1V, esso potrebbe trasformare il segnale da 2V in uno da 3V: essendo tale valore ammissibile per un sistema analogico il destinatario lo considererebbe valido.

Questo errore non si verificherebbe in un sistema digitale se i valori ammissibili fossero soltanto 2V e 6V: in tal caso infatti è sufficiente accertare se



**Figura A2.7**  
a) Codifica RZ;  
b) spettro del codice RZ.

il segnale ricevuto è inferiore o superiore a 4 V (media tra 2 e 6).

Pertanto, nelle trasmissioni digitali, poiché l'informazione è codificata utilizzando solo due livelli, se il segnale ricevuto non è eccessivamente alterato è possibile estrarre l'informazione originaria con una semplice operazione di confronto con un valore di soglia.

In altre parole in un sistema digitale, fino a quando i due livelli di segnale vengono riconosciuti il rumore non ha influenza sulla qualità della trasmissione.

Da tale esempio si deduce la peculiarità delle trasmissioni digitali: l'informazione è contenuta in una combinazione di codice ben precisa e quindi il contenuto informativo del segnale resta invariato sino a quando tale combinazione è riconoscibile; pertanto, se il riconoscimento è effettuato in maniera corretta negli impulsi ricostruiti non rimane traccia di alcuna degradazione.

È importante osservare che il ricevitore non deve ricostruire l'esatta forma d'onda del segnale trasmesso, come accade nella trasmissione analogica, ma soltanto riconoscere il codice binario, rilevando il segnale ricevuto in precisi intervalli temporali per poterlo confrontare con una soglia di riferimento: se tale soglia viene superata è rilevato uno stato (per esempio il bit 1), in caso contrario l'altro stato.

Si può quindi affermare che: **a parità di rapporto tra l'intensità del segnale e quella del rumore, un segnale digitale è meno suscettibile a errori di un segnale analogico.**

Tuttavia, ciò non significa che nei sistemi numerici non siano possibili errori di trasmissione.

Il corretto riconoscimento degli impulsi, infatti, dipende dalla degradazione introdotta sul segnale durante la trasmissione: se questa supera determinati limiti, la probabilità di errore aumenta notevolmente.

La natura digitale del segnale consente però di "fare cose" che non sarebbero possibili con un segnale analogico.

Infatti, un segnale analogico può essere soltanto amplificato e su di esso non possono essere effettuate operazioni di correzione delle alterazioni prodotte sulla sua forma d'onda nel corso della trasmissione, in quanto il ricevitore non conosce le caratteristiche del segnale originario e quindi non può individuarne le differenze.

Al contrario, il segnale digitale rappresenta una sequenza binaria che può essere ricostruita mediante un'operazione di soglia e grazie all'utilizzo di opportune codifiche, è possibile rilevare e correggere eventuali errori di trasmissione.

In sostanza, il miglior comportamento nei confronti del rumore è dovuto almeno a tre fattori:

1. i segnali digitali consentono una buona ricezione anche con valori del rapporto segnale rumore relativamente bassi (che rendono inintelligibili i segnali analogici);
2. nelle trasmissioni digitali su lunga distanza non si accumula l'effetto del rumore raccolto nelle varie tratte del collegamento, poiché il segnale viene completamente rigenerato al termine di ogni tratta;
3. grazie alla relativa facilità con cui possono essere elaborati i segnali digitali, è possibile realizzare circuiti e algoritmi per la rivelazione e la correzione degli errori, ai fini di migliorare l'affidabilità della comunicazione.

Uno dei più semplici sistemi di rilevazione degli errori è il **controllo di parità** (introdotto nel paragrafo A2.3), che prevede l'aggiunta a ciascun carattere di un bit il cui valore (0 o 1) dipende dal numero dei bit 1 in esso contenuti: se il carattere contiene un numero pari di bit 1, il bit ridondante è 0, mentre se contiene un numero dispari di bit 1, il bit ridondante vale 1: così facendo tutti i caratteri contengono un numero pari di bit 1.

Pertanto, se in ricezione il carattere contiene un numero dispari di bit 1 è sicuramente errato, mentre se il numero dei bit 1 è pari la probabilità che sia corretto è molto elevata.

In conclusione possiamo dire che i segnali digitali, rispetto a quelli analogici, forniscono prestazioni migliori per quanto riguarda il comportamento nei confronti del rumore.

### Integrazione dei sistemi di trasmissione

Dal momento che tutti i segnali analogici possono essere convertiti in segnali digitali, è possibile trasmettere con un unico apparato trasmissivo una grande varietà di informazioni, provenienti da fonti diverse. Una volta digitalizzate, infatti, le varie informazioni (audio, video, dati, testo) possono essere mescolate in un unico e uniforme flusso di bit, pronto per essere trasmesso (ovviamente affinché in ricezione le varie informazioni siano riconoscibili, prima di trasmetterle occorre contrassegnarle con appositi bit di riconoscimento). Un unico apparato può quindi trasmettere una grande varietà di informazioni e non è più necessaria la realizzazione di specifici sistemi di trasmissione per ciascuna di esse (per esempio, fonia e dati).



### **Maggiore efficienza e flessibilità dei sistemi**

I sistemi digitali sono gestiti da adeguati software, per cui è possibile ottenere una elevata flessibilità ed efficienza, sia in termini di servizi offerti agli utenti, sia in termini di evoluzione delle prestazioni del sistema, che in genere sono implementate mediante adeguamenti (upgrade) software.

Con un semplice aggiornamento del software è quindi possibile rendere disponibili nuovi servizi, magari non previsti al momento del progetto iniziale.

Si pensi ai problemi di compatibilità che dovevano essere affrontati a ogni evoluzione dei sistemi analogici (per esempio, nel passaggio dal segnale audio mono a quello stereofonico, e nel passaggio dal segnale video in bianco e nero a quello a colori).

### **Facilità di elaborazione in tempo reale dei segnali digitali**

Mentre l'elaborazione dei segnali analogici è generalmente limitata alle operazioni di amplificazione, modulazione e filtraggio, l'elaborazione dei segnali digitali consente di effettuare operazioni, come per esempio la correzione degli errori, di trasmissione con relativa semplicità.

### **Compressione**

Mediante una elaborazione digitale è possibile ridurre la quantità di dati trasmessi comprimendo opportunamente il segnale ed evitando di ripetere l'invio delle informazioni superflue (riduzione della ridondanza).

Il segnale video, per esempio, richiede la trasmissione di un'elevata quantità di dati, che può esse-

re notevolmente ridotta considerando che spesso solo una parte dell'immagine è in movimento: si può quindi evitare di trasmettere dati relativi alle parti che non variano da un fotogramma all'altro.

### **Crittografia**

Un'ulteriore considerazione riguarda la segretezza dell'informazione trasmessa, problema di non semplice soluzione nel caso della trasmissione analogica.

In un sistema digitale, essendo l'informazione codificata, è quindi possibile adottare forme di crittografia per rendere incomprensibili le informazioni a persone non autorizzate.

### **Semplice memorizzazione**

Un segnale digitale può essere memorizzato in modo molto più semplice di quanto non possa avvenire per un segnale analogico.

La realizzazione di dispositivi di memoria in grado di conservare grosse quantità di dati non è infatti particolarmente complessa, in quanto gli stati dei segnali sono soltanto due (0 e 1).

La continua evoluzione della tecnologia dei semiconduttori ha inoltre consentito velocità di lavoro delle memorie sempre più elevati.

### **Convenienza economica dei sistemi digitali**

I circuiti digitali sono più facilmente integrabili dei circuiti analogici, ovvero possono essere miniaturizzati e realizzati un unico chip: ciò comporta una considerevole riduzione dei costi di produzione (e di dimensioni) delle apparecchiature digitali.

# ESERCITAZIONI

.....  
[A1] Fornisci una definizione generale di segnale.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

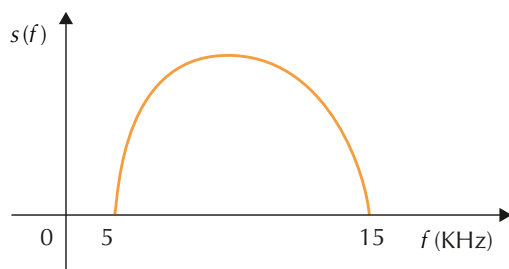
.....  
[A2] Che cos'è la forma d'onda di un segnale?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A3] Data la funzione  $v(t) = 5t + 10$ , quanto vale il valore che essa assume nell'istante  $t = 6$  s?

.....  
.....

.....  
[A4] Nella figura seguente è riportato lo spettro di un segnale. Quanto vale la sua banda?



.....  
.....

.....  
[A5] Fornisci una definizione di segnale determinato e successivamente di segnale aleatorio.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

[A6] Un segnale è discreto se:

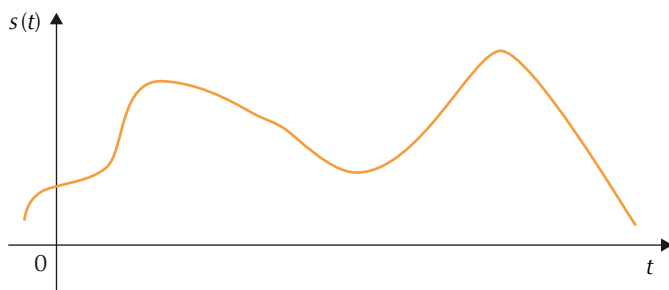
.....

.....

.....

.....

[A7] Il seguente segnale è continuo, discreto o discontinuo? Perché?



.....

.....

.....

.....

.....

[A8] Disegna un esempio di segnale discreto.

[A9] Quando un segnale è detto periodico?

.....

.....

.....

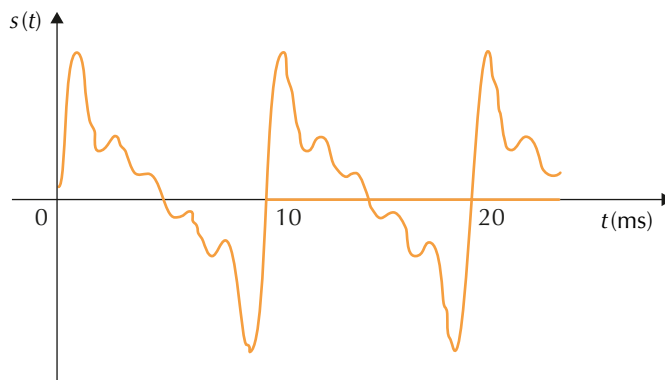
.....

.....

.....  
[A10] Che cosa rappresenta il valore medio di un segnale?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A11] Determina la frequenza del seguente segnale periodico:



.....  
[A12] Fai un esempio di segnale causale.

.....  
[A13] Un segnale è alternativo quando:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A14] Considerata la tensione sinusoidale:

$$v(t) = 15\text{sen}(628t + 0,9) \quad (\text{V})$$

determina:

- il valore massimo;
- la frequenza;
- la fase iniziale;
- il valore che assume nell'istante  $t = 1$  s.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A15] Il segnale a gradino è causale? Perché?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A16] Che cosa afferma il teorema di Fourier?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A17] Che cos'è il bit?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

# ESERCITAZIONI

.....  
[A18] Con 8 bit quanti caratteri si possono codificare?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A19] Descrivi brevemente il codice ASCII.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A20] Descrivi brevemente la conversione analogico-digitale.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A21] Qual è lo scopo della compressione dati?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A22] Qual è la differenza tra i codici RZ e NRZ?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[A23] Elenca il principio di vantaggio dei segnali digitali rispetto a quelli analogici.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....





# MODULO B

## Sistemi

### Unità B1: Richiami di teoria dei sistemi

- B1.1 Definizione di sistema
- B1.2 Esempi di sistemi
- B1.3 Sottosistemi
- B1.4 Ingressi, uscite e stato interno
- B1.5 Rappresentazione dei sistemi
- B1.6 Analisi dei sistemi
- B1.7 Controllo di processo
- B1.8 Sistemi a catena aperta e chiusa
- B1.9 Classificazione dei sistemi

### Unità B2: Sistemi di acquisizione dati

- B2.1 Misurazione delle grandezze fisiche
- B2.2 Misure dirette e misure indirette
- B2.3 Valore vero di una grandezza fisica
- B2.4 Errore assoluto ed errore relativo
- B2.5 Struttura di un sistema di acquisizione dati

### Obiettivi

- Conoscere il concetto di sistema
- Saper rappresentare un sistema
- Saper classificare i sistemi in base alle loro caratteristiche
- Conoscere le caratteristiche salienti dei sistemi
- Saper distinguere un sistema a catena aperta da un sistema a catena chiusa
- Conoscere il concetto di misura
- Conoscere la struttura di un sistema di acquisizione dati

# unità B1

## CONTENUTI

- B1.1 Definizione di sistema
- B1.2 Esempi di sistemi
- B1.3 Sottosistemi
- B1.4 Ingressi, uscite e stato interno
- B1.5 Rappresentazione dei sistemi
- B1.6 Analisi dei sistemi
- B1.7 Controllo di processo
- B1.8 Sistemi a catena aperta e chiusa
- B1.9 Classificazione dei sistemi



### Sistemi a catena chiusa digitale

# RICHIAMI DI TEORIA DEI SISTEMI

## B1.1 Definizione di sistema

L'osservazione quotidiana degli oggetti che ci circondano consente di definire intuitivamente quelli che costituiscono un **sistema** da quelli che non lo formano.

Tutti conosciamo la differenza tra un sacco di grano e un aeroplano: aggiungendo o togliendo un chicco di grano al sacco in pratica non cambia nulla, ma aggiungendo o togliendo un elemento all'aeroplano (per esempio, si aggiunge un'ancora pesantissima o si toglie l'elica), le cose cambiano radicalmente, in quanto l'aeroplano non è semplicemente costituito da un insieme di elementi, come il sacco di grano; esso, infatti, è formato da oggetti che interagiscono tra di loro in modo da farlo funzionare come se fosse un'unica entità.

Si può quindi affermare che un aeroplano è un sistema, mentre un sacco di grano è semplicemente un insieme di elementi (chicchi).

Una prima definizione di sistema è quindi la seguente: *un insieme di elementi che interagiscono tra di loro per funzionare come un elemento unico.*

Una definizione più rigorosa, ma sostanzialmente equivalente, è la seguente: *un insieme di elementi distinti, in relazione fra loro secondo leggi ben precise, che concorrono al raggiungimento di un obiettivo comune.*

I sistemi possono essere suddivisi in più elementi, ciascuno avente una propria struttura, che possono a loro volta essere considerati sistemi; un sistema, pertanto può essere visto come un macrosistema, suddiviso in tanti sottosistemi, aventi struttura più o meno complessa.

Un sistema può essere definito tale quando sono noti:

- gli **obiettivi** da raggiungere;
- le **parti** (o **elementi**) che lo compongono;

- le **interazioni** col mondo esterno, espresse in termini di **ingressi** e **uscite**;
- le **relazioni** che descrivono i rapporti tra i vari componenti.

## B1.2 Esempi di sistemi

Considerando l'esempio dell'aeroplano, è semplice identificare tutti gli elementi che caratterizzano un sistema; infatti:

- l'obiettivo è lo spostamento su lunghe distanze in tempi ragionevolmente brevi;
- le parti sono costituite dai vari componenti meccanici, elettrici ed elettronici (il motore, il telaio, il carrello, la plancia dei comandi e altre);
- le interazioni in ingresso sono il carburante e le persone da trasportare, in uscita l'energia (termica e meccanica) e le persone trasportate;
- le relazioni sono le attività svolte dai vari componenti che consentono all'aeroplano di alzarsi in volo, volare, virare e atterrare.

Anche il **corpo umano** può essere considerato un sistema; infatti:

- l'obiettivo è la sopravvivenza dell'uomo;
- le parti sono costituite dai vari apparati, come il sistema circolatorio, respiratorio, nervoso, muscolare;
- le interazioni in ingresso sono, per esempio, il cibo ingerito, l'aria respirata, in uscita i movimenti in generale, la sudorazione;
- le relazioni consistono nella sincronizzazione delle funzioni svolte dai vari apparati che consentono la sopravvivenza dell'essere umano.

Come ultimo sistema consideriamo il **computer**; in tal caso:

- l'obiettivo è l'elaborazione dei dati;
- le parti sono i vari componenti meccanici, elettrici ed elettronici, come il microprocessore e le memorie;
- le interazioni in ingresso sono i dati e i programmi inseriti dall'utente, in uscita i dati elaborati;
- le relazioni sono le funzioni svolte dai vari componenti che consentono al computer di elaborare dati, visualizzare immagini, stampare documenti.

## B1.3 Sottosistemi

Nel caso le parti che costituiscono un sistema siano a loro volta altri sistemi, esse sono dette sottosistemi.

Ogni sottosistema, pur essendo considerato a tutti gli effetti un sistema, concorre al raggiungimento dell'obiettivo del sistema principale di cui fa parte. Per esempio, per il sistema corpo umano è possibile individuare il sottosistema cuore, il sottosistema fegato, il sottosistema cervello e così via.

Essendo un sottosistema ancora un sistema a tutti gli effetti, per esso è possibile identificare tutti gli elementi che lo caratterizzano; per il sottosistema cuore, per esempio, si ha:

- l'obiettivo è il richiamo del sangue venoso e l'invio di quello arterioso ossigenato;
- le parti sono costituite dai ventricoli destro e sinistro e dalle valvole;
- le interazioni in ingresso sono rappresentate dal sangue venoso proveniente da tutte le parti periferiche del corpo e in uscita dal sangue arterioso ossigenato verso tutte le parti periferiche;
- le relazioni consistono nella sincronizzazione dei sottosistemi (per esempio, l'apertura e chiusura delle valvole) che consentono un costante richiamo e pompaggio del sangue.

## B1.4 Ingressi, uscite e stato interno

Oltre agli ingressi e alle uscite, descritte mediante opportune variabili, esiste un'altra grandezza fondamentale che caratterizza un sistema: lo **stato interno**.

Esso rappresenta le proprietà intrinseche del sistema, ovvero le informazioni necessarie e sufficienti per descriverne le condizioni in cui si trova in un determinato istante.

Nell'esempio del cuore, lo stato interno è costituito dalle sue caratteristiche fisiche, come per esempio, il volume e la pressione sanguigna; per il sistema aeroplano, dall'insieme dei valori che rappresentano i litri di carburante nei serbatoi, il numero di giri del motore, il livello dell'olio.

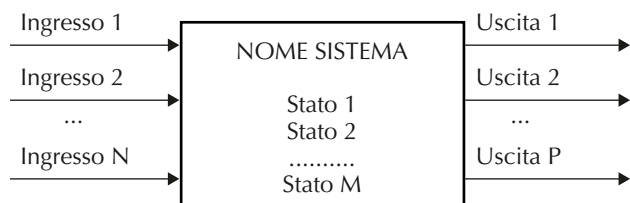
Leggere i valori dello stato di un sistema in un determinato istante equivale a farne una fotografia, ovvero "vedere" la situazione in quell'istante.

I valori degli ingressi, delle uscite e quelli assunti dallo stato interno di un sistema, vengono memorizzati in apposite variabili che prendono il nome di **variabili di ingresso, di uscita** e di **stato**.

## B1.5 Rappresentazione dei sistemi

La rappresentazione di un sistema è realizzata efficacemente tramite un diagramma a blocchi che utilizza il simbolismo grafico composto dai seguenti elementi [fig. B1.1]:

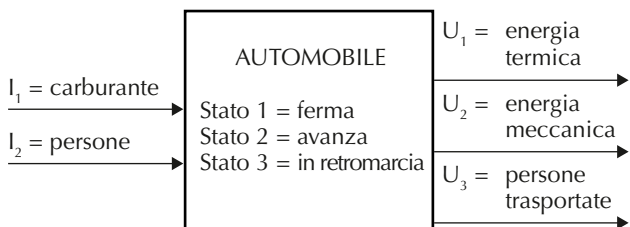
- un rettangolo col nome del sistema;
- gli ingressi, rappresentati da frecce che entrano nel rettangolo;
- le uscite, rappresentate da frecce che escono dal rettangolo;
- lo stato, rappresentato all'interno del rettangolo.



**Figura B1.1** Rappresentazione di un sistema tramite schema a blocchi.

### ESEMPIO

Il sistema automobile può essere rappresentato con il diagramma a blocchi mostrato nella **figura B1.2**:



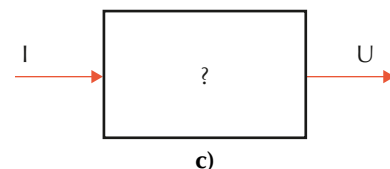
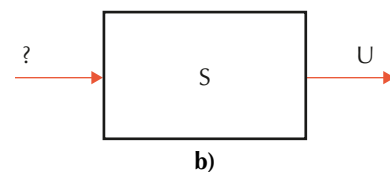
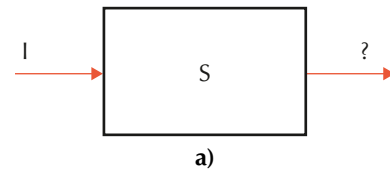
**Figura B1.2** Rappresentazione tramite schema a blocchi del sistema automobile.

## B1.6 Analisi dei sistemi

In generale un sistema viene analizzato per gestire le seguenti tipologie di problematiche.

- **Problema della previsione:** noti l'ingresso  $I$  (variabili di ingresso) e lo stato  $S$  del sistema (variabili di stato) si vuole determinare l'uscita  $U$  (variabili di uscita) [fig. B1.3a].

- **Problema del controllo:** noti l'uscita  $U$  e lo stato  $S$ , si vuole conoscere l'ingresso  $I$ ; cioè si vuole determinare quale ingresso deve essere applicato per ottenere una determinata uscita [fig. B1.3b].
- **Problema dell'identificazione:** noti l'ingresso  $I$  e l'uscita  $U$ , si vuole conoscere lo stato  $S$  [fig. B1.3c].



**Figura B1.3** I tre problemi di analisi di un sistema.

Nei primi due casi si conosce il comportamento del sistema e quindi la relazione ingresso-uscita, nel terzo si deve definire il comportamento del sistema.

### ESEMPLI

1. Consideriamo come esempio di sistema una **caffettiera**, caratterizzata dai seguenti elementi:

- serbatoio per l'acqua;
- filtro;
- guarnizione di tenuta del vapore;
- recipiente superiore per il caffè;
- impugnatura.

**Ingressi:**  $\{I_1, I_2, I_3\}$

$I_1 = \text{acqua}$

$I_2 = \text{caffè}$

$I_3 = \text{energia termica}$

**Uscite:**  $\{U_1, U_2\}$

$U_1 = \text{caffè}$

$U_2 = \text{vapore}$

**Stati:**  $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$

$S_1 =$  vuota

$S_2 =$  pronta per l'uso

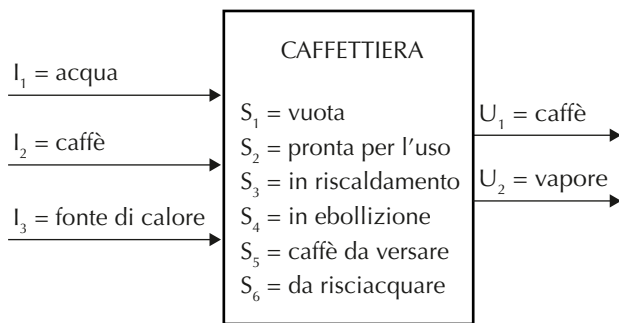
$S_3 =$  in riscaldamento

$S_4 =$  in ebollizione

$S_5 =$  caffè da versare

$S_6 =$  da risciacquare.

Il diagramma a blocchi che rappresenta il sistema caffettiera è pertanto del tipo indicato in **figura B1.4**.



**Figura B1.4** Rappresentazione del sistema caffettiera.

2. Consideriamo ora l'esempio di un **sistema di irrigazione** per giardini, che fornisce l'acqua tramite irrigatori a scomparsa nella quantità definita dall'utente; gli elementi che compongono il sistema sono:

- ingresso dell'acqua;
- pompa per aumentare la pressione dell'acqua;
- centralina elettronica di comando;
- valvola di apertura e chiusura flusso acqua;
- tubazioni di collegamento degli irrigatori;
- irrigatori.

L'acqua dalla tubazione principale entra nella pompa e, per mezzo di una valvola, è inviata agli irrigatori tramite tubazioni secondarie.

In base alle impostazioni programmate sulla centralina da parte dell'utente, è possibile aprire la valvola a intervalli e per tempi definiti, in funzione del grado di umidità che si vuole avere nel terreno.

**Ingressi:**  $\{I_1, I_2\}$

$I_1 =$  acqua

$I_2 =$  impostazioni centralina

**Uscite:**  $\{U_1\}$

$U_1 =$  umidità del terreno

**Stati:**  $\{S_1, S_2, S_3\}$

$S_1 =$  spento

$S_2 =$  in azione

$S_3 =$  in pausa

Il diagramma a blocchi che ne deriva è pertanto del tipo indicato in **figura B1.5**.



**Figura B1.5** Rappresentazione del sistema di irrigazione.

## B1.7 Controllo di processo

Consideriamo il sistema di riscaldamento di un appartamento che ha il termostato regolato a 22 °C: quando la temperatura ambiente supera 23 °C (1 °C sopra la temperatura prestabilita), la caldaia si spegne automaticamente, riaccendendosi se scende a 21 °C (1 °C sotto la temperatura prestabilita). Se la temperatura rilevata all'interno dell'appartamento è contenuta in questo intervallo (2 °C), la caldaia resta accesa.

Ciò si può implementare mediante una apposita procedura che consente di agire sul sistema caldaia, pilotandone automaticamente l'accensione e lo spegnimento, realizzando così un **controllo di processo**.

Per controllo di un processo si intende l'insieme delle azioni che consentono di governare il funzionamento del sistema, in modo da raggiungere l'obiettivo anche in presenza di disturbi esterni.

In altre parole, la procedura deve garantire valori di uscita che consentono di mantenere una relazione tra ingressi e risposte, anche se nel sistema intervengono disturbi esterni o fattori di deterioramento.

Le tipologie di controllo che si possono adottare sono fondamentalmente due:

- sistemi a **catena aperta**;
- sistemi a **catena chiusa**.

I sistemi a catena chiusa (cioè quelli con retroazione) consentono di tenere sotto controllo l'evoluzione del sistema in modo più affidabile e con un maggior margine di precisione.

## B1.8 Sistemi a catena aperta e chiusa

Nell'esempio di irrigazione visto precedentemente, gli elementi del sistema possono essere collegati tra di loro formando una catena aven-

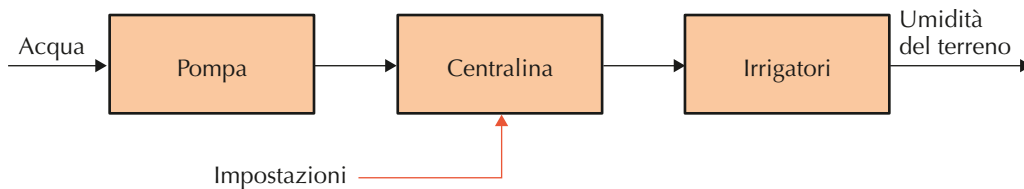


Figura B1.6 Sistema in catena aperta.

te una direzione definita delle loro azioni, come mostrato in **figura B1.6**.

Tale catena è detta **aperta** poiché è caratterizzata da un inizio e una fine; all'inizio della catena è presente l'ingresso del sistema (acqua), alla fine l'umidità del terreno.

In un sistema come questo però, se l'uscita non è quella desiderata, per una serie di motivi (*disturbi*) come per esempio il caldo eccessivo e il vento forte, il sistema non individua l'errore e quindi non si possono effettuare azioni correttive: in tal caso i risultati attesi possono essere garantiti soltanto se si effettuano corrette impostazioni iniziali e si ha la totale assenza di disturbi esterni.

Simili sistemi trovano impiego quando il funzionamento è abbastanza prevedibile, o la precisione dei valori in uscita non è molto importante.

Per superare questo inconveniente, è necessario controllare i valori dell'uscita in modo da modificare opportunamente l'ingresso del sistema, ricorrendo cioè a una **catena chiusa**.

Se il sistema di irrigazione, infatti, è dotato di **trasduttore di umidità** posizionato nel terreno, è possibile conoscere istante per istante il valore dell'umidità e utilizzare tale informazione per modificare le impostazioni della centralina, come per esempio aprire la valvola per un tempo più o meno lungo al fine di mantenere l'umidità a un livello costante.

Lo schema del sistema diventa allora del tipo indicato in **figura B1.7**.

Si può osservare che il trasduttore comunica il valore dell'umidità alla centralina, che viene confrontato con quello impostato dall'utente, rendendo così possibile la regolazione del tempo di

irrigazione in funzione dei risultati ottenuti dal confronto.

Il ramo di ritorno che collega l'uscita alla centralina è detto ramo di **retroazione** o di **feed-back** e il sistema così ottenuto è denominato **retroazionato**, di cui nella **figura B1.8** è riportato uno schema di principio.

Nello schema della **figura B1.8** si possono distinguere i seguenti blocchi funzionali:

- **riferimento**  $r(t)$ : segnale che corrisponde all'uscita che si vuole ottenere dal sistema;
- **comparatore**: sottosistema che confronta il segnale di riferimento con quello di uscita del sistema, restituendo un valore  $e(t)$ , detto **errore**, che misura quanto l'uscita si discosta dal valore di riferimento;
- **controllore**: sottosistema che in base all'errore  $e(t)$  elabora un segnale  $\gamma(t)$  che costituisce l'ingresso del sistema da controllare;
- **attuatore**: sottosistema che trasforma il segnale  $\gamma(t)$ , previa amplificazione, in un opportuno segnale  $i(t)$ , da applicare al sistema (in genere le sollecitazioni generate dagli attuatori sono azioni di tipo meccanico); esempi di attuatori sono gli elettromagneti, che convertono un segnale elettrico in una traslazione o in una rotazione di un nucleo ferromagnetico e i relè;
- **sistema**: blocco da controllare, la cui grandezza di uscita  $u(t)$  deve essere trasformata in un segnale  $x(t)$  compatibile con quello applicato all'ingresso del comparatore (riferimento);
- **trasduttore**: sottosistema che trasforma la

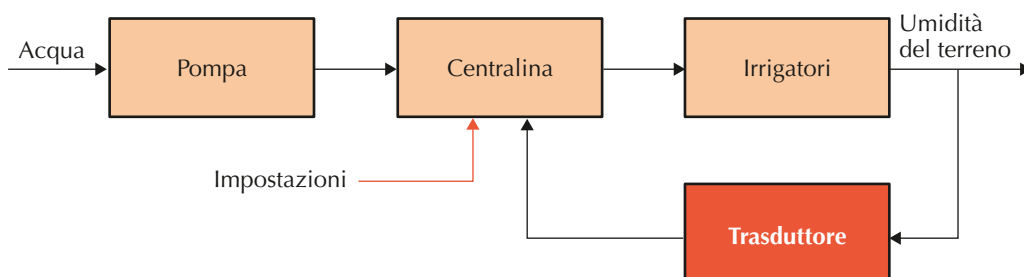
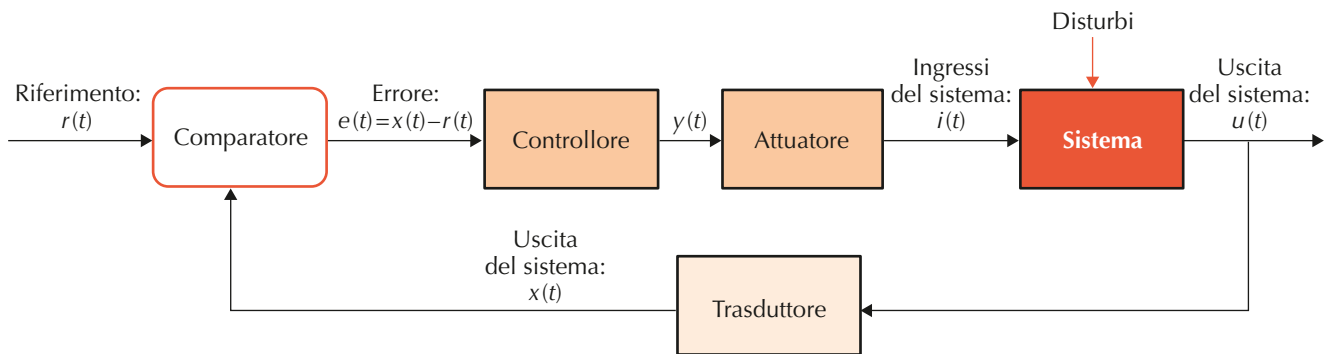


Figura B1.7 Sistema irrigatore a catena chiusa.

**Figura B1.8** Sistema generale a catena chiusa.

grandezza d'uscita nel segnale  $x(t)$  che il comparatore confronta con il segnale di riferimento  $r(t)$  per valutare gli opportuni interventi di correzione; in generale i trasduttori sono di-

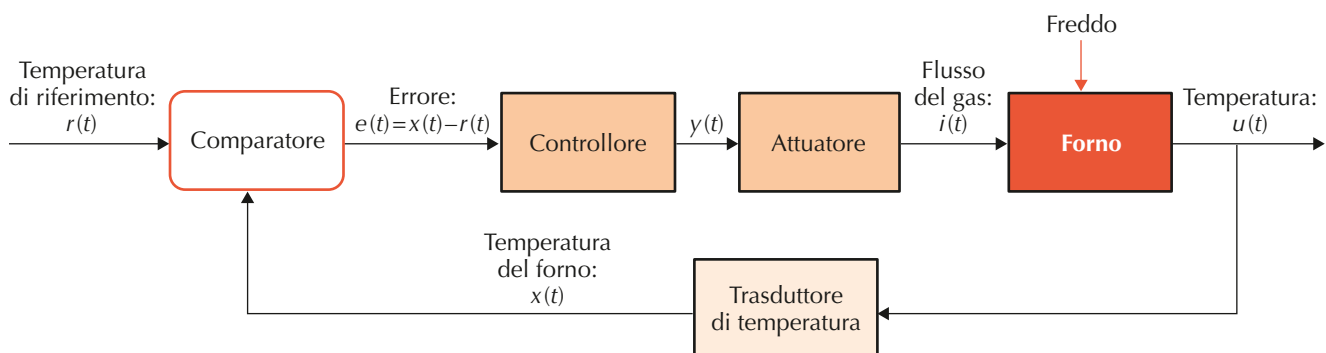
spositivi capaci di convertire grandezze, di solito fisiche, in altrettante di tipo elettrico;

- **disturbi:** fenomeni indesiderati che alterano il corretto funzionamento del sistema.

## ESEMPI

1. Un tipico esempio di sistema retroazionato è il forno a gas nel quale la temperatura viene raggiunta e mantenuta modulando la fiamma di un bruciatore mediante l'aumento o la diminuzione dell'apertura della valvola che regola il gas. All'inizio la valvola è completamente aperta e pertanto la

temperatura (l'uscita) tende ad aumentare. Quando il valore si avvicina a quello prestabilito (temperatura di riferimento), l'errore tende a diminuire così come il flusso del gas, ottenendo il corretto mantenimento della temperatura di esercizio [fig. B1.9].

**Figura B1.9** Sistema forno in catena chiusa.

Si possono distinguere i seguenti blocchi funzionali:

- **riferimento:** temperatura che si vuole mantenere costante;
- **comparatore:** confronta la temperatura di riferimento con quella in uscita dal trasduttore;
- **controllore:** in base all'errore  $e(t)$  (che deve tendere a zero) fornisce un valore  $y(t)$  che corrisponde all'ingresso dell'attuatore;
- **attuatore:** regola la portata del gas per aumentare o diminuire la temperatura;
- **sistema:** forno;
- **trasduttore:** dispositivo che converte la grandezza fisica temperatura in una grandezza elettrica necessaria al comparatore;

- **disturbi:** fattori ambientali (freddo, caldo, vento) che tendono a modificare la temperatura del forno.

2. Un altro esempio di sistema a catena chiusa è costituito dal pilota automatico, la cui funzione è quella di mantenere costante la velocità di un veicolo a un valore preimpostato [fig. B1.10].

In tal caso:

- **riferimento:** velocità che si vuole mantenere costante;
- **comparatore:** confronta la velocità effettiva misurata dal trasduttore con quella di riferimento impostata;
- **controllore:** centralina di controllo che in base all'errore

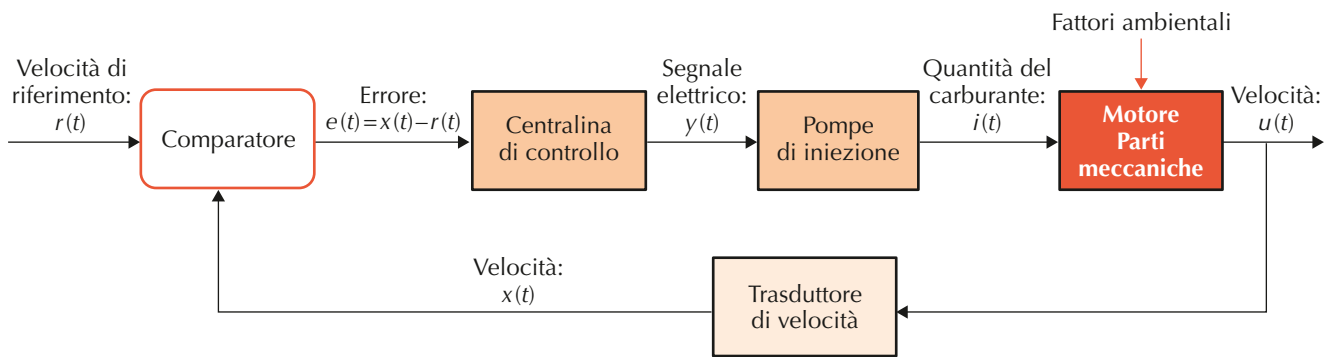


Figura B1.10 Sistema pilota automatico in catena chiusa.

$e(t)$  fornisce un valore  $y(t)$  corrispondente alla quantità di carburante da inviare agli iniettori;

- **attuatore:** pompa di iniezione che fa aumentare o diminuire il flusso di combustibile in base alla velocità;
- **sistema:** motore del veicolo e parti meccaniche che consentono il moto (ruote, differenziali, semiassi);
- **trasduttore:** dispositivo che converte la velocità del veicolo (espressa come numero di giri di una ruota) in una grandezza elettrica compatibile con il comparatore;
- **disturbi:** fattori ambientali che possono fare diminuire o aumentare la velocità del veicolo.

## B1.9 Classificazione dei sistemi

Un sistema si dice **invariante** o **stazionario** se risponde sempre allo stesso modo quando viene sollecitato dagli stessi ingressi in istanti diversi.

Viceversa, si dice invece **variante** o **deteriorabile** se risponde in modo diverso in istanti diversi quando è sollecitato con gli stessi ingressi.

Un esempio di sistema variante è un missile che viaggia nello spazio consumando combustibile solido: il suo moto cambia per effetto della diminuzione della massa nel tempo dovuta al consumo di carburante.

Un sistema distributore di lattine è invariante: esso, infatti, risponde sempre allo stesso modo.

Un sistema si dice **dinamico** quando la sua configurazione (ossia l'insieme di variabili che descrivono lo stato del sistema) varia nel tempo; si dice **statico** in caso contrario.

Un sistema si dice **deterministico** quando il valore dello stato e delle uscite è determinabile in modo univoco; viceversa, si dice **stocastico** quando il valore dello stato e delle uscite è regolato da leggi di natura probabilistica.

Per esempio, il sistema di irrigazione visto prece-

dentemente è **deterministico**: ogni volta che la centralina dà il consenso, gli irrigatori spruzzano acqua.

La luminosità di una stanza (misurata in Lumen) effettuata ogni giorno alle ore 10 del mattino, è di tipo **stocastico**, poiché dipende dalle stagioni e dalle condizioni atmosferiche che sono di tipo probabilistico.

Un sistema si dice **combinatorio** se le uscite, in un certo istante, dipendono esclusivamente dai valori presenti agli ingressi nel medesimo istante, mentre si dice **sequenziale** quando le uscite dipendono non solo dai valori degli ingressi in quell'istante, ma anche da quelli assunti precedentemente.

Come esempio di sistema combinatorio pensiamo a una semplice calcolatrice: se agli ingressi digitiamo due numeri e una operazione, il dispositivo calcolerà tale operazione (somma, differenza, moltiplicazione o altro) fornendo un'uscita il risultato che dipende unicamente dal valore degli ingressi e dalla funzione scelta.

È invece da considerarsi sequenziale il sistema distributore automatico di bibite in cui le uscite, a seguito dell'inserimento di una moneta, dipendono anche dalle monete inserite precedentemente.



# unità B2

## CONTENUTI

- B2.1** Misurazione delle grandezze fisiche
- B2.2** Misure dirette e misure indirette
- B2.3** Valore vero di una grandezza fisica
- B2.4** Errore assoluto ed errore relativo
- B2.5** Struttura di un sistema di acquisizione dati



Grandezze fisiche

# SISTEMI DI ACQUISIZIONE DATI

## B2.1 Misurazione delle grandezze fisiche

Per poter interagire con il mondo che lo circonda, l'uomo ha sempre avuto la necessità di misurare le grandezze fisiche esistenti in natura, che sono numerose e diversificate, come per esempio tempo, massa, peso, posizione, velocità, accelerazione, pressione.

Fondamentalmente misurare una grandezza fisica significa paragonarla a un'altra grandezza della sua stessa natura assunta come **unità di misura**.

Indicando allora con  $G$  la grandezza da misurare e con  $U$  l'unità di misura, per **misura** di  $G$  si intende il numero  $n$  espresso dal rapporto fra  $G$  e  $U$ , cioè:

$$n = \frac{G}{U} \quad (2.1)$$

A prima vista sembrerebbe logico definire tante unità di misura indipendenti quante sono le grandezze da misurare; ciò tuttavia può comportare difficoltà di calcolo se la grandezza in esame è espressa da una relazione nella quale compaiono più grandezze: in questo caso, infatti, per assicurare l'indipendenza reciproca delle varie unità di misura sarebbe necessario introdurre coefficienti numerici di adattamento che renderebbero più complessa la relazione.

Le unità di misura devono allora costituire un **insieme coerente**, cioè il loro numero deve essere tale da semplificare al massimo i risultati derivanti dalle relazioni dei fenomeni fisici in cui compaiono.

Allo scopo di standardizzare l'utilizzo delle unità di misura, il Comitato Internazionale di Pesi e Misure ha definito un sistema unico, denominato **Sistema Internazionale di misura** o **SI**, basato su sette unità *fondamentali* e due *supplementari*, dal-

le quali derivano tutte le altre, denominate unità *derivate*.

Le unità fondamentali e loro definizioni sono le seguenti:

- **metro (m)**: lunghezza del percorso compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di  $1/299\,792\,458$  di secondo;
- **kilogrammo (kg)**: massa del prototipo internazionale, un cilindro di platino iridio conservato a Parigi presso il BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*);
- **secondo (s)**: intervallo di tempo che contiene  $9\,192\,631\,770$  periodi della radiazione corrispondente alla transizione fra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di Cesio 133;
- **ampere (A)**: intensità di una corrente elettrica che, mantenuta costante in due conduttori rettilinei paralleli di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile e posti a una distanza reciproca di un metro nel vuoto, genera tra di essi una forza uguale a  $2 \cdot 10^{-7}$  newton per metro (N/m);
- **kelvin (K)**: frazione  $1/273,16$  della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua. Per gli usi pratici è in genere utilizzata la temperatura Celsius, la cui unità di misura, denominata grado Celsius e indicata con il simbolo [°C], è definita dalla differenza  $t = T - T_0$  dove  $T$  è la temperatura in gradi kelvin e  $T_0 = 273,15$  K;
- **mole (mol)**: quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in  $0,012$  kg di Carbonio 12; quando si usa la mole, le entità elementari devono essere specificate in quanto possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni, altre particelle o raggruppamenti di particelle;
- **candela (cd)**: intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \cdot 10^{12}$  Hz e la cui intensità energetica in quella direzione è  $1/683$  watt/steradiante.

Le unità supplementari sono le seguenti:

- **radiante (rad)**: angolo piano compreso fra due raggi che, sulla circonferenza di un cerchio, intercettano un arco di lunghezza pari a quella del raggio;
- **steradiante (sr)**: angolo solido che, avendo il vertice al centro di una sfera, delimita sulla sua superficie un'area pari a quella di un quadrato di lato uguale al raggio della sfera.

## B2.2 Misure dirette e misure indirette

Una misura si dice diretta quando si confronta la grandezza da individuare direttamente con la sua unità di misura (campione): per esempio, la determinazione di una lunghezza mediante un'asta graduata è una misura diretta.

Anche la misura mediante l'uso di strumenti preparati è diretta, poiché si basa sulla proprietà dello strumento di reagire sempre allo stesso modo quando viene sottoposto alla medesima sollecitazione.

Le misure **indirette**, invece, non sono eseguite direttamente sulle grandezze interessate, ma su altre grandezze che sono a essa legate da una relazione funzionale: per esempio, la velocità di un'automobile può essere valutata indirettamente misurando spazi percorsi e tempi impiegati, dai quali si risale alla velocità ( $V = S/t$ ).

## B2.3 Valore vero di una grandezza fisica

La definizione del "valore vero" di una grandezza, indicato con  $V_v$ , pone un problema di estrema importanza nel campo della teoria delle misure.

Nel caso, per esempio, si voglia misurare la lunghezza di un tavolo con una precisione sempre maggiore, si arriva alla conclusione che non esiste la grandezza "lunghezza del tavolo": infatti, all'aumentare della precisione, la misura fornisce risultati che variano da punto a punto, a causa delle discontinuità presenti sul bordo del tavolo, e in funzione del tempo, a causa della dilatazione o della contrazione dovuta agli sbalzi termici.

Da questa considerazione, che ha validità generale, si evince la seguente assunzione: nessuna quantità fisica può essere misurata con precisione assoluta; in altre parole, il valore vero di una grandezza può essere considerato il risultato di un processo di misura ideale, irrealizzabile in pratica.

È quindi evidente che il modo più corretto per presentare il risultato della misura di una grandezza è quello di fornire la sua miglior stima e l'intervallo all'interno del quale si presume che essa possa variare.

Per esempio, una misura di lunghezza può essere così presentata:

$$36,4 \pm 0,2 \text{ cm}$$

Generalizzando, si può dire che il risultato della misura di una grandezza può essere espresso nella forma:

$$V \pm \varepsilon \quad (2.2)$$

in cui  $V$  rappresenta la miglior stima della grandezza in esame ed  $\varepsilon$ , detta **incertezza** o **errore**, definisce l'intervallo entro il quale si presume che la grandezza misurata possa variare.

Nella maggior parte delle misure, per avere la garanzia che il valore vero della grandezza in esame sia compreso in un certo intervallo, è in genere necessario considerare un valore di  $\varepsilon$  piuttosto elevato; è preferibile pertanto abbandonare l'approccio della certezza matematica e considerare un intervallo entro il quale è compreso, con una probabilità definita, il valore vero.

## B2.4 Errore assoluto ed errore relativo

Si definisce **errore assoluto**  $\varepsilon$  la differenza tra il valore misurato  $V_m$  e il valore vero  $V_v$  della grandezza:

$$\varepsilon = V_m - V_v \quad (2.3)$$

L'errore assoluto non ha però molto significato in quanto non è riferito al valore della grandezza da cui deriva.

Per esempio, asserire che nella misura del lato di un quadrato è stato commesso un errore di 1 mm ha poco significato se non si precisa anche il valore della lunghezza: infatti, su una misura di 10 m l'errore di 1 mm può essere considerato molto piccolo, ma lo stesso errore su una misura di 1 cm è sicuramente estremamente elevato.

Per questo motivo nella valutazione della precisione delle misure si utilizza l'**errore relativo**  $\varepsilon_r$ , così definito:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{V_v} = \frac{V_m - V_v}{V_v} \quad (2.4)$$

e normalmente espresso in forma percentuale:

$$\varepsilon_r \% = \frac{V_m - V_v}{V_v} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Poiché il valore vero di una grandezza non è mai noto, altrimenti non avrebbe senso effettuare la sua misura, nelle (B2.3) e (B2.4) anziché  $V_v$  si considera il **valore medio**  $V_M$ , che statisticamente costituisce la miglior stima della grandezza, essendo determinato effettuando la media dei risultati di più misure, non considerando quelli che si discostano oltre un certo limite dalla media stessa; pertanto, se il numero delle misure è pari a  $n$ , si ha:

$$V_M = \frac{V_{m1} + V_{m2} + V_{m2} + V_{m_n}}{n} \quad (2.6)$$

Il risultato della misura si può quindi esprimere nella forma:

$$V_M \pm \varepsilon \quad (2.7)$$

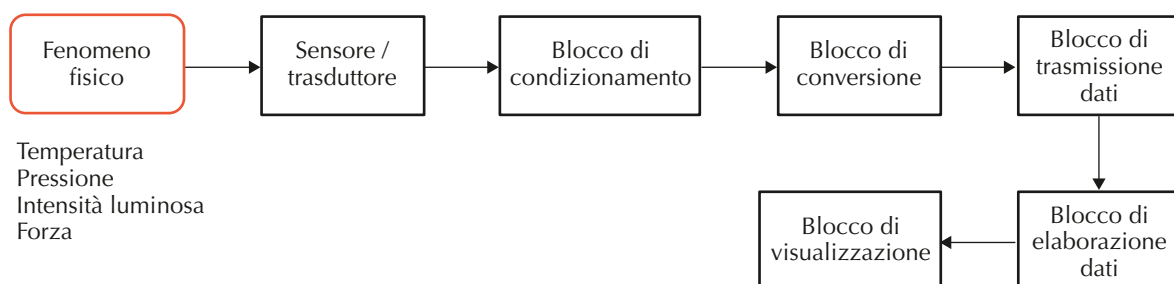
in cui  $\varepsilon$  definisce l'intervallo all'interno del quale, con una determinata probabilità, si può ritenere contenuto il valore vero della grandezza misurata.

## B2.5 Struttura di un sistema di acquisizione dati

Un sistema di acquisizione dati è un sistema di misura elettronico realizzato per monitorare, registrare ed eventualmente elaborare le misure di una o più grandezze fisiche.

Nella **figura B2.1** è mostrato lo schema a blocchi di un tale sistema, costituito da una catena di elementi che ne caratterizzano la qualità e il campo d'impiego.

L'obiettivo primario di un sistema di acquisizione dati è la definizione, in forma appropriata, delle informazioni relative alle grandezze fisiche ogget-



**Figura B2.1** Schema a blocchi di un sistema di acquisizione dati.

to della misura: come si può dedurre dalla **figura B2.1**, per ottenere ciò sono necessari più livelli di processo.

### Sensore e trasduttore

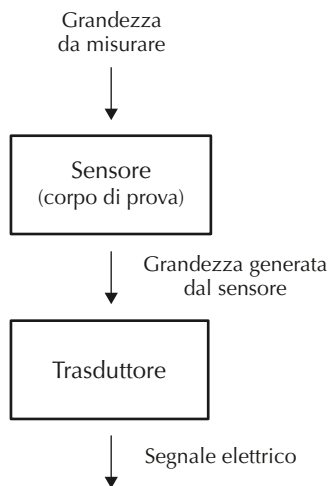
Il **sensore** è il primo blocco dello schema di **figura B2.1**, che interagisce direttamente con la grandezza da misurare.

Costituisce l'elemento primario che rileva la grandezza oggetto della misurazione convertendola in un'altra grandezza, secondo una ben precisa legge fisica: in un termometro a liquido, per esempio, è costituito dall'elemento sensibile alla temperatura, cioè il liquido contenuto nel bulbo.

Il **sensore** non va confuso con il **trasduttore**, la cui funzione è la conversione della grandezza rilevata dal primo in un segnale elettrico, avente caratteristiche fisiche compatibili con i dispositivi di trasmissione, elaborazione e memorizzazione del sistema.

Per esempio, nel termometro il sensore (il liquido contenuto nel bulbo) genera un innalzamento del proprio livello che deve essere convertito dal trasduttore in un segnale elettrico da inviare alla catena di misura.

Il sensore, pertanto, rispetto al trasduttore, è sempre l'elemento iniziale della catena di misura **[fig. B2.2]**.



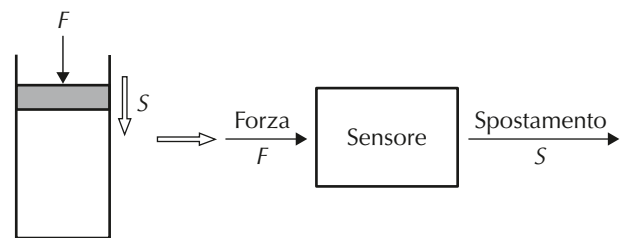
**Figura B2.2** Trasduttore in cascata al sensore.

Tuttavia, nell'ambiente industriale spesso si tende a identificare il sensore con il trasduttore e viceversa, intendendo con entrambe le denominazioni il dispositivo in grado di generare il segnale elettrico contenente tutte le informazioni necessarie al processo misura della grandezza. È importante sottolineare che il segnale elettrico

generato dal trasduttore è quasi sempre analogico, poiché le grandezze fisiche rilevate dal sensore sono in generale grandezze analogiche (per esempio, temperatura, pressione, intensità luminosa).

### ESEMPIO

Un pistone libero di muoversi entro un cilindro tende a spostarsi quando è soggetto a una forza  $F$  compiendo uno spostamento  $S$  che dipende dall'intensità di  $F$ : in questo caso il pistone funge da sensore meccanico che converte una forza in uno spostamento **[fig. B2.3]**.



**Figura B2.3** Sensore meccanico.

È poi compito del trasduttore convertire lo spostamento in un segnale elettrico idoneo all'elaborazione.

La trattazione dei sensori/trasduttori sarà approfondita nel modulo C.

### Blocco di condizionamento

Il segnale elettrico in uscita dal sensore/trasduttore, oltre a contenere componenti indesiderate, è in genere troppo debole (valori dell'ordine dei *millivolt* o dei *picoampere*) per essere elaborato dai blocchi successivi; è pertanto necessario un circuito, detto **blocco di condizionamento**, che amplifichi e filtri opportunamente il segnale generato dal trasduttore e ottimizzi la connessione con i blocchi successivi.

Il blocco di condizionamento, pertanto, ha la funzione di rendere il segnale di uscita del trasduttore compatibile con i dispositivi di elaborazione che seguono, riducendo il più possibile le interferenze esterne.

### Blocco di conversione

Il blocco di conversione esegue la conversione analogico-digitale, necessaria per convertire il segnale elettrico analogico, generato dal trasduttore e adeguatamente amplificato dal blocco di condizionamento, in una sequenza temporale di campioni discretizzati nelle ampiezze e opportunamente codificati, in modo da ottenere un segnale digitale.

È un elemento fondamentale del sistema di acquisizione, poiché dalle sue caratteristiche dipendono le prestazioni dell'intero sistema, in particolare dai suoi parametri, come la velocità di campionamento e la risoluzione.

L'argomento è stato già trattato nel volume 2.

### **Blocco di trasmissione dati**

Consente la trasmissione del segnale digitale all'elaboratore; l'argomento verrà trattato nel modulo D.

### **Blocco di elaborazione dati**

È costituito dal sistema di elaborazione che memorizza ed elabora il segnale digitale generato dal blocco di conversione, fornendo il risultato della misura; l'argomento verrà trattato nel modulo D.

### **Blocco di visualizzazione**

È il display sul quale vengono visualizzati i risultati della misura, opportunamente elaborati.



.....  
[B4] Fai un esempio di sistema descrivendo brevemente il suo funzionamento e rappresentalo con un diagramma a blocchi.

.....  
[B5] Che cosa si intende per controllo di processo?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[B6] Illustra brevemente il funzionamento di un sistema a catena aperta.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[B7] Qual è la differenza tra un sistema a catena aperta e un sistema a catena chiusa?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

# ESERCITAZIONI

.....  
[B8] Descrivi brevemente un sistema stazionario.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[B9] Disegna lo schema a blocchi di sistema di acquisizione dati.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[B10] Qual è la differenza tra un misura diretta e una misura indiretta?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[B11] Descrivi brevemente le differenze tra un trasduttore e un sensore.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....



# MODULO C

## Trasduttori

### Unità C1: Caratteristiche fondamentali dei trasduttori

- C1.1 I trasduttori nell'industria
- C1.2 Sensore o trasduttore?
- C1.3 Il ruolo del trasduttore in un sistema di misura
- C1.4 Classificazione dei trasduttori
- C1.5 Rappresentazione matematica del trasduttore
- C1.6 Campi di variabilità dei segnali
- C1.7 Caratteristiche funzionali del trasduttore
- C1.8 Tipologie di trasduttori

### Unità C2: Trasduttori di posizione

- C2.1 Introduzione
- C2.2 Potenzimetri
- C2.3 Trasformatore lineare differenziale
- C2.4 Resolver
- C2.5 Encoder

### Unità C3: Trasduttori di velocità

- C3.1 Introduzione
- C3.2 L'encoder digitale come trasduttore di velocità
- C3.3 Dinamo tachimetrica

### Unità C4: Trasduttori di deformazione, forza e pressione

- C4.1 Introduzione
- C4.2 Estensimetro
- C4.3 Cella di carico
- C4.4 Trasduttori di pressione
- C4.5 Trasduttori di accelerazione

### Unità C5: Trasduttori di temperatura

- C5.1 Introduzione
- C5.2 Termoresistenze
- C5.3 Termocoppie
- C5.4 Termistori

## **Unità C6: Trasduttori di corrente a effetto Hall**

- C6.1 Introduzione
- C6.2 Effetto Hall
- C6.3 Trasduttori di corrente a misura diretta del campo
- C6.4 Trasduttori a compensazione di campo

## **Unità C7: Trasduttori di prossimità**

- C7.1 Introduzione
- C7.2 Trasduttori di prossimità induttivi
- C7.3 Trasduttori di prossimità capacitivi
- C7.4 Trasduttori di prossimità optoelettronici
- C7.5 Trasduttori a ultrasuoni
- C7.6 Trasduttori di prossimità magnetici

## **Unità C8: Trasduttori di immagini**

- C8.1 Trasduttori CCD
- C8.2 Principio di funzionamento di un CCD
- C8.3 Generazione delle cariche per effetto fotoelettrico e raccolta delle cariche nei pozzi di potenziale

- C8.4 Trasferimento delle cariche
- C8.5 Estrazione delle cariche
- C8.6 Risoluzione di un CCD

## **Unità C9: Trasduttori di suoni**

- C9.1 Il suono
- C9.2 Trasduzione acustico-elettrica
- C9.3 Microfoni a spostamento
- C9.4 Microfoni a velocità

## **Obiettivi**

- Saper distinguere un sensore da un trasduttore
- Saper classificare i trasduttori in base alle loro caratteristiche
- Conoscere le caratteristiche fondamentali dei trasduttori
- Conoscere la struttura e il funzionamento delle varie tipologie di trasduttori
- Saper identificare il ruolo del trasduttore in un sistema di misura

## CONTENUTI

- C1.1 I trasduttori nell'industria
- C1.2 Sensore o trasduttore?
- C1.3 Il ruolo del trasduttore in un sistema di misura
- C1.4 Classificazione dei trasduttori
- C1.5 Rappresentazione matematica del trasduttore
- C1.6 Campi di variabilità dei segnali
- C1.7 Caratteristiche funzionali del trasduttore
- C1.8 Tipologie di trasduttori



Strumenti di misura

# CARATTERISTI- CHE FONDA- MENTALI DEI TRASDUTTORI

## C1.1 I trasduttori nell'industria

I trasduttori costituiscono un settore di importanza rilevante per lo sviluppo tecnologico delle attività produttive di tutti i comparti industriali.

Il forte sviluppo dell'elettronica e delle tecnologie informatiche da un lato, e l'imponente spinta verso l'automazione dei processi produttivi dall'altro, hanno orientato verso le attività di ricerca e sviluppo dei trasduttori notevoli investimenti di risorse umane ed economiche.

Nei processi industriali, infatti, un prodotto viene ottenuto mediante un insieme di attività, la cui gestione presuppone l'analisi del sistema in tempo reale, che può essere effettuata o direttamente da un operatore o in maniera automatica.

L'operatore umano gestisce l'andamento del processo avvalendosi della propria professionalità ed esperienza, mentre l'analisi automatica, per estrarre le informazioni relative all'andamento del processo stesso, necessita dei trasduttori.

Lo sviluppo industriale dell'ultimo secolo è stato caratterizzato da uno spostamento sempre più spinto dal controllo manuale dei processi a quello automatico e quindi a un sempre più vasto impiego dei trasduttori.

I fattori più importanti che hanno accelerato, soprattutto in ambito metalmeccanico, la progressiva automazione di processo sono: l'aumento del costo della manodopera e quindi dell'operatore e la comparsa sul mercato di dispositivi di elaborazione (microprocessori) con rapporti prezzo/prestazioni sempre più vantaggiosi e quindi capaci di realizzare il controllo automatico di processo a costi sempre più bassi.

Definire il valore di mercato in un settore in rapida espansione come quello dei trasduttori è molto difficile, in quanto è notevolmente vasto

e i costi possono essere estremamente limitati, o molto elevati nel caso di trasduttori complessi che consentono grandi ottimizzazioni dei processi e quindi notevoli vantaggi per le imprese.

Lo sviluppo della tecnologia dei trasduttori è stato favorito dai risultati ottenuti nell'ambito dei laboratori di ricerca, dove la necessità di estendere le conoscenze dell'uomo sulla natura stimola continuamente l'invenzione di dispositivi con prestazioni sempre più spinte, come per esempio la misura di grandezze fisiche con sempre maggior precisione.

## C1.2 Sensore o trasduttore?

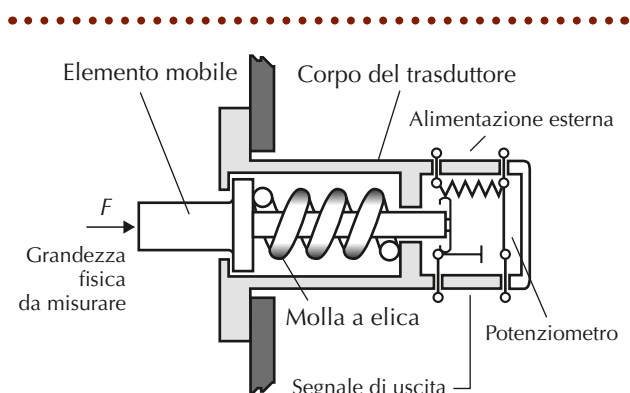
Come visto nell'unità B2, in una catena di misura è sempre possibile individuare l'elemento che si interfaccia con la grandezza da misurare: esso è la parte sensibile, il captatore o meglio il **sensore** che esegue l'operazione di estrazione della grandezza oggetto della misurazione.

L'IEC (International Electrotechnical Commission) definisce come sensore l'elemento primario di una catena di misura, sensibile a una grandezza fisica e in grado di trasformarla in un segnale misurabile secondo una ben precisa legge.

Il trasduttore, invece, è definito come un dispositivo che converte la grandezza rilevata dal sensore in un segnale elettrico, avente caratteristiche fisiche compatibili con i dispositivi di trasmissione, elaborazione e memorizzazione della catena.

In molti casi la distinzione tra sensore e trasduttore non è così netta e delineata e spesso nella letteratura tecnica e nella pratica i due termini sono utilizzati come sinonimi, intendendo con entrambe le denominazioni il dispositivo in grado di generare il segnale elettrico contenente le informazioni necessarie al processo di misura della grandezza in esame.

Nella **figura C1.1** è rappresentato un esempio di



**Figura C1.1** Trasduttore forza-tensione elettrica.

trasduttore che effettua la trasformazione di una forza in un segnale elettrico mediante una conversione intermedia in spostamento: in questo caso il sensore è costituito dall'elemento elastico (molla a elica) che trasforma la forza in uno spostamento, convertito poi dal trasduttore potenziometrico in una tensione elettrica, misurabile da un voltmetro collegato alla sua uscita.

In seguito con il termine trasduttore intenderemo il sistema in grado di convertire una grandezza fisica in un segnale elettrico che conserva le sue caratteristiche.

Il trasduttore si può pertanto rappresentare con un blocco al cui ingresso è applicata la grandezza da misurare  $x(t)$ , detta **misurando**, che viene convertita nel segnale elettrico di uscita  $y(t)$  [fig. C1.2].



**Figura C1.2** Rappresentazione schematica del trasduttore.

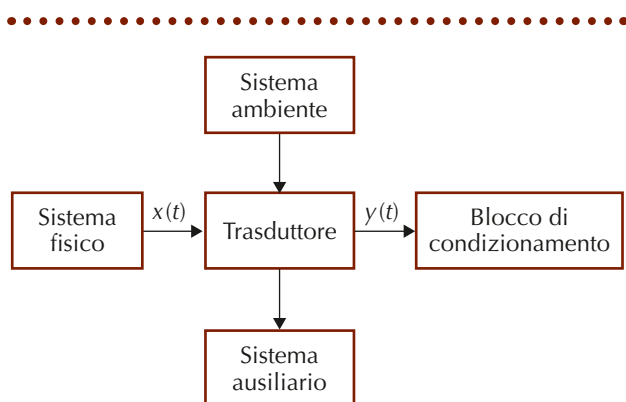
## C1.3 Il ruolo del trasduttore in un sistema di misura

Come visto nel paragrafo precedente, la funzione del trasduttore è la trasformazione del misurando in un'altra grandezza fisica, tipicamente un segnale elettrico, più adatta alle elaborazioni che devono essere effettuate dai blocchi successivi.

Rispetto agli altri dispositivi presenti nella catena di misurazione, il trasduttore è quello che più si differenzia: infatti, mentre i primi trattano segnali già adattati alle loro caratteristiche (per esempio, il convertitore analogico-digitale ha in ingresso un segnale elettrico), la struttura del trasduttore deve essere compatibile con la natura della grandezza da misurare.

In altre parole il trasduttore è l'elemento più critico della catena di misurazione, in quanto il più condizionato dalle caratteristiche del misurando. Durante il suo funzionamento, esso interagisce con più sistemi fisici esterni, come mostrato nella **figura C1.3**, in cui è possibile individuare:

- il **sistema fisico**, dal quale è estratta l'informazione del misurando  $x(t)$  applicato all'ingresso del trasduttore;
- il **blocco di condizionamento**, al quale il



**Figura C1.3** Rappresentazione schematica a blocchi dei collegamenti fra il trasduttore e gli altri sistemi.

trasduttore fornisce l'informazione captata dal misurando (sistema fisico) attraverso il segnale d'uscita  $y(t)$ ;

- il **sistema ausiliario**, ovvero un eventuale sistema supplementare di cui il trasduttore può aver bisogno per il suo funzionamento (per esempio una sorgente ausiliaria di alimentazione o un campione di riferimento);
- il **sistema ambiente**, ovvero le sorgenti di disturbi esterne alla catena di misura che possono interagire con il trasduttore.

Le cause di disturbo vengono indicate col nome di **grandezze di influenza**; il motivo di questa denominazione deriva dal fatto che esse influenzano il comportamento del trasduttore e determinano, insieme al misurando, l'andamento del segnale di uscita.

Le principali grandezze di influenza sono fondamentalmente due: la temperatura dell'ambiente esterno e la variabilità della tensione di alimentazione (per i trasduttori che necessitano di alimentazione ausiliaria).

Una particolare grandezza d'influenza è il tempo di funzionamento, inteso come invecchiamento o alterazione dei componenti che costituiscono il trasduttore: esso solitamente viene trattato separatamente, in quanto relativo a fenomeni con dinamica molto più lenta rispetto a quella delle altre grandezze d'influenza.

## C1.4 Classificazione dei trasduttori

I trasduttori possono essere classificati in base:

- alla tecnologia e al principio fisico che utilizzano (per esempio ottico, piezoelettrico, fotoelettrico, meccanico);

- alla grandezza da misurare (lunghezza, temperatura, pressione);
- al particolare settore a cui sono destinati (agricoltura, chimica, meccanica).

La prima classificazione, quella per tecnologie, fornisce una visione generale dei processi utilizzati nella realizzazione dei trasduttori e risulta particolarmente utile al progettista.

Tuttavia, non è particolarmente indicata per comparare trasduttori diversi che misurano la stessa grandezza: per esempio per scegliere un termometro occorre esaminare ogni elemento caratteristico che lo compone (elementi resistivi, termoelettrici ecc.).

Anche una classificazione per settore, pur risultando utile a chi opera nel settore stesso, oltre alla difficoltà di individuare i molteplici settori che utilizzano quel tipo di trasduttore, può dar luogo ad ambiguità e ripetitività, poiché uno stesso trasduttore potrebbe essere impiegato in aree diverse. Da un punto di vista dell'utente, la miglior classificazione è quella per grandezze da misurare, poiché consente di stabilire in modo immediato i trasduttori disponibili e loro caratteristiche per una specifica applicazione.

Un'ulteriore classificazione è la suddivisione tra **passivi** e **attivi**.

I trasduttori passivi (detti anche a modulazione) necessitano di alimentazione esterna (sistema ausiliario): in tal caso il misurando  $x(t)$  modula, facendone variare l'ampiezza proporzionalmente al proprio valore, la tensione esterna di alimentazione, generando in uscita un segnale elettrico  $y(t)$  contenente le caratteristiche di  $x(t)$ .

Per esempio, nel trasduttore di **figura C1.1**, per convertire la forza  $F$  in un segnale elettrico l'elemento elastico modula la tensione di alimentazione esterna del potenziometro in modo da generare in uscita un segnale elettrico proporzionale allo spostamento  $s$ : esso è quindi un trasduttore di tipo passivo.

Viceversa, i trasduttori attivi, detti anche ad **auto-generazione**, non richiedono alimentazione esterna e forniscono in uscita un segnale elettrico derivato direttamente dal misurando, utilizzando alcuni effetti fisici, come per esempio gli effetti piezoelettrico, fotoelettrico, fotovoltaico, elettromagnetico e termoelettrico.

Non essendoci alcuna alimentazione supplementare e considerando che il misurando in genere assume valori abbastanza piccoli, il corrispondente segnale elettrico di uscita tende ad avere livelli molto bassi: i trasduttori attivi, pertanto, richiedono amplificazioni con forti guadagni.

## C1.5 Rappresentazione matematica del trasduttore

Il legame che unisce il misurando  $x(t)$  con il segnale elettrico di uscita  $y(t)$  costituisce la **funzione di conversione** del trasduttore, definita come:

$$y(t) = f[x(t)] \quad (1.1)$$

La 1.1 fornisce il segnale  $y(t)$  all'uscita del trasduttore in funzione del valore del misurando  $x(t)$ .

Per rappresentare l'effetto delle grandezze di influenza (esprese dalle funzioni  $g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t)$ ), ovvero per definire le caratteristiche del trasduttore quando è "inserito nel mondo reale", la funzione di conversione diretta assume la forma:

$$y(t) = f[x(t) + g_1(t) + g_2(t) + \dots + g_n(t)] \quad (1.2)$$

## C1.6 Campi di variabilità dei segnali

La definizione del modello matematico del trasduttore effettuata mediante la funzione di conversione  $f$  (equazione 1.1) è sufficiente a caratterizzare il funzionamento.

Tuttavia, la funzione  $f$  può dipendere anche dalla dinamica del segnale d'ingresso, per cui può assumere valori diversi a seconda dell'ampiezza di quest'ultimo: per esempio, nel caso delle termoresistenze, per piccole variazioni di temperatura il comportamento può essere ritenuto lineare (funzione di conversione lineare), mentre per variazioni più ampie assume un andamento non lineare.

La linearità di  $f$  rappresenta una caratteristica fondamentale per un trasduttore, poiché consente di trasferire l'informazione contenuta nel misurando sul segnale di uscita senza alcuna alterazione.

Per questo motivo, per ciascun trasduttore viene definito il **campo di misura**, che stabilisce i limiti entro i quali può variare il misurando affinché la funzione di conversione sia sufficientemente lineare e il trasduttore funzioni secondo le specifiche fissate; naturalmente esiste un valore limite superato il quale avviene la rottura del trasduttore per sovraccarico: a tale scopo viene definito il **campo di sicurezza**, solitamente più ampio del campo di misura, che specifica i limiti che il misurando non deve superare per non correre il rischio di danneggiare il trasduttore.

Per quanto riguarda il segnale d'uscita, viene definito il **campo di normale funzionamento** del

trasduttore, cioè l'insieme dei valori del segnale d'uscita corrispondenti ai valori del misurando all'interno del campo di misura.

È da osservare che il funzionamento del trasduttore è garantito solo all'interno del campo di misura per il misurando e all'interno del campo di normale funzionamento per il segnale d'uscita.

Al di fuori di tali limiti, ma all'interno del campo di sicurezza, la funzione di trasferimento può risultare non lineare, mentre al di fuori di esso si può avere la rottura del trasduttore.

## C1.7 Caratteristiche funzionali del trasduttore

In generale il funzionamento del trasduttore può essere riferito a due modalità operative legate all'influenza della dinamica del segnale d'ingresso sulla sua funzione di trasferimento, ovvero:

- funzionamento in **regime stazionario**, nel caso la funzione di conversione del trasduttore non è modificata dalle variazioni del segnale d'ingresso nel tempo (dinamica), cioè se è la stessa di quella ottenuta con un segnale di ingresso costante nel tempo;
- funzionamento in **regime dinamico**, nel caso la funzione di conversione del trasduttore è modificata dalla dinamica del segnale d'ingresso.

Il comportamento del trasduttore viene perciò studiato in modo diverso nei due regimi di funzionamento; per tale ragione le sue grandezze caratteristiche vengono classificate nelle seguenti categorie:

- caratteristiche di tipo generale;
- caratteristiche riferite al funzionamento in regime stazionario;
- caratteristiche riferite al funzionamento in regime dinamico.

Infine, tenendo conto della grande diffusione dei trasduttori con caratteristiche fornite in lingua inglese, per i termini più importanti è stato riportato in parentesi la traduzione in inglese.

### Caratteristiche generali

**Principio di funzionamento** – È il principio fisico mediante la quale il trasduttore trasforma il segnale d'ingresso in quello di uscita.

**Misurando (*measurand*)** – È la grandezza di ingresso  $x(t)$  che deve essere misurata.

**Uscita (*output*)** – È la grandezza di uscita  $y(t)$  fornita dal trasduttore, generalmente di natura elettrica.

**Potenza erogabile (*output power*)** – È il valore limite della potenza elettrica che il trasduttore fornisce in uscita secondo le specifiche.

**Impedenza di uscita (*output impedance*)** – È il valore dell'impedenza equivalente (o resistenza quando la parte reattiva è trascurabile) di uscita.

**Alimentazione ausiliaria (*auxiliary supply*)** – È il valore della tensione o dell'intensità di corrente che deve essere fornita da una sorgente esterna per consentire il corretto funzionamento del trasduttore (che in questo caso è di tipo passivo).

**Condizioni operative (*operating conditions*)** – Definiscono l'insieme delle condizioni di funzionamento del trasduttore; tali condizioni possono essere oggetto di particolari prescrizioni che riguardano la taratura, il funzionamento normale e in sovraccarico, la conservazione in magazzino; esse generalmente comprendono i campi di valori in cui devono essere mantenute le grandezze d'influenza: è quindi possibile definire, analogamente a quanto fatto per il misurando, il **campo di sicurezza di una grandezza d'influenza**, entro il quale deve essere compresa la grandezza di influenza durante l'utilizzo del trasduttore affinché non venga alterata alcuna delle sue caratteristiche, e il **campo di magazzino di una grandezza d'influenza (*storage conditions*)**, all'interno del quale deve essere compresa la grandezza d'influenza quando il sensore è a riposo, cioè in condizioni di immagazzinamento, affinché non venga alterata nessuna delle sue caratteristiche).

**Vita (*life*)** – È la durata garantita di funzionamento del trasduttore in condizioni di piena validità delle sue caratteristiche. Viene indicata in due modi: tramite un valore temporale (mesi oppure anni), o in "operazioni".

Il primo caso interessa i trasduttori soggetti a invecchiamento con il trascorrere del tempo: basta pensare, per esempio, a fenomeni quali l'ossidazione di particolari elementi, la scarica di pile poste all'interno del trasduttore per alimentarne i circuiti.

Il secondo caso, invece, è riferito a trasduttori costituiti da parti in movimento per le quali è importante la quantità di operazioni effettuate, come per esempio i contatti striscianti che collegano elettricamente un elemento mobile a un

altro fisso e le bronzine di supporto dei perni di alcuni trasduttori.

**Caratteristiche fisiche (*physical characteristics*)** – Insieme delle caratteristiche che riguardano:

- le **dimensioni (*dimensions*)**: dimensioni fisiche esterne del trasduttore;
- il **peso (*weight*)**: peso del trasduttore e dei suoi eventuali accessori;
- il **montaggio (*mounting*)**: modalità con cui il trasduttore viene collegato al sistema di misura (viti, flange, collanti, spine, connettori o altro);
- i **materiali di costruzione (*materials of construction*)**: acciaio inossidabile, plastica, o altro;
- gli **accessori (*accessories*)**: apparecchiature ausiliarie necessarie per il corretto funzionamento del trasduttore.

## Caratteristiche in regime stazionario

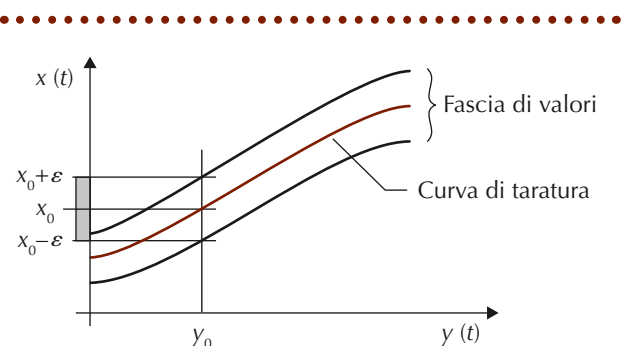
### Diagramma di taratura

Nel paragrafo C1.5 abbiamo visto che il funzionamento del trasduttore è definito dalla funzione di conversione.

Tuttavia, data la variabilità e l'aleatorietà delle grandezze di influenza tale funzione, espressa dalla 1.2, è di difficile definizione e quindi di scarso interesse pratico.

Dal un punto di vista applicativo, pertanto, è più agevole utilizzare il "**diagramma di taratura**", che fornisce il legame fra uscita e ingresso; in tale diagramma sono riportati i due valori estremi, in funzione del segnale di uscita, che il misurando può assumere a causa della variabilità delle grandezze di influenza.

Congiungendo i punti che rappresentano i valori estremi superiori e quelli inferiori, si ottengono due curve all'interno delle quali il trasduttore funziona: la regione delimitata da tali curve è detta "**fascia di valori**" [fig. C1.4].



**Figura C1.4** Esempio di diagramma di taratura.

Congiungendo invece i punti mediani dei segmenti che collegano gli estremi superiori ai corrispondenti estremi inferiori si ottiene una terza curva, detta “**curva di taratura**”, che rappresenta il “comportamento medio” del trasduttore [fig. C1.4].

Per esempio, se il valore del segnale di uscita del trasduttore è  $y_0$ , il misurando, cioè la grandezza d’ingresso, può assumere qualsiasi valore compreso fra  $x_0 - \varepsilon$  e  $x_0 + \varepsilon$ , essendo  $\varepsilon$  l’incertezza della misura (unità B1).

Usando un’espressione matematica più compatta si può anche scrivere che il valore del misurando corrispondente all’uscita  $y_0$  è a  $x_0 \pm \varepsilon$ .

Ciò costituisce una prova di quanto affermato nell’unità B2: a causa degli inevitabili disturbi esterni (grandezze di influenza), nessuna quantità fisica può essere misurata con precisione assoluta e il modo più corretto per rappresentarne il risultato è quello di fornire la sua miglior stima, cioè l’intervallo all’interno del quale si presume possa variare.

### Linearità (linearity)

Fornisce un’indicazione dello scostamento dall’andamento rettilineo della curva di taratura.

È specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita: si possono pertanto definire tante tipologie di linearità quante sono le modalità con cui viene scelta la retta di riferimento.

In particolare, le definizioni più interessanti, illustrate per mezzo dei diagrammi riportati nella **figura C1.5**, sono le seguenti:

- **linearità riferita allo zero (Zero based linearity)**: la retta di riferimento passa per l’estremo inferiore della curva di taratura (corrispondente all’estremo inferiore del campo

di misura) ed è tracciata in modo da rendere minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti [fig. C1.5];

- **linearità riferita agli estremi (End point linearity)**: la retta di riferimento congiunge i due estremi della curva di taratura (corrispondenti ai due estremi del campo di misura) [fig. C1.5b];
- **linearità indipendente (independent linearity)**: la retta di riferimento è quella che rende minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti, non passando necessariamente per i due estremi [fig. C1.5c].

### Sensibilità (sensitivity)

La sensibilità rappresenta il rapporto fra la variazione dell’uscita del trasduttore e la corrispondente variazione del misurando.

Il valore della sensibilità può essere ricavato, per ogni valore del misurando, dalla funzione di taratura: rappresenta, infatti, l’inverso della sua pendenza nel punto considerato.

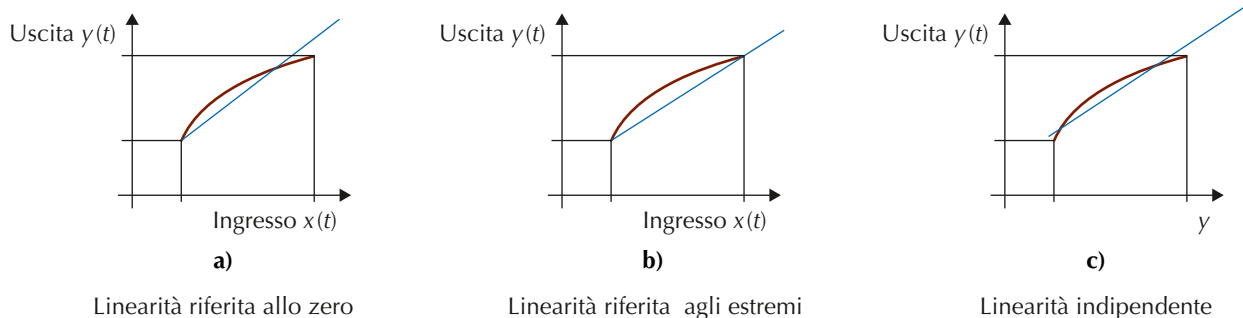
L’unità di misura della sensibilità è riferita alle unità di misura del misurando e dell’uscita; per esempio, in un sensore di pressione con uscita in tensione la sensibilità è espressa in volt/bar.

### Risoluzione (resolution)

La risoluzione esprime l’attitudine del sensore a rilevare piccole variazioni del misurando.

È definita come *la variazione del valore del misurando che provoca in uscita una variazione pari all’incertezza dell’uscita stessa*.

È da osservare che nel caso il trasduttore operi con un misurando che si trova nell’intorno dello zero, al termine risoluzione si preferisce quello di “**soglia**” (*threshold*) che viene così ad assumere il significato di “valore minimo del misurando che determina un’uscita “diversa da zero” apprezzabile.



**Figura C1.5** Quando la curva di taratura (in rosso) non è rettilinea, la linearità indica il suo scostamento da una retta di riferimento (in blu), assunta convenzionalmente. La figura mostra i tre modi principali in cui può essere definita tale retta di riferimento.



**Ripetibilità (repeatability)**

La ripetibilità quantifica l'attitudine del trasduttore a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro, quando all'ingresso è applicato più volte e consecutivamente lo stesso misurando; l'ampiezza della fascia di valori che si ottengono in queste condizioni in uscita costituisce la ripetibilità.

**Isteresi (hysteresis)**

L'isteresi quantifica la presenza di un effetto "memoria" del trasduttore la cui uscita, a parità di valore del misurando, potrebbe essere influenzata dalla precedente condizione operativa.

**Stabilità (stability)**

La stabilità è la capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo (mesi oppure anni) espresso dal parametro "vita".

Riveste un ruolo molto importante, simile a quello della ripetibilità che tiene conto degli effetti a breve termine delle grandezze di influenza.

Viene espressa specificando la massima variazione che si può verificare in uscita a parità del misurando e delle condizioni operative entro un determinato intervallo di tempo.

**Caratteristiche in regime dinamico**

Data la complessità della descrizione del comportamento dinamico del trasduttore, che esula dagli scopi del presente testo, per queste caratteristiche verrà effettuata l'analisi qualitativa delle più importanti, che sono: la **risposta in frequenza**, la **banda passante**, la **costante di tempo** e il **tempo di assestamento**.

**Risposta in frequenza**

Supponiamo di applicare in ingresso al trasduttore un misurando  $x(t)$  il cui andamento nel tempo (forma d'onda) sia una sinusoidale di ampiezza unitaria, cioè

$$x(t) = 1 \text{sen} \omega t \tag{1.3}$$

All'uscita, allora, si avrà un segnale  $y(t)$  ancora sinusoidale e di ampiezza costante, ma non più unitaria a causa della trasformazione avvenuta, e di frequenza uguale a quella del misurando.

Poiché il trasduttore impiega un certo tempo per trasformare il misurando nel corrispondente segnale di uscita, quest'ultimo presenta un certo ritardo rispetto al primo e quindi le due sinusoidi

sono sfasate di un angolo  $\phi$  con l'uscita in ritardo rispetto all'ingresso, cioè:

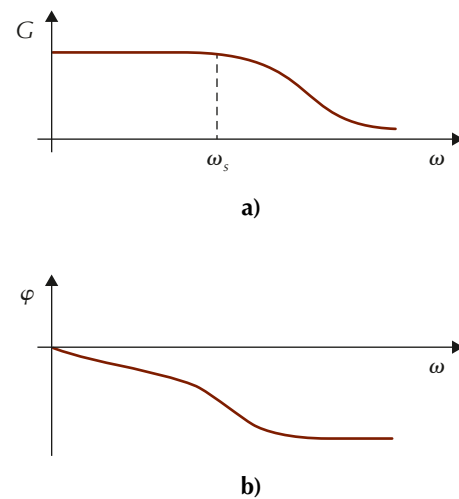
$$y(t) = G \text{sen}(\omega t + \phi) \tag{1.4}$$

dove  $G$  rappresenta l'ampiezza del segnale di uscita dal trasduttore.

Poiché  $x(t)$  ha ampiezza unitaria,  $G$  rappresenta il rapporto fra l'ampiezza del segnale di uscita e l'ampiezza del misurando, cioè il **guadagno** del trasduttore.

Mantenendo costante l'ampiezza (unitaria) di  $x(t)$ , supponiamo di variarne con continuità la pulsazione  $\omega$ : corrispondentemente in uscita al trasduttore sia l'ampiezza  $G$  che la fase  $\phi$  del segnale  $y(t)$  variano al variare di  $\omega$ .

Si possono allora tracciare due grafici che riportano l'andamento di  $G$  e di  $\phi$  in funzione della pulsazione  $\omega$  ottenendo così i diagrammi della risposta in frequenza del trasduttore, denominati rispettivamente **risposta in ampiezza** [fig. C1.6a] e **risposta in fase** [fig. C1.6b].



**Figura C1.6** Diagrammi della risposta in frequenza: a) risposta in ampiezza; b) risposta in fase.

Si può osservare che il guadagno  $G$ , a partire da zero fino alla pulsazione  $\omega_s$ , si mantiene pressoché costante per decrescere rapidamente a partire dalla pulsazione  $\omega_s$ , detta **pulsazione di taglio superiore**.

**Banda passante**

La banda passante rappresenta il campo di frequenze del misurando dove l'ampiezza del segnale di uscita si mantiene proporzionale a quella del misurando stesso, cioè in cui il guadagno  $G$  può essere considerato costante.

Dalla **figura C1.6a** si può dedurre che nella mag-

gioranza dei casi l'estremo inferiore della banda corrisponde allo zero e l'estremo superiore coincide con la pulsazione di taglio superiore  $\omega_s$ .

### Risposta al gradino

Applicando in ingresso al trasduttore un misurando avente una forma d'onda a gradino ideale [fig. C1.7a], cioè che passa istantaneamente dal valore zero a un valore che si mantiene costante nel tempo, il segnale di uscita, per raggiungere il valore di regime, impiega un certo tempo (transitorio di uscita): esso pertanto reagisce con un certo ritardo alla sollecitazione di ingresso [fig. C1.7b].

Viene definita **costante di tempo** (che si indica con  $\tau$ ) il ritardo fra la applicazione dell'ingresso e l'istante in cui l'uscita raggiunge il 63% del valore di regime.

Inoltre, come si evince dalla figura C1.7b, l'uscita non raggiunge direttamente il valore di regime: infatti, in genere l'uscita supera il valore di regime per poi raggiungerlo mediante una serie di oscillazioni che tendono ad annullarsi dopo un certo tempo (oscillazioni smorzate).

Il ritardo fra l'istante in cui è applicata la sollecitazione in ingresso e l'istante in cui l'uscita raggiunge il valore di regime è detto **tempo di assestamento** (che si indica con  $t_a$ ).

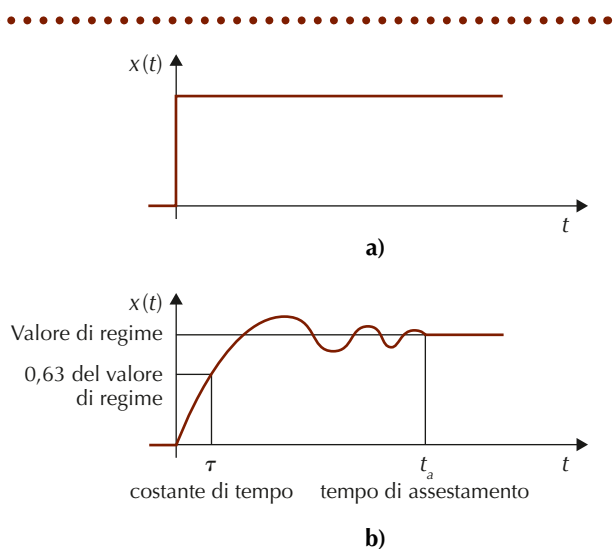


Figura C1.7 Risposta del trasduttore al gradino.

## C1.8 Tipologie di trasduttori

Una classificazione esaustiva dei principi costruttivi su cui si basa il funzionamento dei trasduttori non è semplice da fornire, in quanto le grandezze da misurare possono essere le più disparate e quindi le soluzioni proposte per il progetto dei trasduttori sono molteplici e in continua evoluzione.

In generale, nella maggior parte dei trasduttori, l'effetto fisico utilizzato consiste in una legge fisica che regola la relazione tra la grandezza oggetto di misura (misurando) e una grandezza elettrica, come per esempio una corrente, una tensione, una capacità, una resistenza o un'induttanza, facilmente acquisibile da un sistema di elaborazione elettronico.

Volendo fare una distinzione per tipologie di grandezze da acquisire, possiamo citare:

- **trasduttori meccanici**, i più importanti dei quali sono:
  - trasduttori di posizione (potenziometri, trasformatori lineare differenziale, LVDT, resolver, encoder);
  - trasduttori di velocità (dinamo tachimetriche);
  - trasduttori di deformazione, pressione e forza (estensimetri, celle di carico);
  - trasduttori di accelerazione (accelerometri);
- **trasduttori di temperatura**, i più importanti dei quali sono:
  - termocoppie;
  - termoresistenze;
  - termistori;
- **trasduttori di corrente** (trasduttori di corrente a effetto Hall);
- **trasduttori di prossimità**, i più importanti dei quali sono:
  - trasduttori di prossimità a contatto Reed;
  - trasduttori di prossimità a effetto Hall;
  - trasduttori di prossimità induttivi;
  - trasduttori di prossimità capacitivi;
  - trasduttori di prossimità a ultrasuoni;
  - trasduttori di prossimità optoelettronici;
- **trasduttori di immagini** (CCD);
- **trasduttori di suoni** (microfoni a spostamento, microfoni a velocità).

## CONTENUTI

- C2.1 Introduzione
- C2.2 Potenzimetro
- C2.3 Trasformatore lineare differenziale
- C2.4 Resolver
- C2.5 Encoder



Syncro

# TRASDUTTORI DI POSIZIONE

## C2.1 Introduzione

I trasduttori di posizione sono quei componenti che, rilevando la posizione di un organo mobile, forniscono in uscita un segnale elettrico a essa proporzionale; un tipico esempio è la rilevazione della posizione di dispositivo meccanico in movimento, allo scopo di effettuarne il controllo.

Esistono varie metodologie di misura, che possono richiedere tipologie di trasduttori diverse.

Una prima classificazione può essere fatta in funzione del tipo di movimento da misurare: **lineare** o **rotativo**; in genere lo stesso trasduttore non può essere utilizzato per entrambe le tipologie di movimento.

Una seconda classificazione fa riferimento alla capacità del trasduttore di misurare spostamenti limitati o illimitati.

Anche se in generale non ha senso ipotizzare spostamenti illimitati, tuttavia esistono casi in cui è necessario misurare la posizione di un oggetto in rotazione continua, come per esempio la posizione del rotore rispetto allo statore in un motore, o la posizione relativa di due sistemi in rotazione continua.

## C2.2 Potenzimetro

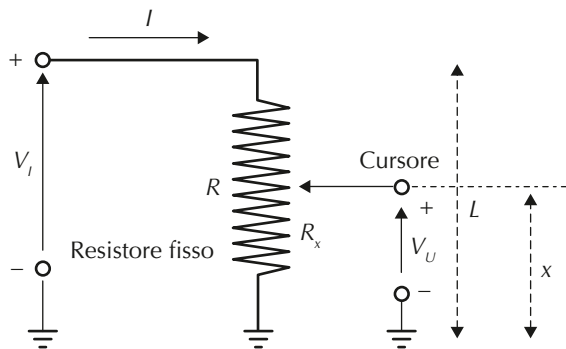
Il **potenziometro** [fig. C2.1] è il più semplice trasduttore di posizione, disponibile sia in versione rotativa che lineare, in cui un cursore è libero di scorre-



Figura C2.1 Potenzimetro.

re su un resistore fisso di resistenza  $R$  e pertanto la resistenza misurata fra il cursore e un capo del resistore dipende dalla posizione del primo; è un trasduttore passivo, in quanto necessita di una sorgente di alimentazione ausiliaria.

Nella **figura C2.2** è riportato lo schema elettrico di un potenziometro lineare.



**Figura C2.2** Potenziometro lineare.

Applicando la legge di Ohm, la corrente  $I$  che circola nel resistore fisso vale:

$$I = \frac{V_I}{R} \quad (2.1)$$

Indicando con  $R_x$  la resistenza del tratto  $x$  compreso tra il cursore e l'estremo del resistore posto a massa, la tensione di uscita  $V_U$  risulta:

$$V_U = IR_x = \frac{V_I}{R} R_x = \frac{R_x}{R} V_I \quad (2.2)$$

Poiché il resistore fisso ha resistenza  $R$  e lunghezza  $L$ , la resistenza  $r$  per unità di lunghezza vale:

$$r = \frac{R}{L} \quad (2.3)$$

Pertanto, la resistenza  $R_x$  vista dal cursore vale:

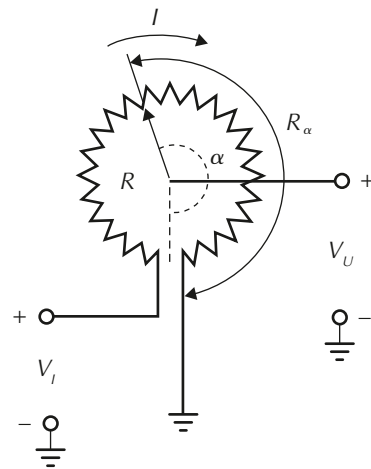
$$R_x = rx = \frac{R}{L} x \quad (2.4)$$

che sostituita nella 2.2 fornisce:

$$V_U = \frac{R_x}{R} V_I = \frac{x}{L} V_I \quad (2.5)$$

La tensione di uscita  $V_U$  è quindi proporzionale alla posizione  $x$  del cursore.

Nella **figura C2.3** è riportato lo schema elettrico di un potenziometro a rotazione.



**Figura C2.3** Potenziometro a rotazione.

La corrente  $I$  che attraversa il resistore fisso (avente resistenza  $R$ ) vale sempre:

$$I = \frac{V_I}{R} \quad (2.6)$$

Se  $\alpha$  è l'angolo che il cursore forma l'estremo del resistore collegato a terra, indicando con  $R_\alpha$  la resistenza angolare sottesa da  $\alpha$ , la tensione di uscita  $V_u$  risulta:

$$V_U = IR_\alpha = \frac{V_I}{R} R_\alpha = \frac{R_\alpha}{R} V_I \quad (2.7)$$

In tal caso, anziché la resistenza per unità di lunghezza conviene considerare la resistenza angolare unitaria  $r_a$ ; tenendo conto che l'intera resistenza  $R$  corrisponde a un angolo di  $2\pi$ , si ha:

$$r_a = \frac{R}{2\pi} \quad (2.8)$$

Pertanto, la resistenza  $R_\alpha$  vista dal cursore è:

$$R_\alpha = r_a \alpha = \frac{R}{2\pi} \alpha \quad (2.9)$$

che sostituita nella 2.7 fornisce:

$$V_u = \frac{R_\alpha}{R} V_i = \frac{\alpha}{2\pi} V_i \quad (2.10)$$

Anche in questo caso la tensione di uscita  $V_U$  è proporzionale alla posizione  $\alpha$  del cursore mobile. I potenziometri possono essere realizzati tramite le seguenti tecniche costruttive:

- **filo metallico** avvolto su supporto isolante;
- **film metallico** (CERMET);
- **plastica conduttiva**.

### Potenzimetri a filo metallico

L'elemento resistivo è realizzato con un sottile filo di materiale metallico avvolto su un supporto isolante e rigido: sul filo scorre un cursore metallico che realizza il contatto elettrico con un punto dell'elemento resistivo.

Il supporto può essere un cilindro retto o un toro: nel primo caso il cursore si muove in linea retta e il sistema si presta per realizzare un trasduttore di spostamento lineare, nel secondo descrive una circonferenza e il sistema può essere impiegato come trasduttore di posizione angolare.

La vita di tali potenziometri è espressa in termini di "corse" del cursore, in quanto è l'usura meccanica, provocata dall'attrito di quest'ultimo sull'elemento resistivo, che determina l'invecchiamento del componente: a ogni corsa, infatti, il cursore asporta una piccola quantità di metallo dal filo provocandone una variazione di sezione e una conseguente variazione della resistenza.

Se l'usura fosse ugualmente distribuita su tutto l'avvolgimento resistivo, non comporterebbe alterazioni delle caratteristiche del trasduttore, ma è più frequente il caso in cui è localizzata in una regione ristretta dell'avvolgimento, con conseguente degrado della linearità del potenziometro.

### Potenzimetri a film metallico

L'elemento resistivo è realizzato depositando un sottile strato metallico su un supporto isolante piano tramite un processo di **sinterizzazione**, che consiste nel comprimere ad alta temperatura una polvere metallica conduttrice: l'effetto combinato della temperatura e della compressione genera legami di tipo molecolare molto resistenti fra le particelle della polvere e il supporto isolante, in modo da ottenere una guida resistiva.

Una volta depositata, la guida viene rifinita con tecnologia laser per migliorarne la linearità.

### Potenzimetri a plastica conduttiva

La plastica, anche se è un materiale isolante, può essere resa conduttiva mescolando ai suoi componenti elementi conduttivi a base di carbonio, in modo da ottenere superfici conduttrici molto resistenti all'abrasione meccanica.

Si ottengono così dispositivi con tempi di vita

molto lunghi, adatti a impieghi caratterizzati da molte corse del contatto sulla pista resistiva.

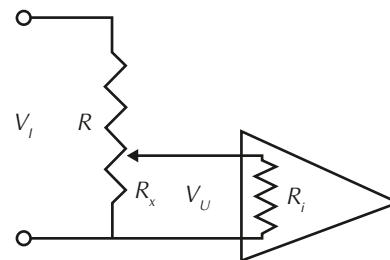
### Interfacciamento del potenziometro

La scelta della tensione di alimentazione  $V_I$  del potenziometro è molto importante.

Infatti, con un valore elevato di tensione si ha un buon rapporto segnale/rumore, ma anche un maggiore riscaldamento dell'elemento resistivo a causa della dissipazione per effetto Joule, che può generare variazioni della resistenza nominale del potenziometro.

Sono anche da tener presente eventuali errori di misura dovuti all'interfaccia elettrica, introdotti dalla variabilità della resistenza di uscita del potenziometro.

Infatti, con riferimento alla **figura C2.4**, la continua variazione di  $R_x$ , determinata dalla posizione del cursore, provoca variazioni del parallelo tra le resistenze  $R_x$  e  $R_i$ , dove  $R_i$  è l'impedenza di ingresso del blocco che segue il potenziometro (amplificatore di segnale).



**Figura C2.4** Schema elettrico dell'interfacciamento tra un potenziometro e un amplificatore di segnale.

Occorre infine considerare che la precisione e l'accuratezza del potenziometro dipendono dalla stabilità della tensione di alimentazione: è quindi necessario utilizzare un generatore che garantisca una stabilità di tensione idonea a garantire la precisione che si vuole ottenere nella misura.

### Caratteristiche del potenziometro

Di seguito sono riassunte le caratteristiche salienti del potenziometro.

- **Risoluzione:** nei potenziometri a filo dipende dal numero e dalla spaziatura delle spire; può essere anche migliore dello 0,1% e cresce all'aumentare della resistenza totale (numero maggiore di spire). Nei potenziometri a film la risoluzione è teoricamente infinita: in realtà è limitata dalla granularità residua del film e dalla qualità del contatto.

- **Errore di linearità:**  $< 0,1\%$
- **Resistenza totale:** da  $10^3$  a  $10^5 \Omega$  per il potenziometro a filo e da  $10^3$  a  $10^6 \Omega$  per quello a film.

### Considerazioni generali

Il potenziometro ha un prezzo piuttosto basso, ma presenta una affidabilità limitata a causa dell'inevitabile deterioramento del contatto strisciante, delle vibrazioni e shock meccanici; per tale ragione è scarsamente utilizzato nelle macchine automatiche.

È invece abbastanza utilizzato come generatore di set-point negli anelli di controllo; in questo caso al cursore, che viene azionato dall'operatore di impianto, è associata una scala numerata che indica approssimativamente il valore corrente del set-point.

### C2.3 Trasformatore lineare differenziale

Il trasformatore differenziale o LVTD (*Linear Variable Differential Transformer*) è uno dei dispositivi più utilizzati nelle applicazioni industriali per convertire spostamenti meccanici (generalmente compresi tra qualche micron e qualche centimetro) in un segnale elettrico.

È un traduttore passivo, in quanto richiede un generatore ausiliario che fornisca una tensione sinusoidale di eccitazione, il cui principio di funzionamento si basa sulla legge dell'induzione elettromagnetica.

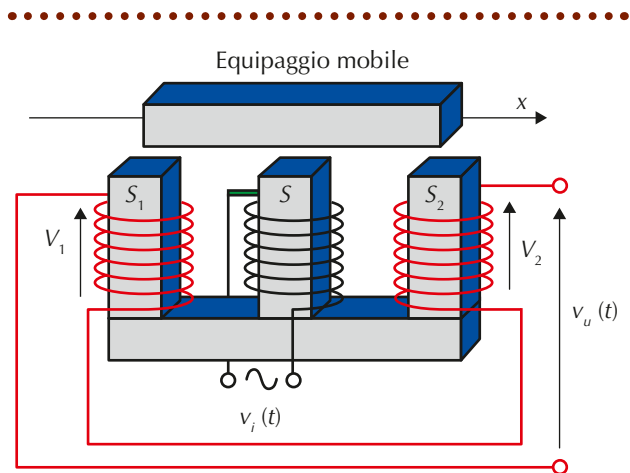
Fondamentalmente è costituito da:

- un avvolgimento primario  $S$  alimentato da una tensione alternata di ampiezza costante;
- due avvolgimenti secondari  $S_1$  e  $S_2$  connessi in controfase;
- un equipaggio mobile di materiale ferromagnetico, generalmente ferro-nichel [fig. C2.5].

Essendo i due avvolgimenti secondari in opposizione di fase, la tensione di uscita  $v_u(t)$  è data dalla differenza tra le tensioni  $v_1(t)$  e  $v_2(t)$  indotte in ciascuno di essi, cioè:

$$v_u(t) = v_1(t) - v_2(t) \quad (2.11)$$

Come si evince dalla **figura C2.5**, il trasformatore ha una struttura simmetrica: ponendo allora l'equipaggio mobile al centro del sistema, come indicato nella **figura C2.5**, l'accoppiamento tra il primario  $S$  e i due secondari ( $S_1$  e  $S_2$ ) è della stessa



**Figura C2.5** Trasformatore differenziale lineare.

entità, per cui le due tensioni assumono lo stesso valore assoluto, ma di segno opposto, e quindi il valore della tensione di uscita è nullo (posizione di zero).

Uno spostamento dell'equipaggio mobile rispetto alla posizione di zero modifica l'accoppiamento, aumentando quello di un secondario e diminuendo l'altro.

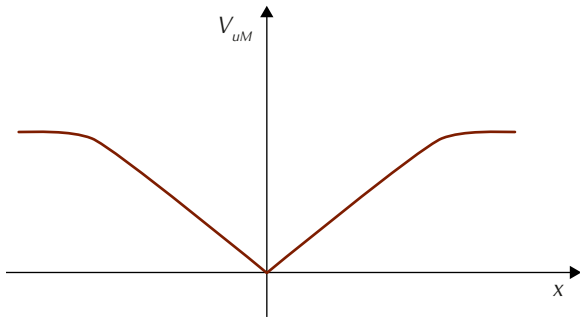
Ciò determina la variazione della tensione indotta sui due avvolgimenti secondari e quindi della tensione di uscita che assume il valore espresso dalla 2.11: tale variazione è funzione dello spostamento del nucleo e quindi della sua posizione. Se il circuito magnetico e l'intensità dell'eccitazione non introducono distorsioni nel segnale, la forma d'onda in uscita ha lo stesso andamento temporale di quella di eccitazione, cioè sinusoidale; l'ampiezza e la fase dipendono dall'entità dello spostamento dell'equipaggio mobile e dalla direzione dello spostamento stesso.

Infatti, nel caso lo spostamento del nucleo sia tale che risulti  $v_1(t) > v_2(t)$ , la tensione di uscita ha la stessa fase di quella d'ingresso poiché risulta  $v_u(t) = v_1(t) - v_2(t) > 0$ , mentre se  $v_2(t) > v_1(t)$  la tensione di uscita ha segno opposto al caso precedente poiché  $v_u(t) = v_1(t) - v_2(t) < 0$ , e quindi è in opposizione di fase rispetto alla tensione di eccitazione (per una grandezza sinusoidale il segno negativo indica una fase di  $180^\circ$ ).

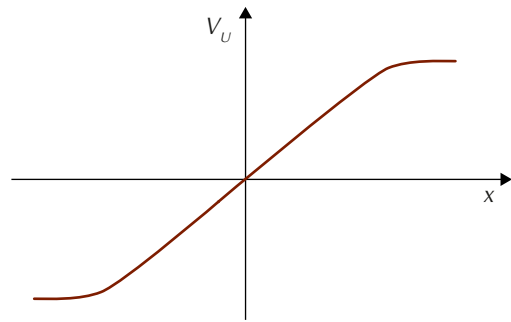
Pertanto, mentre l'ampiezza di  $v_u(t)$  fornisce l'entità dello spostamento, la fase indica la direzione in cui esso avviene.

La caratteristica di funzionamento di un LVDT è riportata nella **figura C2.6**: in ascissa è indicato il valore  $x$  dello spostamento, in ordinata l'ampiezza  $V_{uM}$  della tensione in uscita  $v_u(t)$ .

Si può osservare che l'ampiezza  $V_{uM}$  del segnale di uscita, che si annulla per  $x = 0$  (posizione di zero),



**Figura C2.6** Caratteristica ingresso-uscita del trasformatore lineare differenziale.



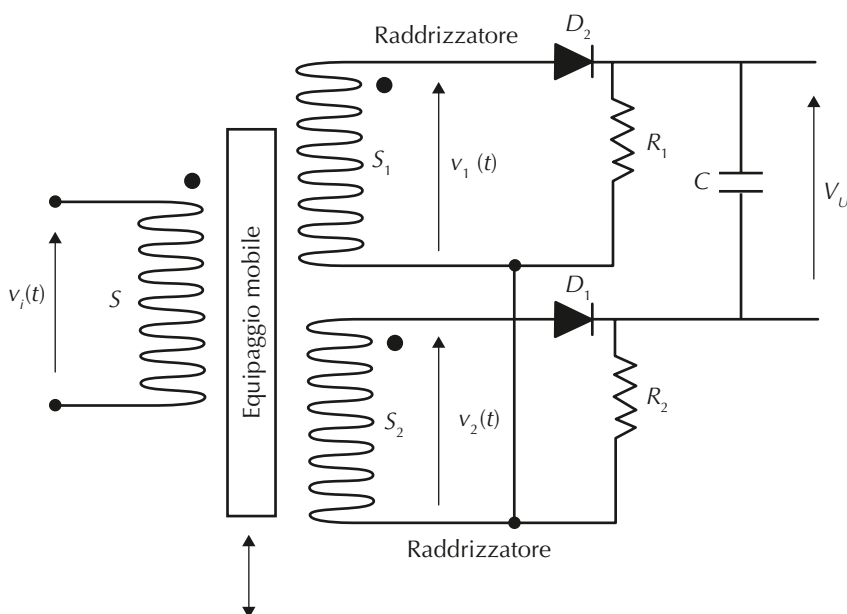
**Figura C2.8** Caratteristica ingresso-uscita del trasformatore lineare differenziale con raddrizzamento delle uscite.

non fornisce alcuna informazione sulla direzione dello spostamento in quanto i due rami della curva sono simmetrici rispetto all'asse delle ampiezze (si ha lo stesso valore di  $V_{uM}$  sia per spostamenti sia positivi che negativi rispetto alla posizione centrale). Ponendo all'uscita di ciascun avvolgimento secondario un raddrizzatore a una semionda (costituito da un diodo e una resistenza) seguito da un filtro capacitivo (condensatore C), come mostrato in **figura C2.7**, in uscita si ottiene una tensione continua  $V_U$  positiva o negativa a seconda dei valori assunti dalle tensioni sinusoidali  $v_1(t)$  e  $v_2(t)$ . La relazione ingresso-uscita del trasduttore, allora, si modifica come mostrato in **figura C2.8**: in questo caso la tensione di uscita continua  $V_U$  consente di determinare anche la direzione dello spostamento  $x$ , in quanto si inverte di segno a seguito a un'inversione dello spostamento  $x$  rispetto alla posizione centrale.

L'LVDT è un trasduttore robusto, affidabile e ripetibile, ma il costo è abbastanza elevato poiché richiede una circuiteria aggiuntiva.

Di seguito, sono infine riportate le caratteristiche salienti dell'LVDT:

- possibilità di effettuare misure di spostamento senza la presenza di contatti striscianti, come per esempio la misura di deformazioni dinamiche o di vibrazioni;
- un elevato tempo vita, determinato anch'esso dalla mancanza di contatti striscianti che determinano l'usura delle parti mobili;
- elevata risoluzione, in quanto l'accoppiamento magnetico consente di misurare in uscita anche variazioni di posizione del nucleo molto piccole;
- isolamento elettrico tra ingresso e uscita realizzato dall'accoppiamento magnetico.

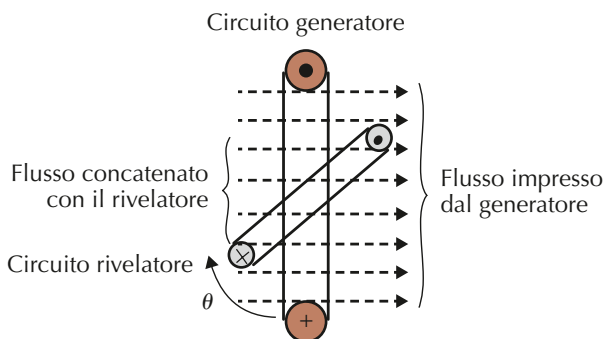


**Figura C2.7** Trasformatore lineare differenziale comprensivo dei circuiti di raddrizzamento e filtraggio.

## C2.4 Resolver

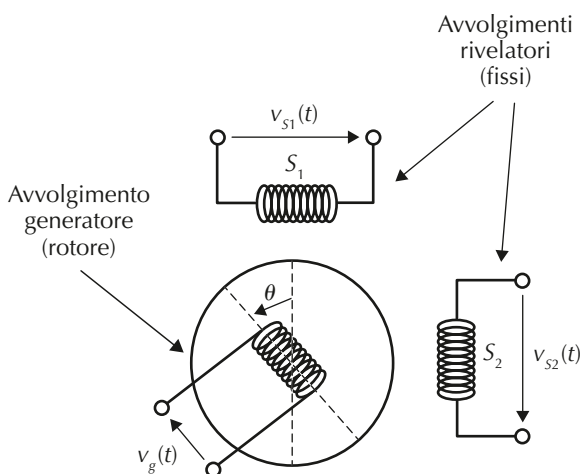
Il resolver è un trasduttore per la misura di spostamenti angolari, il cui principio di funzionamento si basa sulla variazione dell'accoppiamento tra due avvolgimenti elettrici ruotanti l'uno rispetto all'altro.

Sul primo di essi, detto avvolgimento o circuito **generatore**, viene applicata una tensione sinusoidale che genera un flusso magnetico, il quale, accoppiandosi con il secondo, detto avvolgimento o circuito **rivelatore**, crea una tensione indotta che dipende da quella applicata al primario e dalla posizione relativa (angolo  $\theta$ ) dei due avvolgimenti, come mostrato in **figura C2.9**.



**Figura C2.9** Principio di funzionamento di un resolver.

In **figura C2.10** è mostrato lo schema circuitale completo di un resolver, comprendente un avvolgimento generatore e due avvolgimenti rivelatori fissi posizionati in modo da avere i loro assi di simmetria sfasati di  $90^\circ$  elettrici; l'avvol-



**Figura C2.10** Schema circuitale del resolver.

gimento generatore (detto anche rotore) è in movimento rotatorio rispetto ai due fissi (detti anche statori).

Se al circuito generatore viene applicata una tensione  $v_g(t)$  sinusoidale, cioè:

$$v_g(t) = V_M \sin \omega t \quad (2.12)$$

in entrambi gli avvolgimenti rivelatori viene indotta una F.E.M. formata da due componenti: una di origine trasformatorica dovuta alle variazioni della tensione di eccitazione e l'altra dovuta al suo moto relativo rispetto agli avvolgimenti fissi.

Si può dimostrare che il valore di quest'ultima componente dipende, per entrambi gli avvolgimenti, dall'angolo  $\theta$  di rotazione individuato dalla posizione del generatore rispetto a un riferimento iniziale.

Infatti, assumendo come riferimento iniziale ( $\theta = 0$ ) l'allineamento del generatore con l'avvolgimento fisso  $S_2$  (generatore parallelo ad  $S_2$ ), le espressioni delle tensioni ai morsetti dei due circuiti secondari, valgono:

$$v_{S1}(t) = K v_g(t) \cos \theta = K (V_M \sin \omega t) \cos \theta = (2.13) \\ = (K V_M \cos \theta) \sin \omega t$$

$$v_{S2}(t) = K v_g(t) \sin \theta = K (V_M \sin \omega t) \sin \theta = (2.14) \\ = (K V_M \sin \theta) \sin \omega t$$

dove  $K$  è una costante di proporzionalità dipendente da parametri costruttivi del trasduttore che tiene conto della componente trasformatorica.

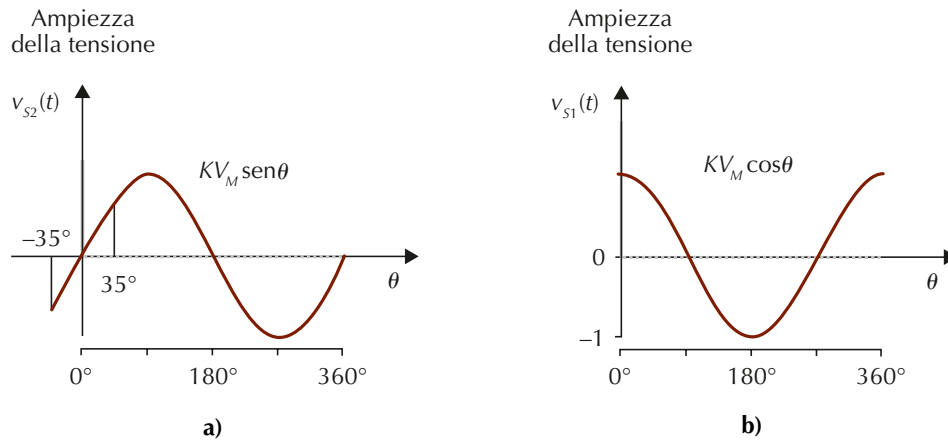
In sostanza il trasduttore fornisce in uscita una coppia di tensioni alternate caratterizzate da:

- pulsazioni uguali a quella del segnale applicato al circuito generatore;
- ampiezze dipendenti dalla posizione del rotore e in quadratura reciproca ( $K V_M \cos \theta$  per  $v_{S1}(t)$  e  $K V_M \sin \theta$  per  $v_{S2}(t)$  **[fig.C2.11]**;
- fasi concordi rispetto alla tensione applicata al primario.

Dal grafico **[fig. C2.11a]**, si può osservare che in prossimità dello 0 l'ampiezza della tensione  $v_{S2}(t)$  assume un andamento quasi lineare: al riguardo si può dimostrare che, se l'intervallo angolare è compreso tra  $-35^\circ$  e  $+35^\circ$ , la funzione  $\sin \theta$  si approssima con una retta e l'errore percentuale relativo risulta minore dell'1%; all'interno di tale campo, pertanto, l'ampiezza della tensione di uscita  $v_{S2}(t)$  può essere considerata proporzionale all'angolo  $\theta$ .

Il resolver è un trasduttore di posizione affidabi-





**Figura C2.11** Andamento delle ampiezze delle tensioni  $v_{s1}(t)$  e  $v_{s2}(t)$  in funzione dell'angolo  $\theta$ .

le, preciso e non molto costoso, la cui principale applicazione è il rilievo della posizione del rotore negli azionamenti con motori elettrici. La robustezza, la tecnologia elettromagnetica simile a quella di un motore e la relativa insensibilità alle variazioni di temperatura, lo rendono idoneo a essere integrato all'interno del motore, favorendo così la compattezza e la riduzione dei costi.

### C2.5 Encoder

L'encoder è un trasduttore che misura spostamenti angolari fornendo in uscita la posizione del suo asse rotante sotto forma di segnale elettrico digitale. Gli encoder possono essere di due tipi:

- **incrementali**, quando i segnali d'uscita dipendono sia dallo spostamento sia dalla posizione precedente;

- **assoluti**, quando a ogni posizione dell'albero corrisponde un valore ben definito del segnale di uscita.

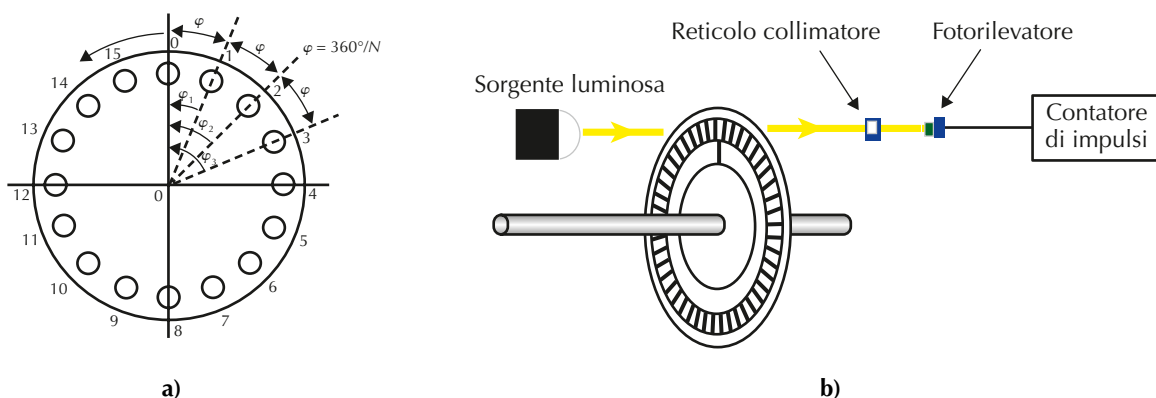
#### Encoder incrementale

Rileva le variazioni rispetto a una posizione assunta come riferimento.

Nella sua forma più semplice è costituito da un disco di materiale plastico, sul quale sono ricavati dei fori attraverso i quali passa un fascio luminoso [fig. C2.12a]; la distanza tra due fori è detta **passo** dell'encoder.

Il disco viene calettato sull'albero dell'organo di cui si vuole rilevare lo spostamento angolare: il disco pertanto ha la stessa rotazione dell'albero.

In corrispondenza dei fori viene applicato un dispositivo fotoemittitore (LED) e nella parte opposta un dispositivo fotorilevatore, costituito da un reticolo collimatore (che ha lo scopo di fo-



**Figura C2.12** Schema di principio di un encoder incrementale.

calizzare il fascio luminoso entro i fori) e da un sistema di fototransistor [fig. C2.12b].

Quando l'encoder si trova nella posizione iniziale, il flusso luminoso, attraversando il foro 0, attiva l'uscita del fotorilevatore che si porta a livello alto rimanendo in tale stato finché il fascio luminoso non viene interrotto.

Appena il disco inizia a ruotare, il fascio luminoso si interrompe: il fotorilevatore viene diseccitato e quindi la sua uscita si porta al livello basso, rimanendo in tale stato fino a quando il foro 1 viene a trovarsi nella posizione occupata precedentemente dal foro 0; in questa situazione il fascio luminoso può attraversare il foro 1 eccitando nuovamente il fotorilevatore, la cui uscita torna nuovamente alta.

È da osservare che lo spostamento angolare relativo al foro 1, risulta pari a:

$$\frac{360^\circ}{\text{Numero fori disco}}$$

Proseguendo nella rotazione, il disco interrompe nuovamente il fascio luminoso diseccitando il fotorilevatore, la cui uscita ritorna bassa: tale processo si ripete per tutte le posizioni angolari in cui il disco è stato diviso e quindi il fotorilevatore genera una serie di impulsi elettrici, ciascuno dei quali rappresenta una frazione predeterminata di un giro completo dell'albero.

Se, per esempio, il disco ha quattro fori, un giro completo di  $360^\circ$  genera 4 impulsi: un impulso, pertanto, rappresenta una rotazione di  $90^\circ$ .

Poiché gli impulsi sono tutti uguali, l'angolo si può determinare conteggiando il numero di impulsi/giro; in altre parole il totale degli impulsi dopo un certo tempo costituisce il numero degli incrementi angolari generati dalla rotazione dell'organo a cui il disco è calettato.

Il numero degli impulsi può essere conteggiato



Figura C2.13 Struttura costruttiva di un encoder incrementale.

collegando il fotorivelatore a un apposito contatore digitale.

Non essendoci una relazione tra posizione angolare e configurazione dei fori, l'encoder incrementale non può fornire la posizione assoluta.

Nella figura C2.13 è infine indicata la struttura di un encoder incrementale.

### Encoder assoluto

L'encoder assoluto è fondamentalmente costituito da un disco suddiviso in  $n$  corone circolari e in  $2^n$  settori (per esempio, se le corone sono 4, i settori risultano  $2^4 = 16$ ) e quindi ogni settore è costituito da  $n$  areole, le quali possono essere rese opache o trasparenti alla luce.

Premesso che a quelle opacizzate è associato uno "0" logico e a quelle trasparenti un "1" logico, ciascun settore, al quale corrisponde una determinata posizione angolare, viene codificato con una parola ad  $n$  bit (il bit più significativo è rappresentato dall'areola più esterna, quello meno significativo su quella più interna).

Le areole opache e trasparenti si alternano in modo da codificare la posizione corrente secondo una determinata configurazione binaria.

Il disco è posto tra una fonte di luce (diodi luminosi LED) e una sequenza di  $n$  fotorilevatori, come mostrato in figura C2.14.

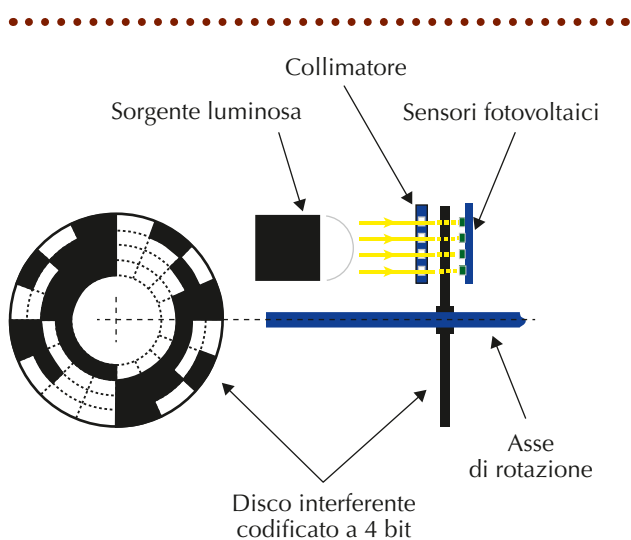
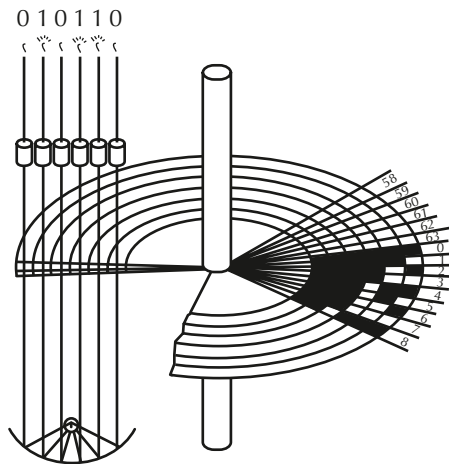


Figura C2.14 Schema di principio di un encoder assoluto.

In base alla sequenza delle areole opacizzate e trasparenti, la luce prodotta dai LED raggiunge o meno i fotorilevatori, dando luogo a una sequenza binaria che identifica la posizione angolare di ciascun settore.

Per esempio, in un encoder assoluto a 6 bit (6 corone circolari) e quindi  $2^6 = 64$  settori, si possono



**Figura C2.15** Schema di principio di un encoder assoluto a 6 bit.

distinguere 64 posizioni identificate con sequenze binarie a 6 bit [fig. C2.15].

Il disco dell'encoder può rappresentare il codice binario naturale, nel quale possono avvenire cambiamenti di stato di più bit contemporaneamente, oppure il codice Gray [tab. C2.1], che prevede il passaggio al successivo modificando un solo bit: questa caratteristica (detta a cambio 1) semplifica e rende meno soggette a errori le operazioni dei dispositivi elettronici che processano le informazioni organizzate in sequenze.

**Tabella C2.1** Codifica binaria e Gray dei primi 15 numeri decimali

Numero decimale	Codice binario	Codice Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

## CONTENUTI

- C3.1 Introduzione
- C3.2 L'encoder incrementale come trasduttore di velocità
- C3.3 Dinamo tachimetrica



Particolari costruttivi della dinamo

# TRASDUTTORI DI VELOCITÀ

## C3.1 Introduzione

La misura della velocità è di fondamentale importanza in molti processi industriali e può essere effettuata sia con dispositivi analogici che digitali, i più importanti dei quali sono:

- l'**encoder incrementale** (digitale);
- la **dinamo tachimetrica** (analogico).

## C3.2 L'encoder incrementale come trasduttore di velocità

L'encoder incrementale è generalmente usato per misurare la velocità di rotazione di un albero motore; a tal fine è necessario definire un intervallo tempo  $T$  (in secondi) e misurare il numero  $m$  di impulsi che vengono generati in tale intervallo. La velocità di rotazione, espressa in numero di giri al minuto, è data dalla seguente relazione:

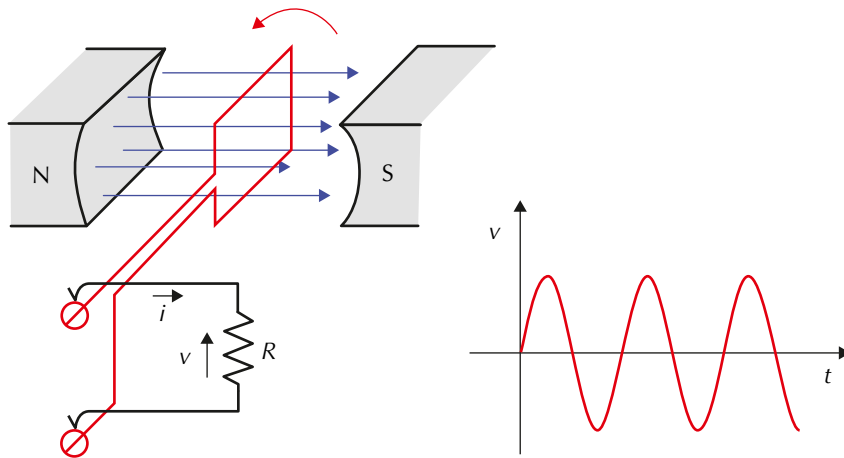
$$n = \frac{m \cdot 60}{T \cdot R} \quad (3.1)$$

in cui:

- $n$  è la velocità in giri/minuto;
- $m$  è il numero impulsi generati nell'intervallo  $T$  espresso in secondi;
- $R$  è risoluzione dell'encoder (impulsi/giro).

Il segnale digitale di uscita dell'encoder è idealmente rappresentato da una sequenza di impulsi a onda quadra.

Tuttavia, soprattutto nel caso di elevate velocità di rotazione, l'onda quadra subisce distorsioni: per tale motivo, in genere, gli encoder sono dotati di



**Figura C3.1** Principio di funzionamento della dinamo.

un circuito elettronico di correzione, che consente ricostruire l'onda quadra (molto importante per la corretta elaborazione del segnale).

Il segnale impulsivo ricostruito viene trasformato, tramite un convertitore frequenza/tensione, in una tensione continua proporzionale alla velocità di rotazione; applicando all'ingresso del convertitore un segnale di tipo impulsivo, alla sua uscita si ottiene perciò una tensione avente ampiezza direttamente proporzionale alla frequenza del segnale d'ingresso. La qualità della misura dipende dalla risoluzione dell'encoder; per ottenere una buona qualità occorre disporre di encoder aventi risoluzioni comprese tra 100 e 600 impulsi a giro.

### C3.3 Dinamo tachimetrica

La dinamo tachimetrica è un generatore che fornisce una tensione continua proporzionale alla velocità di rotazione del suo rotore.

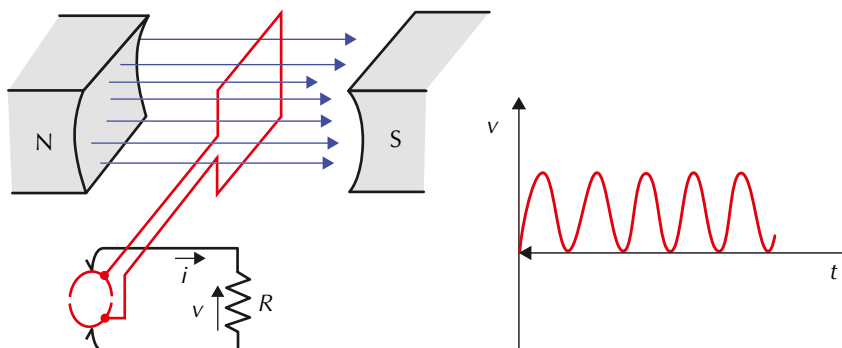
Come tutti i generatori di corrente che si basano su principi elettromagnetici, è fondamentalmente costituita da un avvolgimento mobile, detto **indotto**, posto in rotazione all'interno di un campo

magnetico generato da un magnete permanente, detto **induttore**.

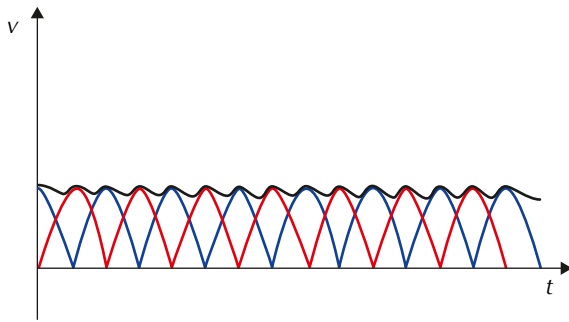
Nella **figura C3.1** è mostrato il principio di funzionamento di una dinamo, nel quale per semplicità l'indotto è costituito da una semplice spira immersa nel campo magnetico di induzione  $B$  prodotto da un magnete permanente (costituito dalle espansioni polari N e S).

La tensione generata, prelevata tramite due lamine poste a contatto diretto con altrettanti anelli metallici a cui sono collegati gli estremi della spira, è applicata a un carico esterno rappresentato dalla resistenza  $R$ . Quando la spira è perpendicolare alle linee di forza del campo  $B$ , il flusso magnetico  $\Phi$  assume il massimo valore; man che la spira ruota, diminuisce la superficie che si concatena con  $B$  e quindi  $\Phi$  decresce fino ad annullarsi quando la spira si dispone parallelamente alle linee di forza di  $B$ .

Quando la spira è di nuovo perpendicolare al campo  $B$ , il flusso  $\Phi$  si inverte e assume ancora il massimo valore (che questa volta però è negativo); infine, quando la spira assume di nuovo la posizione parallela alle linee di forza di  $B$ , il flusso si annulla: l'andamento temporale del flusso magnetico risulta allora di tipo sinusoidale.



**Figura C3.2** Inversione della semionda negativa.



**Figura C3.3** Tensione generata dalla dinamo con due soli avvolgimenti (spire).

Ne consegue che, per la legge dell'induzione elettromagnetica, la tensione  $v$  indotta ai capi della spira e quindi la corrente  $i$  assorbita dal carico  $R$ , hanno anch'esse un andamento di tipo sinusoidale [fig. C3.1]. Se i due anelli della figura C3.1 sono sostituiti con due semi-anelli isolati fra loro, come mostrato nella figura C3.2, a ogni mezzo giro i capi della spira sono alternativamente scambiati e quindi la F.E.M. indotta si mantiene dello stesso segno.

In altre parole, la F.E.M.  $v$  indotta e quindi la corrente  $i$  assorbita dal carico  $R$  sono variabili, ma unidirezionali: i due semianelli fungono pertanto da raddrizzatore meccanico, cioè invertono la parte negativa della semionda.

I due semianelli, sono la base di un organo meccanico denominato **collettore**.

Nelle dinamo reali la spira viene sostituita da una serie di avvolgimenti di spire detti **matasse**, le quali sono poste in apposite gole eseguite sulla parte rotativa, denominata **rotore**.

Il collettore fa capo alle estremità di ogni avvolgimento e la corrente di uscita viene prelevata tramite spazzole in carbone mantenute a un'adeguata pressione mediante apposite molle.

Poiché ogni avvolgimento equivale a una spira, sul

collettore si ottiene la somma delle tensioni generate da ciascuno di essi, ottenendo così una forma d'onda simile a una grandezza continua, come si desume dalla figura C3.3, riferita a due avvolgimenti. L'induttore, denominato anche **statore** (essendo la parte fissa), può essere un magnete permanente oppure un elettromagnete eccitato dalla stessa corrente continua generata dalla dinamo: in tal caso la dinamo è definita "autoeccitata".

La figura C3.4 mostra la struttura del rotore di una dinamo.

Le spazzole, tenute in pressione sul collettore che ruota con continuità, sono soggette a usura che con il tempo può determinare criticità sul contatto: il programma di manutenzione di una dinamo, pertanto, deve prevederne periodicamente il controllo e l'eventuale sostituzione.

Si può dimostrare che la tensione  $E$  generata dalla dinamo dipende dalla velocità di rotazione del rotore (espressa in numero di giri  $n$  al minuto) secondo la relazione:

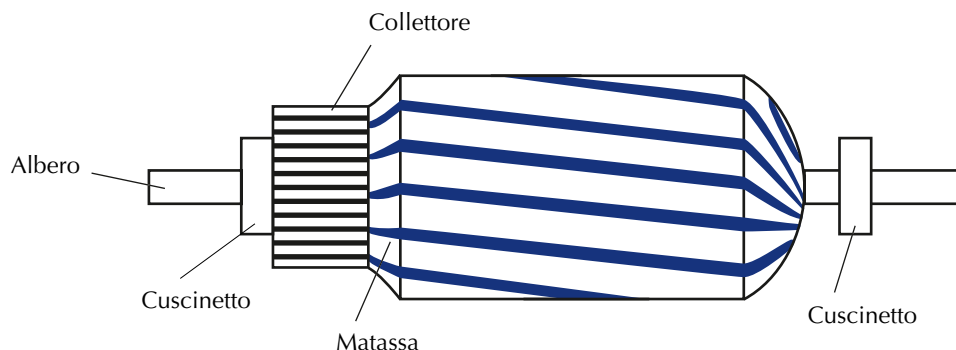
$$E = K_d \Phi n \quad (3.2)$$

dove:

- $K_d$  è una costante di proporzionalità che dipende dalle caratteristiche costruttive della dinamo;
- $\Phi$  è il flusso magnetico (generato dal magnete permanente);

Essendo  $K_d$  e  $\Phi$  costanti, la tensione generata è legata alla velocità di rotazione da una relazione lineare (cioè al numero di giri  $n$  al minuto detto rotore).

In considerazione di quanto sopra detto, collegando il rotore della dinamo all'albero di un organo meccanico in rotazione e misurando la tensione da essa generata, è possibile risalire alla velocità di rotazione.



**Figura C3.4** Struttura del rotore di una dinamo.

## CONTENUTI

- C4.1 Introduzione
- C4.2 Estensimetro
- C4.3 Cella di carico
- C4.4 Trasduttori di pressione
- C4.5 Trasduttori di accelerazione



Il ponte di Wheatstone

# TRASDUTTORI DI DEFORMAZIONE, FORZA E PRESSIONE

## C4.1 Introduzione

In genere la misura di una forza è eseguita misurando le deformazioni che produce sull'elemento al quale è applicata.

Un classico esempio è la bilancia pesa persone, costituita da un piatto a cui è collegata una molla: la forza peso della persona, applicata sul piatto, deforma una molla collegata a un ago indicatore, il cui spostamento su una scala graduata determina la misura del peso.

## C4.2 Estensimetro

L'estensimetro, detto anche *strain gauge*, è un trasduttore che rileva le deformazioni meccaniche subite da un corpo solido quando è sollecitato da una forza, trasformandole in variazioni della sua resistenza elettrica.

### Principio di funzionamento

Consideriamo un corpo solido di sezione costante, al quale viene applicata una forza  $F$  crescente con gradualità e tendente ad allungarlo (forza di trazione) fino a provocarne la rottura.

Per ogni valore della forza  $F$  si misura il corrispondente allungamento  $\Delta l$  e si riportano i valori su un diagramma del tipo indicato nella **figura C4.1**.

Si può osservare che il diagramma presenta un primo tratto  $OA$  rettilineo, caratterizzato da una proporzionalità diretta tra la forza  $F$  e i corrispondenti allungamenti: in tale tratto il corpo si **deforma elasticamente**, cioè se si elimina la forza, l'allungamento si annulla.

Si può pertanto definire **elasticità**, la proprietà della materia in virtù della quale i corpi solidi de-

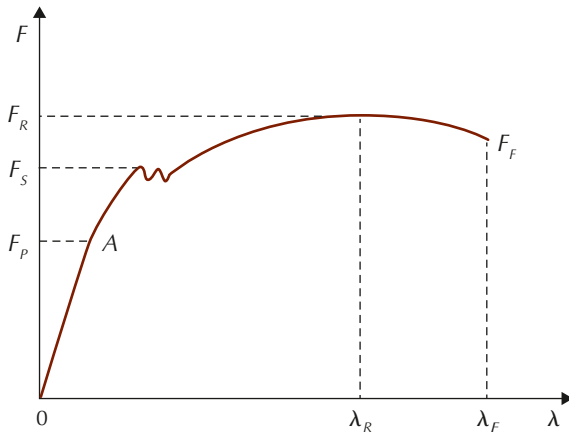


Figura C4.1 Diagramma forza-allungamento.

formati per effetto di forze esterne riacquistano la forma e le dimensioni originarie al cessare di queste.

Il tratto rettilineo  $0A$  corrisponde al campo di validità della **legge di Hooke**, secondo la quale la forza  $F$  è proporzionale all'allungamento  $\Delta l$  secondo la relazione:

$$F = E \cdot S \frac{\Delta l}{l} \quad (4.1)$$

dove  $l$  ed  $S$  rappresentano rispettivamente la lunghezza iniziale (cioè prima dell'applicazione di  $F$ ) e l'area della sezione trasversale del corpo ed  $E$  è il modulo di elasticità longitudinale, detto **modulo di Young**.

Il carico  $F_p$ , corrispondente al punto  $A$ , al di sopra del quale non è più valida la legge di Hooke, è detto **carico al limite di proporzionalità**: superando tale limite, all'interno del corpo si verificano piccoli scorrimenti che provocano deformazioni permanenti.

Aumentando il carico fino al valore  $F_s$ , detto **carico di snervamento**, nel corpo si verificano i primi sfaldamenti con parziale rottura della struttura interna.

Continuando l'esame del diagramma si osserva che la sollecitazione aumenta fino a un valore massimo  $F_R$ , per poi scendere al valore  $F_F$  in corrispondenza del quale avviene la rottura.

Consideriamo ora un filo conduttore di sezione cilindrica, avente lunghezza  $l$  e sezione  $S$ , sottoposto a una forza  $F$  di trazione, avente intensità tale da produrre un allungamento  $\Delta l$  elastico, per la quale vale perciò la legge di Hooke.

Per la 4.1, allora,  $\Delta l$  vale:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{S \cdot E} \quad (4.2)$$

Poiché la resistenza elettrica  $R$  del filo è espressa dalla relazione (volume 2):

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4.3)$$

se esso subisce un allungamento  $\Delta l$  la sua resistenza  $R$  varia in funzione allungamento stesso: il funzionamento dell'**estensimetro** si basa proprio su questo principio.

Fondamentalmente l'estensimetro è costituito da una griglia formata di un sottilissimo filo metallico (solitamente costantana) rigidamente solidale a un supporto di materiale plastico [fig. C4.2], il quale viene incollato sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni (generalmente utilizzando collanti istantanei come il cianoacrilato). Il filo, che segue le deformazioni della superficie su cui è incollato, si allunga e si accorcia insieme a questa generando la variazione della sua resistenza elettrica.

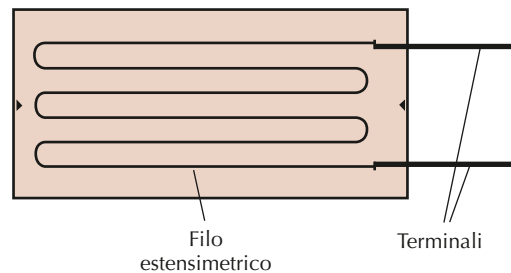


Figura C4.2 Struttura base di un estensimetro.

### Acquisizione del segnale estensimetrico

Poiché in genere le deformazioni meccaniche rilevate dall'estensimetro hanno entità modesta, la corrispondente variazione della resistenza elettrica è talmente piccola da renderne difficoltosa la rilevazione.

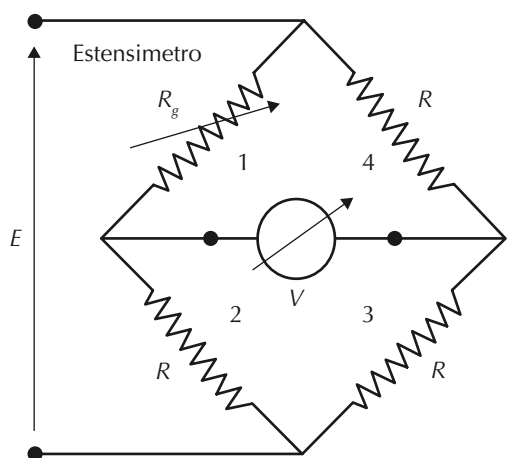
Per tale ragione, si utilizzano sistemi di rivelazione a elevata sensibilità, il più importante dei quali è il ponte di Wheatstone [fig. C4.3], costituito da quattro resistenze connesse in modo da realizzare una maglia con quattro lati e quattro vertici.

Tra due vertici opposti viene collegata la sorgente di alimentazione continua  $E$ , mentre tra gli altri due viene inserito il voltmetro  $V$ .

In base alla configurazione di figura C4.3, è possibile definire le seguenti parti del ponte:

- i **lati**, corrispondenti ai quattro rami costituiti dai resistori;





**Figura C4.3** Ponte di Wheatstone.

- le **diagonali**, corrispondenti ai rami che contengono la sorgente di alimentazione e il voltmetro; in particolare, sono denominate **diagonale di alimentazione** quella relativa alla sorgente di alimentazione e **diagonale di rivelazione** quella in cui è inserito il voltmetro.

A uno qualsiasi dei quattro lati è collegato l'estensimetro (avente resistenza  $R_g$ ), mentre negli altri sono inserite tre resistenze  $R$  di uguale valore.

Il ponte è in equilibrio quando la tensione ai capi della diagonale di rivelazione è nulla.

Si può dimostrare che tale condizione si verifica quando il prodotto delle resistenze dei due lati opposti eguaglia il prodotto delle altre due: nel caso della **figura C4.3** quando tutte le quattro le resistenze hanno lo stesso valore.

Ciò significa che il valore delle tre resistenze  $R$  deve essere uguale a quello di  $R_g$  dell'estensimetro in assenza di deformazione (resistenza a riposo).

Quando il corpo a cui è applicato l'estensimetro subisce una forza deformante, la resistenza  $R_g$  varia e il ponte si sbilancia: il voltmetro, allora, rivela una tensione non più nulla, il cui valore dipende dall'entità della deformazione subita dal corpo.

Viene così generato un segnale elettrico che dipende dalla deformazione meccanica del corpo.

### C4.3 Cella di carico

La cella di carico è un trasduttore che trasforma una forza, tipicamente quella peso, in un segnale elettrico (fondamentalmente è una bilancia elettronica).

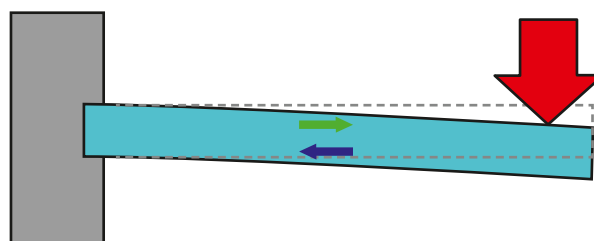
A seconda del principio fisico che utilizzano, le celle di carico possono essere suddivise in:

- celle di carico estensimetriche;
- celle di carico piezoelettriche;
- celle di cariche induttive.

#### Cella di carico estensimetrica

Utilizza la proprietà elastica di un corpo metallico opportunamente sagomato il quale, come visto nel paragrafo precedente, se sottoposto a una forza  $F$  subisce una deformazione.

Per comprenderne il funzionamento si consideri la **figura C4.4**, nella quale è rappresentata una barretta metallica con un lato incastrato a un supporto, mentre sull'altro è applicato un peso (freccia rossa).

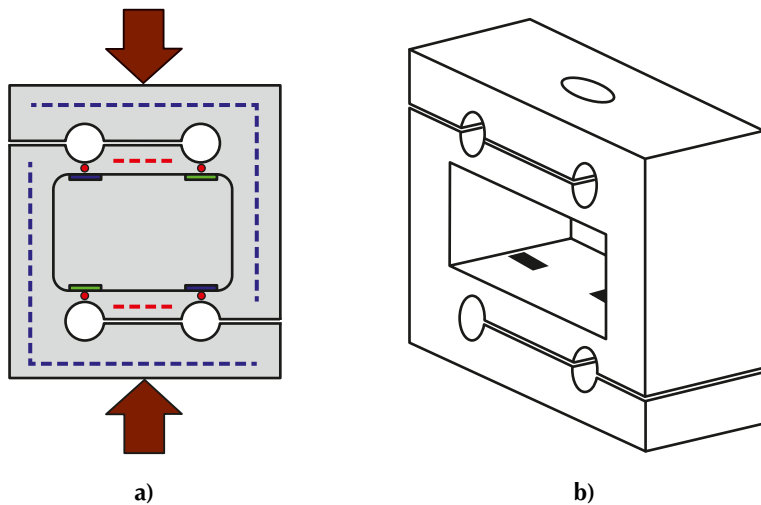


**Figura C4.4** Barretta metallica con un lato incastrato.

Si può osservare che la flessione genera una trazione sulla superficie superiore della barra (freccia verde), e una compressione su quella inferiore (freccia blu): lo sviluppo di queste due forze (trazione e compressione) è alla base del funzionamento delle celle di carico estensimetriche, di cui nella **figura C4.5** è indicato lo schema di principio. Questo tipo di cella, detta "a S", è costituita da due mensole ad "L" (tratteggiate in blu) vincolate da due aste orizzontali (tratteggiate in rosso). Sottoponendo la cella a una pressione, essendo la struttura rigida, gli unici punti che possono flettersi sono quelli marcati in rosso, in quanto hanno uno spessore più sottile; il restringimento generato dai fori agisce come una sorta di "cerniera" flessibile.

Agendo sul diametro dei fori, cioè sullo spessore delle "cerniere", è possibile tarare la cella per varie portate: più grandi sono i fori, infatti, più sottili sono i punti di flessione e quindi minore sarà la portata della cella, con conseguente aumento della sensibilità e della precisione.

Applicando un estensimetro in corrispondenza di ciascuno di tali punti, è possibile rilevare le deformazioni che si generano intorno a essi; essendo 4 i punti sensibili alle deformazioni, devono essere applicati 4 estensimetri, rappresentati dalle strisce verdi e blu.



**Figura C4.5** Struttura di una cella di carico: a) sezione trasversale; b) visione prospettica.

L'estensimetro nell'angolo in alto a sinistra (colorato in blu) è sottoposto a compressione, quello in alto a destra (colorato in verde) a trazione; per gli estensimetri posti in basso vale lo stesso principio. Si può dimostrare che la deformazione meccanica  $D$  della cella è data dall'espressione:

$$D = K \frac{F / A_0}{E} \quad (4.4)$$

dove:

- $K$  è una costante di proporzionalità che dipende dalla geometria del sistema;
- $E$  è il modulo di elasticità di Young del materiale che costituisce la cella;
- $F$  è la forza applicata.
- $A_0$  è l'area delle superficie della cella sulla quale agisce la forza  $F$ .

Per aumentare la sensibilità della cella, gli estensimetri possono essere disposti in modo tale che due siano sollecitati in trazione e due a compressione: così facendo è sufficiente una piccola deformazione della cella per ottenere un apprezzabile valore della tensione in uscita.

### Cella di carico piezoelettrica

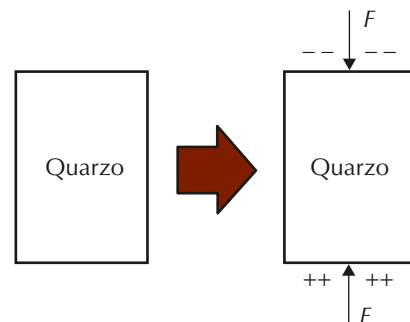
Un'altra possibile realizzazione della cella di carico è quella che utilizza l'**effetto piezoelettrico**, fenomeno per cui alcuni corpi cristallini, detti **cristalli piezoelettrici**, si polarizzano elettricamente se sottoposti a una deformazione meccanica di natura elastica (effetto piezoelettrico diretto) e, viceversa, si deformano elasticamente sotto l'azione di un campo elettrico (effetto piezoelettrico inverso o effetto **Lippmann**).

Il segno della polarizzazione si inverte a seconda del tipo di deformazione (compressione o trazione). La polarizzazione elettrica segue l'azione meccanica (e viceversa) con un ritardo brevissimo dell'ordine di  $10^{-8}$  s: una risposta così veloce rende i cristalli piezoelettrici particolarmente adatti a realizzare trasduttori elettromeccanici ed elettroacustici ad alta fedeltà (per esempio, accelerometri e microfoni).

Il fenomeno della piezoelettricità dipende dalle caratteristiche della struttura cristallina, nella quale sono presenti numerosi dipoli elettrici, il cui effetto totale si annulla se la struttura non è sottoposta a sollecitazioni esterne; in presenza di sollecitazioni, invece, i dipoli spostano il baricentro delle cariche positive rispetto a quello delle cariche negative trasformando il cristallo in un dipolo elettrico.

L'effetto piezoelettrico può essere rappresentato da uno schema di principio del tipo indicato nella **figura C4.6**.

Si può osservare che le superfici del cristallo, quando sono soggette a una sollecitazione ester-



**Figura C4.6** Schematizzazione dell'effetto piezoelettrico.

na (forza  $F$ ), si comportano come le armature di un condensatore, sulle quali viene accumulata una quantità di carica  $Q$ .

Si può dimostrare che tale quantità di carica vale:

$$Q = SKF \quad (4.5)$$

dove  $S$  è la superficie delle facce del quarzo e  $K$  la sua **costante piezoelettrica**.

I quarzi piezoelettrici presentano numerosi vantaggi (basso costo, piccole dimensioni, peso ridotto, elevata sensibilità), ma la sensibilità varia con la temperatura e non possono essere impiegati in climi umidi.

Nella **figura C4.7** è mostrata l'immagine ingrandita di un cristallo di quarzo.

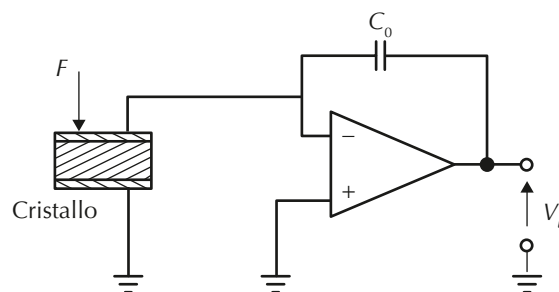


**Figura C4.7** Cristallo di quarzo ingrandito.

Da quanto fino a ora detto, si evince che l'effetto piezoelettrico può essere utilizzato nelle celle di carico: infatti, poiché l'applicazione di una forza-peso  $F$  sulle superficie di un cristallo piezoelettrico genera un accumulo di carica e quindi una tensione proporzionale alla forza stessa, misurando quest'ultima è possibile determinare il valore di  $F$ . Essendo il cristallo paragonabile a una capacità  $C$ , la tensione  $V$  ai suoi capi vale:

$$V_u = \frac{Q}{C} \quad (4.6)$$

Purtroppo la capacità del cristallo varia in funzione della forza applicata e quindi non è nota a priori: questo inconveniente può essere superato "trasferendo" la carica  $Q$  su una capacità nota e stabile, utilizzando un **amplificatore di carica**, il cui schema di principio è mostrato in **figura C4.8**. Poiché la tensione ai capi del cristallo, e quindi anche la carica, devono annullarsi per il principio di corto circuito virtuale dell'amplificatore operazionale, sul condensatore  $C_0$  (di valore noto e fisso) si accumula una quantità di carica  $Q$  uguale



**Figura C4.8** Schema di principio di un amplificatore di carica.

a quella che si genera nel quarzo; pertanto, la tensione di uscita  $V_u$  risulta:

$$V_u = \frac{Q}{C_0} \quad (4.7)$$

Per la 4.5 la 4.7 diventa:

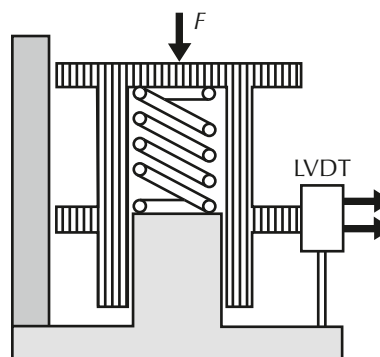
$$V_u = \frac{Q}{C_0} = \frac{SKF}{C_0} \quad (4.8)$$

La tensione  $V_u$  è quindi proporzionale alla forza  $F$ . È da osservare che l'amplificatore di carica è molto delicato dal punto di vista costruttivo: infatti, essendo la quantità di carica  $Q$  generata dal quarzo molto piccola, occorre che le perdite ai suoi terminali d'ingresso, dovute alla resistenza di ingresso (non infinita), siano più piccole possibili.

### Cella di carico induttiva

Lo schema di principio di questa tipologia di cella è del tipo indicato in **figura C4.9**.

La forza  $F$  applicata alla piattaforma comprime la molla, la quale sposta di una quantità  $x$  l'equipaggio mobile del LVDT, che pertanto fornisce un'uscita proporzionale a  $x$  e quindi alla forza.



**Figura C4.9** Schema di principio di una cella di carico induttiva.

## C4.4 Trasduttori di pressione

Con la denominazione “trasduttori di pressione” sono indicati quei dispositivi di misura che convertono la pressione (forza per unità di area) di un fluido in una grandezza elettrica.

La tecnica generalmente utilizzata in questi dispositivi è per molti aspetti simile alla misura delle forze: anche in questo, infatti, viene rilevata la deformazione subita da un’interfaccia meccanica a opera della pressione esercitata dal fluido.

Le più comuni interfacce meccaniche utilizzate nei trasduttori di pressione sono:

- capsule piatte a diaframma;
- tubi di Bourbon.

### Trasduttori di pressione estensimetrici

In questi dispositivi l’interfaccia meccanica è costituita da un “diaframma” (tipicamente in acciaio inox) che fa da basamento a un estensimetro.

Per effetto della pressione del fluido, il diaframma subisce una “flessione” trasdotta dall’estensimetro in un segnale elettrico [fig. C4.10].

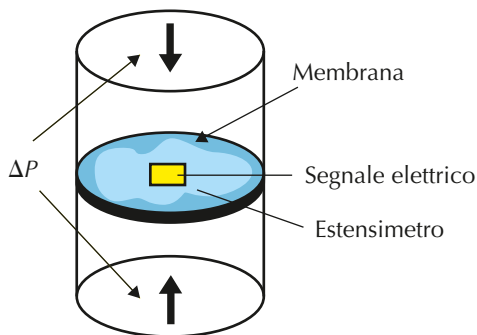


Figura C4.10 Trasduttori di pressione con interfaccia a diaframma.

Tali trasduttori sono caratterizzati da un basso costo, elevata prontezza, accuratezza e stabilità rispetto alle variazioni di temperatura (compensate da opportune strutture resistive a ponte integrate all’interno del “case” del dispositivo).

### Trasduttori di pressione a LVDT

Sono costituiti fondamentalmente da un tubo Bourdon, un sottile tubo metallico a sezione ellittica, avente forma elicoidale [fig. C4.11].

Un’estremità del tubo è collegata a un rubinetto, l’altra è chiusa ed è libera di muoversi. Immettendo, attraverso il rubinetto, un fluido a pressione all’interno del tubo, quest’ultimo tende a esten-

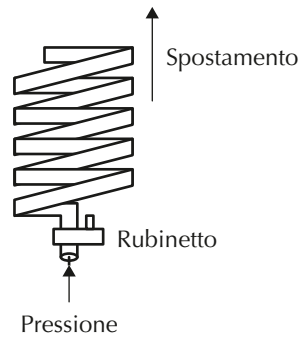


Figura C4.11 Tubo di Bourdon.

dersi provocando lo spostamento  $x$  dell’estremo libero, il quale è rilevato tramite un LVDT che lo converte in un segnale elettrico a esso proporzionale.

### Trasduttori di pressione a potenziometro

Il funzionamento è analogo ai trasduttori ad LVDT: anche in questo caso la conversione pressione  $\rightarrow$  spostamento è realizzata tramite un tubo di Bourdon, mentre la conversione spostamento  $\rightarrow$  segnale elettrico viene effettuata tramite un potenziometro lineare.

## C4.5 Trasduttori di accelerazione

I trasduttori di accelerazioni, detti anche **accelerometri**, realizzano la trasformazione accelerazione  $\rightarrow$  segnale elettrico. Nati per scopo scientifico e di ricerca, hanno successivamente trovato largo impiego anche in altri campi, come per esempio il settore automobilistico; oggi, infatti, sono disponibili sul mercato accelerometri in grado di supportare una vasta gamma di utilizzazioni.

Fondamentalmente l’accelerometro è costituito da una massa  $m$  connessa a una molla avente coefficiente di elasticità  $K$  [fig. C4.12].

Per il secondo principio della dinamica, una forza  $F$  applicata alla massa  $m$  (supposta inizialmente in

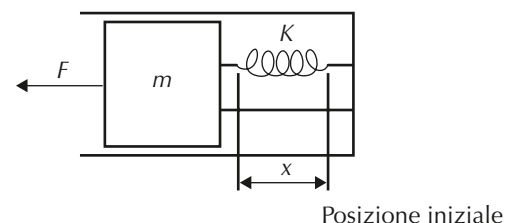


Figura C4.12 Schema di principio di un accelerometro.

quiete), imprime a quest'ultima un'accelerazione data dalla relazione:

$$F = ma \quad (4.9)$$

Ne consegue che la massa si sposta dalla posizione iniziale di una quantità  $x$ .

Tale movimento è però contrastato dalla forza elastica  $F_e$  della molla che tende a trattenere la massa nella sua posizione originale, la quale vale:

$$F_e = -Kx \quad (4.10)$$

All'equilibrio la somma delle due forze è nulla, cioè:

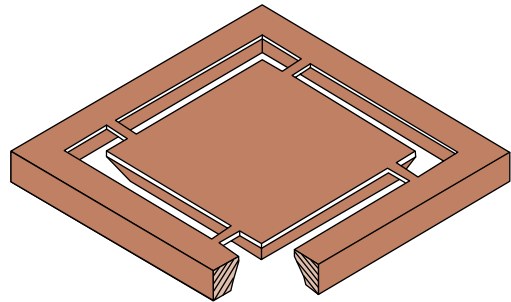
$$ma - Kx = 0 \quad (4.11)$$

Dalla 4.11 si può quindi ricavare l'accelerazione  $a$ :

$$a = \frac{K}{m} x \quad (4.12)$$

Essendo  $m$  e  $K$  grandezze note, misurando l'allungamento  $x$  si può determinare l'accelerazione  $a$ . Lo spostamento  $x$  può essere rilevato, per esempio, con un LVDD, in cui la massa  $m$  ne costituisce l'equipaggio mobile.

Tuttavia, nella maggior parte dei casi, gli accelerometri sono realizzati utilizzando le capacità di miniaturizzazione e integrazione del silicio: in tal caso la massa  $m$  è costituita da una lastra di silicio che viene vincolata a un supporto, anch'esso di silicio, tramite apposite barre di sospensione che agiscono come molle, come indicato in **figura C4.13**.



**Figura C4.13** Accelerometro integrato su silicio.

La misura della forza elastica può essere effettuata integrando nelle barre di sospensione un estensimetro o dei cristalli piezoelettrici connessi ad amplificatori di carica.

## CONTENUTI

- C5.1 Introduzione
- C5.2 Termoresistenze
- C5.3 Termocoppie
- C5.4 Termistori



Effetto termoelettrico

# TRASDUTTORI DI TEMPERA- TURA

## C5.1 Introduzione

Il controllo della temperatura è di fondamentale importanza in molti processi industriali.

Qualsiasi apparato elettrico, infatti, durante il funzionamento si riscalda a causa della potenza dissipata al suo interno, fino a raggiungere la propria temperatura di regime, che non deve essere superata per non correre il rischio di malfunzionamenti.

Gli effetti negativi dovuti al superamento dei limiti di temperatura sono molteplici: peggioramento delle proprietà meccaniche, variazioni dei parametri elettrici, deterioramento delle proprietà dielettriche dei materiali isolanti: quest'ultimo fenomeno è causato da reazioni chimiche che avvengono nel materiale stesso, le quali aumentano la loro velocità in relazione alla temperatura di funzionamento.

Per la misura della temperatura sono disponibili vari tipi di trasduttori, basati su principi fisici differenti, i più importanti dei quali sono: le **termoresistenze**, le **termocoppie** e i **termistori**.

## C5.2 Termoresistenze

Le termoresistenze, dette anche RTD (*Resistance Thermal Detector*), sono dispositivi nei quali la resistenza varia al variare della temperatura, secondo la legge lineare:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (5.1)$$

dove  $R_0$  è la **resistenza nominale** (misurata a  $0^\circ\text{C}$ ),  $T$  la temperatura in gradi K e  $\alpha$  il coefficiente di temperatura caratteristico del materiale. In un materiale conduttore, infatti, un incremen-

to di temperatura provoca un aumento dell'agitazione termica degli atomi, il quale ostacola il movimento degli elettroni di conduzione, con conseguente aumento della resistenza elettrica.

Gli RTD sono costituiti da sottili fili di materiale conduttore (generalmente platino, nichel e tungsteno) avvolti su supporti isolanti di forma cilindrica o piatta, o da un film metallico depositato su di un piccolo supporto piatto di ceramica.

Il metallo utilizzato e la resistenza nominale rappresentano i dati caratteristici di un RTD, che consentono di identificarne la tipologia nei cataloghi forniti dai costruttori.

È importante sottolineare che la 5.1 è valida solo per un ristretto range di temperature, al di fuori del quale la variazione della resistenza in funzione della temperatura non è più lineare.

A titolo di esempio, uno degli RTD più utilizzati in ambito industriale, il **PT100** [fig. C5.1], è realizzato con un filo di platino avente resistenza nominale  $R_0 = 100 \Omega$  e coefficiente di temperatura  $\alpha = 39,27 \cdot 10^{-4}$ ; per esso la 5.1 è valida solo all'interno dell'intervallo di temperature compreso tra 0 e 100 °C, mentre per temperature superiori la legge di variazione della resistenza è:

$$R(T) = R_0(1 + AT - BT^2) \quad (5.2)$$

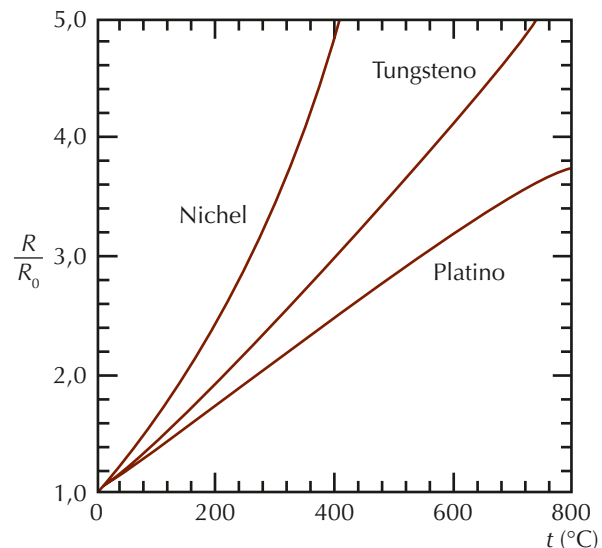
con  $A = 3,986 \cdot 10^{-3}$  e  $B = 5,88 \cdot 10^{-7}$ .

Nella 5.2 si può osservare la presenza del termine quadratico  $BT^2$ , che rende non lineare la dipendenza della resistenza dalla temperatura; pertanto, negli RTD è importante specificare sempre il campo di variazione della temperatura.



**Figura C5.1** Termoresistenza PT100.

Nel diagramma di **figura C5.2** è riportato l'andamento della variazione della resistenza, normalizzata rispetto al valore nominale  $R_0$ , per i tre materiali più utilizzati nella fabbricazione delle termoresistenze (platino, nichel e tungsteno): si può osservare la non linearità per elevati valori di temperatura. In genere, le variazioni di resistenza generate da un RTD sono di entità modesta e quindi di difficile rilevazione: esse pertanto non possono essere misurate direttamente ma, analogamente a quanto visto per gli estensimetri, occorre ricorrere a sistemi

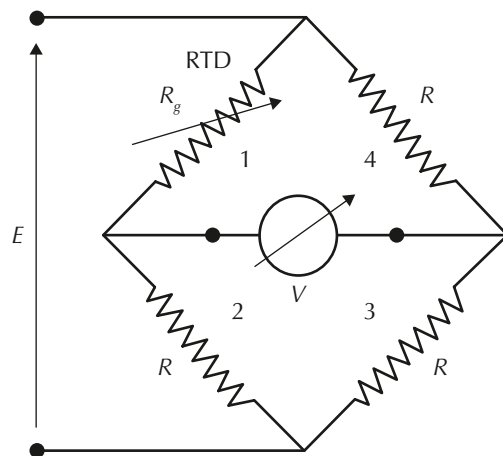


**Figura C5.2** Andamento della caratteristica resistenza-temperatura.

di rilevazione molto sensibili, il più importante dei quali è il ponte di Wheatstone.

### Ponte di Wheatstone

L'RTD (avente resistenza  $R_g$ ) costituisce uno dei quattro lati del ponte, gli altri tre sono formati da resistenze di uguale valore  $R$  [fig. C5.3].



**Figura C5.3** Ponte di Wheatstone.

Affinché il ponte sia in equilibrio, il prodotto delle resistenze dei due lati opposti deve uguagliare il prodotto delle altre due: in questa condizione la tensione misurata dal voltmetro è nulla.

Nel caso di variazione del valore della resistenza dell'RTD a seguito di una variazione della temperatura, il ponte si sbilancia e il voltmetro misura una tensione il cui valore dipende dall'entità di tale

variazione: viene così generato un segnale elettrico che dipende dalla variazione della temperatura.

### Autoriscaldamento

Indipendentemente dal tipo di collegamento utilizzato, per trasformare le variazioni di resistenza in un segnale elettrico misurabile occorre far circolare una corrente  $I$  nel dispositivo, la quale, però, comporta un riscaldamento dello stesso per effetto Joule e quindi una potenza dissipata data dalla relazione:

$$P = RI^2 \quad (5.3)$$

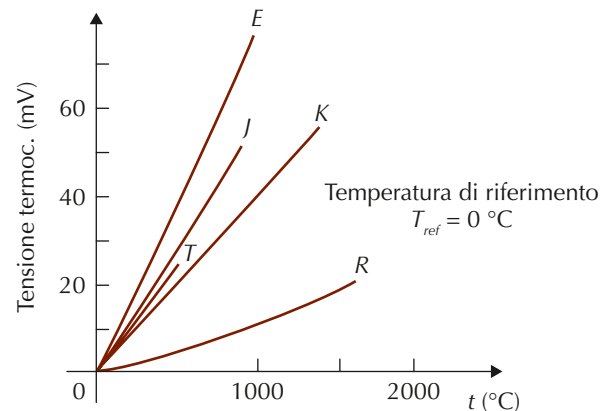
dove  $R$  è la resistenza dell'RTD.

Tale autoriscaldamento introduce un errore di misura e quindi, specialmente negli RTD a film caratterizzati da piccole dimensioni, è molto importante non superare i limiti imposti dal costruttore sul valore della corrente.

## C5.3 Termocoppie

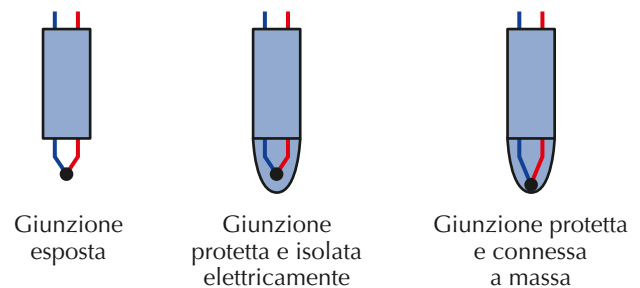
Le termocoppie sono trasduttori di temperatura basati sull'**effetto Seebeck**: scaldando una giunzione tra due diversi metalli viene generata una differenza di potenziale alle loro estremità libere. Tale fenomeno, scoperto da **Thomas Johann Seebeck**, fisico di provenienza estone, non sussiste in un circuito formato da un solo conduttore omogeneo. La giunzione tra i due metalli, detta **giunzione calda**, è il punto nel quale è applicata la temperatura da misurare (indicata con  $T_1$ ), mentre ai capi delle due estremità libere (poste a una temperatura di riferimento  $T_{ref}$ ) viene misurata la tensione generata, la quale dipende dalla differenza di temperatura  $T_1$  e  $T_{ref}$  secondo una legge non lineare. In base alla tipologia dei metalli che realizzano la giunzione, le termocoppie sono indicate con lettere maiuscole E, J, K, R, T (Standard ANSI);

nella **tabella C5.1** sono riportate sinteticamente le caratteristiche delle termocoppie più comuni. Nella **figura C5.4** è riportato l'andamento della tensione generata dai vari tipi di termocoppie in funzione della differenza tra la temperatura del giunto caldo e quella delle estremità libere (assunta pari a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ), detta **caratteristica tensione/temperatura**.



**Figura C5.4** Caratteristica tensione/temperatura dei vari tipi di termocoppia.

Per utilizzare le termocoppie anche in ambienti difficili, come liquidi e gas corrosivi, la giunzione calda è inserita all'interno di un bulbo protettivo di vetro, come mostrato nella **figura C5.5**.

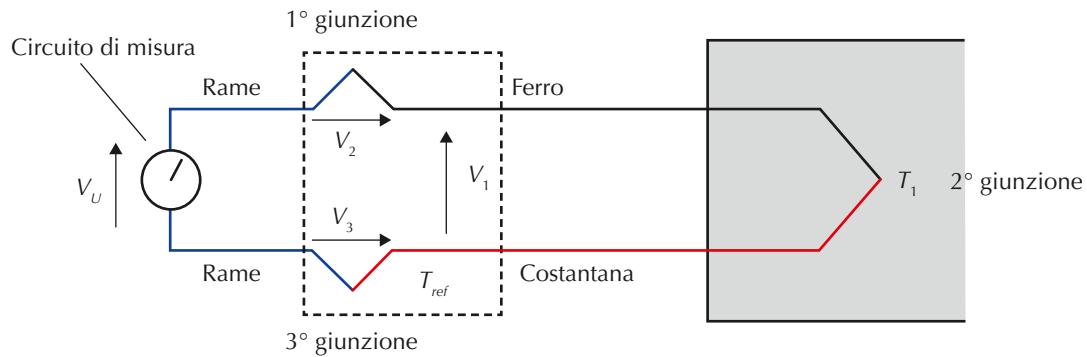


**Figura C5.5** Tipologie delle termocoppie.

**Tabella C5.1** Caratteristiche delle termocoppie più importanti (la massima tensione di uscita  $V_{max}$  è misurata considerando come temperatura di riferimento  $T_{ref} = 0\text{ }^\circ\text{C}$ )

Tipo	E	J	K	R	T
	Nichel-Cromo (+) Costantana (-)	Ferro (+) Costantana (-)	Nichel-Cromo (+) Nichel-Alluminio (-)	Platino-Rodio (+) Platino (-)	Rame (+) Costantana (-)
$T_{min}$	$95\text{ }^\circ\text{C}$	$95\text{ }^\circ\text{C}$	$95\text{ }^\circ\text{C}$	$870\text{ }^\circ\text{C}$	$-200\text{ }^\circ\text{C}$
$T_{max}$	$900\text{ }^\circ\text{C}$	$760\text{ }^\circ\text{C}$	$1260\text{ }^\circ\text{C}$	$1450\text{ }^\circ\text{C}$	$350\text{ }^\circ\text{C}$
$V_{max}$	68,78 mV	42,25 mV	50,63 mV	16,74 mV	17,81
Errore	$\pm 1,7\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 2,2\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 2,2\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 1,4\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,8\text{ }^\circ\text{C}$





**Figura C5.6** Circuito di misura della termocoppia.

### Interfacciamento delle termocoppie

Le termocoppie non necessitano alimentazione esterna, in quanto l'effetto Seebeck, sul quale si basa il loro funzionamento, genera direttamente la tensione di uscita. Il segnale di uscita generato dalla termocoppia deve essere opportunamente elaborato per estrarre il valore della temperatura della giunzione calda, in quanto i conduttori che la collegano al circuito di acquisizione generano giunzioni parassite, di cui si deve tenere conto per effettuare una corretta misura.

A tal proposito si consideri il circuito costituito dalla termocoppia (posta a una temperatura  $T_1$ ) e dal circuito di misura (posto a una temperatura di riferimento  $T_{ref}$ ) mostrato nella **figura C5.6**.

Si può osservare la presenza di 3 giunzioni: la prima Rame-Ferro, la seconda Ferro-Costantana e la terza Costantana-Rame: la prima e la terza sono giunzioni parassite che derivano dai collegamenti al voltmetro e quindi influenzano il risultato della misura.

La tensione di uscita  $V_U$ , che dipende dalle tensioni relative alle tre giunzioni, vale:

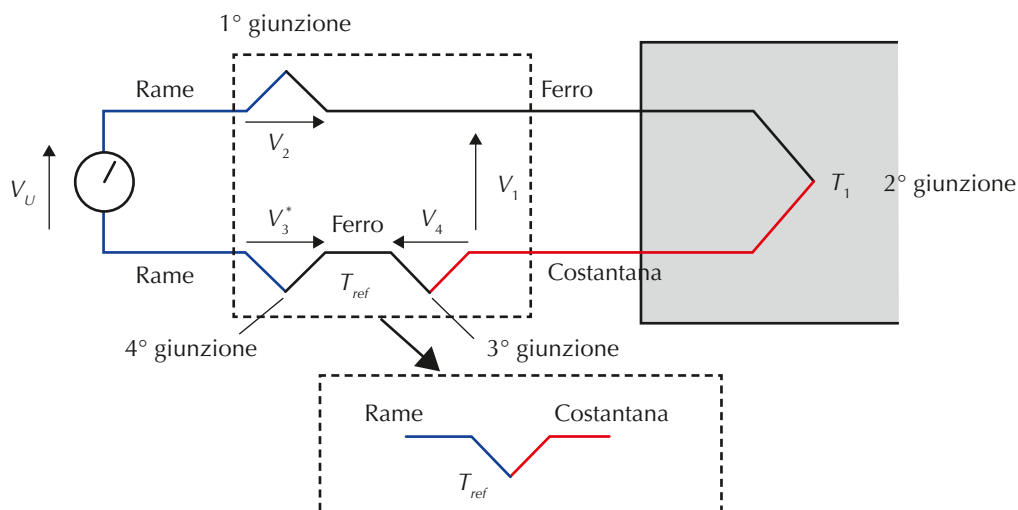
$$V_U = V_3 + V_1 - V_2 \quad (5.4)$$

Tuttavia, poiché due termocoppie in serie che condividono lo stesso materiale centrale e sono alla stessa temperatura generano la stessa tensione che genererebbe una sola termocoppia realizzata con i due materiali esterni, è possibile sostituire nel circuito di **figura C5.6** la giunzione Rame-Costantana con una doppia giunzione fittizia Rame-Ferro e Ferro-Costantana, come mostrato in **figura C5.7**.

In questo circuito la tensione misurata dal voltmetro vale:

$$V_U = V_3^* - V_4 + V_1 - V_2 \quad (5.5)$$

Se le due giunzioni Rame-Ferro (la prima e la quarta) si trovano alla stessa temperatura, allora le



**Figura C5.7** Circuito equivalente per l'acquisizione del segnale di temperatura dalla termocoppia.

due tensioni  $V_2$  e  $V_3^*$  sono uguali e quindi si annullano; la tensione misurata  $V_U$  è pertanto uguale alla differenza tra la tensione  $V_1$  del giunto caldo Ferro-Costantana alla temperatura  $T_1$  (indicata con  $V_1(T_1)$ ) e la tensione  $V_4$  dello stesso giunto alla temperatura di riferimento  $T_{ref}$  (indicata con  $V_4(T_{ref})$ ), cioè:

$$V_U = V_1(T_1) - V_4(T_{ref}) \quad (5.6)$$

Dalla 5.6 si può ricavare la tensione  $V_1(T_1)$  generata dalla termocoppia alla temperatura  $T_1$ :

$$V_1(T_1) = V_U + V_4(T_{ref}) \quad (5.7)$$

La tensione  $V_4(T_{ref})$  può essere determinata tramite la caratteristica tensione/temperatura della termocoppia utilizzata (in questo caso la curva  $J$  di **figura C5.4**, relativa alla termocoppia Rame-Costantana), previa misura della temperatura di riferimento  $T_{ref}$  (solitamente la temperatura ambiente): in corrispondenza del valore  $T_{ref}$  (asse delle ascisse) si legge il valore della tensione (asse delle ordinate), che costituisce  $V_4(T_{ref})$ .

Il valore così determinato va quindi sommato alla tensione  $V_U$  misurata: si ottiene così il valore  $V_1(T_1)$  della tensione generata dalla termocoppia alla temperatura  $T_1$ .

Determinata  $V_1(T_1)$ , si può ricavare la temperatura  $T_1$  sempre dalla caratteristica  $J$  tensione/temperatura, leggendola sull'asse delle ordinate in corrispondenza del valore  $V_1(T_1)$ .

L'operazione di determinazione del corretto valore di  $T_1$  è detta **compensazione di giunto freddo** (in inglese *ice-point compensation*).

Dal punto di vista storico, tale terminologia nasce dalla tradizionale consuetudine di effettuare la compensazione inserendo nel circuito di misura una giunzione, questa volta reale (analoga a quella impiegata per la misura di  $T_1$ ), immergendola in un bagno di ghiaccio ( $T_{ref} = 0$  °C): in queste condizioni, la tensione misurata è nulla quando  $T_1 = 0$  °C, positiva se  $T_1 > 0$  °C e negativa se  $T_1 < 0$  °C.

Proprio per questo motivo i costruttori delle termocoppie forniscono tabelle di riferimento con valori di tensione corrispondenti a varie temperature, assumendo  $T_{ref} = 0$  °C.

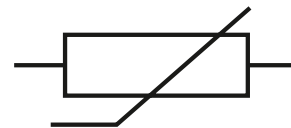
Riassumendo, il procedimento di misura della temperatura tramite termocoppia prevede:

1. misura della temperatura di riferimento  $T_{ref}$  e determinazione della tensione  $V(T_{ref})$  tramite la caratteristica tensione/temperatura della termocoppia;

2. determinazione della tensione della giunzione di misura  $V(T_1)$  aggiungendo a  $V_U$  la tensione  $V(T_{ref})$  ottenuta al punto precedente;
3. determinazione della temperatura  $T_1$  utilizzando la caratteristica della termocoppia.

## C5.4 Termistori

Un **termistore**, indicato con il simbolo riportato in **figura C5.8**, è un resistore la cui resistenza elettrica varia significativamente con la temperatura; il termine deriva dalla parola inglese *thermistor*, combinazione delle parole *thermal* e *resistor*.



**Figura C5.8** Simbolo elettrico di un termistore.

L'elemento sensibile è costituito da un materiale semiconduttore nel quale la resistenza varia con la temperatura sia in positivo sia in negativo; in funzione di tali modalità di variazione, i termistori possono essere suddivisi in:

- **termistori NTC** (*Negative Temperature Coefficient*), nei quali la resistenza diminuisce all'aumentare della temperatura;
- **termistori PTC** (*Positive Temperature Coefficient*), nei quali la resistenza aumenta all'aumentare della temperatura.

### Termistori NTC

Sono costituiti da ossidi di elementi del gruppo del Ferro, come Ferro (Fe), Cromo (Cr) Manganese (Mn), Cobalto (Co) e Nichel (Ni).

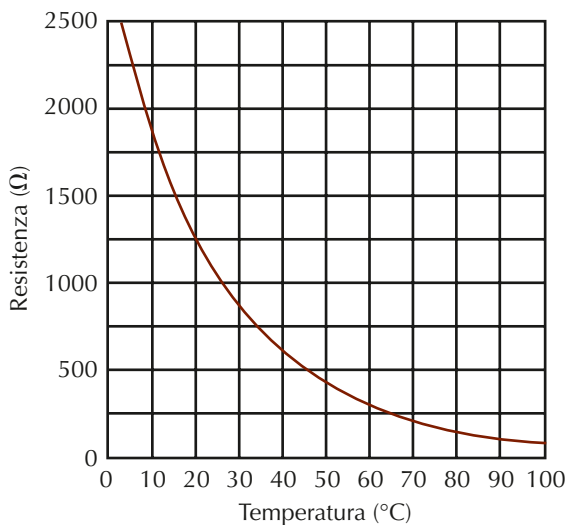
Allo stato puro tali ossidi presentano un'elevata resistività, ma possono essere trasformati in semiconduttori con l'aggiunta di piccole quantità di ioni aventi valenza diversa: per esempio, introducendo nell'ossido di ferro piccole quantità di ioni negativi di titanio, si ottiene un materiale con eccesso di elettroni (cioè di tipo N); aggiungendo invece agli ossidi di Nichel o Cobalto ioni positivi di litio, si ottiene un semiconduttore con eccesso di lacune (cioè di tipo P).

Una volta aggiunti questi elementi e un legante plastico, il materiale così ottenuto viene estruso in barrette, pressato in dischi e poi sinterizzato

a elevata temperatura (1100-1400 °C); i contatti elettrici sono realizzati tramite emulsioni di argento, depositato sotto vuoto con la tecnica della spruzzatura metallica (sputtering).

Il dispositivo così ottenuto viene infine isolato dall'ambiente esterno inserendolo in una capsula protettiva di materiale plastico o metallico.

Nella **figura C5.9** è mostrata la curva caratteristica di un NTC, che esprime la variazione della resistenza in funzione della temperatura, dalla quale si può osservare che la resistenza diminuisce all'aumentare della temperatura.



**Figura C5.9** Caratteristica resistenza/temperatura di un NTC.

Si può dimostrare che tale caratteristica può essere analiticamente così espressa:

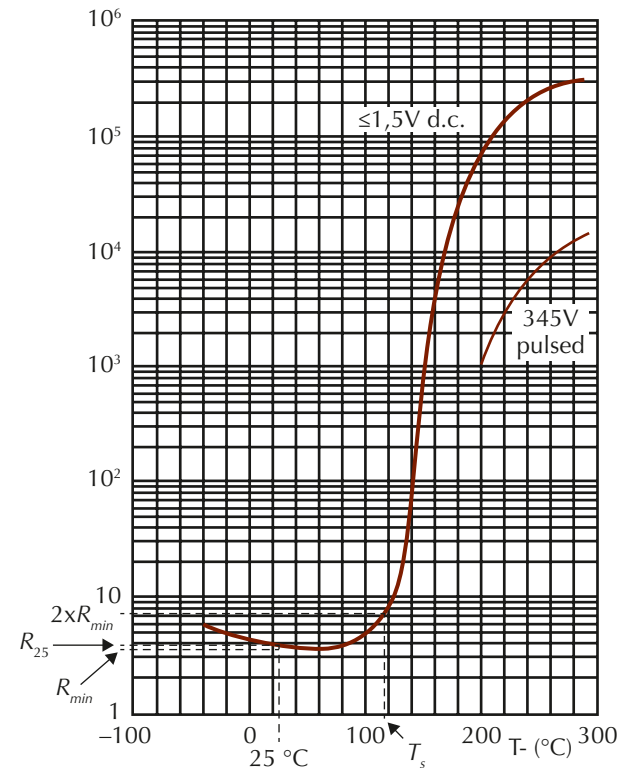
$$R(T) = R_0 e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}} \quad (5.8)$$

in cui:

- il parametro  $B$ , detto **temperatura caratteristica** dell'NTC, dipende dal materiale con il quale esso è realizzato;
- $R(T)$  è la resistenza dell'NTC alla temperatura  $T$ ;
- $R_0$  è la resistenza dell'NTC alla temperatura di riferimento  $T_0$  (generalmente quella ambiente).

### Termistori PTC

Sono realizzati con materiali ceramici, quali il carbonato di bario, l'ossido di stronzio e di titanio, che opportunamente combinati, consentono



**Figura C5.10** Caratteristica resistenza/temperatura di un PTC.

di regolare l'intervallo di temperatura entro cui la resistenza aumenta.

Il materiale così ottenuto, dopo essere stato trasformato in dischi, barrette o cilindri, è sinterizzato a temperature comprese tra 1100 e 1400 °C. Come negli NTC, i contatti elettrici sono realizzati tramite emulsioni di argento con la tecnica della spruzzatura metallica.

Nella **figura C5.10** è riportato il diagramma resistenza/temperatura del PTC in scala logaritmica. Si può osservare che per basse temperature il comportamento è simile a quello degli NTC, poiché la resistenza diminuisce all'aumentare della temperatura; superata una certa temperatura, detta **di Curie** (caratteristica di ciascun PTC), la resistenza inizia ad aumentare.

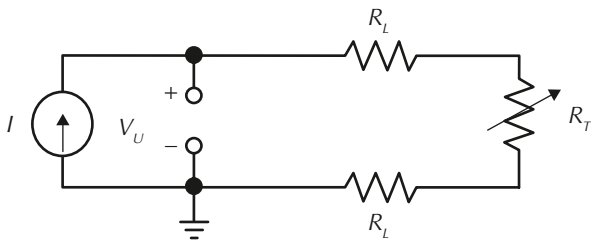
Come indicazione pratica della temperatura alla quale la resistenza del PTC inizia ad avere un valore positivo sufficientemente elevato, è stato definito un parametro, denominato **temperatura di switching** ( $T_s$ ), che rappresenta la temperatura in corrispondenza della quale il valore della resistenza del PTC è pari al doppio del valore riferito a 25 °C.

### Interfacciamento dei termistori

Il metodo più semplice per collegare un termistore a un dispositivo di misura, è la connessione

**Tabella C5.2** Confronto tra le diverse caratteristiche dei sensori di temperatura.

	Termocoppie	Termoresistenze	Termistori
<b>Pro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autoeccitante</li> <li>• Semplice</li> <li>• Campo di misura elevato</li> <li>• Economico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Molto stabile</li> <li>• Molto accurato</li> <li>• Molto lineare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Molto sensibile</li> <li>• Veloce</li> <li>• Elevato rapporto segnale/rumore</li> </ul>
<b>Contro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non lineare</li> <li>• Bassa tensione di uscita</li> <li>• Serve una temperatura di riferimento</li> <li>• Poco sensibile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costoso</li> <li>• Serve un riferimento di corrente</li> <li>• Bassa resistenza nominale</li> <li>• Autoriscaldamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estremamente non lineare</li> <li>• Campo di misura limitato</li> <li>• Serve un riferimento di corrente</li> <li>• Autoriscaldamento</li> </ul>



**Figura C5.11** Connessione del termistore a due cavi.

diretta a due cavi, tramite i quali viene sia fornita la corrente  $I$  di eccitazione al termistore sia effettuata la misura della tensione  $V_U$  da esso generata [fig. C5.11].

Infatti, a differenza delle termocoppie, data l'elevata resistenza dei termistori, le resistenze dei cavi di collegamento  $R_L$  non pregiudicano l'accuratezza della misura.

Nella **tabella C5.2**, infine, sono confrontate le diverse caratteristiche dei sensori di temperatura.

## CONTENUTI

- C6.1 Introduzione
- C6.2 Effetto Hall
- C6.3 Trasduttori di corrente a misura diretta del campo
- C6.4 Trasduttori a compensazione di campo



Pinza amperometrica

# TRASDUTTORI DI CORRENTE A EFFETTO HALL

## C6.1 Introduzione

Il modo più semplice per eseguire le misure di corrente è il metodo volt-amperometrico, che consiste nel misurare la caduta di tensione  $V$  su di una resistenza nota  $R$  percorsa dalla corrente incognita  $I$  e quindi di ricavare il valore di quest'ultima tramite la legge di Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad (6.1)$$

Tale metodo non è però attuabile per correnti molto elevate, come per esempio nei circuiti di controllo dei motori elettrici, dove possono raggiungere anche centinaia di Ampere.

In tal caso si utilizzano particolari trasduttori, che sfruttano l'effetto Hall (paragrafo seguente) mediante i quali la misura della corrente può essere effettuata:

- direttamente, effettuando la misura della tensione prodotta per effetto Hall dalla corrente da misurare (**trasduttori di corrente a misura diretta del campo**);
- tramite un circuito elettrico nel quale viene indotta una corrente proporzionale a quella incognita, ma di minore intensità, misurata con un circuito a misura diretta (**trasduttori a compensazione di campo**).

## C6.2 Effetto Hall

L'effetto Hall, scoperto nel 1879 da **Edwin Hall** presso la Johns Hopkins University (Baltimora USA), si verifica quando un conduttore percorso da corrente è immerso in un campo magnetico.

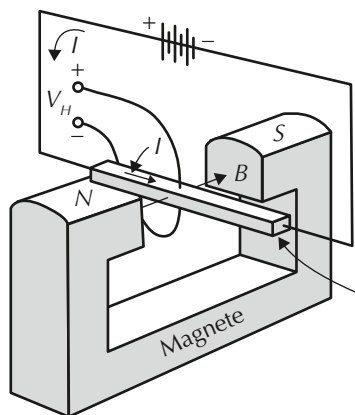


Figura C6.1 Effetto Hall.

Si consideri, al riguardo, una barretta di materiale conduttore, collegata a un generatore di tensione continua attraverso la resistenza  $R$  immersa in un campo magnetico uniforme di induzione  $B$  a essa perpendicolare, come mostrato in **figura C6.1**.

Essendo collegata a una tensione continua, la barretta è percorsa da una corrente continua  $I$ : sui portatori di carica che danno origine alla corrente (in questo caso elettroni, essendo la barretta di materiale conduttore) agisce una forza  $F$  (forza di Lorentz), in direzione perpendicolare al piano individuato da  $I$  e  $B$ .

Secondo la regola della mano sinistra (volume 2), immaginando di "associare" la corrente  $I$  al dito indice e l'induzione  $B$  al dito medio, la direzione e il verso della forza  $F$  sono individuati dal dito pollice; le tre dita menzionate vanno posizionate in modo che ogni dito sia perpendicolare agli altri due, come mostrato nella **figura C6.2a** (o in modo stilizzato nella **figura C6.2b**).

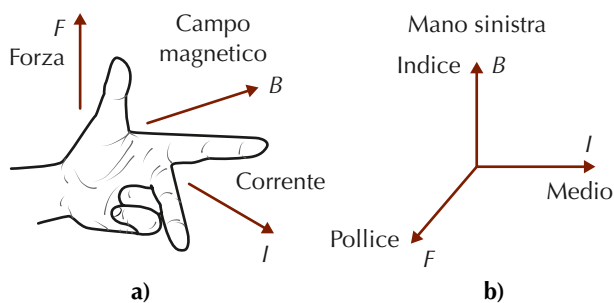


Figura C6.2 Regola della mano sinistra.

Con le direzioni di  $B$  e  $I$  indicate nella **figura C6.1**, applicando regola della mano sinistra, la forza  $F$  che agisce sugli elettroni è diretta verso l'alto. Gli elettroni sono spinti verso la faccia superiore

della barretta, che pertanto si carica negativamente rispetto a quella inferiore: tra le due facce viene così a crearsi una differenza di potenziale, detta **tensione di Hall**, che dipende dall'intensità del campo magnetico; si può dimostrare che tale tensione, indicata con  $V_H$ , vale:

$$V_H = \frac{K_H \beta I}{z} \quad (6.2)$$

dove  $K_H$  è la costante di Hall,  $\beta$  è la densità di flusso magnetico,  $I$  è la corrente che circola nella barretta e  $z$  è il suo spessore.

Dalla 6.2 si evince che la tensione di Hall dipende sia dalla corrente  $I$ , sia dall'intensità del campo magnetico (tramite il parametro  $\beta$ ) in cui la barretta è immersa: il sistema rappresentato in **figura C6.1** costituisce pertanto un trasduttore (detto **a effetto Hall**) che converte un campo magnetico in una tensione.

### C6.3 Trasduttori di corrente a misura diretta del campo

Nella **figura C6.3** è mostrato lo schema di principio di un **trasduttore di corrente a misura diretta del campo**, fondamentalmente costituito da un nucleo magnetico toroidale (ferrite o altro materiale ferromagnetico) che circonda il conduttore attraversato dalla corrente  $I_x$  da misurare; il nucleo è dotato di un'apertura con all'interno alloggiata una barretta di metallo, sulla quale viene concentrato il campo magnetico  $B$  generato dalla corrente  $I_x$ . Agli estremi della barretta è applicata una tensione continua  $V$  che, tramite la resistenza  $R$ , limita il valore della corrente  $I$ ; tra le facce superiori e inferiori della barretta, per effetto del campo magnetico, si genera allora la tensione di Hall  $V_H$  a esso proporzionale.

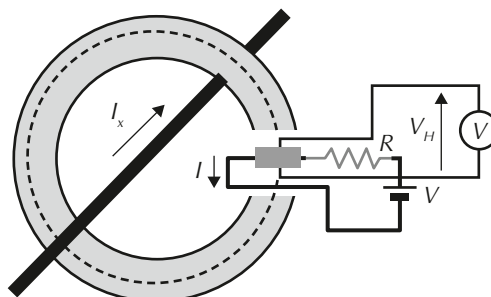


Figura C6.3 Schema di principio di un trasduttore di corrente a effetto Hall.



**Figura C6.4** Trasduttore di corrente a effetto Hall.

Essendo il campo magnetico proporzionale alla corrente  $I_x$  che lo genera, anche la tensione  $V_H$  sarà proporzionale a  $I_x$ : misurando pertanto  $V_H$  (tramite il voltmetro  $V$ ), è possibile risalire al valore della corrente  $I_x$ .

Nella **figura C6.4** è mostrato un trasduttore toroidale a effetto Hall.

## C6.4 Trasduttori a compensazione di campo

Lo schema di principio di tale trasduttore è del tipo indicato nella **figura C6.5**.

La struttura generale è analoga a quella del trasduttore a misura diretta, con la differenza che sul nucleo toroidale è presente un avvolgimento costituito da  $n_2$  spire.

L'uscita dell'amplificatore operazionale  $G$  pilota un generatore di corrente che genera nell'avvolgimento la corrente  $I_2$ , mentre ai suoi ingressi è applicata la tensione  $V_H$  prodotta per effetto Hall

dall'interazione tra i campi magnetici generati dalla corrente da misurare  $I_x$  e da  $I_2$ .

L'insieme dell'avvolgimento e della barretta può essere visto come un trasformatore, in cui il circuito primario è costituito dalla barretta stessa e quindi formato da una sola spira ( $n_1 = 1$ ), mentre il secondario è formato dall'avvolgimento intorno al nucleo toroidale avente  $n_2$  spire, sul quale circola la corrente controllata dalla tensione  $V_H$  tramite l'amplificatore operazionale.

L'avvolgimento è realizzato in modo tale che  $I_2$  genera un campo magnetico che si oppone a quello generato da  $I_x$ ; in tal caso  $V_H$  si annulla se i due campi magnetici sono uguali, cioè se:

$$\frac{I_x}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (6.3)$$

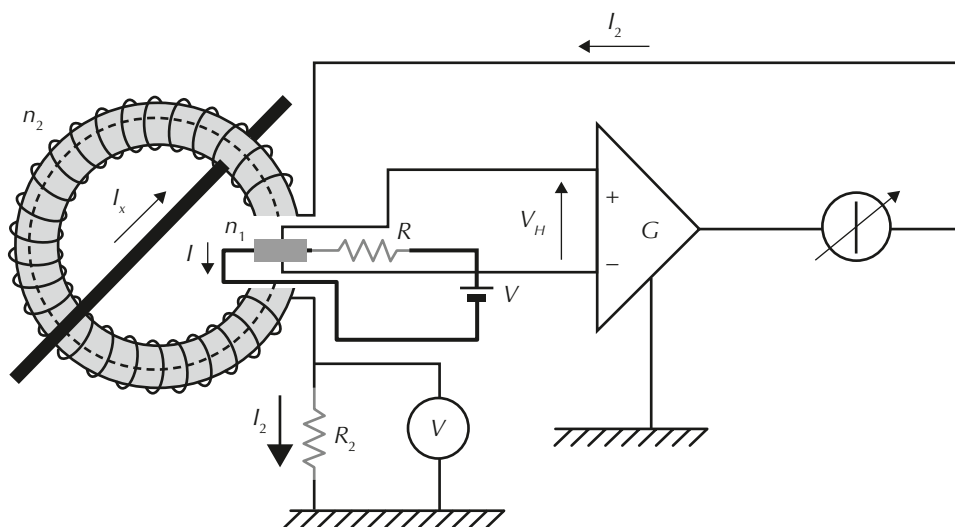
Il trasduttore si comporta quindi come un circuito di controllo a retroazione, che tende ad annullare la tensione  $V_H$  agendo sulla corrente  $I_2$ .

In condizione di stabilità, essendo  $n_1 = 1$ , dalla 6.3 si ha:

$$I_2 = \frac{I_x}{n_2} \quad (6.4)$$

La corrente  $I_x$  può essere pertanto determinata misurando  $I_2$  (che risulta  $n_2$  volte più piccola della prima), con il metodo volt-amperometrico, attraverso il circuito costituito dalla resistenza  $R_2$  e il voltmetro  $V$ .

Tale metodologia di misura è più complessa della precedente per la presenza dell'avvolgimento secondario; tuttavia è preferibile in quanto consente di utilizzare il trasduttore a effetto di Hall intorno al valore nullo del campo magnetico, in corrispondenza del quale la linearità è garantita anche con dispositivi relativamente economici.



**Figura C6.5** Schema di principio del trasduttore a compensazione di campo.

## CONTENUTI

- C7.1 Introduzione
- C7.2 Trasduttori di prossimità induttivi
- C7.3 Trasduttori di prossimità capacitivi
- C7.4 Trasduttori di prossimità optoelettronici
- C7.5 Trasduttori a ultrasuoni
- C7.6 Trasduttori di prossimità magnetici



Comparatori e trigger di Schmitt

# TRASDUTTORI DI PROSSIMITÀ

## C7.1 Introduzione

I trasduttori di **prossimità**, detti anche **proximity**, sono in grado di percepire e indicare la presenza di un oggetto all'interno del loro campo di azione senza avere contatti fisici con l'oggetto stesso; la distanza entro cui questi trasduttori rilevano oggetti è definita **distanza di rilevamento nominale**.

Poiché rilevano solo la presenza o l'assenza di un oggetto, il segnale elettrico d'uscita è di tipo *on/off* (presenza/assenza): i proximity sono pertanto realizzati con circuiti in grado di fornire informazioni di tipo logico (alcuni modelli dispongono anche di un sistema di regolazione per poter calibrare la distanza).

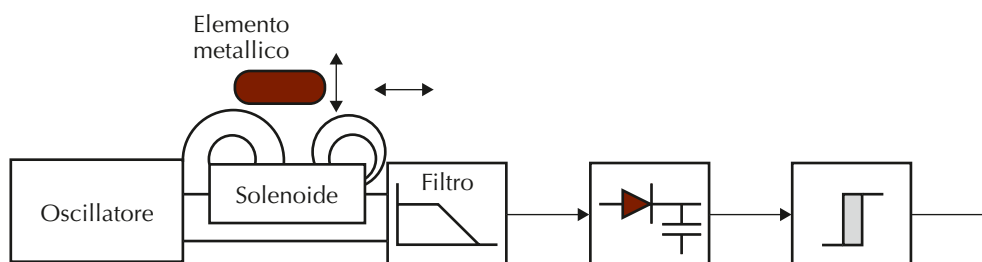
L'assenza di meccanismi d'attuazione meccanica e di un contatto fisico fra trasduttore e oggetto, conferisce a questi trasduttori una elevata affidabilità.

L'uscita è in genere progettata per operare con segnali a bassa tensione (fino a 48V) e basse correnti (fino 200 mA), non idonee per comandare direttamente gli attuatori, come elettrovalvole, teleruttori e motori, ma in grado di alimentare ingressi di schede di controllo.

I proximity possono essere realizzati con diversi tipi di tecnologie, in funzione delle quali sono così classificati:

- trasduttori induttivi;
- trasduttori capacitivi;
- trasduttori optoelettronici;
- trasduttori a ultrasuoni;
- trasduttori magnetici.





**Figura C7.1** Schema di principio di un trasduttore induttivo passivo.

## C7.2 Trasduttori di prossimità induttivi

Il funzionamento dei trasduttori di prossimità induttivi è basato sulla rilevazione delle perdite dovute alle **correnti parassite**<sup>1</sup> che si generano in un oggetto di materiale ferroso, quando è investito da un campo magnetico variabile.

Si dividono in due categorie: **passivi** e **attivi**.

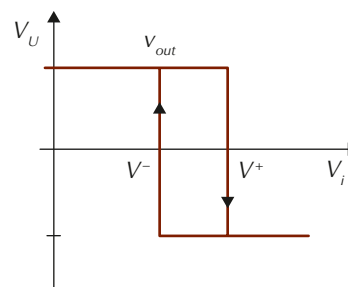
### Trasduttori induttivi passivi

Nei trasduttori induttivi passivi, detti anche a correnti parassite, dei quali nella **figura C7.1** è mostrato lo schema di principio, un circuito oscillatore alimenta un solenoide avvolto su un nucleo aperto di ferrite, in modo da realizzare un generatore di flusso magnetico le cui linee di flusso influenzano un campo d'azione abbastanza ampio, nel quale è localizzato l'oggetto da rilevare, detto **azionatore**. La presenza dell'azionatore in prossimità del solenoide consente l'induzione, da parte del campo magnetico, di correnti parassite che determinano una dissipazione di potenza per effetto Joule.

Fino a una certa distanza dell'azionatore dal solenoide (detta **distanza di rivelazione**), l'entità delle perdite è tale per cui l'oscillatore riesce a compensarle e quindi l'oscillazione viene mantenuta; quando però l'azionatore si avvicina al solenoide superando la distanza di rivelazione, l'oscillatore non è in grado più di compensare le perdite e l'oscillazione tende a smorzarsi.

L'oscillazione smorzata viene rilevata dal filtro passa-basso, raddrizzata e inviata all'ingresso di un **trigger di Schmitt**, particolare tipo di comparatore di soglia con isteresi che consente di trasformare un segnale analogico d'ingresso in un segnale di uscita variabile soltanto tra due valori

di tensione, a seconda che l'ingresso superi una certa soglia (soglia alta) o sia inferiore a una seconda (soglia bassa), come mostrato nella **figura C7.2** nella quale ne è riportata la caratteristica ingresso-uscita.



**Figura C7.2** Caratteristica ingresso-uscita del trigger di Schmitt.

Si può osservare che la soglia più bassa ( $V^-$ ) produce la commutazione al livello alto, mentre quella più alta  $V^+$  al livello basso.

La commutazione dell'uscita deve avvenire in un tempo idealmente nullo, praticamente impossibile; in ogni caso deve essere molto minore del tempo con cui varia il segnale in ingresso.

Quando la distanza dell'oggetto dal solenoide diminuisce oltre la distanza di rivelazione, il segnale di ingresso decresce oltre la soglia  $V^-$  e il trigger si porta a livello alto, segnalandone la presenza.

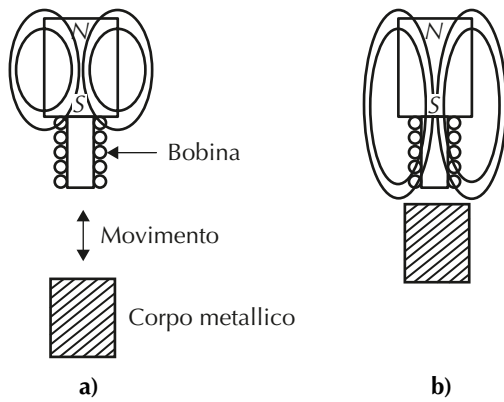
È importante osservare che la perdita per effetto Joule e quindi lo smorzamento dell'oscillazione, oltre che dalla distanza dell'azionatore, dipende anche:

- dallo spessore dell'azionatore;
- dalla superficie investita dal campo;
- dalla frequenza del campo magnetico generato;
- dalla resistività del materiale.

### Trasduttori induttivi attivi

Lo schema di principio di tali trasduttori è sostanzialmente identico a quello relativo ai trasdutto-

<sup>1</sup> Le **correnti parassite** o **di Foucault** sono correnti indotte in masse metalliche conduttrici immerse in un campo magnetico variabile o che, muovendosi, attraversano un campo magnetico costante o variabile; in entrambi i casi è la variazione del flusso magnetico che genera le correnti.



**Figura C7.3** Trasduttore di prossimità induttivo attivo: a) azionatore distante dal solenoide; b) azionatore in prossimità del solenoide.

ri passivi, salvo la mancanza di alimentazione del solenoide, realizzato su un magnete permanente, come mostrato in **figura C7.3**.

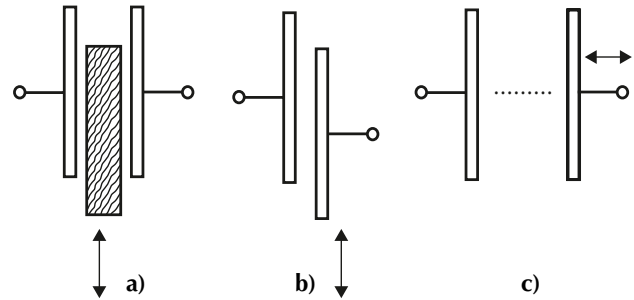
Finché l'azionatore (di materiale metallico) è sufficientemente distante dal magnete, il campo magnetico non si concatena con il solenoide [**fig. C7.3a**]; quando, invece, l'azionatore si approssima al trasduttore, parte del campo magnetico viene deviata verso il solenoide [**fig. C7.3b**] concatenandosi con quest'ultimo.

A causa della variabilità del flusso, per il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, nel solenoide viene indotta una tensione, la quale, se supera la soglia di attivazione del trigger, ne fa commutare l'uscita al valore alto, segnalando così la presenza dell'oggetto.

È importante sottolineare che in tal caso non è solo la distanza a provocare l'attivazione dell'uscita, ma anche il movimento dell'azionatore (altrimenti non sarebbero presenti variazioni del flusso magnetico e quindi le tensioni indotte).

### C7.3 Trasduttori di prossimità capacitivi

Il funzionamento dei trasduttori di prossimità capacitivi è basato sulla rilevazione delle variazioni della capacità elettrica di un condensatore.



**Figura C7.4** Variazione della capacità di un condensatore piano: a) variazione della permittività; b) variazione dell'area affacciata tra le due armature; c) variazione della distanza tra le armature.

Per un condensatore costituito da due armature piane e parallele di area  $S$ , separate da un dielettrico avente costante dielettrica (o permittività elettrica)  $\varepsilon$  e spessore  $d$  (condensatore piano), la capacità vale:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (7.1)$$

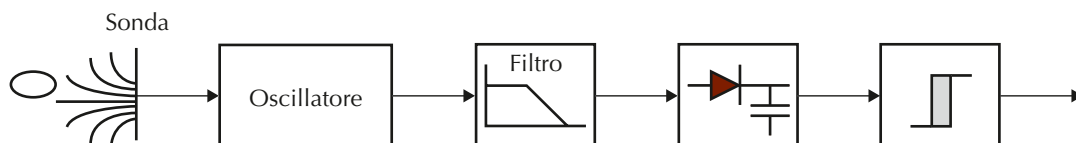
Dalla relazione C7.1 appare evidente che la variazione della capacità del condensatore può essere ottenuta variando:

- la permittività, ovvero la posizione del materiale dielettrico entro le armature [**fig. C7.4a**];
- l'area affacciata tra due armature [**fig. C7.4b**];
- la distanza tra le due armature [**fig. C7.4c**].

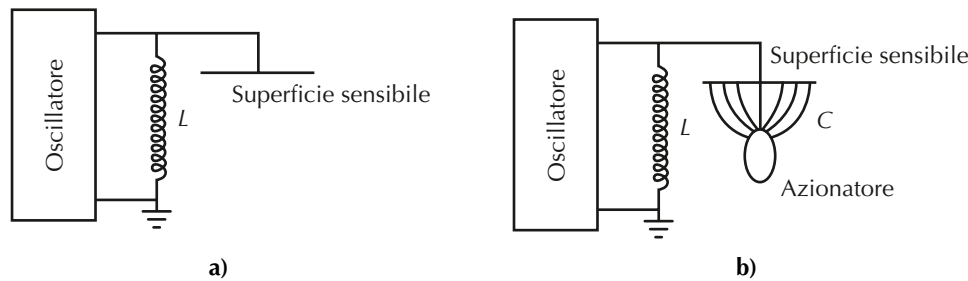
Nella **figura C7.5** è mostrato lo schema di principio di un trasduttore di prossimità capacitivo.

Si può osservare che lo schema di **figura C7.5** è simile quello di **figura C7.1** relativo a un trasduttore di prossimità induttivo (attivo): la differenza sostanziale è che l'oscillatore non è connesso al solenoide e il suo circuito oscillante è costituito da un'induttanza  $L$  collegata a una superficie metallica piana [**fig. C7.6a**], detta **superficie sensibile**.

In assenza, di oggetti nelle vicinanze della son-



**Figura C7.5** Schema di principio di un trasduttore di prossimità capacitivo.



**Figura C7.6** Principio di funzionamento del trasduttore di prossimità capacitivo: a) in assenza dell'azionatore non c'è la capacità  $C$ ; b) in presenza dell'azionatore si crea un condensatore di capacità  $C$  che insieme all'induttanza  $L$  genera l'innescò dell'oscillazione e quindi la rilevazione della sua presenza.

da, l'oscillatore è inibito poiché non è presente la capacità che, insieme all'induttanza  $L$ , genera e mantiene l'oscillazione (oscillatore LC).

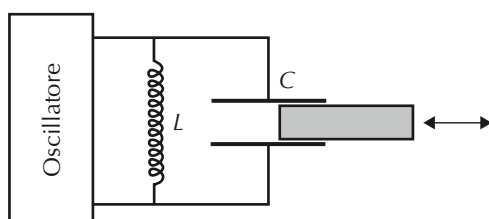
Quando un oggetto conduttore (azionatore) si avvicina all'oscillatore, si crea un condensatore le cui armature sono costituite dalla superficie sensibile e dall'azionatore stesso [fig. C7.6b].

La capacità di tale condensatore dipende dalla distanza dell'azionatore dalla superficie sensibile: a una certa distanza, la capacità assume un valore che determina l'innescò dell'oscillatore, il quale si attiva generando in uscita una tensione sinusoidale.

Tale tensione viene filtrata, raddrizzata e inviata al trigger di Schmitt, la cui uscita commuta al livello alto quando il suo ingresso supera la soglia di riferimento, rilevando così la presenza dell'azionatore.

La presenza di un oggetto (di materiale metallico) nelle vicinanze del trasduttore costituisce, pertanto, l'armatura mancante del condensatore del circuito oscillante.

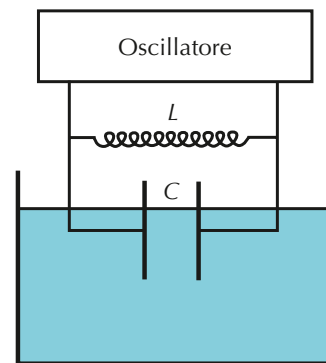
La variazione della capacità può essere anche ottenuta variando la permittività: in tal caso il circuito oscillante è costituito da un'induttanza  $L$  in parallelo a un condensatore piano ad armature fisse separate da un dielettrico mobile [fig. C7.7]: la variazione della posizione del dielettrico deter-



**Figura C7.7** Variazioni della capacità dovute al dielettrico mobile.

mina la variazione della permittività del condensatore e quindi della capacità.

Questo principio viene utilizzato per realizzare i trasduttori di livello di un liquido contenuto all'interno di un serbatoio: in tal caso quando il liquido, che funge da dielettrico, raggiunge un determinato livello, la capacità del condensatore assume un valore tale che, insieme all'induttanza  $L$ , provoca l'innescò dell'oscillatore [fig. C7.8], segnalando così il raggiungimento del livello.



**Figura C7.8** Principio di funzionamento di un trasduttore di livello: quando il livello del liquido raggiunge un determinato valore avviene l'innescò dell'oscillatore.

## C7.4 Trasduttori di prossimità optoelettronici

I sensori di prossimità optoelettronici si basano sull'effetto fotoelettrico, cioè nell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica, quando viene investita da una radiazione luminosa: l'energia incidente della radiazione viene assorbita, sotto forma di energia cinetica, dagli elettroni colpiti, che conseguentemente iniziano

a vibrare all'interno della struttura cristallina del metallo.

Se tale energia è sufficiente a rompere i legami che li vincolano ai propri nuclei, essi si liberano nello spazio circostante.

È da osservare che l'effetto fotoelettrico non si verifica soltanto nei metalli, nei quali il fenomeno è molto evidente, ma anche nei semiconduttori, nei quali prende il nome di **effetto fotoconduttivo**.

Gli importanti risultati ottenuti dallo studio dell'effetto fotoelettrico possono essere riassunti in tre punti fondamentali:

- si ha emissione fotoelettrica solo se la frequenza della radiazione incidente è superiore a un determinato valore;
- l'energia cinetica degli elettroni emessi dipende dalla frequenza della radiazione incidente e non dalla sua intensità;
- il numero degli elettroni emessi per unità di tempo aumenta all'aumentare dell'intensità della radiazione elettromagnetica incidente.

Einstein riuscì a spiegare tale fenomeno ipotizzando che l'energia dell'onda luminosa non è continua, ma concentrata in pacchetti discreti chiamati **fotoni**, la cui energia dipende dalla frequenza dell'onda secondo la relazione:

$$E = h\nu \quad (7.2)$$

dove  $h$  è la costante di Planck pari a  $6,63 \cdot 10^{-34}$  joule·s e  $\nu$  la frequenza della radiazione emessa.

Con tale ipotesi, l'energia cinetica  $E_c$  acquistata dagli elettroni è uguale a quella ceduta dai fotoni, cioè:

$$E_c = h\nu - w_0 \quad (7.3)$$

in cui  $w_0$  rappresenta l'energia di estrazione, ovvero l'energia necessaria per liberare gli elettroni dai loro legami con i rispettivi nuclei.

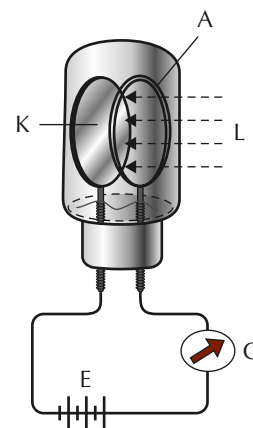
Dalla C7.3 ponendo  $w_0 = h\nu_0$  si ottiene che la frequenza  $\nu$  della radiazione incidente deve essere maggiore di  $\nu_0 = w_0/h$ .

Ciò significa che  $\nu_0$  rappresenta la frequenza minima della radiazione necessaria per estrarre un elettrone dal metallo: tale frequenza prende il nome di **soglia fotoelettrica**.

L'intensità del raggio incidente determina, invece, il numero degli elettroni che riescono a superare i legami con i nuclei: più sono i fotoni incidenti, più elettroni sono emessi dal metallo.

## Cellula fotoelettrica

L'effetto fotoelettrico trova immediata applicazione nella **cellula fotoelettrica**, uno dei più importanti dispositivi per la rilevazione della luce e della sua intensità, che costituisce l'elemento base dei sistemi di trasduzione optoelettronici di prossimità. Fondamentalmente una cellula fotoelettrica è costituita da un involucro sotto vuoto (o contenente gas inerte), sul quale incide la radiazione luminosa  $L$ , all'interno del quale sono disposti due elettrodi: l'**anodo** (indicato con  $A$ ), collegato al polo positivo di un generatore di corrente continua  $E$ , e il **catodo** (indicato con  $K$ ), costituito o rivestito da sostanze fotosensibili e collegato al polo negativo, come mostrato in **figura C7.9**.



**Figura C7.9** Struttura di principio di una fotocellula.

Il **galvanometro**  $G$  consente di misurare correnti anche di debole intensità.

Quando il catodo  $K$  viene illuminato dalla radiazione  $L$ , per l'effetto fotoelettrico emette elettroni, i quali sono attratti dall'anodo  $A$ , avente carica positiva: nel circuito in cui è inserita la cellula fotoelettrica, si crea allora una corrente elettrica, avente intensità proporzionale a quella dell'illuminazione. Interponendo un ostacolo tra la sorgente luminosa e il catodo, quest'ultimo non è più raggiunto dal fascio luminoso e quindi non emette più elettroni, provocando l'interruzione della corrente.

Su tale principio si basa il funzionamento dei trasduttori di prossimità optoelettronici, che consentono di rilevare la presenza di oggetti di qualsiasi materiale, semplicemente interrompendo un raggio luminoso.

Normalmente è impiegato un fascio di raggi infrarossi, in quanto tale radiazione difficilmente interferisce con i disturbi generati da altre fonti luminose. In generale un trasduttore di prossimità optoelettronico è composto da una sorgente luminosa,

detta **emettitore** (generalmente costituita da un LED), e da un **ricevitore** ottico, costituito da una fotocellula, in grado di rivelare il raggio luminoso emesso dal primo.

Quando il fascio luminoso, generato dall'emettitore e rilevato dalla fotocellula, viene interrotto da un oggetto qualsiasi che si interpone tra loro, la sua uscita cambia stato logico rilevando così l'oggetto che ha provocato l'interruzione.

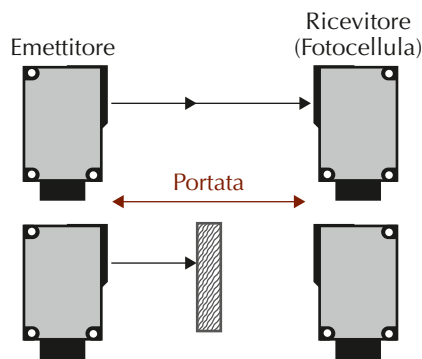
Naturalmente, affinché la fotocellula possa rilevare il raggio luminoso, deve essere perfettamente allineata con l'emettitore.

### Classificazioni dei trasduttori optoelettronici

I trasduttori di prossimità optoelettronici possono essere classificati in tre categorie:

- **trasduttori a barriera;**
- **trasduttori a riflessione;**

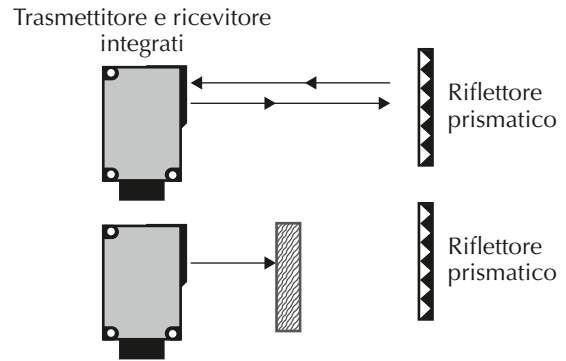
Nei trasduttori a barriera l'emettitore e il ricevitore (fotocellula) sono separati, come mostrato nella **figura C7.10**. Qualunque oggetto non trasparente interposto tra loro interrompe il raggio luminoso e viene pertanto rilevato; questo tipo di trasduttore è generalmente impiegato quando sono richieste elevate distanze da coprire (anche dell'ordine di diversi metri).



**Figura C7.10** Trasduttori a barriera.

Nei sistemi a riflessione, utilizzati per medie distanze di copertura (uno, massimo due metri), l'emettitore e il ricevitore sono integrati nello stesso contenitore; il riflettore prismatico che riflette il raggio trasmesso verso il ricevitore è posizionato di fronte all'elemento fotoelettrico, come mostrato in **figura C7.11**, anche in questo caso a ogni interruzione/ripristino del raggio luminoso cambia lo stato dell'uscita.

Nella **figura C7.12** sono infine mostrate le due tipologie di trasduttori.



**Figura C7.11** Trasduttori a riflessione.

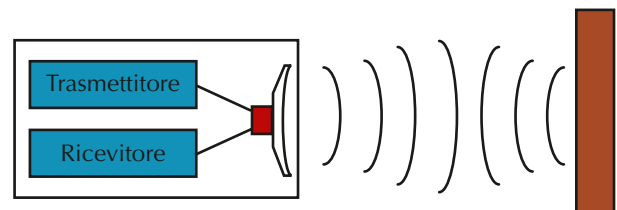


**Figura C7.12** Fotocellula a barriera (a) e fotocellula a riflessione (b).

### C7.5 Trasduttori a ultrasuoni

I trasduttori di prossimità a ultrasuoni sono basati sul fenomeno della riflessione del suono: essi, infatti, emettono impulsi nella gamma degli ultrasuoni e rilevano l'eventuale eco di ritorno generato dalla presenza di un oggetto all'interno della portata nominale.

Come mostrato nella **figura C7.13**, la distanza e quindi la presenza di un oggetto viene determinata inviando un treno di impulsi acustici a frequenze superiori alla gamma udibile (oltre 20 kHz) e analizzando il tempo di ritardo nella ricezione degli impulsi riflessi.



**Figura C7.13** Schema di principio di un trasduttore a ultrasuoni.

Nota la velocità di propagazione delle onde acustiche  $V_c$  e l'angolo  $\theta$  tra la direzione di propagazione e la perpendicolare alla superficie riflettente (*angolo di incidenza*), la relazione che lega la distanza al tempo di ritardo  $T_r$  è la seguente:

$$d = \frac{1}{2} V_c T_r \cos \theta \quad (7.4)$$

Se l'oggetto è sufficientemente distante dalla coppia emettitore/ricevitore l'angolo di incidenza è prossimo allo zero ( $\cos \theta \approx 1$ ).

## C7.6 Trasduttori di prossimità magnetici

I trasduttori di prossimità magnetici funzionano rilevando il campo magnetico generato da un magnete permanente appositamente posizionato sull'oggetto da rilevare; sono basati sul principio dei **contatti Reed** e sull'**effetto Hall**.

### Trasduttori di prossimità a contatto Reed

Fondamentalmente il contatto Reed è un interruttore a lamina che si chiude in presenza di un campo magnetico.

Nella forma più semplice è costituito da due lamine, realizzate con materiale ferromagnetico, parzialmente sovrapposte e separate da qualche decimo di millimetro [fig. C7.14]; sulle lamine contrapposte sono riportati dei contatti, generalmente in oro diffuso.

Ampolla sotto vuoto

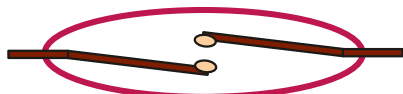


Figura C7.14 Schema di principio di un contatto Reed.

Le lamine vengono sigillate all'interno di un piccolo contenitore di vetro riempito di gas inerte (azoto o argon); le estremità delle lamine (opposte ai contatti) che fuoriescono dal contenitore costituiscono i terminali del contatto.

Il campo magnetico generato dal magnete permanente applicato all'oggetto da rilevare, induce sulle due lamine polarità magnetiche di segno opposto, che pertanto tendono ad attrarsi: se il campo magnetico è sufficientemente elevato, la forza d'attrazione supera la resistenza alla flessione delle lamine, che così chiudono il circuito elettrico nel quale sono inserite [fig. C7.15].

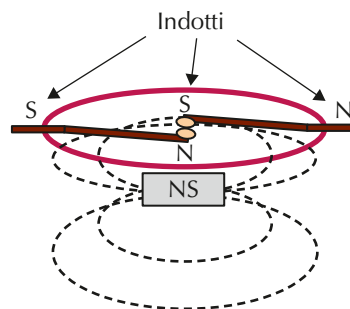


Figura C7.15 Induzione dei poli opposti e chiusura del contatto Reed.

Essendo il funzionamento del trasduttore basato sull'elasticità delle lamine, il tempo medio di vita del dispositivo non è molto elevato (circa  $10^8$  operazioni).

Inoltre, occorre tener presente i livelli di tensione e corrente del circuito nel quale il contatto Reed è inserito, in quanto, nel caso superino i valori di funzionamento stabiliti, possono provocare l'incollamento dei contatti che rende il dispositivo non più utilizzabile.

Sono infine da considerare gli effetti di rimbalzo in seguito alla chiusura del contatto, che possono limitare la frequenza di funzionamento.

Rispetto ai contatti tradizionali ad azionamento meccanico il contatto Reed presenta i seguenti vantaggi:

- la chiusura ermetica protegge i contatti dalla polvere, dall'ossidazione e dalla corrosione;
- l'azionamento dei contatti è molto semplice (non sono presenti meccanismi) in quanto avviene mediante un campo magnetico;
- velocità di funzionamento fino a 300 Hz e breve tempo di attrazione (1,5 – 3 m/s compresi i rimbalzi);
- assenza di manutenzione e ingombro limitato.

### Trasduttori di prossimità a effetto Hall

Il campo magnetico generato dal magnete permanente posizionato sull'oggetto da controllare può essere rilevato anche da un trasduttore a effetto Hall (unità C6), il quale genera una tensione  $V_H$  che dipende dall'intensità del campo magnetico e che decresce (secondo una relazione non lineare) con l'aumentare della distanza del magnete dal trasduttore.

Se tale tensione pilota un rivelatore di soglia con isteresi (**Schmitt Trigger**), all'uscita di quest'ultimo si ha un segnale di livello alto nel caso il trasduttore arrivi entro la zona di azionamento, di basso livello in caso contrario.

## CONTENUTI

- C8.1** Trasduttori CCD
- C8.2** Principio di funzionamento di un CCD
- C8.3** Generazione delle cariche per effetto fotoelettrico e raccolta delle cariche nei pozzi di potenziale
- C8.4** Trasferimento delle cariche
- C8.5** Estrazione delle cariche
- C8.6** Risoluzione di un CCD



Dispositivi fotoemittenti

# TRASDUTTORI DI IMMAGINI

## C8.1 Trasduttori CCD

I **CCD**, acronimo di *Charge Coupled Device*, sono trasduttori ottico-elettrici costituiti da una griglia rettangolare di elementi semiconduttori, detti anche **celle** o **elementi di base** o **pixel**, disposti in righe (file orizzontali) e in colonne (file verticali), in grado di accumulare una carica elettrica (charge) proporzionale all'intensità della radiazione luminosa che li colpisce.

I pixel sono accoppiati tra loro (*coupled*) in maniera tale che ciascuno di essi, sollecitato da un opportuno impulso elettrico, può trasferire la propria carica elettrica al pixel adiacente, analogamente a quanto avviene in un registro a scorrimento: le cariche elettriche generate a una estremità possono essere pertanto rilevate all'altra estremità del dispositivo, ottenendo così un segnale elettrico che riproduce la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD.

Tale segnale può essere utilizzato direttamente nella sua forma analogica per riprodurre l'immagine su un monitor o per registrarla su supporti magnetici, oppure può essere convertito in formato digitale per l'immagazzinamento in *file*, consentendone così un riutilizzo futuro.

I CCD sono stati ideati nel 1969 presso la divisione componenti semiconduttori dei *Bell Laboratories* da Willard S. Boyle e George E. Smith e nel 1975 fu realizzata la prima videocamera a CCD con una qualità dell'immagine adeguata per riprese televisive.

Attualmente esiste una vasta gamma di dispositivi che impiegano sensori CCD, come per esempio le webcam e i videocitofoni, che contengono CCD con basso numero di pixel, le videocamere e le macchine fotografiche digitali, che ne con-

tengono un numero molto più elevato e infine, i sensori per applicazioni astronomiche il cui numero di pixel è ancora superiore.

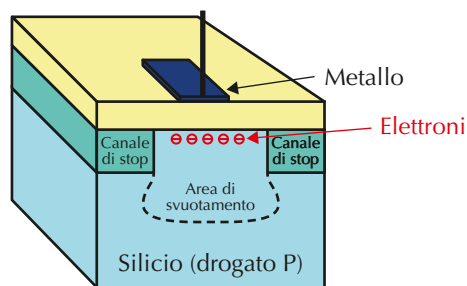
## C8.2 Principio di funzionamento di un CCD

Il funzionamento dei trasduttori CCD si basa sull'effetto fotocoduttivo che si verifica nei semiconduttori, cioè nella generazione di coppie **elettrone-lacuna** quando questi sono investiti da una radiazione di frequenza sufficientemente elevata.

Gli elettroni colpiti dalle radiazioni acquistano energia cinetica e iniziano a vibrare all'interno della struttura cristallina del semiconduttore; se tale energia è sufficiente a rompere i legami che li vincolano ai propri nuclei, si liberano nello spazio circostante formando, nel posto occupato dall'elettrone prima della rottura del legame, una carica positiva (lacuna): viene cioè generata una coppia elettrone-lacuna.

La lacuna costituisce a tutti gli effetti un portatore di carica analogamente all'elettrone libero e ambedue contribuiscono alla conduzione elettrica attraverso il semiconduttore.

Un sensore CCD è formato da una piastra di silicio organizzata secondo una matrice di *pixel*, ciascuno dei quali è costituito da un condensatore MOS (*Metal Oxide Silicon*), del quale nella **figura C8.1** è rappresentata la struttura di principio.



**Figura C8.1** Struttura di principio di un condensatore MOS.

Un condensatore MOS (C-MOS) è fondamentalmente costituito da un substrato semiconduttore di silicio P (quindi con cariche maggioritarie positive), avente spessore non superiore a  $100\ \mu\text{m}$ , ricoperto da uno strato isolante di ossido di silicio (spessore  $0,12\ \mu\text{m}$  circa) che funge da dielettrico, sopra il quale è depositato un elettrodo metallico.

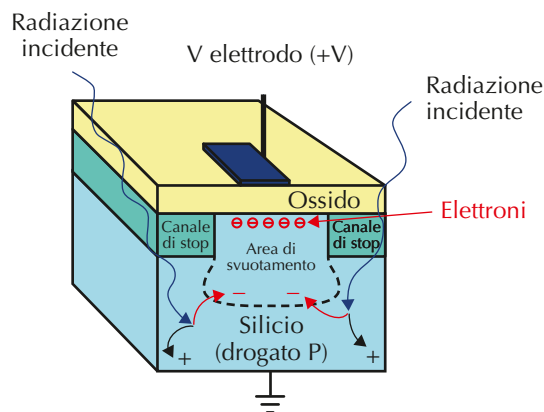
Mantenendo l'elettrodo metallico a un potenziale sufficientemente positivo rispetto al substrato di silicio, sotto lo strato di ossido si crea una regione di *svuotamento* nella quale non sono presenti portatori di carica maggioritari (lacune), ma solo portatori di carica minoritari (elettroni); le lacune, infatti, per effetto della polarizzazione positiva dell'elettrodo di metallo, si spostano verso il basso del substrato, mentre gli elettroni sono attratti in prossimità dell'ossido.

Per contenere l'estensione laterale della zona di svuotamento immediatamente sotto l'ossido, vengono create due regioni di tipo P pesantemente drogate, delle dimensioni di pochissimi micron, dette *canali di stop*: così facendo nel substrato di silicio di tipo P sottostante l'elettrodo si crea un "pozzo di potenziale" nel quale rimangono confinate le cariche minoritarie (elettroni), poiché le barriere di potenziale che delimitano il pozzo impediscono loro di spostarsi nelle zone vicine.

Una radiazione luminosa incidente il substrato di silicio, che penetra al suo interno per uno spessore dipendente dalla profondità di assorbimento del silicio stesso, genera per effetto fotoconduttivo coppie elettrone-lacuna: gli elettroni (che costituiscono le cariche minoritarie) si concentrano all'interno del pozzo di potenziale, mentre le lacune, che costituiscono le cariche maggioritarie, vengono spinte verso il basso del substrato di silicio P [fig. C8.2].

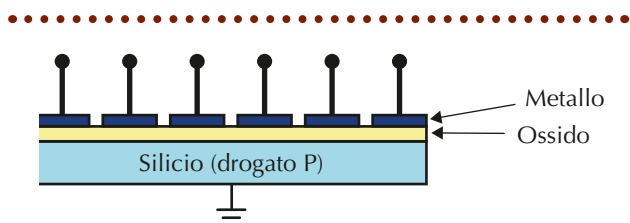
All'interno del pozzo si accumulano pertanto gli elettroni generati dalla radiazione incidente (segnale utile), ai quali si uniscono gli elettroni prodotti per agitazione termica, che costituiscono il rumore di fondo del dispositivo, riducibile abbassando la temperatura di lavoro.

Realizzando molti condensatori MOS (pixel) affiancati come in un mosaico, si ottiene un trasdut-



**Figura C8.2** Generazione del pozzo di potenziale.





**Figura C8.3** Esempio di sensore CCD a 7 pixel.

tore CCD, come indicato nella **figura C8.3** nella quale è riportato un esempio a 7 unità.

Il funzionamento del CCD può essere suddiviso in quattro fasi:

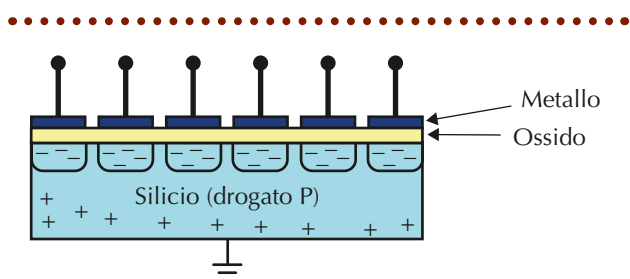
- generazione delle cariche per effetto fotoelettrico;
- raccolta delle cariche tramite la creazione di pozzi di potenziale;
- trasferimento delle cariche, variando opportunamente i potenziali degli elettrodi;
- estrazione della carica mediante il circuito di uscita.

### C8.3 Generazione delle cariche per effetto fotoelettrico e raccolta delle cariche nei pozzi di potenziale

Mantenendo gli elettrodi dei vari pixel a potenziale positivo rispetto al substrato di silicio P, nella zona sottostante l'ossido si creano tanti "pozzi di potenziale" quanti sono gli elettrodi, nei quali rimangono confinate le cariche minoritarie (elettroni).

Una radiazione luminosa che incide sul substrato di silicio genera, per effetto fotoelettrico, coppie elettrone-lacuna: gli elettroni (cariche minoritarie) si concentrano all'interno dei pozzi di potenziale [fig. C8.4], mentre le lacune (cariche maggioritarie) vengono spinte verso il basso del substrato di silicio P.

Le coppie elettrone-lacuna generate dipendono



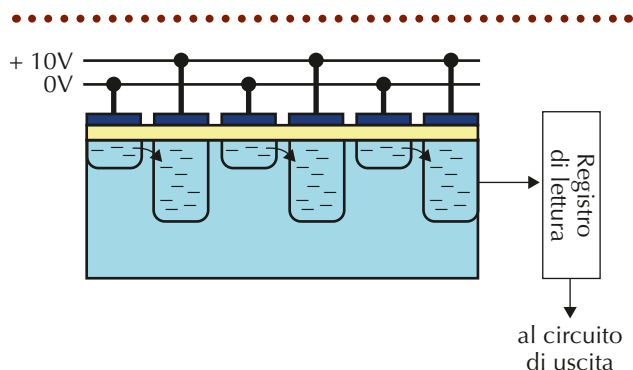
**Figura C8.4** Esempio di struttura CCD a 7 pixel.

dall'intensità della radiazione e pertanto la quantità di carica che si accumula nei pozzi è proporzionale all'intensità luminosa della radiazione incidente: conseguentemente la matrice che si forma riproduce, punto dopo punto, in termini di quantità di carica, la luminosità della radiazione incidente (immagine).

### C8.4 Trasferimento delle cariche

La fase successiva riguarda il trasferimento (accoppiamento) all'elemento successivo della carica accumulata sotto l'elettrodo; il trasferimento è realizzato portando l'elettrodo adiacente a un potenziale positivo superiore a quello vicino: così facendo il corrispondente pozzo diventa più profondo, consentendo il "trabocco" degli elettroni dal pozzo meno profondo a quello più profondo (adiacente).

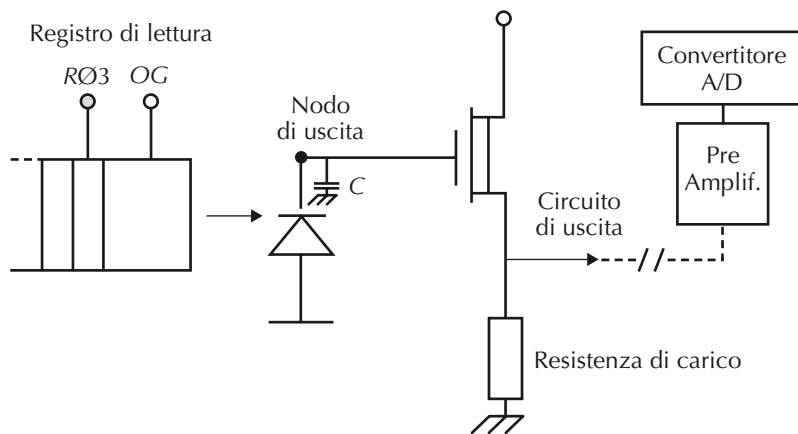
Con successive variazioni dei potenziali degli elettrodi adiacenti è pertanto possibile spostare gli elettroni nella direzione desiderata parallelamente ai canali di stop: il sensore CCD si comporta quindi come un registro a scorrimento, nel quale le cariche possono essere generate a una estremità, spostate lungo la superficie del trasduttore e rilevate all'altra estremità, dove è posto il registro di lettura [fig. C8.5], costituito da una riga di pixel, anch'essa opportunamente pilotata dai potenziali degli elettrodi, in cui la carica si sposta perpendicolarmente ai canali di stop.



**Figura C8.5** Trasferimento delle cariche lungo la superficie del CCD parallelamente ai canali di stop.

### C8.5 Estrazione delle cariche

Il contenuto del registro di lettura viene letto tramite il circuito d'uscita, di cui in **figura C8.6** è indicato uno schema di principio, prima scaricandolo sul diodo D mediante opportuna variazione dei

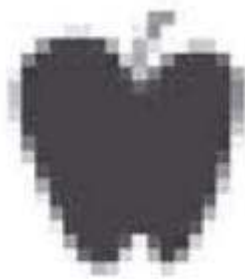


**Figura C8.6** Circuito di uscita del CCD.

potenziali di ciascun pixel del registro, poi sul nodo d'uscita (capacità  $C$ ) e infine, tramite il FET (*Field Effect Transistor*), sulla resistenza di carico (*Load*). Il segnale viene quindi amplificato da un preamplificatore posto subito dopo il circuito d'uscita del CCD e convertito in digitale dal convertitore analogico-digitale.

## C8.6 Risoluzione di un CCD

Immaginando di disporre idealmente di un piccolo CCD in bianco e nero con 400 pixel disposti secondo una matrice quadrata  $20 \times 20$ , l'immagine di una mela, per esempio, risulta costituita da 400 quadratini, ciascuno avente la propria tonalità di grigio, come mostrato in **figura C8.7**.



**Figura C8.7** Visualizzazione dell'immagine di una mela sul CCD a 400 pixel.

Si può osservare che con 400 pixel la qualità dell'immagine è molto bassa e per migliorarla è necessario aumentarne il numero.

Infatti, con un basso numero di pixel, ciascuno di essi "copre" un'area dell'immagine troppo grande e poiché la carica che accumula rappresenta la media dei dettagli luminosi che hanno colpito la sua superficie, la qualità dell'immagine è scadente.

Aumentando il numero dei pixel, ciascuno di essi va a "coprire" un'area più piccola con conseguente miglioramento della qualità: pertanto, tanto più elevato è il numero di pixel, quanto migliore risulta la qualità, ovvero la **risoluzione** dell'immagine.

Come visto nell'unità A2 (paragrafo A2.5) la risoluzione di un'immagine digitale è il numero di pixel che compongono l'immagine stessa espresso in base per altezza: nell'esempio di **figura C8.6** la risoluzione dell'immagine è quindi  $20 \times 20$ .

Nella **figura C8.8** è infine mostrato un sensore CCD, normalmente utilizzato nelle videocamere.



**Figura C8.8** Sensore CCD per videocamera.

## CONTENUTI

- C9.1 Il suono
- C9.2 Trasduzione acustico-elettrica
- C9.3 Microfoni a spostamento
- C9.4 Microfoni a velocità



Microfoni a carbone  
e radiomicrofoni

# TRASDUTTORI DI SUONI

## C9.1 Il suono

Il suono è una perturbazione di tipo ondulatorio (avente una determinata frequenza) che si propaga in un mezzo elastico, in grado di generare una sensazione uditiva nell'uomo (e più in generale in tutti gli esseri viventi).

Non tutti i suoni sono udibili dall'uomo, ma soltanto quelli la cui frequenza è compresa tra circa 20 Hz e 20 KHz; le perturbazioni che hanno frequenze inferiori a 16-20 Hz vengono dette **infrasuoni**, mentre quelle di frequenza superiore a 20 kHz vengono dette **ultrasuoni**.

L'uomo genera i suoni mediante due membrane in grado di vibrare, chiamate **corde vocali**, che producono oscillazioni trasmesse all'aria circostante mediante la bocca, la quale, insieme alle fosse nasali, costituisce una specie di cassa di risonanza che modula e rafforza il suono emesso.

Le vibrazioni delle corde vocali generano un moto oscillatorio che si trasmette alle molecole d'aria immediatamente vicine, le quali a loro volta entrano in oscillazione trasmettendo tale moto a quelle vicine e così via: la propagazione dell'onda sonora nell'aria, e più in generale in un qualsiasi mezzo, avviene perciò per successive trasmissioni di un moto oscillatorio.

Nel caso in cui la direzione del moto coincide con quella della propagazione della perturbazione, l'onda sonora è detta **longitudinale**, mentre se è ortogonale alla direzione di propagazione è denominata **trasversale**.

Negli aeriformi e nei liquidi le onde sonore sono longitudinali, mentre nei solidi possono essere sia longitudinali che trasversali.

Se il suono è caratterizzato da una sola frequenza è detto **semplice** o **puro**, mentre se il suo spettro è costituito da più frequenze, cioè da più onde di diversa frequenza, si dice **composto**.

Nel caso di un suono composto e periodico, il

contenuto spettrale è formato da una componente fondamentale, alla quale è associata la maggior parte dell'energia e da un certo numero di armoniche aventi frequenza pari a un multiplo intero della frequenza fondamentale.

## C9.2 Trasduzione acustico-elettrica

La **trasduzione acustico-elettrica**, cioè la trasformazione di un suono generato da una sorgente sonora in un segnale elettrico, si effettua mediante trasduttori denominati **microfoni**.

Generalmente la traduzione acustico-elettrica è indiretta, nel senso che l'energia acustica viene prima convertita in energia meccanica mediante un organo mobile (sensore) e successivamente in energia elettrica.

In base al movimento dell'organo mobile i microfoni possono essere classificati in:

- **microfoni a spostamento;**
- **microfoni a velocità.**

I primi generano una tensione elettrica proporzionale allo spostamento dell'organo mobile rispetto alla posizione di riposo e l'accoppiamento tra il sistema meccanico e quello elettrico è di natura elettrica.

Nei secondi, invece, la tensione elettrica generata è proporzionale alla velocità di spostamento dell'organo mobile e l'accoppiamento meccanico-elettrico è di natura magnetica.

Alla prima categoria appartengono i microfoni a condensatore, piezoelettrico, ceramico e a transistor, mentre alla seconda categoria appartengono il microfoni a bobina mobile e a nastro.

Una seconda classificazione, può essere fatta in base alle modalità con cui viene effettuata la conversione acustico-meccanica, per cui si hanno:

- **microfono a pressione;**
- **microfoni a gradiente di pressione.**

Nei microfoni a pressione solo una faccia dell'organo mobile viene investita dalle onde sonore, mentre in quelli a gradiente di pressione queste ultime investono entrambe le facce.

## C9.3 Microfoni a spostamento

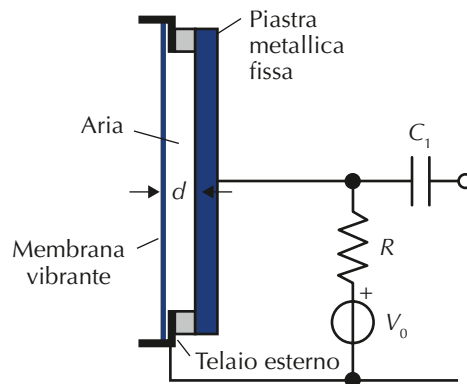
### Microfono a condensatore

Il microfono a condensatore, o elettrostatico, appartiene alla classe dei microfoni a spostamento in quanto la tensione elettrica generata è proporzio-

nale allo spostamento di una delle due armature di un condensatore piano.

Lo schema di principio è del tipo indicato nella **figura C9.1**.

L'organo mobile è costituito da una membrana vibrante di spessore variabile tra 20-40  $\mu\text{m}$ , fissata su un telaio tramite due anelli di materiale isolante a una distanza di circa 40-50  $\mu\text{m}$  da una piastra metallica fissa avente la stessa superficie della membrana; la membrana e la piastra costituiscono le armature di un condensatore piano, denominato **condensatore microfonico**, il cui dielettrico è l'aria.



**Figura C9.1** Principio di funzionamento del microfono a condensatore.

Sia la membrana vibrante che la piastra sono collegate a un circuito di polarizzazione, costituito da un generatore di tensione continua  $V_0$ , con in serie una resistenza  $R$  di elevato valore (per tale ragione il microfono a condensatore è anche detto polarizzato).

In condizioni di riposo, cioè di completa assenza di perturbazioni esterne, il condensatore microfonico viene caricato alla tensione  $V_0$  e quindi accumula una carica  $Q_0$  proporzionale alla sua capacità statica ( $Q_0 = C_0 V_0$ ), mentre la membrana rimane fissa a distanza  $d$  dalla piastra.

Un'onda sonora che investe la membrana genera una forza che la fa vibrare provocandone spostamenti rispetto alla condizione di riposo e quindi variazioni della distanza  $d$  tra membrana e piastra. Poiché la capacità di un condensatore piano è direttamente proporzionale a tale distanza  $\left(C = \epsilon \frac{S}{d}\right)$ ,

si ha una corrispondente variazione  $\Delta C$  rispetto al valore statico  $C_0$ , con conseguente variazione  $\Delta Q$  della quantità di carica  $Q_0$ : se, però, la costante di tempo  $RC_0$  è molto grande rispetto alle variazioni  $\Delta C$ , la quantità di carica non riesce a

seguire in tempo reale tali variazioni, per cui si può ipotizzare con sufficiente approssimazione che  $Q_0$  rimanga costante (è questo il motivo per cui la resistenza  $R$  del circuito di polarizzazione deve essere di valore molto elevato).

Con questa ipotesi le variazioni di capacità  $\Delta C$  si traducono in corrispondenti variazioni di tensione che si sovrappongono alla componente continua di polarizzazione  $V_0$ , la quale, essendo filtrata dal condensatore  $C_1$ , genera all'uscita del circuito una tensione proporzionale all'intensità energetica dell'onda sonora incidente.

Inoltre, poiché gli spostamenti della membrana provocati dall'incidenza dell'onda sono in genere molto piccoli (dell'ordine di qualche micron), per ottenere apprezzabili variazioni di capacità, e quindi variazioni della tensione d'uscita sufficientemente elevate, occorre rendere la distanza  $d$  della membrana dalla piastra molto piccola e impiegare elevati valori della tensione di polarizzazione  $V_0$ .

Generalmente  $V_0$  è dell'ordine di 180–200 V, mentre la capacità statica  $C_0$  ha un valore compreso tra 200 e 400 pF; le corrispondenti variazioni di capacità prodotte dall'incidenza dell'onda sonora rispetto a  $C_0$  sono dell'ordine dello 0,01%. Dato il notevole costo di realizzazione, dovuto in particolare alla necessità di un'elevata tensione di polarizzazione e alle difficoltà costruttive, il microfono a condensatore viene per lo più impiegato in laboratorio come strumento di studio dei suoni e nelle applicazioni professionali.

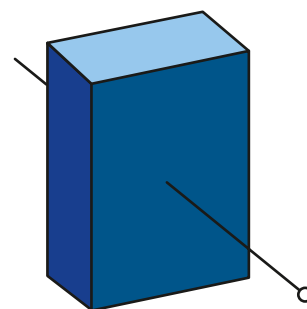
### Microfono piezoelettrico

Il funzionamento di un microfono piezoelettrico si basa sull'effetto piezoelettrico (unità C4), tipico di alcuni cristalli come il quarzo o il sale di Rochelle, secondo il quale alcuni corpi cristallini, detti **cristalli piezoelettrici**, si polarizzano elettricamente se sottoposti a una deformazione meccanica di natura elastica.

Se la deformazione prodotta è di natura acustica, cioè dovuta all'incidenza di un'onda sonora, viene generata una tensione che dipende dall'intensità energetica dell'onda.

L'elemento base di un microfono piezoelettrico è quindi costituito da una piastrina di materiale piezoelettrico, sulle cui facce sono saldati due elettrodi dai quali è possibile prelevare la tensione generata [fig. C9.2].

I vantaggi di questo microfono rispetto a quello a condensatore sono l'assenza della tensione di polarizzazione e una notevole semplicità costruttiva (è costituito semplicemente da una piastrina di materiale piezoelettrico).



**Figura C9.2** Schema di principio di un microfono piezoelettrico.

L'azione dell'onda sonora sulla piastrina può essere diretta o indiretta: nel primo caso l'onda incide direttamente sulle facce del cristallo, mentre nel secondo su una membrana a esso aderente.

### Microfono ceramico

Il microfono ceramico presenta caratteristiche analoghe a quelle del microfono piezoelettrico. È infatti costituito da una piastrina di materiale ceramico, dove le proprietà della piezoelettricità vengono indotte artificialmente mediante l'azione di un campo elettrico durante la fase di preparazione del materiale.

I materiali ceramici maggiormente impiegati sono quelli al **titanato di bario** in quanto questo materiale, oltre al grande vantaggio di non risentire del calore e dell'umidità, presenta un'ottima curva di risposta tra i 60 Hz e i 13 kHz.

### Microfono a transistor

Il microfono a transistor si basa sull'**effetto piezoresistivo**, tipico di alcuni cristalli come il silicio. In questi materiali, infatti, una sollecitazione meccanica provoca deformazioni elastiche della struttura cristallina che generano variazioni della sua resistenza elettrica.

Se una sollecitazione acustica è applicata sulla superficie esterna dell'emettitore di un transistor, vengono generate delle deformazioni elastiche che provocano una variazione della corrente di collettore proporzionalmente all'intensità energetica dell'onda incidente, la quale si traduce, ai capi della resistenza di collettore, in una variazione di tensione anch'essa proporzionale all'intensità dell'onda incidente.

La pressione acustica viene esercitata su una punta di zaffiro o di diamante (del diametro di 50  $\mu\text{m}$ ), direttamente connessa alla superficie dell'emettitore.

## C9.4 Microfoni a velocità

### Microfono a bobina mobile

Il microfono a bobina mobile, o dinamico, appartiene alla classe dei microfoni a velocità, in quanto la tensione elettrica che genera è proporzionale alla velocità di spostamento dell'organo mobile (in questo caso costituito da una bobina mobile).

Fondamentalmente è costituito da una bobina avvolta su un supporto cilindrico, rigidamente connessa a una membrana metallica a forma di cupola [fig. C9.3].

La bobina è immersa in un traferro cilindrico, sede di un campo magnetico radiale prodotto da un magnete permanente a forma di corona circolare.

Un'onda sonora che incide sulla membrana trasmette a quest'ultima un moto vibrazionale che fa oscillare assialmente la bobina sulle cui spire, che tagliano le linee di forza del campo magnetico, viene indotta (per la legge dell'induzione elettromagnetica) una tensione che ha andamento nel tempo uguale all'onda sonora incidente sulla membrana.

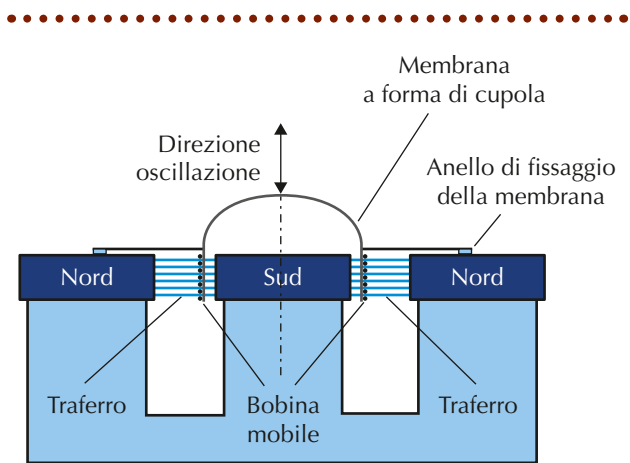


Figura C9.3 Schema di principio di un microfono a bobina mobile.

Essendo in questo caso il campo magnetico prodotto da un magnete permanente, il microfono è definito **magnetodinamico**; se invece il campo è generato da una corrente elettrica continua è detto **elettrodinamico**.

### Microfono a nastro

Nel microfono a nastro l'organo mobile è costituito da una sottile lamina di materiale conduttore avente larghezza compresa tra 3 e 5 mm, lunghezza variabile tra 5 e 6 cm e spessore dell'ordine del centesimo di mm.

Tale lamina, tramite un apposito sistema di bloccaggio, è immersa in un campo magnetico, generato da due espansioni polari permanenti, in modo tale che risulti parallela alle linee di forza magnetiche [fig. C9.4].

Un'onda sonora che incide sul nastro genera una forza che lo fa vibrare perpendicolarmente alle linee di forza del campo magnetico, per cui il nastro diventa sede di una tensione indotta che riproduce nel tempo l'andamento dell'onda incidente.

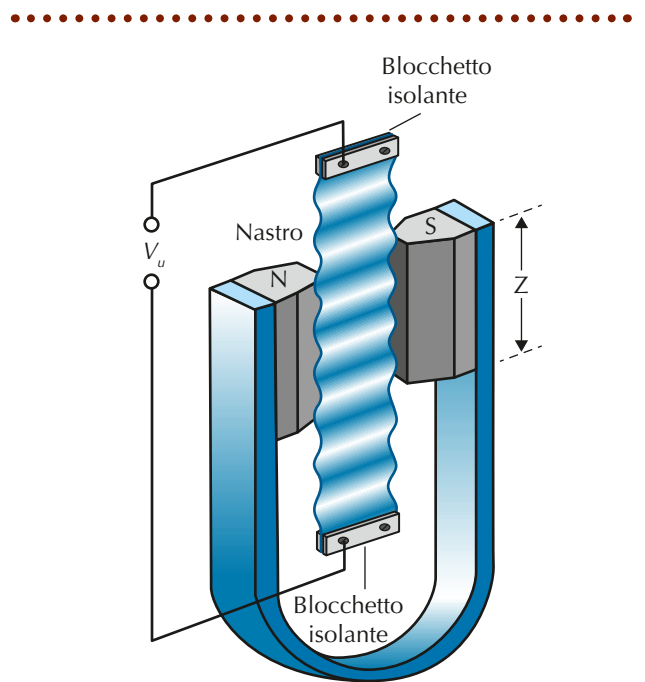


Figura C9.4 Schema di principio di un microfono a nastro.

Dalla figura C9.4 si può osservare che il nastro non è liscio, ma corrugato allo scopo sia di aumentare la resistenza meccanica trasversale, sia di rendere il nastro più cedevole, in modo da aumentarne la sensibilità alla pressione acustica.

Poiché entrambe le facce del nastro sono interessate al campo sonoro, il microfono a nastro è del tipo a gradiente di pressione.

.....  
[C1] Qual è la differenza tra un sensore e un trasduttore?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C2] Quali sono i sistemi fisici esterni con i quali il trasduttore interagisce?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C3] Che cosa sono le grandezze di influenza?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C4] Fornisci una definizione di trasduttore passivo.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C5] Che cos'è il campo di misura di un trasduttore?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C6] Un trasduttore funziona in regime stazionario quando:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C7] Elenca le caratteristiche generali di un trasduttore.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C8] Spiega brevemente in cosa consiste il diagramma di taratura di un trasduttore.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C9] La sensibilità di un trasduttore rappresenta il rapporto fra la ..... e la  
corrispondente .....

.....  
[C10] Che cosa rappresenta la stabilità di un trasduttore?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....



.....  
[C11] Descrivi la risposta in frequenza di un trasduttore.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C12] La ripetibilità di un trasduttore quantifica l'attitudine del trasduttore a fornire .....  
..... poco differenti fra loro, quando all'ingresso è applicato più volte  
e consecutivamente lo .....

.....  
[C13] Descrivi il principio di funzionamento del potenziometro.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C14] Il potenziometro ha un'affidabilità limitata?

VERO       FALSO

.....  
[C15] Il trasformatore lineare differenziale è un trasduttore attivo?

VERO       FALSO

.....  
[C16] Descrivi il principio di funzionamento del trasformatore lineare differenziale.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C17] Descrivi il principio di funzionamento del resolver.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C18] Descrivi il principio di funzionamento dell'encoder incrementale.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C19] Descrivi il principio di funzionamento dell'encoder assoluto.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C20] La dinamo tachimetrica è un ..... che fornisce una .....  
.....proporzionale alla .....

.....  
[C21] Che cos'è un estensimetro?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

# ESERCITAZIONI

.....  
[C22] L'effetto piezoelettrico è un fenomeno per cui alcuni corpi cristallini, detti cristalli piezoelettrici, si polarizzano elettricamente se sottoposti a una deformazione meccanica di natura elastica.

VERO       FALSO

.....  
[C23] Quali sono le interfacce meccaniche che consentono di convertire la pressione di un fluido in uno spostamento?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C24] Che cos'è il tubo di Bourbon?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C25] Descrivi il principio di funzionamento dell'accelerometro.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C26] Le termoresistenze sono dispositivi in cui il valore della propria ..... varia al variare della .....

.....  
[C27] Spiega brevemente il motivo fisico per cui un incremento della temperatura provoca un aumento della resistenza.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

# ESERCITAZIONI

.....  
[C28] Le termocoppie sono dei trasduttori di temperatura il cui funzionamento è basato sull'effetto:

- a) fotoelettrico;
- b) Hall;
- c) Seebeck;
- d) piezoelettrico.

.....  
[C29] Le termocoppie necessitano di una alimentazione esterna.

VERO       FALSO

.....  
[C30] Che cos'è un termistore?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C31] Nei termistori NTC la resistenza aumenta all'aumentare della temperatura.

VERO       FALSO

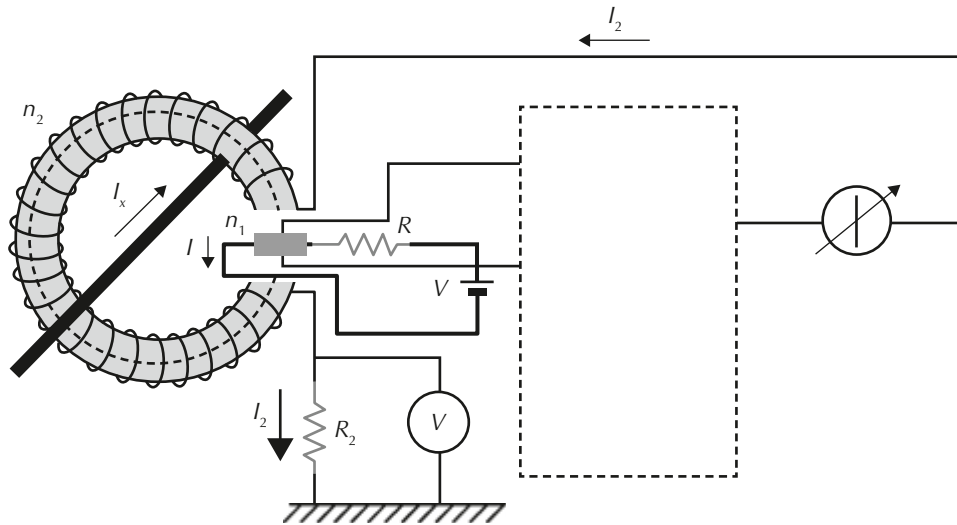
.....  
[C32] Che cosa rappresenta temperatura di switching in un termistore PTC?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C33] Descrivi l'effetto Hall.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

[C34] Completa il seguente schema relativo a un trasduttore a effetto Hall a compensazione di campo.



[C35] Qual è la funzione dei sensori di prossimità?

.....

.....

.....

.....

.....

[C36] Descrivi brevemente il principio di funzionamento del trasduttore induttivo attivo.

.....

.....

.....

.....

.....

[C37] Come può essere ottenuta la variazione della capacità di un condensatore?

.....

.....

.....

.....

.....

# ESERCITAZIONI

.....  
[C38] Elenca i punti fondamentali dell'effetto fotoelettrico.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C39] Descrivi brevemente la struttura di una cellula fotoelettrica.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C40] Nei primi trasduttori a barriera l'emettitore e il ricevitore (fotocellula) sono separati tra di loro.

VERO       FALSO

.....  
[C41] I trasduttori di prossimità a ultrasuoni sfruttano la capacità di un materiale ..... il suono.

.....  
[C42] Che cos'è il contatto Reed?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C43] Elenca i vantaggi del contatto Reed rispetto ai contatti tradizionali ad azionamento meccanico.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C44] Che cos'è il suono?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C45] Un suono caratterizzato da una sola frequenza è detto:

- a) semplice;
- b) composto;
- c) trasversale;
- d) longitudinale.

.....  
[C46] Descrivi il funzionamento di un microfono a condensatore.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[C47] Il microfono a transistor si basa sull'effetto:

- a) fotoelettrico;
- b) fotoconduttivo;
- c) piezoresistivo;
- d) piezoelettrico.

.....  
[C48] Il microfono a bobina mobile appartiene alla classe dei microfoni a velocità.

VERO       FALSO

.....  
[C49] Nel microfono a nastro l'organo mobile è costituito da ..... avente  
larghezza compresa tra ....., lunghezza variabile tra .....  
e spessore dell'ordine del .....





# MODULO D

## Sistema di elaborazione dati

### Unità D1: L'elaboratore elettronico

- D1.1 Introduzione
- D1.2 Il computer
- D1.3 L'architettura di von Neumann
- D1.4 Struttura di un computer
- D1.5 La scheda madre

### Unità D2: Memoria di massa

- D2.1 Introduzione
- D2.2 L'hard disk
- D2.3 Dischi a stato solido
- D2.4 CD
- D2.5 DVD
- D2.6 Dischi blu-ray
- D2.7 USB Flash Drive

### Obiettivi

- Conoscere il principio di funzionamento di un elaboratore elettronico
- Saper individuare i componenti fondamentali di un elaboratore elettronico
- Conoscere le principali memorie di massa e i relativi aspetti costruttivi
- Saper individuare il ruolo dell'elaboratore elettronico all'interno di un sistema di acquisizione dati

## CONTENUTI

- D1.1 Introduzione
- D1.2 Il computer
- D1.3 L'architettura di von Neumann
- D1.4 Struttura di un computer
- D1.5 La scheda madre



### Il microprocessore

# L'ELABORATORE ELETTRONICO

## D1.1 Introduzione

Il **sistema di elaborazione dati**, o **blocco dati** come indicato nella **figura B2.1** (unità B2), costituisce la parte finale del sistema di acquisizione dati. È costituito da un elaboratore elettronico capace di eseguire operazioni di manipolazione e rappresentazione delle informazioni rilevate dal trasduttore, opportunamente adattate dal blocco di condizionamento e convertite in un segnale digitale dal blocco di conversione.

Può essere costituito da:

- un PLC (*Programmable Logic Controller*);
- un computer.

Il PLC, già trattato nel volume 2 e al quale si rimanda, è un'apparecchiatura elettronica programmabile in grado di interpretare ed eseguire le istruzioni dei programmi in essa memorizzati, interagendo con un circuito di controllo attraverso dispositivi d'ingresso (input) e d'uscita (output). Nel corso degli anni ha sostituito i tradizionali circuiti elettromeccanici ed elettronici in logica cablata, con i seguenti vantaggi:

- **flessibilità**: possibilità di adeguare un sistema a nuove esigenze di processo senza rivoluzionarne la configurazione fisica (hardware), ma solo modificando il programma (software) realizzato per il suo esclusivo funzionamento;
- **affidabilità**: comprende componenti elettronici che non necessitano di manutenzioni particolari, dispone di funzioni autodiagnostiche e può interagire con computer gestionali in grado di monitorarne l'attività;
- **versatilità**: si adatta facilmente a qualsiasi soluzione circuitale, in quanto il suo funziona-

mento dipende esclusivamente dal programma (software) in esso impostato;

- **riciclo**: può essere riutilizzato più volte per la medesima applicazione o per nuovi sistemi;
- **costo**: è diventato nel tempo un dispositivo avente prezzo e dimensioni sempre minori, che lo hanno reso molto vantaggioso rispetto ai comuni circuiti in logica cablata.

## D1.2 Il computer

È un sistema elettronico in grado di eseguire, mediante procedure automatiche, sequenze di operazioni logico-aritmetiche sui dati di ingresso (input) e di restituirne i risultati in uscita (output). Nel corso degli anni, la sua tecnologia ha subito notevoli evoluzioni, sia nella struttura architettonica sia nelle modalità operative.

La maggior parte dei computer sono oggi realizzati con l'architettura di von Neumann, sviluppata negli anni Quaranta del XX secolo, la quale prevede di memorizzare programma e istruzioni nello stesso spazio di memoria, a differenza dell'architettura Harvard che prevede spazi distinti.

Il computer, insieme alla televisione, rappresenta il mezzo tecnologico che a partire dal secondo dopoguerra ha maggiormente modificato lo stile di vita delle persone: la sua invenzione ha contribuito alla nascita e allo sviluppo dell'informatica e delle telecomunicazioni moderne, segnando l'avvento della "terza rivoluzione industriale", che ha portato all'attuale società, nella quale la risorsa fondamentale è l'elaborazione e la circolazione dell'informazione.

## D1.3 L'architettura di von Neumann

Nel 1946 John von Neumann, ingegnere americano di origine ungherese, sviluppò un modello teorico di macchina di calcolo che ancora oggi è utilizzato per la progettazione degli elaboratori elettronici.

Per introdurre l'architettura di von Neumann, si supponga di dover eseguire la seguente procedura ripetitiva:

- leggere un'operazione scritta su un foglio di carta (per esempio una somma);
- eseguire l'operazione, prendendo i dati da un altro foglio (foglio dati), usandone anche un altro per i calcoli intermedi (foglio di calcolo).

- al completamento dell'operazione, scrivere il risultato su un altro foglio (foglio dei risultati).

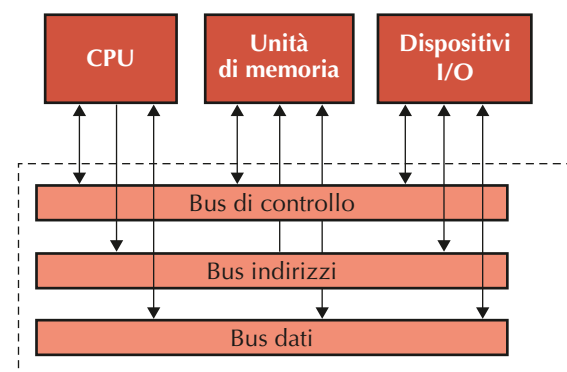
Queste azioni possono essere effettuate da un dispositivo automatico, equipaggiato con adeguati supporti elettronici cioè dal foglio di calcolo, da quello dati e da quelli per i risultati intermedi e finali.

A prescindere da come tali azioni vengono eseguite, occorre disporre dei seguenti componenti:

- una memoria per l'immagazzinamento dei dati iniziali, dei risultati intermedi e finali;
- una funzione aritmetica per lo svolgimento dell'operazione somma;
- i dispositivi di ingresso/uscita (I/O) per ricevere i dati in ingresso e inviare i risultati in uscita;
- un dispositivo di controllo, per il coordinamento del flusso dati tra i vari componenti.

Per realizzare questo processo von Neumann propose un'architettura di calcolo del tipo indicato nella **figura D1.1**, nella quale è possibile individuare cinque componenti fondamentali:

- il **microprocessore** (CPU), il quale costituisce l'elemento che interpreta ed elabora le informazioni (il "cervello" del computer);
- l'**unità di memoria**, chiamata anche **memoria centrale** o **memoria principale**, la quale contiene i dati e le istruzioni che il microprocessore deve elaborare (è importante sottolineare la differenza tra questa memoria e quella **secondaria**, detta anche **memoria di massa**, in cui sono memorizzate in modo permanente le informazioni, che non vengono perse quando il computer viene spento);
- i dispositivi o periferiche I/O, suddivisi in:
  - unità di input, tramite la quale i dati ven-



**Figura D1.1** Modello di von Neumann.

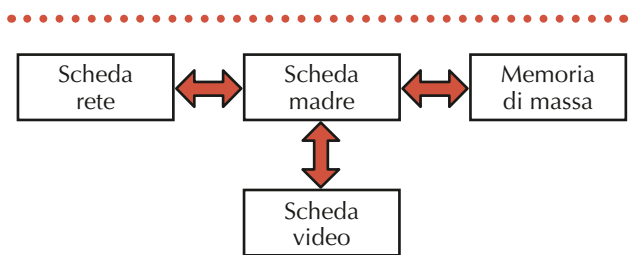
gono inseriti nel calcolatore per essere elaborati;

- unità di output, tramite la quale i dati elaborati vengono presentati in uscita;
- i **bus di controllo**, di **indirizzamento** e **dati**, ovvero i canali di comunicazione comuni che collegano tra di loro tutte le componenti.

Tale architettura, anche se proposta nel 1946, è ancora di validità generale e costituisce il modello di riferimento per la progettazione dei sistemi di elaborazione a microprocessore.

## D1.4 Struttura di un computer

Secondo l'architettura di von Neumann lo schema a blocchi di un computer è del tipo indicato nella **figura D1.2**.



**Figura D1.2** Schema a blocchi di un computer secondo l'architettura di von Neumann.

Si può osservare che è fondamentale costituito da:

- **scheda madre**: è la parte più importante che gestisce e coordina tutti gli altri blocchi, i quali devono pertanto essere a essa collegati;
- **scheda video**: è il blocco che genera il segnale elettrico da inviare al monitor affinché sia tradotto in un segnale ottico visibile dall'utente;
- **memoria di massa** (o secondaria): è il blocco che consente di memorizzare e conservare le informazioni in modo permanente, anche dopo lo spegnimento del computer.

## D1.5 La scheda madre

Le parti fondamentali della scheda madre o **scheda di sistema**, nota anche come **motherboard** o **mainboard**, sono le seguenti:

- **microprocessore**: costituisce il cuore del computer;

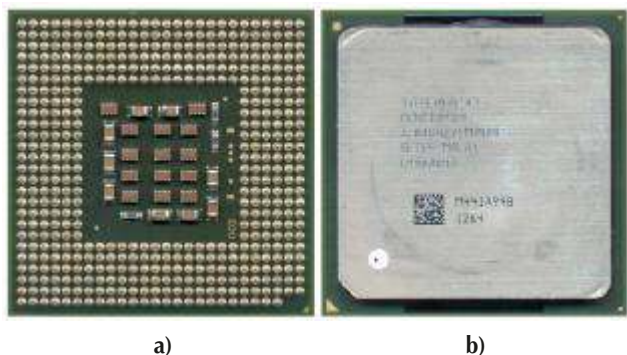
- **ROM del BIOS**: contiene il BIOS del sistema (vedere più avanti); come dice l'acronimo (*Read Only Memory*), è una memoria che può solo essere letta e non modificata, poiché i dati contenuti sono stati scritti in modo permanente in fase di costruzione;
- **RAM di sistema o memoria primaria** (*Random Access Memory*): è una memoria di tipo volatile nella quale vengono memorizzati i dati temporanei utilizzati per l'esecuzione di un programma (tanto più è grande la RAM tanto più veloce è l'esecuzione del programma); le operazioni che possono essere effettuate su una memoria RAM sono fondamentalmente due:
  - **scrittura**: operazione di memorizzazione delle informazioni nelle varie locazioni;
  - **lettura**: operazione di prelievo delle informazioni memorizzate;
- **memoria cache**: particolare memoria RAM caratterizzata da un'elevatissima velocità di accesso;
- **porte I/O**: interfacce necessarie per effettuare lo scambio dati con il mondo esterno;
- **clock di sistema**: scandisce la temporizzazione che stabilisce la cadenza delle attività del microprocessore; è realizzato con un oscillatore che utilizza la risonanza meccanica di un cristallo piezoelettrico vibrante, il quale genera un segnale caratterizzato da una frequenza molto precisa;
- **batteria tampone**: fornisce l'alimentazione continua necessaria a conservare le impostazioni del BIOS e del clock di sistema. I computer recenti utilizzano batterie al litio, che in genere hanno una vita di 5-10 anni;
- **bus di sistema**: collega il microprocessore con la RAM di sistema;
- **bus di espansione**: collega alla scheda madre, mediante i relativi connettori (slot di espansione), le schede di espansione, che hanno la funzione di aumentare la capacità elaborativa del sistema.

## Il microprocessore

È un circuito integrato multifunzionale che costituisce il cuore del computer, in grado di effettuare operazioni aritmetiche e logiche secondo una successione preordinata di istruzioni.

È contenuto in un involucro (package) che lo protegge sia dagli urti sia da agenti esterni (polvere, vapori, calore), che ne potrebbero comprometterne il corretto funzionamento; è inserito nella scheda madre tramite un particolare tipo di connettore denominato **socket**.

Il socket è fondamentalmente una piastra, fissata al circuito stampato della scheda madre e dotata di un adeguato numero di fori, in corrispondenza dei pin del microprocessore; inserendo i pin nei corrispondenti fori ed esercitando una leggera pressione sul packaging, il microprocessore viene connesso senza effettuare saldature [fig. D1.3].



**Figura D1.3** Socket del microprocessore Pentium IV (a) e relativo package (b).

Durante il funzionamento i processori producono calore, che deve essere opportunamente smaltito: temperature troppo elevate, infatti, possono avere sul microprocessore gravi conseguenze, fino all'arresto o il danneggiamento permanente.

I primi microprocessori erano raffreddati dal flusso di aria richiamato dalla ventola dell'alimentatore; successivamente il raffreddamento è stato realizzato mediante appositi dissipatori di calore e ventole dedicate.

### La ROM del BIOS

Il computer è un sistema elettronico programmabile che deve essere istruito ogni volta che viene acceso.

Nell'istante di accensione, poiché la RAM (essendo volatile) non contiene istruzioni, il microprocessore esegue un programma di avvio, denominato **BIOS** (Basic Input/Output System), che fornisce le informazioni per inizializzare il sistema.

Come prima operazione il BIOS effettua un controllo preliminare di tutte le periferiche connesse (scheda video, tastiera, mouse, stampanti ecc.) verificandone la presenza e il corretto funzionamento.

Successivamente preleva il sistema operativo dalla memoria di massa (hard disk) o da altre periferiche di archiviazione di massa (CD-ROM e DVD) e lo carica nella RAM.

Il BIOS non interviene solo all'accensione del PC, ma ha anche il compito di gestire il flusso dati tra il sistema operativo e le periferiche connesse. Fisicamente, è contenuto in una memoria di tipo ROM, detta **ROM del BIOS**, che può essere modificata e riprogrammata.

### Bus di sistema e bus di espansione

In generale per **bus** si intende un insieme di collegamenti fisici (fili elettrici, piste di circuiti stampati) utilizzabili in comune da più elementi hardware per comunicare.

Il bus concentra le comunicazioni su una singola via di dati: per tale ragione è paragonato ad "un'autostrada", le cui corsie sono costituite dai fili o dalle piste in rame realizzate sul circuito stampato.

La caratteristica saliente di un bus è la **larghezza**, che rappresenta il numero di bit inviabili contemporaneamente, ovvero il numero di linee fisiche sulle quali essi sono trasmessi (trasmissione parallela): per esempio un bus di larghezza 50 (cioè 50 fili) consente di trasmettere 50 bit in parallelo.

In base al tipo di periferiche collegate, un bus può essere classificato come:

- **bus sistema**, che connette il microprocessore con la RAM di sistema;
- **bus di espansione** o di **estensione**, che attraverso le interfacce della scheda madre (porte USB, seriali, parallele, schede collegate ai connettori PCI), collega il microprocessore alle varie periferiche (hard disk, lettori e masterizzatori di CD-ROM, DVD, tastiera, mouse), consentendo di aggiungerne di nuove grazie ai connettori di estensione (**slot**).

In base al tipo di informazioni trasportate, ciascuno di questi due bus è costituito da tre sottoinsiemi funzionali:

- il **bus di indirizzi**, che trasporta gli indirizzi delle locazioni di memoria o delle periferiche a cui il processore accede per leggere o scrivere informazioni (bus unidirezionale);
- il **bus di dati**, che veicola le istruzioni provenienti/destinate dal/al processore (bus bidirezionale);
- il **bus di controllo**, che trasporta i comandi e i segnali di sincronizzazione provenienti dal microprocessore verso le periferiche o la RAM (bus bidirezionale in quanto trasporta anche i segnali di risposta di questi ultimi).

La velocità delle informazioni trasportate da un bus, detta **velocità di trasmissione**, è definita

dalla **frequenza** (espressa in Hertz) di funzionamento del clock ed esprime il numero di bit trasmessi in un secondo su ciascun filo.

Per instaurare una comunicazione tra due dispositivi collegati mediante un bus di espansione è necessario che:

- uno dei due dispositivi prenda il controllo del bus (master) e invii all'altro (slave) una richiesta I/O;
- lo slave risponda al master per confermare la ricezione della richiesta;
- terminata la comunicazione, il master liberi il bus.

Alcuni esempi di bus di espansione sono:

- l'ATA;
- l'SCSI;
- il PCI e la sua evoluzione PCI Express.

### RAM di sistema

La **RAM** (*Random Access Memory*) è il dispositivo in cui vengono caricati il sistema operativo e i programmi da eseguire, in modo da essere facilmente indirizzati; ha un ruolo molto importante sulle prestazioni del computer.

Le informazioni memorizzate nella RAM sono temporanee (a differenza di quelle dell'hard disk che sono permanenti), ossia vengono cancellate allo spegnimento del computer e riscritte all'accensione.

La RAM è fisicamente costituita da una serie di chip raggruppati in moduli che vengono inseriti in appositi alloggiamenti della scheda madre.

Originariamente tali chip venivano installati singolarmente, saldando i relativi pin in appositi fori ricavati sul circuito stampato, oppure inseriti in uno zoccolo (configurazione denominata **Dual Inline Package**, DIP).

Con la crescente esigenza di aumentare la capacità della RAM, il numero dei chip ha raggiunto valori tali da renderne difficoltosa l'installazione: il problema è stato risolto disponendo i chip su un circuito stampato dedicato, denominato **modulo**, inserito in un apposito alloggiamento (**banco di memoria**) della scheda madre.

I primi moduli erano proprietari, cioè strettamente legati al modello di computer e quindi tra loro incompatibili.

Furono allora realizzati i moduli **SIMM** (*single in-line memory module*) i quali, utilizzando connettori a 30 pin, costituiscono il primo standard di memorie compatibili per una vasta gamma di schede madri (misuravano circa  $9 \times 2$  centime-

tri); successivamente sono state realizzate SIMM di dimensioni superiori (circa  $11 \times 2,5$  cm) che utilizzano connettori a 72 pin e possono contenere fino a 256 MB [fig. D1.4].

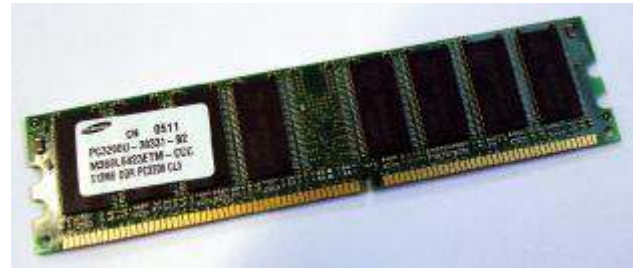


Figura D1.4 Una classica SIMM.

Con la continua crescita delle potenzialità dei microprocessori, è stato introdotto il modulo **DIMM** (*dual in-line memory module*), caratterizzato da un connettore a 168 pin e una capacità da 8 a 128 MB, le cui dimensioni sono di circa  $14 \times 2,5$  cm [fig. D1.5].



Figura D1.5 Una DIMM a 168 pin.

### Memoria cache

Si tratta di una RAM a elevata velocità di accesso utilizzata come memoria intermedia tra CPU e RAM primaria per aumentare la velocità e le prestazioni del computer [fig. D1.6].

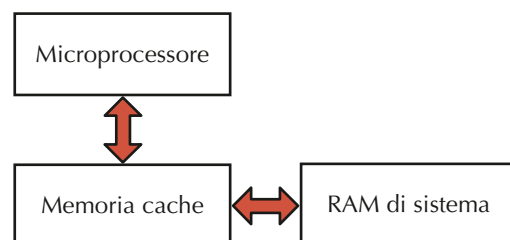


Figura D1.6 Memoria cache.

La sua funzione è quella di memorizzare i dati temporanei usati più frequentemente, rendendoli disponibili senza la necessità di prelevarli ogni volta dalla RAM, decisamente più lenta.

La cache può essere organizzata su due livelli: la **cache di primo livello** (L1), inclusa nel chip, che ospita il processore, e la **cache di secondo livello** (L2), incorporata sulla scheda madre; L1 funziona alla stessa velocità del microprocessore ed è più veloce, ma anche più costosa, della L2.

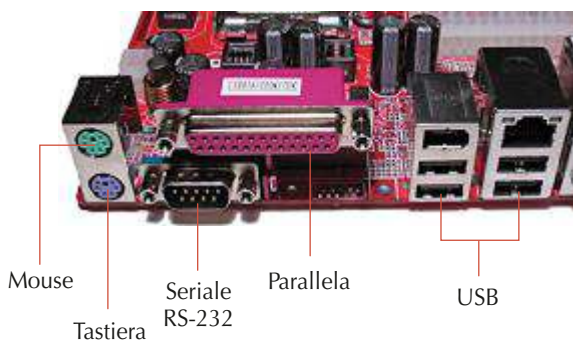
## Le porte I/O

La comunicazione tra CPU e periferiche è gestita da un insieme di componenti sia hardware sia software.

I primi (componenti hardware) sono costituiti dalle **interfacce o porte di I/O** (installate sulla scheda madre) e dai **controller** (installati sulle periferiche), mentre i secondi (componenti software) dai **driver delle periferiche**, caricati sulla periferica stessa.

Le interfacce di I/O sono formate da circuiti specifici tramite i quali le periferiche vengono interconnesse con la scheda madre.

Dal punto di vista della trasmissione, le porte si distinguono in seriali e parallele: nelle prime i dati da trasferire viaggiano in serie, nelle seconde sono trasmessi contemporaneamente sui fili del bus dati (per esempio 8, 16, 32, o 64 fili). Nella **figura D1.7** è indicata una scheda madre con le sue porte I/O.



**Figura D1.7** Porte I/O della scheda madre.

Alcune porte sono dedicate, come le PS/2 (ormai obsolete) tramite le quali sono connessi il mouse e la tastiera, altre sono generiche, come le **USB** (Universal Serial Bus) che consentono di connettere la maggior parte delle periferiche esterne.

La USB, progettata per sostituire le porte seriali più lente, supporta un collegamento a cascata di numerose periferiche in sequenza sulla stessa por-

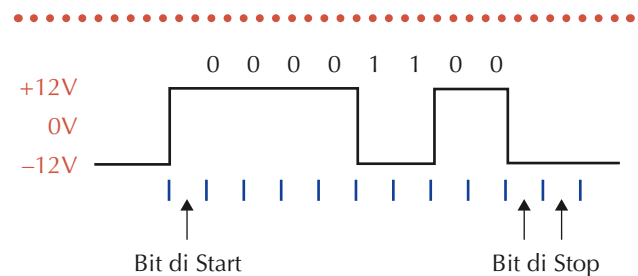
ta (fino a 127), consentendo di evitare l'utilizzo di slot interni.

## Porta seriale RS-232

La porta seriale, denominata anche porta di comunicazione asincrona, è stata sviluppata nei primi anni Sessanta del XX secolo dalla Electronic Industries Association (EIA) per realizzare una trasmissione seriale asincrona tra dispositivi digitali.

Tale standard definisce le caratteristiche elettriche dei segnali, la struttura e le temporizzazioni dei dati, le regole per il controllo del flusso di dati, il connettore e la disposizione dei relativi pin, il tipo e la lunghezza massima dei cavi di collegamento. Pur essendo stata introdotta da molti decenni, è ancora utilizzata per comunicazioni a bassa velocità tra microprocessori, dispositivi industriali e altri circuiti relativamente semplici che non necessitano di velocità elevate.

Nella **figura D1.8** è riportato, a titolo di esempio, il segnale che rappresenta la sequenza di bit 00110000.



**Figura D1.8** Segnale RS-232 a 8 bit.

La linea è inizialmente nello stato di riposo (nessun segnale in transito); la prima transizione da basso ad alto indica l'inizio della trasmissione (bit di start).

Seguono il primo bit (meno significativo), il secondo e così via, fino all'ultimo (il più significativo) e i due bit di stop che indicano la fine della sequenza: la sequenza è quindi trasmessa "al contrario", e quindi va letta da destra verso sinistra.

Si può osservare che l'ampiezza del segnale è caratterizzata da un valore "alto", pari a +12 V, che rappresenta lo zero logico, e un valore "basso", pari a -12 V, che rappresenta l'uno logico: si ha pertanto una codifica a logica negativa.

Trattandosi di una trasmissione asincrona è importante garantire il rispetto della durata dei bit: infatti, non essendo presente alcun segnale di clock comune al trasmettitore e al ricevitore, l'unico elemento di sincronizzazione è dato dal fronte di salita del bit di start.

Sono disponibili due tipologie di connettori RS-

232: il DB25 a 25 pin [fig. D1.9a] e il DB9 a 9 pin [fig. D1.9b]; entrambi sono “maschi” e identici dal punto di vista funzionale.

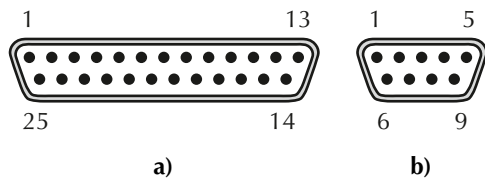


Figura D1.9 a) Connettore DB25; b) connettore DB9.

## Porta parallela

Agli inizi degli anni Ottanta è stata sviluppata una connessione che consentiva ai PC IBM di interfacciarsi con le stampanti di tipo **CENTRONICS**, molto diffuse in quegli anni: nasceva così la **porta parallela** (chiamata inizialmente **porta Centronics**), perfezionata nel corso degli anni per consentire anche il collegamento di altre periferiche quali scanner, plotter e memorie di massa, diventando così lo standard per tutti i produttori di PC.

La porta parallela ha 25 pin disposti su 2 file (come il connettore DB25): 13 sulla prima fila e 12 sulla seconda [fig. D1.10].

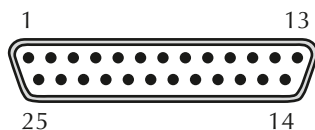


Figura D1.10 Porta parallela.

È generalmente usata per il collegamento di stampanti e dispositivi di memorizzazione esterni; trasmette otto bit (un byte) alla volta su altrettante linee parallele e quindi, rispetto alle porte seriali, consente comunicazioni più veloci.

Ha però un inconveniente: un cavo parallelo può infatti raggiungere una lunghezza massima di 30 m, a differenza di una connessione seriale che può arrivare a 300 m.

La porta parallela è ormai considerata obsoleta e in genere sono utilizzati altri standard di comunicazione come l'USB (seriale e quindi di minore ingombro, più veloce e multifunzionale).

## Le porte USB e firewire

Con il notevole incremento del numero delle periferiche le porte seriali e parallele sono diventate insufficienti e pertanto sono state introdotte nuo-

ve porte I/O denominate **USB (Universal Serial Bus)**, molto più veloci delle RS-232 e in grado di gestire tutte le periferiche.

Supportano la tecnologia **Plug and Play** (termine inglese che significa letteralmente “collega e usa”), che consente di realizzare connessioni automatiche “a caldo”, cioè senza spegnere o riavviare il computer e senza nessuna procedura di installazione o configurazione software da parte dell'utente.

Esistono 2 differenti tipi di connettori USB, di tipo A e di tipo B [fig. D1.11], entrambi costituiti da 4 linee fisiche, di cui due dedicate all'alimentazione delle periferiche e due alla trasmissione dei dati.



Figura D1.11 a) USB con connettore A; b) USB con connettore B.

La connessione USB necessita di una porta per ogni periferica: per esempio per collegare una stampante, uno scanner, un joystick e una webcam, sono necessarie 4 porte USB.

Non tutti i computer nascono però con una dotazione così ampia di porte USB: per tale ragione è possibile usare degli HUB USB che funzionano come normali hub di rete e a cui possono essere connessi fino a 127 periferiche in cascata.

A oggi esistono quattro versioni dello standard USB:

- versione 1.0 (gennaio 1996), che supporta collegamenti fino a 1,5 Mbit/s, velocità adeguate per mouse, tastiere e dispositivi lenti;
- versione 1.1 (settembre 1998), per velocità di trasmissione a 12 Mbit/s;
- versione 2.0 (aprile 2000), per velocità di trasmissione fino a 480 Mbit/s;
- versione 3.0 (settembre 2007) in grado di trasferire dati alla velocità 4,8 Gbit/s; le speci-



che USB 3.0 sono state pubblicate nell'agosto del 2008, mentre i primi prodotti commerciali sono usciti tra il 2009 e il 2010.

Le porte **firewire** [fig. D1.12], sviluppate dalla Apple e indicate anche con l'acronimo IEEE 1394, sono ormai presenti in tutti i computer e nei dispositivi elettronici di grande diffusione.

La tecnologia Firewire, molto più potente dell'USB, è stata progettata per collegare fino a 63 periferiche con un'ampia banda passante, come videocamere, macchine fotografiche, lettori di videodischi digitali, nonché le tipiche unità periferiche (stampanti, scanner ecc.).



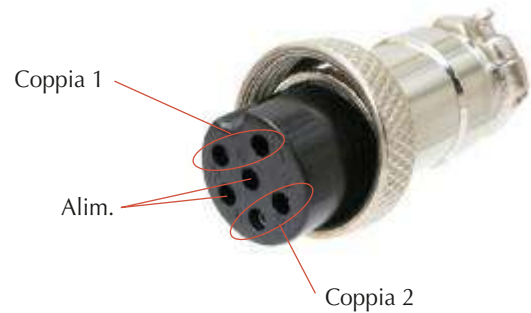
**Figura D1.12** Porta firewire.

Una porta firewire è un bus seriale che consente una comunicazione in entrambe le direzioni, ma non contemporaneamente.

Esistono 2 differenti tipi di porte firewire, quella a 4 pin e quella a 6 pin: in entrambe sono presenti 4 linee fisiche (wires) utilizzate per il trasferimento dei dati; quella a 6 pin ha in più due linee supplementari per alimentare gli apparecchi connessi [fig. D1.13]).

Le 4 linee per il trasferimento dei dati sono accoppiate 2 a 2 e schermate separatamente, l'intero cavo è a sua volta dotato di una propria schermatura: ciò consente di ottenere elevate velocità di trasmissione (fino a 30 volte superiori alla connessione USB).

Anche le porte firewire supportano la tecnologia Plug and Play: la connessione delle periferiche



**Figura D1.13** Sezione del cavetto a 6 pin.

avviene in maniera automatica assegnando a ciascuna di esse un indirizzo univoco e la rimozione/reinserimento può essere fatta a caldo (senza spegnere il computer).

La connessione firewire può essere applicata in differenti contesti, alcuni dei quali sono di seguito indicati:

- **dispositivi di storage:** hard disk, CD-ROM, masterizzatori, scanner, nastri e altri dispositivi;
- **video:** grazie alla connessione firewire, è possibile scaricare velocemente audio e video da una telecamera digitale;
- **foto:** le fotocamere digitali di ultima generazione possono memorizzare immagini ad altissima risoluzione contenenti milioni di pixel;
- **stampanti e scanner:** oltre ai benefici classici dovuti alla velocità di trasmissione, è possibile creare piccoli gruppi di lavoro per la condivisione delle periferiche in modo da ridurre l'occupazione della banda della LAN di appartenenza;
- **home entertainment:** console per videogiochi, televisori digitali, stereo, TV interattiva e computer, le quali necessitano connessioni affidabili e veloci;
- **networking:** collegamenti tra computer, realizzazione di LAN veloci (porta firewire è un bus ad altissima velocità).

# unità D2

## CONTENUTI

- D2.1 Introduzione
- D2.2 L'hard disk
- D2.3 Dischi a stato solido
- D2.4 CD
- D2.5 DVD
- D2.6 Dischi blu-ray
- D2.7 USB Flash Drive



Le memorie

# MEMORIA DI MASSA

## D2.1 Introduzione

La memoria di massa consente di immagazzinare e conservare le informazioni utili di un computer (il sistema operativo, i programmi applicativi e i dati d'utente) anche dopo il suo spegnimento.

La sua caratteristica principale è la “non volatilità”, ovvero la possibilità di memorizzare permanentemente i dati (per questo è detta anche memoria di archiviazione).

Può essere di due tipi:

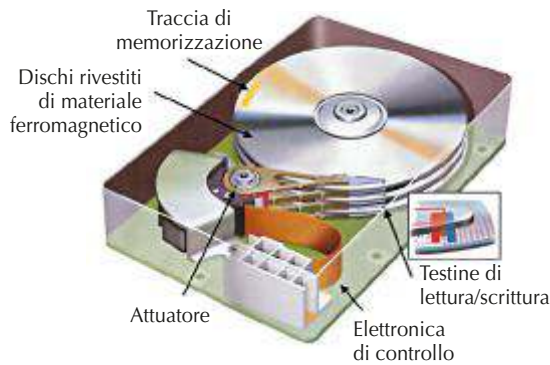
- **fissa**: integrata nel computer e non rimovibile dall'utente; un tipico esempio è il **disco fisso (hard disk)**;
- **rimovibile**: può essere facilmente rimossa dal computer; alcuni esempi tipici sono le “chiavette” **USB** (memory key), i **DVD** e i **CD-ROM**. Queste memorie, dette anche **terziarie**, sono particolarmente utili per trasferire i dati da un computer a un altro o per avere una copia di sicurezza dei dati (backup).

## D2.2 L'hard disk

È la più importante memoria di massa di tipo magnetico che ha sostituito i vecchi nastri magnetici, molto utilizzati in passato per la loro economicità in rapporto alla quantità di dati memorizzabili.

Fondamentalmente è costituito da uno o più piatti in rapida rotazione, realizzati in alluminio o vetro e rivestiti di materiale ferromagnetico, ciascuno dotato di due testine induttive (una per lato).

Durante il funzionamento le testine “volano” alla distanza di poche decine di micrometri dalla superficie dei piatti leggendo e scrivendo i dati (le testine sono sollevate dall'aria mossa dalla rotazione dei dischi).



**Figura D2.1** Struttura dell'hard disk.

Dal punto di vista funzionale l'hard disk è costituito dai seguenti componenti [fig. D2.1]:

- i piatti;
- il motore;
- le testine di lettura/scrittura;
- gli attuatori della testina;
- il filtro dell'aria;
- la scheda logica.

Tutti i componenti sono alloggiati in un case di metallo sigillato denominato **Head Disk Assembly** (HDA).

### Piatti del disco

Sono i componenti principali e costituiscono il supporto su cui vengono memorizzati i dati. Fino ad alcuni anni fa erano realizzati in alluminio, materiale robusto e leggero, che però tendeva a flettere a causa della dilatazione prodotta dalle variazioni di temperatura; per questo motivo l'alluminio è stato sostituito da un composto di vetro-ceramica che non modifica le sue dimensioni al variare della temperatura, ottenendo così dischi rigidi più stabili. La superficie dei piatti è ricoperta con un sottile strato di speciali leghe ferromagnetiche, in grado di magnetizzarsi sotto l'azione di un campo magnetico generato da una corrente elettrica.

### Il motore

Il motore dell'hard disk è dotato di un albero sul quale sono innestati una pila di piatti separati da opportuni distanziatori che assicurano una spaziatura costante, necessaria per consentire alle testine di lettura/scrittura di accedere alla parte superiore e inferiore di due piatti consecutivi. Funziona in corrente continua (CC), senza spazzole e sensori, ed è connesso direttamente all'asse

senza cinghie o ingranaggi, per evitare che eventuali vibrazioni possano causare criticità nella lettura e scrittura dei dati.

La velocità di rotazione è 3600, 4800, 5400, 7200 rpm (giri al minuto); nei dispositivi più recenti può raggiungere i 15 000 rpm.

Nella parte inferiore si trova il **conduttore di terra**, un piccolo conduttore di rame piatto, rivestito di carbone e collegato tramite un contatto strisciante all'asse, avente la funzione di scaricare l'elettricità statica che si forma durante la rotazione. Il motore è l'elemento più importante e critico del disco: la maggior parte dei problemi, infatti, derivano da suoi malfunzionamenti.

### Testine di lettura/scrittura

Realizzano le operazioni di lettura e scrittura dei dati sulla superficie dei piatti.

Su ciascun lato di un piatto agisce almeno una testina di lettura/scrittura e pertanto ogni piatto è dotato di almeno due testine.

Quando il disco è inattivo i piatti non ruotano e le testine sono forzate dalle molle dei bracci che le sostengono ad appoggiarsi sulla loro superficie; viceversa, quando è in funzione la rotazione ad alta velocità dei piatti crea un cuscinetto d'aria che le allontana dalla loro superficie.

Le testine possono essere danneggiate da piccoli corpi estranei depositati sulla superficie del disco in quanto la distanza tra queste e il piatto è molto limitata.

In particolare, le particelle di polvere, il fumo e il grasso di un'impronta umana possono causare il crash (letteralmente schianto, scontro) delle testine sulla superficie del disco: è questo il motivo per cui l'HDA deve essere sigillato.

Le testine hanno forma a U e sono avvolte a spirale da fili conduttori nei quali circola una corrente elettrica continua che genera un campo magnetico con una polarità che dipende dalla sua direzione.

Invertendo il verso della corrente si inverte la polarità del campo magnetico: queste due polarità vengono impiegate per memorizzare i valori elettrici che rappresentano gli stati binari 1 e 0.

### Processo di memorizzazione dei dati

La memorizzazione dei dati è effettuata mediante la testina di scrittura, sfruttando il fenomeno della polarizzazione magnetica: il campo magnetico generato dalla corrente elettrica che circola nell'avvolgimento delle testine agisce su una piccola area del disco (l'equivalente delle celle di memoria), provocando l'orientamento delle molecole che tendendo a disporsi parallelamente a esso.

Invertendo la direzione della corrente elettrica si inverte la polarità del campo magnetico e quindi l'effetto sull'area: ogni area può perciò assumere solo due stati determinati dal verso del campo magnetico, di cui uno rappresenta lo stato 1 e l'altro lo 0.

Il supporto di memorizzazione, costituito dal materiale magnetico che riveste i piatti, è composto da uno strato molto sottile di sostanze ferromagnetiche, generalmente a base di ossido di ferro, o a film sottile.

L'ossido è un materiale relativamente morbido, che può essere danneggiato da un crash della testina sul disco; i supporti di ossido erano usati nei modelli di dischi di fascia bassa di vecchia generazione, poiché tale materiale si poteva applicare facilmente ed era economico.

Attualmente la maggior parte delle unità a disco usano supporti a film sottile (strato estremamente sottile di metalli posti sulla superficie del disco), applicato con un processo di placcatura.

### Attuatore della testina

Gli attuatori sono dispositivi che gestiscono lo spostamento delle testine affinché i dati vengano letti o scritti correttamente nei piatti; possono essere suddivisi in due gruppi: **passo passo** e a **bobina mobile**.

Esistono profonde differenze in prestazioni e affidabilità tra queste due categorie: gli attuatori passo passo sono lenti, molto sensibili alle variazioni della temperatura e non molto affidabili, quelli a bobina mobile sono veloci, non influenzati dalle variazioni della temperatura ed estremamente affidabili, ma più costosi.

### Filtri d'aria

L'Hard disk è dotato di due filtri d'aria: uno **di ricircolo** e uno **barometrico o di ricambio**, che vengono sigillati all'interno dell'HDA.

L'HDA, pur essendo sigillato, non è impermeabile e pertanto sono possibili infiltrazioni dell'aria esterna: la funzione del filtro di ricambio è proprio quella di uniformare la pressione dell'aria all'interno dell'HDA a quella esterna in modo da eliminare flussi di aria con particelle inquinanti.

### Scheda logica

Ha la funzione di coordinare il funzionamento del motore e dell'attuatore.

### Logica di lettura e scrittura

Come visto nei precedenti paragrafi, l'hard disk è costituito da uno o più piatti circolari, che ruo-

tano intorno a un'asse, ricoperti in entrambi i lati da una sostanza ferromagnetica [fig. D2.2].

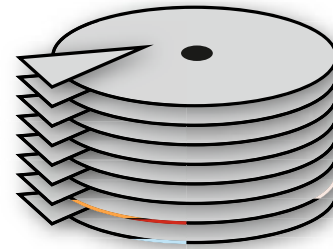


Figura D2.2 Struttura di un hard disk.

Ogni piatto comprende numerosi anelli concentrici numerati detti **tracce** [fig. D2.3a], le quali sono suddivise in spicchi detti settori [fig. D2.3b].

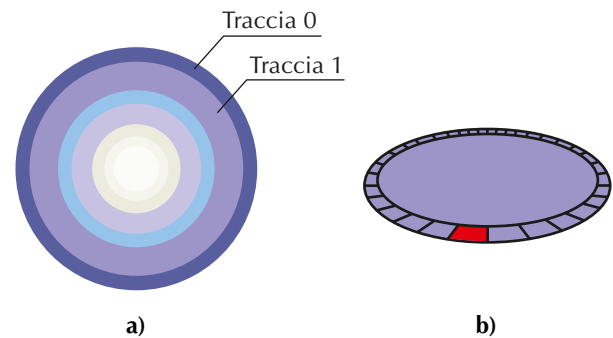


Figura D2.3 a) Tracce di un piatto; b) suddivisione in settori delle tracce.

L'insieme delle tracce poste alla stessa distanza dal centro è detto cilindro: un cilindro pertanto comprende le tracce aventi il medesimo numero, ma diverso piatto [fig. D2.4].

Ogni piatto ha associate due testine aventi posizione solidale con tutte quelle presenti sugli altri piatti: in altre parole, se una testina è posizionata

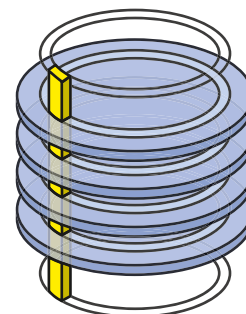
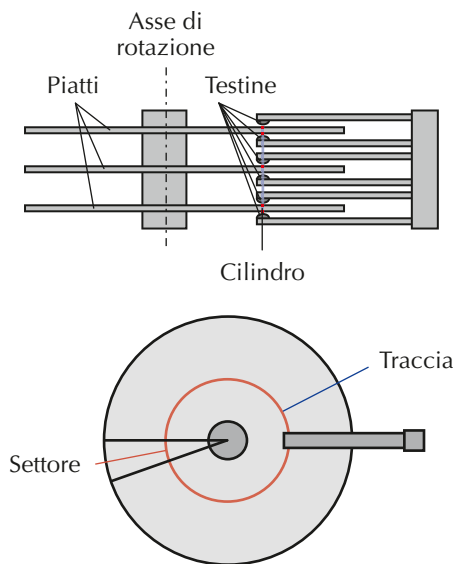


Figura D2.4 Cilindri di un disco fisso.

sopra una traccia, tutte le altre sono posizionate nel cilindro a cui la traccia appartiene [fig. D2.5]. Con la struttura sopra descritta, per leggere o scrivere un dato in una determinata zona del disco occorre specificarne il cilindro, la testina e il relativo settore.



**Figura D2.5** Struttura di un hard disk.

Tale schema denominato **CHS**, acronimo di **Cylinder/Head/Sector** (Cilindro/Testina/Settore), costituisce il più importante metodo di indirizzamento in un hard disk: il cilindro rappresenta l'insieme delle tracce contenute sulle facce dei piatti a una determinata distanza dall'asse di rotazione (una traccia per ogni faccia), la testina identifica la traccia, il settore la porzione della traccia.

### Caratteristiche dell'hard disk

Le caratteristiche principali di un hard disk sono:

- **la capacità;**
- **il tempo di accesso;**
- **la velocità di trasferimento.**

La capacità, misurata in Gigabyte (GB), esprime la quantità di informazioni (byte) che il disco può memorizzare.

Può essere aumentata incrementando la densità con cui le informazioni vengono memorizzate, usando piatti più grandi, o aumentando il loro numero.

Il tempo di accesso rappresenta il tempo medio necessario per reperire un dato posto in un settore, ovvero il tempo con il quale la testina si porta

in corrispondenza del settore; questo tempo può essere diminuito aumentando la velocità di rotazione dei piatti o realizzando testine più leggere (quindi con minore inerzia) che rendono possibili spostamenti più veloci.

Il tempo tipico di accesso di un hard disk è circa 10 millisecondi; per un hard disk ad alte prestazioni (15 000 giri) 3 o 4 millisecondi.

La velocità di trasferimento è la quantità di dati che l'hard disk è in grado di leggere o scrivere in un secondo.

Altre caratteristiche che influenzano, anche se in misura minore, le prestazioni di un hard disk sono:

- **il buffer di memoria;**
- **la velocità dell'interfaccia.**

Il buffer è una piccola memoria cache (in genere di alcuni megabyte) posta all'interno dell'hard disk, che memorizza gli ultimi dati letti o scritti nel disco.

Pertanto, nel caso in cui un programma legga ripetutamente gli stessi dati, questi possono essere reperiti nel buffer piuttosto che sull'hard disk: essendo il buffer un componente elettronico e non meccanico, la velocità di trasferimento è più elevata. L'interfaccia (bus) di collegamento tra l'hard disk e la scheda madre può influenzare le prestazioni poiché determina la massima velocità con la quale i dati possono essere trasferiti da o verso l'hard disk.

Per esempio, le interfacce ATA, Serial ATA e SCSI possono trasferire centinaia di MB al secondo, molto più di quanto un hard disk possa fare e quindi, in genere, non costituiscono un fattore limitante.

### D2.3 Dischi a stato solido

Come visto nei paragrafi precedenti, gli hard disk di tipo magnetico sono fondamentalmente costituiti da uno o più piatti che ruotano intorno a un asse, il cui contenuto è letto da una o più testine che si spostano.

Negli ultimi anni sono stati realizzati **dischi allo stato solido**, indicati con l'acronimo **SSD** (dal corrispondente termine inglese *Solid State Drive*), i quali per memorizzare i dati utilizzano memorie a stato solido (in particolare memorie flash), senza utilizzare organi meccanici in movimento.

In realtà il termine "disco a stato solido" è improprio, in quanto all'interno dell'SSD non c'è nessun disco, né di tipo magnetico né di altro tipo: l'utilizzo della parola "disco" deriva dal fatto che

tale dispositivo svolge la medesima funzione del classico disco rigido.

Fondamentalmente gli SSD sono costituiti da celle di memoria realizzate con chip di memoria flash (*memory flash*), organizzati secondo una struttura a matrice: ogni cella di memoria viene individuata mediante due coordinate, rispettivamente indicate con WL, che indica la **WordLine** cioè la linea di collegamento di una riga, e con BL che indica la **Bitline**, cioè la linea di collegamento di una colonna [fig. D2.6].

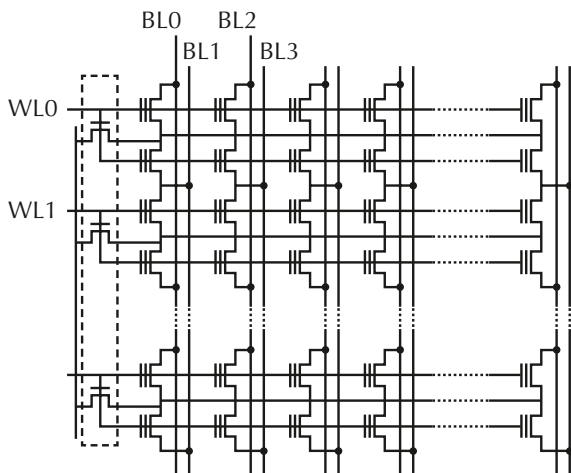


Figura D2.6 Struttura di principio di un disco SSD.

La memoria flash (non volatile), è realizzata mediante un insieme di transistor a effetto campo capaci di conservare una carica elettrica nella capacità C del proprio gate per un lungo periodo di tempo.

Le celle sono organizzate secondo una struttura gerarchica in cui 32 di esse formano una bitline (BL) e 32 bitline formano una pagina, l'elemento più piccolo gestibile dal controller del disco.

A loro volta le pagine sono organizzate in blocchi (128 pagine formano un blocco) i quali sono organizzati in piani (1024 blocchi formano un piano).

Per tale ragione i dati vengono letti o scritti a pagine o a blocchi.

Per esempio, l'operazione di scrittura, più complicata della lettura, prevede le seguenti fasi:

1. individuazione della pagina o le pagine dove memorizzare i dati;
2. lettura del contenuto della pagina interessata e memorizzazione della stessa in cache o in altra memoria volatile;
3. modifica del contenuto memorizzato in cache;
4. cancellazione dal disco della pagina;

5. scrittura sul disco di tutta la pagina modificata memorizzata in cache.

Di seguito sono riassunte le principali differenze tra gli hard disk tradizionali e gli SSD:

1. essendo privi di parti meccaniche in movimento, gli SSD hanno minor peso e consentono un notevole risparmio energetico e una maggiore velocità di accesso ai dati;
2. la necessità di copiare i dati in cache diminuisce la velocità di scrittura;
3. negli ultimi anni i costi degli SSD sono notevolmente diminuiti anche se, a parità di capacità, sono attualmente ancora superiori degli HD tradizionali;
4. gli SSD hanno capacità inferiori rispetto agli hard disk tradizionali.

In un PC portatile, dove il risparmio energetico e il peso sono elementi fondamentali, la scelta degli SSD rappresenta la soluzione ottimale, mentre per PC Desktop destinati a rimanere nello stesso posto gli hard disk tradizionali sono, a oggi, ancora più convenienti.

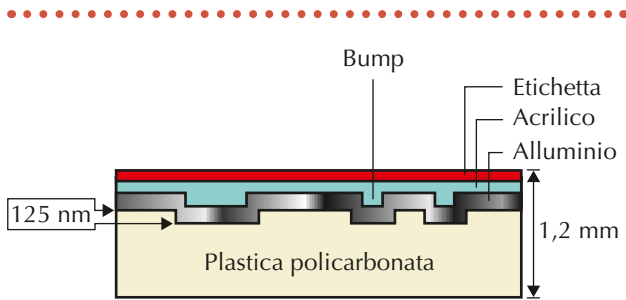
## D2.4 CD

Il CD (acronimo di *Compact Disk*, in italiano disco compatto) è una memoria di massa costituita da un disco di **plastica policarbonata** avente diametro pari a circa 12 cm e spessore intorno a 1,2 millimetri.

I dati vengono scritti lungo una traccia a spirale, che parte dal centro per arrivare alla parte esterna, praticando piccolissimi buchi (**bump**) separati da zone piatte: è pertanto possibile memorizzare in modo permanente sequenze di bit associando, per esempio, al bit 0 la zona piatta e al bit 1 la presenza del bump [fig. D2.7].



Figura D2.7 Scrittura di un CD-ROM.



**Figura D2.8** Sezione di un CD prestampato.

Il CD, dopo l'incisione, è ricoperto con uno strato di alluminio riflettente e da un successivo strato di acrilico, sopra il quale è apportata l'etichetta [fig. D2.8]. La larghezza della spirale (che coincide con quella dei bump) è circa 0,5 micron (1 micron = 1 milionesimo di metro), mentre la distanza tra una spira e l'altra è circa 1,6 micron; i bump incisi nella traccia hanno una larghezza di 0,5 micron, una lunghezza di 0,83 micron e un profondità di 125 nanometri (1 nanometro = 1 miliardesimo di metro): se la spirale potesse essere tolta e allungata, si otterrebbe una linea avente una larghezza di 0,5 micron e lunghezza di circa 5 km!

### Letture CD

Date le microscopiche dimensioni dei bump, per leggere la traccia di un CD è necessario un processo di lettura molto preciso, che viene realizzato mediante un "lettore CD".

Fondamentalmente un lettore CD è costituito da tre 3 elementi:

- un **motore** che fa ruotare il disco a velocità costante;
- un **laser** e un **sensore ottico** per leggere i bump durante la rotazione;
- un **meccanismo** che consente al laser di muoversi seguendo la spirale sul disco.

Il raggio laser, puntato sulla traccia, attraversando il policarbonato è riflesso dallo strato di alluminio e colpisce un sensore ottico, il quale, essendo sensibi-

le all'intensità della luce, è in grado di individuare la presenza di un bump o di una zona piatta, poiché caratterizzati da una diversa intensità luminosa riflessa [fig. D2.9], rendendo così possibile la ricostruzione della sequenza di bit memorizzata.

L'operazione più complessa della fase di lettura è la centratura del laser sulla spirale, realizzata dal **tracking system**, un dispositivo che controlla il movimento del laser verso l'esterno e la velocità di rotazione del disco.

Al riguardo, è importante sottolineare che il numero di bump è legato alla spirale: all'inizio, dove il raggio è minimo, possono essere memorizzati meno bump rispetto alla fine (dove il raggio è massimo), e pertanto per leggere i dati a velocità costante è necessario sincronizzare la rotazione e il movimento del laser.

### CD-R e CD-RW

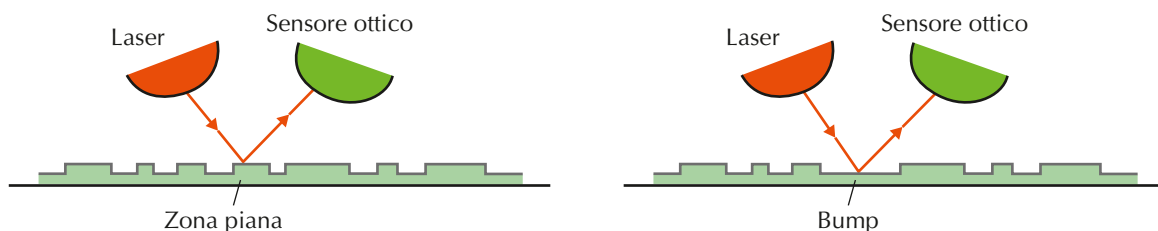
Il CD illustrato nel precedente paragrafo ha una struttura in cui è possibile scrivere sulla parte del policarbonato solo mediante macchine industriali e processi non replicabili: questi CD possono solo essere letti e pertanto sono memorie a sola lettura dette **CD Read Only Memory (CD-ROM)**.

Successivamente sono stati introdotti **CD registrabili (CD-R)** formati da supporto di plastica policarbonata ricoperto da uno strato di materiale fotosensibile altamente riflettente con sopra un sottilissimo strato di acrilico.

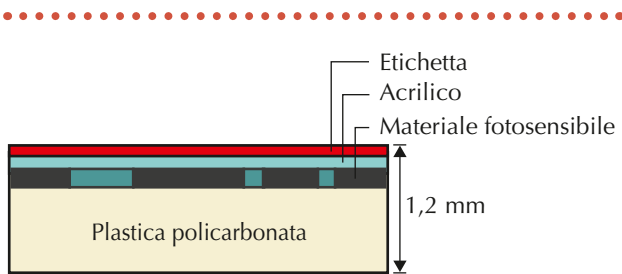
Il materiale fotosensibile, se riscaldato con luce avente adeguata intensità e frequenza, diventa opaco perdendo il suo potere riflettente.

Riscaldando allora la traccia solo in determinate zone [fig. D2.10], queste ultime diventano opache, mentre quelle non sottoposte al riscaldamento rimangono riflettenti: è pertanto possibile memorizzare bit assegnando, per esempio, il valore 0 alle zone riflettenti e il valore 1 alle zone opache.

La lettura di un CD-R avviene con la stessa tecnica illustrata per i CD prestampati: un lettore CD, infatti, legge allo stesso modo CD prestampati e CD registrabili, poiché il suo funzionamento si



**Figura D2.9** Differente intensità riflessa da una zona piatta e da un bump.



**Figura D2.10** Il CD-R non ha bump come nei CD prestampati, ma presenta zone opache o riflettenti che riflettono più o meno luce, consentendo al sensore ottico di acquisire lo stato dei bit.

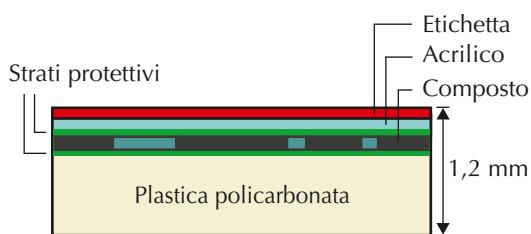
basa sulla luce riflessa, sia proveniente da un bump sia da una zona riflettente.

Anche per i CD-R i dati, una volta scritti, a differenza degli hard disk, non possono essere più cancellati poiché la superficie del disco è stata alterata dal laser.

Tuttavia, verso la metà degli anni Novanta è stato sviluppato un nuovo formato che consente di cancellare e riscrivere un CD più volte.

Si tratta dei dischi riscrivibili (CD-RW), simili a quelli registrabili (CD-R) ma cancellabili, che consentono di tornare allo stato precedente alla scrittura del laser.

Tali dischi utilizzano il fenomeno del cambiamento di stato di uno strato di materiale costituito da diversi elementi, i più importanti dei quali sono l'argento, l'antimonio e il tellurio: tale materiale, se riscaldato a una temperatura superiore ai 600 gradi, diventa liquido e quindi tutti i



**Figura D2.11** CD riscrivibile.

dati precedentemente scritti vengono cancellati; riportandolo alla temperatura di cristallizzazione (circa 200 gradi) diventa di nuovo solido, pronto per memorizzare nuovi dati [fig. D2.11].

## D2.5 DVD

Strutturalmente il DVD (acronimo di *Digital Versatile Disk*, in italiano Disco Versatile Digitale) è simile al CD; è infatti anch'esso costituito da plastica policarbonata avente diametro di circa 12 cm e altezza di circa 1,2 mm.

I dati vengono incisi su una traccia a forma di spirale dal centro all'esterno, utilizzando la stessa metodologia dei CD: piccoli buchi (bump) separati da zone piatte (non incise) che rappresentano rispettivamente i bit 1 e 0.

Una volta inciso, sul DVD viene depositato un sottile strato protettivo argentato riflettente.

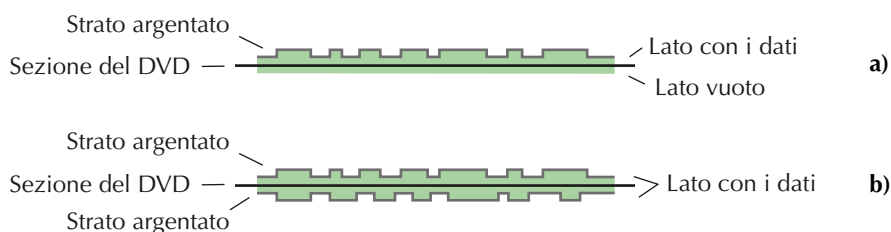
Questa tipologia di DVD è detta a **Single-sided/Single-layer**, cioè singolo lato e singolo strato [fig. D2.12a].

A differenza dei CD, nei DVD è possibile memorizzare i dati in ambo i lati raddoppiando così la sua capacità: in tal caso i DVD sono detti **Double-sided/Single-layer**, poiché scrivibili su un solo strato in entrambi i lati [fig. D2.12b].

Nei DVD di ultima generazione è possibile disporre di due strati per ogni lato; il secondo strato, contenente la seconda traccia su cui scrivere le informazioni, è incollato al primo con una speciale resina adesiva e una volta inciso viene ricoperto da una pellicola dorata semiriflettente: tali DVD sono denominati **Single-sided/Double-layer** (singolo lato, doppio strato), poiché è possibile scrivere i dati sui due strati di un solo lato [fig. D2.13a].

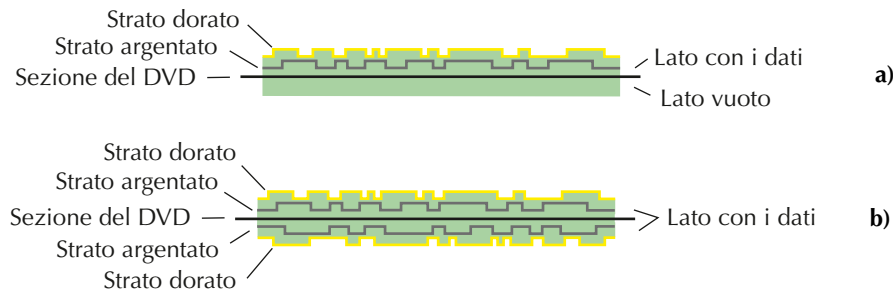
Nel caso invece sia possibile scrivere sui due strati di ciascun lato [fig. D2.13b], il DVD è detto **Double-sided/Double-layer** (doppio lato-doppio strato).

La distanza tra una spirale e l'altra è circa 740 nanometri, mentre i bump incisi hanno un'altezza di



**Figura D2.12** a) *Single-sided/Single-layer*; b) *Double-sided/Single-layer*.





**Figura D2.13** a) DVD *Single-sided/Double-layer*; b) DVD *Double-sided/Double-layer*.

120 nanometri: srotolando idealmente la traccia si otterrebbe una linea lunga di circa 15 km (a fronte dei 5 del CD).

La lettura dei DVD è effettuata tramite lettori simili a quelli dei CD, puntando il laser sulla traccia, la quale, essendo costituita da materiale riflettente (strato argentato) provoca la riflessione del raggio incidente: l'intensità del raggio riflesso, differente a seconda che venga colpito un bump o una zona piana, viene rilevata da un sensore ottico che ricostruisce la sequenza di bit.

Nei DVD con doppio strato, il laser deve puntare sia la traccia dorata sia quella argentata, utilizzando due diverse intensità luminose: quella più debole per riflettere i bump della traccia dorata e quella più forte per attraversare lo strato dorato e accedere ai bump dello strato argentato sottostante.

Anche in questo caso l'operazione più critica è il mantenimento del laser perfettamente centrato sulla spirale, realizzato con un sistema **tracking system** che controlla il movimento del laser verso l'esterno e regola la velocità di rotazione del disco.

### Confronto tra DVD e CD

I DVD e i CD appaiono simili in quanto entrambi sono dischi di materiale plastico delle stesse dimensioni che utilizzano la stessa tecnica di lettura; hanno però una differenza sostanziale: la capacità di un DVD può essere fino a 20 volte quella di un CD.

Ciò, fondamentalmente, è dovuto:

- all'**alta densità dei dati**: nella **tabella D2.1** sono comparati alcuni valori relativi alla densità dei DVD e dei CD, in particolare la distanza tra le spire e la lunghezza minima dei bump e delle zone piatte;
- al **multi-strato (Multi-layer)**: nella **tabella D2.2** sono riportate le capacità dei vari tipi di DVD in funzione della loro struttura.

**Tabella D2.1** Confronto tra CD e DVD

Caratteristica	CD	DVD
Distanza tra le spire	1600 nanometri	740 nanometri
Lunghezza minima bump/zone-piatte (DVD a singolo strato)	830 nanometri	400 nanometri
Lunghezza minima bump/zone piatte (DVD a doppio strato)	830 nanometri	440 nanometri

**Tabella D2.2** Capacità dei DVD

Formato DVD	Capacità
Lato singolo/Singolo strato ( <i>Single-sided/Single-layer</i> )	4,38 GB
Lato singolo/Doppio strato ( <i>Single-sided/Double-layer</i> )	7,95 GB
Doppio lato/Singolo strato ( <i>Double-sided/Single-layer</i> )	8,75 GB
Doppio lato/Doppio strato ( <i>Double-sided/Double-layer</i> )	15,9 GB

Si può osservare che un DVD *Single-sided/Double-layer* ha una capacità un po' inferiore a quella del doppio di un DVD *Single-sided/Single-layer* (7,95 GB e 4,38 GB), in quanto applicando 2 strati (layers) sullo stesso lato, la lunghezza minima dei bumps/zone piatte aumenta di circa il 10%. Se i due strati sono applicati su due lati differenti, questa limitazione non è presente e infatti la capacità di un DVD *Double-sided/Single-layer* è proprio il doppio rispetto a un *Single-sided/Single-layer* (4,38 GB contro 8,75 GB);

- alla **minore dispersione di spazio**: nei CD, molte informazioni vengono duplicate per garantire una adeguata gestione della correzio-

ne degli errori. Nei DVD, invece, gli algoritmi per la correzione degli errori sono molto più efficienti e non richiedono molto spazio aggiuntivo.

### Formati dei DVD

Attualmente sono disponibili i seguenti tipi di DVD:

- **DVD-ROM:** sono a sola lettura e memorizzano supporti interattivi, dati e contenuti audio e video;
- **DVD-R (registrabile):** possono registrare fino a 3,95 GB utilizzando la stessa tecnologia dei CD-R;
- **DVD-RAM:** hanno caratteristiche che si avvicinano più a quelle di un grosso dischetto che a un CD-ROM e può essere considerato una forma riscrivibile di DVD che utilizza essenzialmente la tecnologia di un CD-R. Ha una capacità di 4,7 GB per lato ed è disponibile sia nella versione a singola faccia sia in quella a doppia faccia;
- **DVD-RW (lettura/scrittura):** è una versione di DVD riscrivibile in grado memorizzare 4,7 GB per lato e può essere riscritto più di 100 volte.

### D2.6 Dischi blu-ray

I dischi blu-ray, sono basati sulla stessa tecnologia dei DVD, ma anziché laser di colore rosso, impiegano laser di colore viola-blu (blu-ray), aventi lunghezza d'onda ridotta (405 nm a fronte dei 650 nm dei DVD).

In questo modo è possibile scrivere (e quindi leggere) dati in minor spazio, consentendo di aumentare considerevolmente la capacità di memorizzazione.

Per esempio con un Blu-ray single layer si possono raggiungere capacità di 25 GB, mentre con un Blu-ray dual layer fino a 50 GB.

Con lo sviluppo della tecnologia video ad alta definizione i dischi blu-ray stanno conquistando il mercato dell'home-video.

Infatti, la quantità di informazioni contenute in circa due ore di filmato in alta definizione (16–25 GB) è notevolmente superiore alla capacità massima di un DVD: ne consegue che quest'ultimi non possono essere utilizzati per prestazioni in alta definizione.

### D2.7 USB Flash Drive

La **USB Flash Drive** [fig. D2.14], più comunemente conosciuta con il nome di **chiave USB**, è la più diffusa memoria di massa rimovibile, ideata per connettersi a un computer mediante una porta USB ed essere immediatamente riconosciuta (tecnologia Plug and Play).



Figura D2.14 USB Flash Drive.

Progettata nel 1998 dalla IBM, per la sua versatilità e semplicità di utilizzo, può essere considerata l'erede del floppy disk, ormai non più utilizzato. È una unità di memoria di tipo flash che attualmente può raggiungere una capienza fino a 128 GB, con velocità di lettura/scrittura fino a 350 MB/s, compatibili sia con USB 2.0 che 3.0. Anche se i modelli a più elevata capacità sembrano prestarsi a un impiego analogo a quello di un hard disk, occorre tener presente che la memoria flash, per sua natura, non è in grado di sostenere un numero infinito di riscritture senza degradarsi: è pertanto sconsigliato utilizzare tali memorie per eseguire programmi applicativi; è però da osservare che gli ultimi modelli arrivano a sopportare fino a diversi milioni di cicli di scrittura/riscrittura senza subire deterioramenti apprezzabili.

.....  
[D1] Che cos'è un computer?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D2] Descrivi l'architettura di von Neumann.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D3] Qual è la funzione della scheda madre?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D4] La RAM è una memoria di sola lettura?

VERO       FALSO

.....  
[D5] Descrivi la ROM del BIOS.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

# ESERCITAZIONI

.....  
[D6] Qual è la funzione della memoria cache?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D7] Descrivi brevemente il funzionamento della porta seriale.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D8] Qual è la funzione della memoria cache?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D9] Le porte USB supportano la tecnologia Plug and Play

VERO       FALSO

.....  
[D10] Che cos'è la memoria di massa?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D11] Quali sono i componenti fondamentali dell'hard disk?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D12] Elenca le caratteristiche principali dell'hard disk.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D13] Che cosa sta a significare l'acronimo SSB?

.....  
.....  
.....

.....  
[D14] Quali sono i componenti fondamentali di un lettore CD?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[D15] Illustra il principio della lettura di un DVD.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....



# PARTE SECONDA

## Affidabilità e qualità

# PARTE SECONDA

## Affidabilità e qualità

### MODULO E • La produzione industriale

#### unità E1: Ciclo di vita di un prodotto industriale

- E1.1 LCA
- E1.2 Origini della LCA
- E1.3 Obiettivi e finalità della LCA
- E1.4 Struttura di uno studio LCA
- E1.5 Organizzazioni ed enti attivi nel campo LCA
- E1.6 Esempio di LCA applicata a un motore elettrico

#### unità E2: Il sistema produttivo

- E2.1 Definizione di sistema produttivo
- E2.2 Classificazione dei sistemi produttivi
- E2.3 Classificazione delle modalità produttive
- E2.4 Il sistema produttivo e i prodotti che vengono realizzati
- E2.5 Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti di catalogo
- E2.6 Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti su commessa
- E2.7 Esempio di produzione su commessa: l'impianto elettrico

#### unità E3: La gestione dei materiali nel sistema produttivo

- E3.1 Introduzione
- E3.2 Il metodo MRP
- E3.3 La distinta base

#### unità E4: Smaltimento dei rifiuti di lavorazione

- E4.1 Introduzione
- E4.2 Definizione e classificazioni dei rifiuti
- E4.3 Attribuzione codice CER ai rifiuti speciali

- E4.4 Divieti
- E4.5 Il deposito temporaneo
- E4.6 Formulario di identificazione del rifiuto
- E4.7 Il Registro di Carico e Scarico dei rifiuti
- E4.8 Il modello unico di dichiarazione ambientale

### MODULO F • Affidabilità e sicurezza

#### unità F1: Affidabilità di un sistema

- F1.1 Introduzione
- F1.2 Obiettivi dell'affidabilità
- F1.3 L'affidabilità come strumento di progettazione
- F1.4 Definizione quantitativa dell'affidabilità
- F1.5 Tipologie di affidabilità
- F1.6 I guasti
- F1.7 Parametri di affidabilità
- F1.8 Affidabilità durante il periodo di vita utile
- F1.9 Sistemi composti
- F1.10 Ridondanza

#### unità F2: Sicurezza sul luogo di lavoro

- F2.1 Il Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro
- F2.2 Il datore di lavoro
- F2.3 Il dirigente
- F2.4 Il preposto
- F2.5 I lavoratori
- F2.6 Il medico competente
- F2.7 Il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza
- F2.8 Il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione
- F2.9 Le squadre di emergenza
- F2.10 La formazione dei lavoratori



# MODULO E

## La produzione industriale

### Unità E1: Ciclo di vita di un prodotto industriale

- E1.1 LCA
- E1.2 Origini della LCA
- E1.3 Obiettivi e finalità della LCA
- E1.4 Struttura di uno studio LCA
- E1.5 Organizzazioni ed enti attivi nel campo LCA
- E1.6 Esempio di LCA applicata a un motore elettrico

### Unità E2: Il sistema produttivo

- E2.1 Definizione di sistema produttivo
- E2.2 Classificazione dei sistemi produttivi
- E2.3 Classificazione delle modalità produttive
- E2.4 Il sistema produttivo e i prodotti che vengono realizzati
- E2.5 Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti di catalogo
- E2.6 Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti su commessa
- E2.7 Esempio di produzione su commessa: l'impianto elettrico

### Unità E3: La gestione dei materiali nel sistema produttivo

- E3.1 Introduzione
- E3.2 Il metodo MRP
- E3.3 La distinta base

### Unità E4: Smaltimento dei rifiuti di lavorazione

- E4.1 Introduzione
- E4.2 Definizione e classificazioni dei rifiuti
- E4.3 Attribuzione codice CER ai rifiuti speciali
- E4.4 Divieti
- E4.5 Il deposito temporaneo
- E4.6 Formulario di identificazione del rifiuto
- E4.7 Il Registro di Carico e Scarico dei rifiuti
- E4.8 Il modello unico di dichiarazione ambientale

### Obiettivi

- Conoscere il ciclo di vita di un prodotto
- Conoscere le fasi di un sistema produttivo
- Saper classificare i vari sistemi produttivi
- Saper interpretare una distinta base
- Saper classificare i rifiuti di lavorazione pericolosi
- Conoscere le procedure e le fasi di smaltimento dei rifiuti pericolosi

## CONTENUTI

- E1.1** LCA
- E1.2** Origini della LCA
- E1.3** Obiettivi e finalità della LCA
- E1.4** Struttura di uno studio LCA
- E1.5** Organizzazioni ed enti attivi nel campo LCA
- E1.6** Esempio di LCA applicata a un motore elettrico



**Politiche integrate di prodotto e certificazione ambientale**

# CICLO DI VITA DI UN PRODOTTO INDUSTRIALE

## E1.1 LCA

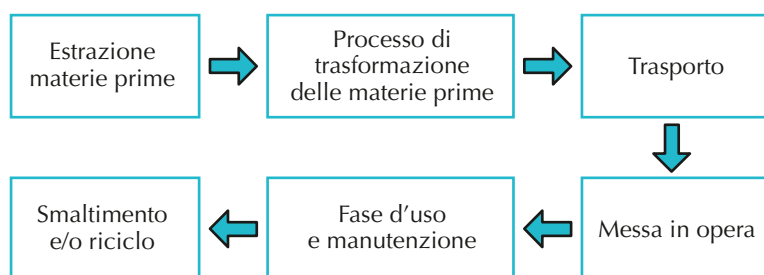
Negli ultimi anni le problematiche ambientali legate alla realizzazione e all'utilizzo di prodotti di ogni genere, hanno reso necessario lo sviluppo di studi finalizzati alla definizione di piani e programmi per la riduzione e il contenimento degli impatti sull'ambiente causati da:

- riscaldamento globale (gas serra);
- acidificazione (suolo e mare);
- buco dell'ozono;
- eutrofizzazione;
- inquinanti tossicologici per l'ambiente e le persone;
- distruzione di habitat;
- desertificazione;
- uso del suolo e esaurimento dei minerali e dei combustibili fossili.

Al riguardo, due importanti Direttive Comunitarie, finalizzate allo sviluppo e alla realizzazione di apparecchiature ambientalmente sostenibili, sia durante il ciclo di vita utile sia al momento della dismissione, sono diventate leggi nel febbraio 2003; si tratta di:

- **WEEE** (*Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, 2002/96/EC*), relativa agli impatti ambientali delle apparecchiature elettrotecniche ed elettroniche;
- **RoHS** (*Restriction of Hazardous Substances Directive, 2002/95/EC*), relativa ai rifiuti e alla restrizione all'uso delle sostanze.

Anche a livello normativo e legislativo, numerosi documenti fanno riferimento a una metodologia di analisi di impatto ambientale che prende in considerazione tutte le varie fasi di vita del prodotto.



**Figura E1.1** Schema delle fasi della vita di un prodotto.

Per questi motivi è nata la **LCA**, acronimo di *Life Cycle Assessment*, che in italiano viene tradotto con l'espressione **valutazione del ciclo di vita**. La **LCA** può essere definita come una metodologia di valutazione dei carichi energetici e ambientali associati a un prodotto o a un processo lungo l'intero ciclo di vita, ovvero un'analisi sistematica che valuta i flussi di materia ed energia utilizzati durante tutta la vita di un prodotto, dall'estrazione delle materie prime alla produzione, all'utilizzo, fino al suo smaltimento, una volta diventato rifiuto [fig. E1.1].

La caratteristica fondamentale di LCA risiede nella metodologia con la quale vengono analizzati i sistemi industriali: dall'approccio tipico dell'ingegneria tradizionale, che privilegia lo studio separato delle fasi dei processi produttivi, si passa a una visione globale del sistema produttivo, in cui sono analizzate tutte le fasi di trasformazione, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento dei prodotti a fine vita.

Questa impostazione di studio del sistema produttivo fa parte di una cultura più ampia e alternativa rispetto a quella che ha supportato il tradizionale modello di sviluppo industriale, in quanto è una cultura che pensa alla produzione industriale nell'ottica del concetto di sviluppo sostenibile, i cui obiettivi fondamentali sono la conservazione delle risorse naturali e la minimizzazione degli effetti delle attività antropiche sull'ambiente.

## E1.2 Origini della LCA

Le origini di *Life Cycle Assessment* risalgono agli inizi degli anni Sessanta quando furono redatti i primi bilanci energetici in considerazione dalla crescente preoccupazione per l'esauribilità delle risorse fossili.

Il primo studio sull'impatto ambientale fu pubblicato nel 1974 dal Midwest Research Institute e riguardava la produzione di contenitori per

bevande, affrontando per la prima volta uno studio completo su un prodotto e non più su singoli processi.

Un nuovo impulso si ebbe negli anni Ottanta del secolo scorso, allorché su scala mondiale iniziò a manifestarsi il problema dei rifiuti solidi: in questo contesto iniziò a prendere forma l'idea di concretizzare uno strumento che consentisse di ridurre l'impatto della produzione industriale sull'ambiente.

Al riguardo furono sviluppate diverse metodologie di studio, standardizzate da **SETAC** (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) e **ISO** (International Standard Organization), nella norma UNI EN ISO 14040, secondo la quale la LCA è così definito:

*LCA è un processo che permette di valutare gli impatti ambientali associati a un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia ed energia e delle emissioni nell'ambiente e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L'analisi riguarda l'intero ciclo di vita del prodotto ("dalla culla alla tomba"): dall'estrazione e lavorazione delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e alla collocazione finale del prodotto dopo l'uso.*

## E1.3 Obiettivi e finalità della LCA

Come già detto la LCA è un metodo di analisi ambientale, che consente di studiare nel dettaglio le interazioni di un prodotto, di un processo o di una attività con l'ambiente: costituisce quindi uno strumento efficace non solo di gestione ambientale ma anche industriale.

Viene utilizzato per verificare e accertare l'impatto ambientale di un prodotto/servizio cercando di esaminarne tutti gli effetti che essi causano sull'ambiente.

I principali indicatori di uno studio LCA sono essenzialmente di due tipi:

- **energetico**, ossia i consumi di energia necessaria a produrre l'unità funzionale (per esempio la produzione di 1 mq di un prodotto); sono indicati mediante il parametro **GER** (*Gross Energy Requirement*) espresso in MJ (Mega Joule) che esprime il fabbisogno energetico complessivo;
- **ambientale**, che rappresenta il consumo di risorse naturali, le emissioni in aria e in acqua e i rifiuti solidi prodotti, sempre riferiti all'unità funzionale generata; sono espressi mediante il parametro **GWP100** (*Global Warming Potential*, cioè l'effetto serra potenziale a 100 anni) espresso in kg di CO<sub>2</sub>.

Un'accurata analisi di LCA consente di ricavare importanti informazioni sul prodotto, quali:

- **raccolta** completa e organica di tutti i dati relativi alla fabbricazione di un prodotto, creando così un sistema informatico che supporti una gestione ambientale e industriale, tenendo sotto controllo le emissioni, i consumi delle risorse e gli effetti connessi;
- **individuazione** dei "punti deboli" del processo produttivo: individuando le fasi sulle quali è possibile intervenire per diminuire l'impatto ambientale del prodotto, si può arrivare a ridurre i consumi di energia, di materie prime e la produzione di rifiuti, diminuendo di conseguenza i costi di produzione;
- **valutazione** della "prestazione ambientale" di un prodotto rispetto a un altro avente analoghe caratteristiche, in modo tale da poter effettuare le opportune scelte;
- **progettazione** e quindi realizzazione di un prodotto che generi il minor impatto sull'ambiente (Ecodesign);
- **individuazione** dei possibili miglioramenti tecnologici e gestionali di un prodotto e del suo indotto nell'ottica dello sviluppo sostenibile;
- **miglioramento** dell'immagine del prodotto e dell'Azienda, nei confronti della collettività.

Le linee guida di riferimento per la LCA sono le norme ISO della serie 14040, ovvero:

- **UNI EN ISO 14040 (1998)** – Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi di riferimento;
- **UNI EN ISO 14041 (1999)** – Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione e analisi d'inventario;

- **UNI EN ISO 14042 (2000)** – Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Valutazione dell'impatto del ciclo di vita;
- **UNI EN ISO 14043 (2000)** – Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Interpretazione del ciclo di vita.

## E1.4 Struttura di uno studio LCA

La struttura di uno studio LCA, così come proposto dalla normativa ISO 14040, si articola in quattro fasi principali [fig. E1.2].

1. Definizione degli obiettivi e finalità (*goal definition and scoping*).
2. Analisi di inventario (*inventory analysis*).
3. Valutazione degli impatti (*impact assessment*).
4. Interpretazione (*interpretation*).

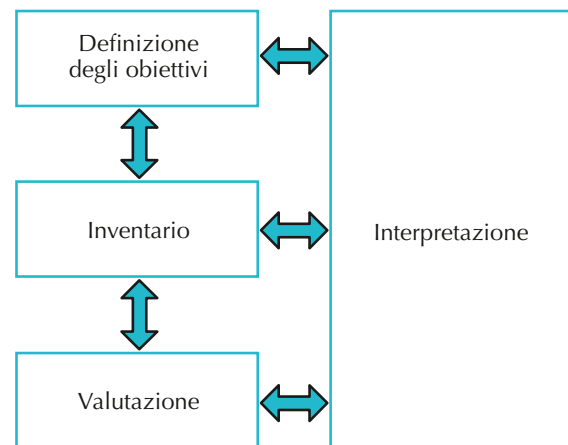


Figura E1.2 Fasi dell'analisi del ciclo di vita.

### Definizione degli obiettivi (*goal definition and scoping*)

È la prima fase dello studio, nella quale la norma UNI EN ISO 10040 introduce così l'argomento:

*Gli obiettivi e gli scopi dello studio LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione prevista. L'obiettivo di una LCA è stabilire senza ambiguità quali siano le applicazioni previste, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio.*

In questa fase vengono innanzitutto dichiarati il committente, l'esecutore, il fine e l'oggetto dello studio.

Successivamente si descrivono le assunzioni, le ipo-

tesi e le metodologie che saranno utilizzate; particolare rilievo hanno le definizioni dell'**unità funzionale**, del **metodo di allocazione delle risorse** e della **definizione dei confini del sistema**.

### Unità funzionale

L'unità funzionale rappresenta la quantità di prodotto usata come riferimento per i calcoli dei flussi (in uscita e in entrata) di materiale e di energia nel sistema.

In sostanza rappresenta l'unità di misura del prodotto su cui si basa l'analisi e il confronto con le possibili alternative (kg di prodotto, kg di rifiuto trattato, Kwh di energia fornita...).

La definizione di un'adeguata unità funzionale agevola il confronto tra sistemi diversi che offrono lo stesso servizio, consentendo una migliore comprensione delle informazioni raccolte e il confronto con altri studi.

La necessità di creare questo tipo di unità nasce dalla constatazione che le unità di misura normalmente utilizzate (massa, volume ecc.) spesso sono inadeguate per esprimere l'efficienza del sistema, sia da un punto di vista energetico che ambientale. Per esempio, per lo studio del ciclo di vita di un'autovettura, l'unità funzionale potrebbe essere il trasporto di 4 persone per 100 km in un'ora in determinate condizioni di comfort; la corretta definizione di una comune unità funzionale è un aspetto importante, in quanto risultati uguali di uno stesso studio espressi secondo unità funzionali diverse, possono portare a conclusioni diverse e determinare scelte strategiche differenti.

### Metodo di allocazione delle risorse

Consente di ripartire i carichi ambientali e i consumi di risorse all'interno di un processo del sistema che fornisce più prodotti.

Per esempio, in uno stabilimento che produce bottiglie e barattoli di vetro, per la cui produzione sono emessi 100 kg di SO<sub>2</sub> all'anno, occorre valutare due LCA, per stabilire quale parte dell'emissione di SO<sub>2</sub> sia da attribuire alle bottiglie e quale ai barattoli.

Nel caso la produzione annua di bottiglie sia di 80000 pezzi corrispondenti a 8000 kg di vetro, e quella di barattoli sia 4000 pezzi corrispondenti a 2000 kg di vetro, l'emissione di SO<sub>2</sub> da imputare a ogni kg di prodotto uscente (indipendentemente se bottiglia o barattolo) è pari a:

$$\frac{100}{8000 + 2000} = 0,01 \text{ kg}$$

mentre i kg di SO<sub>2</sub> imputabili alle sole bottiglie risultano:

$$0,01 \cdot 8000 = 80 \text{ kg}$$

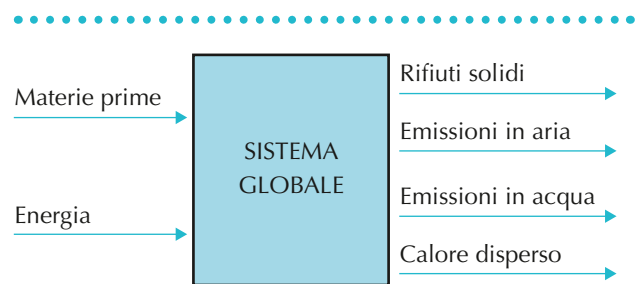
che corrispondono a  $80/80\,000 = 0,001$  kg di SO<sub>2</sub> per bottiglia.

Ne consegue che i kg di SO<sub>2</sub> imputabili ai soli barattoli sono  $100 - 80 = 20$  kg che corrispondono a  $20/4000 = 0,005$  kg a barattolo.

### Definizione dei confini del sistema

I confini del sistema determinano i processi che devono essere inclusi nella LCA e il loro livello di dettaglio: ciò è indispensabile per delimitare il campo di studio ai soli processi che interessano il sistema, in modo da evitare il rischio che i risultati trovati non siano rappresentativi in maniera esauriente della realtà.

È importante sottolineare, infine, che il sistema da sottoporre a LCA deve avere come unici ingressi energia e materie prime e come uniche uscite i rifiuti [fig. E1.3].



**Figura E1.3** Schematizzazione degli input e output di una LCA.

### Analisi di inventario (*inventory analysis*)

Ha lo scopo di evidenziare tutti i flussi di input e output relativi alle diverse fasi del prodotto, lungo tutta la sua vita.

Vengono identificati e quantificati i consumi di risorse (materie prime, acqua, prodotti riciclati), di energia (termica ed elettrica) e le emissioni in aria, acqua e suolo, strutturando un vero e proprio bilancio ambientale.

La redazione dell'inventario deve essere effettuata seguendo uno schema ben definito e trasparente: soltanto con questa metodologia, infatti, i risultati di diversi inventari possono essere confrontati e utilizzati per valutazioni attendibili.

A tal fine è necessario raccogliere dati precisi e rigorosi, in quanto è su di essi che si fonda la validità e l'attendibilità di tutto lo studio di LCA: per tale ragione i dati da utilizzare nell'inventario, per

quanto possibile, devono essere acquisiti direttamente sul campo; nel caso non sia possibile reperire dati **diretti**, vengono utilizzati dati **derivati** (*secondary data*), ovvero ricavati da banche dati appositamente predisposte.

I dati raccolti possono essere distinti in 3 categorie:

- **dati primari** (provenienti da rilevamenti diretti);
- **dati secondari** (ricavati dalle banche dati);
- **dati terziari** (provenienti da stime e da valori medi).

Per garantire l'attendibilità e la trasparenza dei dati è buona norma riportare:

- l'età dei dati (anno delle misurazioni effettuate);
- il territorio per il quale i dati sono significativi;
- la tecnologia di riferimento;
- il tipo di campionamento eseguito per ciascun dato riportato;
- il processo a cui il dato è riferito;
- i metodi di calcolo impiegati;
- le variazioni e le irregolarità riscontrate nelle misurazioni;
- i metodi usati per il controllo di qualità.

### Valutazione degli impatti ambientali

È riferita a tutto il ciclo di vita e in genere si articola in quattro punti.

- **Classificazione.** Ciascun impatto, quantificato nella fase di inventario, viene classificato sulla base dei problemi ambientali a cui può potenzialmente contribuire; alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto, sono contenuti tutti gli input e output del ciclo di vita che possono contribuire a quella categoria (la stessa sostanza o materiale potrà essere quindi contenuta all'interno di più categorie ambientali).
- **Caratterizzazione.** Ciascuna sostanza contribuisce in maniera differente allo stesso problema ambientale; le quantità di ciascun input e output sono moltiplicate per un "fattore di peso" (calcolato sulla base di dati puramente scientifici) che misura l'intensità dell'effetto di una sostanza sul problema ambientale considerato; i dati così ottenuti, sommati all'interno di ciascuna categoria ambientale, determinano un insieme di valori che definisce il profilo ambientale del sistema.
- **Normalizzazione.** I valori precedentemente ottenuti vengono normalizzati, divisi cioè per

un "valore di riferimento", in modo da poter stabilire la magnitudo di ciascun effetto ambientale rispetto a tale valore, rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, regionale o europea e riferiti a un determinato intervallo di tempo; attraverso la normalizzazione si può stabilire quindi l'entità relativa di ciascun problema ambientale.

- **Valutazione.** L'obiettivo della fase di valutazione è quello di esprimere, attraverso un valore numerico, l'impatto ambientale associato a un prodotto nell'arco del suo ciclo di vita; al riguardo i valori degli effetti normalizzati vengono moltiplicati per dei parametri, che esprimono "l'importanza" (intesa come criticità) che viene attribuita a ciascun problema ambientale; la determinazione di tali parametri si basa sul principio della "distanza dallo scopo", secondo il quale la differenza fra lo stato attuale e quello che si vuole raggiungere è una misura della gravità di un effetto; sommando i valori degli effetti così ottenuti si ottiene un unico valore dimensionale, detto **ecoindicatore**, che quantifica l'impatto ambientale associato al prodotto.

### Interpretazione e analisi dei risultati

Consiste nell'interpretazione dei risultati delle fasi di inventario e di valutazione degli impatti ambientali e nell'eventuale redazione di conclusioni e di raccomandazioni per il miglioramento della performance ambientale del sistema studiato.

In questa fase, pertanto, vengono valutati i miglioramenti produttivi che possono minimizzare l'impatto ambientale associato a un prodotto.

Possono essere così valutate le varie proposte di miglioramento costruendo i relativi profili ambientali e quindi scegliere l'alternativa più appropriata.

Al riguardo esistono diversi metodi e sono disponibili numerosi software per effettuare l'analisi dell'impatto ambientale associato al ciclo di vita.

Uno di questi software è il SimaPro, costituito da due componenti principali: un database per la fase di inventario (costituito dai processi e dagli input e output associati ai processi) e un database per l'analisi dell'impatto ambientale.

Con il software SimaPro è possibile analizzare e confrontare prodotti con cicli di vita anche molto complessi, in quanto le banche dati di cui dispone, oltre a contenere un numero molto ampio di dati, possono essere modificate e completate in modo molto flessibile e senza limitazioni da parte dell'utente.

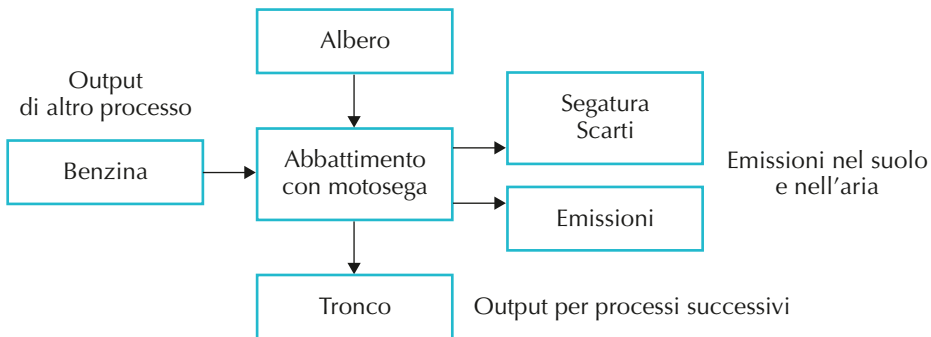
**ESEMPIO**

Il concetto di LCA può essere illustrato con il seguente esempio, relativo alla realizzazione di tavole per carpenteria, che si articola nei seguenti processi.

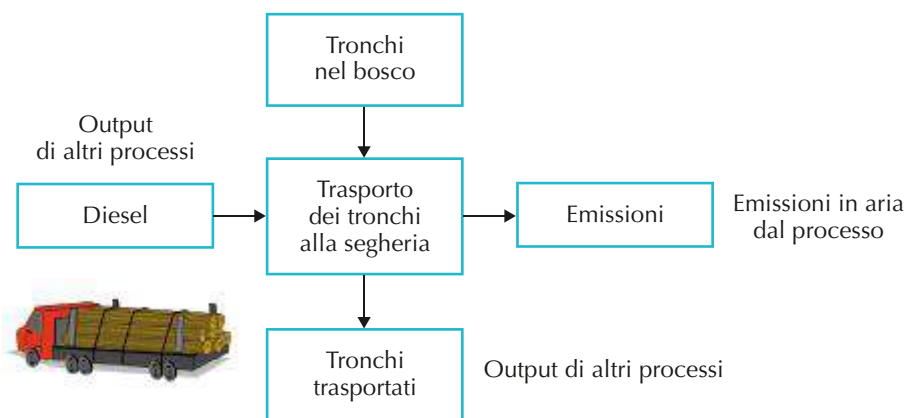
**Processo 1:** per realizzare tavole di legno, alcuni alberi devono essere precedentemente abbattuti, utilizzando motose-

ghe che richiedono il consumo di benzina; l'abbattimento degli alberi genera:

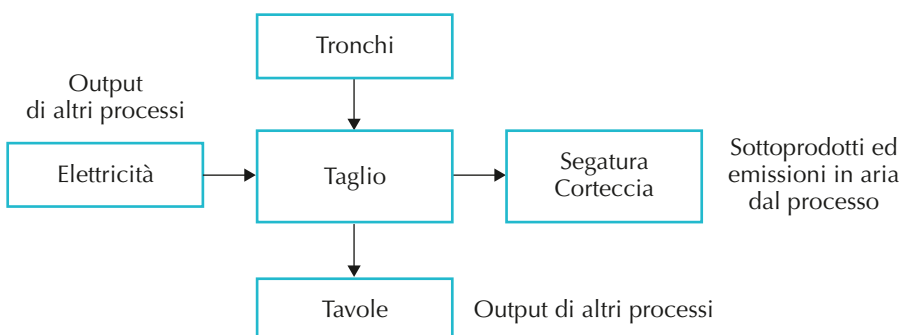
- segatura;
- scarti lasciati nel bosco;
- emissioni della motosega;



**Figura E1.4** Schema a blocchi del processo 1.



**Figura E1.5** Schema a blocchi del processo 2.



**Figura E1.6** Schema a blocchi del processo 3.

che sono da considerarsi come rifiuti; i tronchi invece sono i prodotti per le successive unità di processo [fig. E1.4].

**Processo 2:** dopo il taglio degli alberi, i tronchi vengono raccolti e trasportati in segheria; pertanto, il trasporto costituisce la successiva unità di processo, in cui il diesel

è il carburante per il camion utilizzato per il trasporto mentre i tronchi trasportati sono i prodotti del processo [fig. E1.5].

**Processo 3:** giunti in segheria, i tronchi vengono tagliati per ricavare le tavole [fig. E1.6].

## ET.5 Organizzazioni ed enti attivi nel campo LCA

Di seguito sono riportati alcuni riferimenti a organizzazioni che si occupano di *Life Cycle Assessment*.

### AILCA

L'AILCA (Associazione Italiana LCA) è un organismo, senza scopo di lucro, con sede in Torino presso l'Environment Park, che riunisce su scala nazionale dipartimenti ambiente di grandi imprese, Università e liberi professionisti.

La principale attività dell'Associazione è la diffusione e la promozione di studi ed esperienze sull'Analisi del Ciclo di Vita, sulla base dell'attività scientifica effettuata sia a livello aziendale sia in ambito universitario; effettua inoltre proposte di legge inerenti l'Analisi del Ciclo di Vita, stabilisce contatti e instaura rapporti di collaborazione con Enti che affrontano temi relativi alla disciplina in oggetto.

### ANIE

La Federazione ANIE (Federazione nazionale imprese elettrotecniche ed elettroniche), aderente a Confindustria, rappresenta 900 imprese operanti in Italia nell'industria elettrotecnica ed elettronica.

Svolge varie funzioni: segue l'evoluzione della legislazione ambientale in ambito nazionale e internazionale, mantiene i rapporti con enti e istituzioni italiani e internazionali; svolge attività di consulenza a favore delle associazioni e delle imprese associate nell'interpretazione della normativa ambientale, organizza seminari di formazione e aggiornamento sulle tematiche ambientali e incontri sui provvedimenti legislativi di più recente emanazione, cura la pubblicazione del Bollettino di Informazione Ambientale (periodico sulle novità legislative e la giurisprudenza nazionale e internazionale in materia ambientale).

### ANPA

L'ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente) è una struttura tecnico-scientifica, sottoposta alla vigilanza del Ministro dell'Ambiente e al controllo della Corte dei Conti, che gode di autonomia, indipendenza e flessibilità organizzativa (ha una propria personalità giuridica). Istituita con legge n. 61 del 21/01/1994, a supporto dell'attività del Governo, svolge importanti compiti connessi alla protezione dell'ambiente: collabora con le Istituzioni, in particolare con il

Ministero dell'Ambiente, nella stesura di normative ambientali e nell'applicazione dei controlli, gestisce i dati ambientali, diffonde l'informazione, promuove la ricerca per contribuire al miglioramento dell'ambiente, garantisce la sicurezza nucleare e la radioprotezione.

### APME

È l'associazione delle industrie produttrici di materie plastiche, i cui obiettivi statutari sono: rappresentare gli interessi delle industrie associate, definire e comunicare le posizioni dell'industria della plastica sui temi relativi alla produzione uso e trattamento dei rifiuti, sviluppare e promuovere diffusione di informazioni oggettive su tutti gli aspetti delle materie plastiche: inoltre produce e diffonde i risultati di analisi LCA delle principali materie plastiche.

### CEI

È il Comitato Elettrotecnico Italiano, cioè l'ente istituzionale riconosciuto dallo Stato Italiano e dall'Unione Europea, preposto alla normazione e all'unificazione del settore elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni.

La sua finalità istituzionale è la promozione e la diffusione della cultura tecnica e della sicurezza elettrica.

A tale scopo il CEI sviluppa una serie di attività normative a livello nazionale e internazionale che includono, oltre alla redazione dei documenti normativi e al recepimento delle direttive comunitarie, azioni di coordinamento, ricerca, sviluppo, comunicazione e formazione, in sinergia con le parti coinvolte nel processo normativo.

Il comitato ambiente CEI si occupa di LCA e ha prodotto la Guida 0-8 introduttiva alla LCA.

### ENEA

L'ENEA è un ente di diritto pubblico operante nei campi della ricerca e dell'innovazione per lo sviluppo sostenibile, finalizzata a promuovere insieme agli obiettivi di sviluppo, competitività e occupazione, anche la salvaguardia ambientale.

Svolge inoltre funzioni di agenzia per le pubbliche amministrazioni mediante la prestazione di servizi avanzati nei settori dell'energia, dell'ambiente e dell'innovazione tecnologica.

Il Dipartimento Ambiente dell'ENEA ha il compito primario di promuovere ed effettuare attività di studio, ricerca, sperimentazione e dimostrazione in materia ambientale e di provvedere alla diffusione e al trasferimento alle amministrazioni pubbliche, agli operatori economici e alla collet-



tività intera, le conoscenze e i risultati acquisiti. In questo ambito promuove e realizza anche interventi di consulenza tecnico-scientifica e iniziative a sostegno delle azioni della Pubblica Amministrazione in materia di difesa dell'ambiente, con particolare riferimento alle esigenze espresse dal sistema delle autonomie locali.

## IEC

La IEC (Commissione Elettrotecnica Internazionale) è l'organizzazione mondiale che prepara e pubblica le norme internazionali per le tecnologie connesse con l'elettronica e l'elettrotecnica. L'organizzazione ha la finalità di sviluppare normative con il massimo consenso internazionale, promuovere cooperazioni sugli aspetti connessi con la standardizzazione nei campi dell'elettronica, elettrotecnica, elettroacustica, telecomunicazioni, produzione e distribuzione dell'energia, terminologia e simboli, metodi di misura, progettazione e sviluppo, sicurezza e ambiente.

## IEFE

L'IEFE (Istituto di Economia delle Fonti di Energia) dell'Università Bocconi di Milano si occupa dello studio delle problematiche di economia e politica energetica, con particolare riferimento agli aspetti tecnologici, all'economia e alla politica dell'ambiente dei servizi pubblici e di alcuni settori ad alto contenuto tecnologico.

Organizza e gestisce un osservatorio sui sistemi di gestione ambientale e un laboratorio sulle politiche integrate di prodotto.

### 4.2.9 IJLCA

Lo IJLCA (International Journal of LCA) è la prima rivista scientifica internazionale interamente dedicata alla pubblicazione di studi LCA.

## ISO

L'ISO (International Organization for Standardization) è la federazione delle organizzazioni nazionali di normalizzazione.

È un'organizzazione non governativa finalizzata alla promozione dello sviluppo della normazione e attività connesse, per la facilitazione degli scambi internazionali di beni e servizi. Le norme ISO relative alla gestione ambientale e alla LCA sono quelle della serie 14000.

## LCANET

L'LCANet è una organizzazione finalizzata agli scambi culturali sulle tematiche connesse con LCA.

## SETAC

La SETAC (Society of Environmental Chemistry And Toxicology) è la prima organizzazione ad aver sviluppato scientificamente gli aspetti metodologici di LCA.

Organizza gruppi di lavoro su tematiche connesse con la LCA e relativi eventi culturali (seminari, conferenze e simposi).

I risultati delle indagini condotte dai gruppi di lavoro SETAC sono utilizzati da ISO come riferimenti per la produzione delle norme.

## SPOLD

La SPOLD (Society for the Promotion of Life Cycle Development), è un'associazione di industrie interessate allo sviluppo della LCA applicata come strumento di gestione e di organizzazione finalizzata allo sviluppo sostenibile.

Uno dei principali aspetti seguiti dalla SPOLD è il formato dei dati da utilizzare negli studi LCA.

### Alcune sedi universitarie attive nello sviluppo della LCA

Presso le seguenti Università sono attivi studi sullo sviluppo di LCA:

Bari, Bologna, Milano, Torino, Palermo, Pavia, Pescara, Barcellona (Spagna), Gotheborg (Svezia), Guildford (Inghilterra), Leiden (Olanda), Londra (Inghilterra), Lund (Svezia), Zurigo (Svizzera).

## E1.6 Esempio di LCA applicata a un motore elettrico

L'esempio che segue rappresenta una sintesi delle fasi che vengono svolte nell'esecuzione di uno studio di LCA.

È articolato attraverso lo sviluppo di capitoli e paragrafi in accordo alla norma ISO 14040; tuttavia alcuni argomenti (per esempio le procedure di allocazione, la qualità dei dati e la valutazione degli impatti, sono intenzionalmente tralasciati per non appesantire l'esercizio che ha puramente scopo didattico.

### Obiettivi dello studio

Gli obiettivi dello studio sono la scelta dei criteri e le soluzioni progettuali per realizzare un motore elettrico da 55 kW alimentato a 400 V, minimizzando l'impatto ambientale nel ciclo di vita.

## Prodotto in esame e sue caratteristiche

Il prodotto oggetto dello studio è un motore elettrico per applicazioni industriali avente le seguenti caratteristiche tecniche:

Potenza	55 kW
Velocità rotazione	3000 giri/min
Tensione nominale	400 V

## Unità funzionale

L'unità funzionale dipende dall'obiettivo che si vuole raggiungere per cui, in alcuni casi, può essere più significativo riferire quest'ultimo a un servizio piuttosto che a un prodotto.

Nel caso del motore il servizio è la capacità di effettuare un lavoro, quindi, come unità funzionale può essere assunta l'erogazione continua di un kW per un'ora di funzionamento (1 kWh).

## Descrizione del sistema e dei suoi confini

Il sistema in esame include l'intero ciclo di vita del motore, dall'estrazione delle materie prime, all'assemblaggio, all'utilizzo e dismissione a fine vita, includendo i trasporti e le attività di manutenzione. I dati da acquisire sono relativi ai flussi di materia e di energia [fig. E1.7]:

- produzione dei componenti principali del motore; in questo esempio, vengono considerati solo gli elementi costituenti il rotore e lo statore;
- funzionamento del motore per 10 anni in regime continuativo.

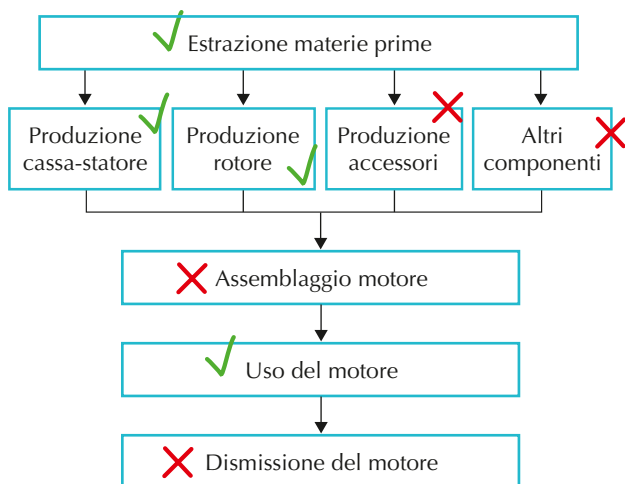


Figura E1.7 Fasi del ciclo di vita (include ✓ e non include X).

Per semplicità si trascurano i flussi di materia ed energia relativi a:

- trasporti dal sito produttivo a quello di esercizio;
- assemblaggio nel sito produttivo;
- smaltimento dei materiali a fine vita.

## Analisi di inventario del ciclo di vita

Con riferimento allo schema di figura E1.7, si effettua l'inventario delle emissioni e del consumo di materie prime relative al sistema definito.

Si procede quindi a un primo inventario dei componenti inclusi nel sistema con informazioni relative:

- al materiale di cui sono costituiti;
- ai processi di lavorazione a cui sono stati sottoposti al termine della filiera;
- al loro peso.

Si elabora quindi la seguente tabella [tab. E1.1].

Tabella E1.1 Elementi motore

Componente	Materiale	Processi	Peso (kg)
Rotore	Acciaio	Laminazione	80
Cassa-statore	Acciaio	Laminazione	100
Avvolgimento rotore	Rame	Trafilatura	30
Avvolgimento statore	Rame	Trafilatura	20

Con i dati riportati nella tabella E1.1, il bilancio di massa del motore è il seguente:

Acciaio: 180 kg

Rame: 50 kg

I dati relativi ai processi di produzione di questi materiali sono disponibili in banche dati specializzate, come per esempio quella prodotta da ANPA.

Da questa banca dati, relativamente alla produzione di un kg di acciaio, si possono trarre le informazioni riportate nelle 3 tabelle seguenti [tab. E1.2], nelle quali sono riportati solo i valori più significativi.

Moltiplicando tutti i valori riportati nelle tre tabelle per il peso dell'acciaio che costituisce il motore, ovvero 180 kg, si ottiene l'inventario relativo all'acciaio.

Lo stesso procedimento si effettua per tutti gli altri materiali elencati nel bilancio di massa (solo il rame nel nostro caso).

**Tabella E1.2** Produzione di 1 kg di acciaio in lamiera (banca dati ANPA)

Input natura			Output acqua			Output aria		
Flusso	UM	Qty	Flusso	UM	Qty	Flusso	UM	Qty
Acqua	l	16 400	Ammoniaca come N	g	6,17556	Acido cloridrico HCl	g	86,3
Calcare	kg	283				Acido fluoridrico HF	g	11
Carbone fossile	kg	1190	Azoto Ntot	g	5,52	Acido solfidrico H <sub>2</sub> S	g	9,9
Ferro	kg	950	BOD5	g	170	Ammoniaca NH <sub>3</sub>	g	1,97
Gas naturale	kg	104				Benzene C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	g	2,27
Legno	kg	14,3	Carbonio organico disciolto DOC	g	1,67	Biossido di carbonio CO <sub>2</sub> (foss)	g	2950000
Lignite	kg	106	Carbonio organico totale TOC	g	149	Cadmio Cd	g	0,107
Petrolio	kg	86,8				COV non metanici	g	1000
Urano	kg	0,00536	Cianuri CN-	g	0,0294	Cromo Cr	g	0,14

A questo punto si effettua la somma di tutti gli inventari per tipologia di materiale, ottenendo così il risultato dell'inventario relativo alla produzione dei componenti costituenti il motore.

Per quanto riguarda la fase di esercizio, occorre valutare l'energia dissipata dal motore durante l'arco di vita: è perciò necessario stabilire uno scenario di esercizio.

Nell'ipotesi di funzionamento continuativo per 10 anni, si suppone che il motore dissipi 18 800 GJ (18 800 000 MJ).

Ogni MJ di energia elettrica si traduce in una tabella di inventario contenente materie prime ed emissioni i cui quantitativi dipendono dal mix energetico del Paese in cui l'energia viene dissipata.

Solitamente non è noto a priori la destinazione del prodotto, per cui è consigliabile utilizzare i dati relativi al mix energetico europeo.

Effettuata la sommatoria di tutti i contributi all'inventario per tutte le fasi del ciclo di vita esaminate si procede alla valutazione degli impatti.

**CONTENUTI**

- E2.1** Definizione di sistema produttivo
- E2.2** Classificazione dei sistemi produttivi
- E2.3** Classificazione delle modalità produttive
- E2.4** Il sistema produttivo e i prodotti che vengono realizzati
- E2.5** Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti di catalogo
- E2.6** Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti su commessa
- E2.7** Esempio di produzione su commessa: l'impianto elettrico

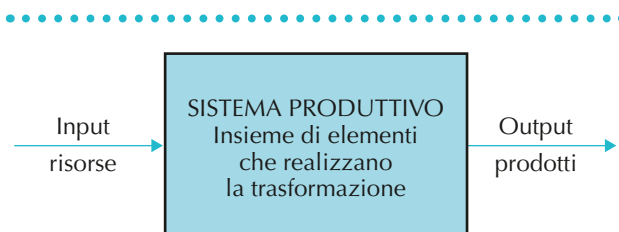


Sistemi di produzione job-shop

# IL SISTEMA PRODUTTIVO

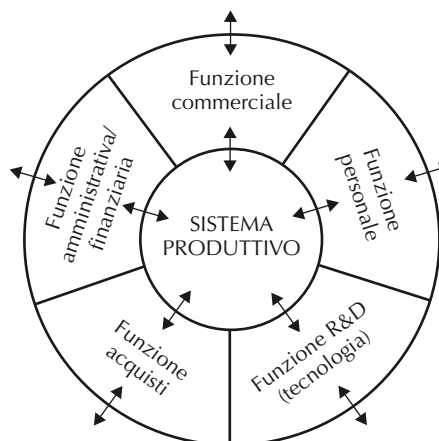
## E2.1 Definizione di sistema produttivo

Si definisce **Sistema Produttivo** (SP) l'insieme delle attività aziendali che trasformano le risorse entranti nell'azienda in prodotti finiti in uscita [fig. E2.1].



**Figura E2.1** Schema di principio di un sistema produttivo.

È importante sottolineare che l'SP costituisce un "sottosistema" di un sistema di livello superiore: l'intera azienda, nella quale sono presenti vincoli e condizionamenti provenienti da altre funzioni aziendali, come indicato nella **figura E2.2**.



**Figura E2.2** Il sistema produttivo e le altre funzioni aziendali.

Le frecce esterne rappresentano i legami tra l'azienda e l'ambiente esterno, in particolare tra le singole funzioni aziendali e lo specifico tipo di "mercato" con cui ciascuna di esse ha rapporti (mercato dei prodotti, delle forniture, dei mezzi finanziari, della tecnologia, del lavoro).

Le frecce interne, invece, rappresentano la trasformazione dei rapporti con l'ambiente esterno nelle richieste dirette all'SP.

Per esempio, le osservazioni dei clienti, tramite la funzione commerciale, possono essere trasformate in interventi di miglioramento della qualità dei prodotti; le conclusioni di una trattativa sindacale possono portare a cambiamenti di utilizzo della forza lavoro; le condizioni di fornitura troppo onerose di alcuni materiali possono portare alla loro rinuncia e quindi alla ricerca di soluzioni alternative e tecnicamente valide.

L'SP, pertanto, svolge la funzione di trasformare le risorse entranti in prodotti finiti uscenti, rispettando i vincoli imposti dalle scelte strategiche che caratterizzano i rapporti dell'azienda con il proprio ambiente esterno di riferimento.

## E2.2 Classificazione dei sistemi produttivi

A seconda del tipo di prodotto da realizzare, esistono diverse tipologie di SP.

Una prima distinzione è quella tra SP di **fabbricazione** e di **montaggio**, i cui processi di produzione sono caratterizzati da operazioni di tipologia diversa.

Per fabbricazione si intende l'insieme delle lavorazioni che modificano almeno una caratteristica del materiale in ingresso, come per esempio quelle geometriche (operazioni di taglio, piegatura, sagomatura), quelle meccaniche (trattamenti termici, galvanici) o chimiche (reazioni chimiche industriali).

Il termine montaggio, invece, indica il complesso di operazioni che comportano l'unione di parti inizialmente disgiunte (saldature, bullonature, chiodature, incollaggi).

Nella **figura E2.3** è rappresentato un esempio di schema di flusso dei materiali, detto anche **flusso**

**logistico**, entro un SP comprensivo delle fasi di fabbricazione, montaggio, spedizione e distribuzione ai clienti.

Oltre a questo primo criterio di classificazione, è possibile individuarne altri, che si distinguono per le modalità con cui:

- si realizza il volume produttivo;
- si risponde alla domanda di mercato;
- si realizza il prodotto.

### Classificazione secondo il volume di produzione

La prima classificazione degli SP è quella basata sulle modalità con cui sono ottenuti i volumi di produzione, caratterizzata dai seguenti parametri:

- la ripetitività delle operazioni;
- la continuità del flusso entrante/uscente, intesa come uniformità rispettivamente delle materie prime e dei prodotti finiti.

In funzione di questi due parametri è possibile individuare le tre categorie di SP di seguito indicate.

- **Sistemi a flusso.** Sono caratterizzati dalla ripetitività delle operazioni e dalla continuità del flusso entrante/uscente; tipici sistemi a flusso sono le linee di produzione manifatturiere, le raffinerie di petrolio e gli impianti di processo funzionanti in condizioni di regime costante.
- **Sistemi a lotti.** Sono caratterizzati da una produzione di quantità predefinite di prodotti denominate **lotti**; esempi di sistemi a lotti sono:
  - reparti manifatturieri nei quali si realizzano particolari prodotti in lotti più o meno numerosi;
  - impianti petrolchimici che lavorano a "campagne", ovvero con modalità di funzionamento mirate a ottenere uno specifico prodotto o mix di prodotti; durante la campagna produttiva questi impianti hanno le stesse caratteristiche di un sistema a flusso (continuità del flusso entrante/uscente e ripetitività delle operazioni).



**Figura E2.3** Schema di flusso logistico.

- **Sistemi a prodotto singolo.** Sono caratterizzati da scarsa o nulla ripetitività delle operazioni e da discontinuità del flusso entrante/uscente; in genere ogni prodotto è diverso da quello precedente e da quello successivo; esempi di sistemi a prodotto singolo sono i cantieri civili e i reparti manifatturieri preposti alla costruzione di impianti o di grandi macchine operatrici.

### Classificazione rispetto al modo di rispondere alla domanda commerciale

Una seconda classificazione degli SP nasce da criteri di natura commerciale, ossia dalla modalità con cui l'azienda risponde alle richieste del mercato.

Al riguardo, le aziende possono essere suddivise come di seguito indicato:

- aziende con prodotti a catalogo su previsione, dette **Make to Stock (MTS)**: le fasi di progettazione, acquisti, fabbricazione e montaggio sono tutte eseguite su previsione delle vendite;
- aziende con prodotti a catalogo assemblati su ordine, dette **Assemble to Order (ATO)**: le fasi di progettazione, acquisti e fabbricazione sono eseguite su previsione, mentre il montaggio su ordine del cliente;
- aziende con prodotti a catalogo costruiti su ordine del cliente, dette **Make to Order (MTO)**: progettazione e acquisti sono svolte su previsione, mentre fabbricazione e montaggi su ordine del cliente; nel caso anche gli acquisti fossero eseguiti su ordine le aziende sono definite **Purchase to Order (PTO)**, cioè che acquistano su ordine;
- aziende con prodotti su commessa, dette **Engineer to Order (ETO)**: le fasi di progettazione, acquisti, fabbricazione e montaggio sono svolte tutte su ordine del cliente.

### Classificazione secondo il modo di realizzare il prodotto

La terza e ultima classificazione degli SP nasce dalla natura intrinseca dei prodotti.

Prodotti chimici, farmaceutici e tessili, per esempio, sono ottenuti a partire da una serie di materie prime che non possono più essere individuate nel prodotto finale, poiché non sono più distinguibili o perché hanno cambiato natura.

Le lavorazioni attraverso cui si ottengono questi tipi di prodotti sono dette **produzioni per processo**.

In altri casi, invece, il prodotto finale risulta costi-

tuito da una serie di componenti discreti o **parti** di diversa natura: è il caso, per esempio, di automobili, apparati elettrici (motori, quadri, impianti industriali) ed elettronici (cellulari, lettori DVD, televisori); in questo caso i processi produttivi sono denominati “**per parti**” e il prodotto finale è costituito da una serie di componenti discreti (o parti) di diversa natura.

La caratteristica peculiare di questi prodotti è la possibilità di smontarli nei loro diversi componenti (la carta, al contrario non può essere smontata per verificare la presenza e la natura della cellulosa utilizzata e degli altri additivi impiegati per la sua produzione).

In genere gli SP per processo sono costituiti da impianti specifici entro cui fluiscono con continuità le materie prime in entrata e dai quali, sempre con continuità, escono i prodotti finiti.

Negli SP per parti, invece, sono presenti macchine che possono svolgere lavorazioni differenti e dalle quali è pertanto possibile ottenere diversi manufatti in funzione dei diversi programmi di produzione.

## E2.3 Classificazione delle modalità produttive

Dall'incrocio delle modalità di classificazione “secondo il modo di realizzare il prodotto” e “secondo il volume di produzione” si ottiene la matrice che individua diverse categorie di modalità produttive [tab. E2.1].

La matrice identifica, nei quadranti 1 e 4, la “produzione singola” rispettivamente per parti e per processo.

Il quadrante 2 individua la “produzione intermittente”, una produzione a lotti di prodotti ottenuti per parti: questi ambienti produttivi sono caratterizzati da un processo nel quale i materiali vengono lavorati e movimentati in quantità predefinite (lotti), secondo cicli di lavorazione variabili, con prelievi a magazzino più o meno frequenti (i materiali attraversano i reparti funzionali in lotti e ogni lotto è caratterizzato da un ciclo produttivo differente).

Il quadrante 5 identifica la “produzione discontinua”, intesa come una produzione a lotti di prodotti ottenuti per processo.

Infine, il quadrante 3 classifica la “produzione ripetitiva” come una produzione a flusso di prodotti ottenuti per parti e il quadrante 6 la “produzione continua” come una produzione a flusso di prodotti ottenuti per processo.

**Tabella E2.1** Matrice di classificazione delle modalità di produzione

Classificazione secondo il modo di realizzare il prodotto \ Classificazione secondo il modo di realizzare il volume di produzione	Produzione singola	Produzione a lotti	Produzione a flusso
Produzione per parti (prodotti integrali)	1 Produzione unitaria per parti	2 Produzione intermittente	3 Produzione ripetitiva
Produzione per processo (prodotti dimensionali)	4 Produzione unitaria per processo	5 Produzione discontinua	6 Produzione continua

Le produzioni ripetitiva e continua sono caratterizzate da un flusso omogeneo e continuo di materiali che fluiscono lungo le unità produttive fino all’ottenimento dei prodotti finiti.

Nella **tabella E2.2** sono riportati gli SP che realizzano le sei modalità produttive sopra esposte, con esempi di prodotti dei relativi settori industriali di applicazione.

## E2.4 Il sistema produttivo e i prodotti che vengono realizzati

Nel paragrafo E2.2 è stata eseguita una classificazione delle aziende rispetto alla modalità di risposta della domanda, distinguendo quelle che operano con prodotti di catalogo (MTS, ATO, MTO e PTO) da quelle che operano con prodotti su commessa (ETO).

Un’azienda che opera con prodotti di catalogo

è nota per i prodotti che costruisce e propone ai propri potenziali clienti/consumatori (per esempio Fiat, Zanussi, Barilla): tali aziende offrono al mercato prodotti che sono già stati realizzati.

Un’azienda che opera con prodotti su commessa, è invece più nota per la sua tecnologia, la capacità realizzativa e qualità dei suoi prodotti.

Innumerevoli sono gli esempi di aziende note alla propria potenziale clientela per la loro capacità tecnologica, come per esempio nel campo delle costruzioni civili, navali e in generale delle costruzioni.

In questa categoria rientrano anche alcune aziende note per la loro capacità tecnologica nel campo dei servizi; tipici esempi sono le aziende che operano nei servizi di trasporto (trasporti eccezionali, di merci pericolose), di manutenzione di impianti tecnologici e di sviluppo di software.

Un’azienda che opera su commessa realizza prodotti solo a seguito di un ordine, cioè dopo aver acquisito una commessa da un cliente (aziende

**Tabella E2.2** Matrice di classificazione delle modalità di produzione con esempi

Classificazione secondo il modo di realizzare il prodotto \ Classificazione secondo il modo di realizzare il volume di produzione	Produzione singola	Produzione a lotti	Produzione a flusso
Produzione per parti (prodotti integrali)	1 Cantieri <ul style="list-style-type: none"> <li>• costruzioni civili</li> <li>• costruzioni navali</li> </ul>	2 Costruzione di componenti meccanici	3 Linee di fabbricazione/ monitoraggio <ul style="list-style-type: none"> <li>• alimentari</li> <li>• automobili</li> <li>• elettronica di consumo</li> </ul>
Produzione per processo (prodotti dimensionali)	4 Laboratori <ul style="list-style-type: none"> <li>• prodotti galenici</li> <li>• sintesi di laboratorio</li> </ul>	5 Impianti che lavorano a infornate <ul style="list-style-type: none"> <li>• settore alimentare</li> <li>• settore farmaceutico</li> </ul>	6 Impianti continui <ul style="list-style-type: none"> <li>• fertilizzanti</li> <li>• cloro soda</li> <li>• acido nitrico</li> </ul>

di tipo Engineer to Order, ETO): in tal caso le caratteristiche del processo produttivo variano in funzione del tipo di prodotto da realizzare.

## E2.5 Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti di catalogo

L'SP di un prodotto è costituito da una serie di attività tra loro interdipendenti che iniziano dalla fase di concezione e terminano con la commercializzazione: esso costituisce una variabile strategica della competizione industriale.

Migliorare lo sviluppo dei prodotti, infatti, ha effetti rilevanti sia sui costi di produzione che sulla qualità e sulla soddisfazione dei clienti e quindi sul vantaggio competitivo dell'azienda.

Infatti, non si raggiunge un risultato efficiente soltanto investendo in ricerca e sviluppo, mettendo a punto, per esempio, una tecnologia innovativa (anche se in alcuni casi una scelta del genere può rivelarsi decisiva) o introducendo nuove attrezzature per quanto innovative possano essere.

Ciò che distingue le aziende che realizzano risultati di alto livello nello sviluppo dei prodotti è la coerenza dell'SP nel suo complesso, comprendente la struttura organizzativa, le competenze tecniche e le strategie.

Lo sviluppo e la produzione di un prodotto sono infatti processi complessi che coinvolgono tutta la realtà aziendale (progettazione, marketing, engineering e servizio al cliente), in cui assume un ruolo fondamentale l'informatizzazione delle procedure adottate.

Un processo di sviluppo coerente si articola in quattro stadi principali:

1. raccolta e selezione delle idee e generazione del concept del prodotto;
2. progettazione preliminare del prodotto;
3. progettazione finale del prodotto;
4. scelta dell'SP.

### Raccolta e selezione delle idee generazione del concept del prodotto

Ciascun prodotto trae origine da un'idea: ogni azienda auspica che tale idea sia così brillante da dar vita a un prodotto di grande diffusione e con una vita molto lunga.

A questo punto occorre porsi una domanda: quali sono le "fonti" dalle quali l'idea di un prodotto può scaturire?

La prima e la più importante risposta è costituita dall'ascolto delle osservazioni e dei suggerimenti forniti dai propri clienti potenziali: è senz'altro conveniente che i responsabili dell'azienda abbiano con regolarità "confronti" con propri clienti potenziali, sollecitandone e raccogliendone opinioni e osservazioni.

Sulla base delle idee raccolte l'azienda può ritenere opportuno realizzare unità prototipo di nuovi prodotti che possono essere forniti ai clienti allo scopo di sperimentarne l'affidabilità, la qualità, la realizzazione e la manutenibilità.

Altre tradizionali fonti di idee sono le ricerche di mercato e i risultati forniti dalla divisione "Ricerca & Sviluppo" dell'azienda.

Le idee raccolte devono essere singolarmente analizzate e selezionate sia in base alla loro validità, sia alla possibilità di realizzarle concretamente.

In tal senso occorre definire un modello di selezione comprendente l'insieme dei vincoli rappresentati dalle effettive disponibilità di macchinari, manodopera, know-how, risorse finanziarie, opportunità di mercato.

Una volta definito il modello di selezione più opportuno, la scelta del prodotto da produrre può essere agevolata e razionalizzata mediante il ricorso a strumenti matematici (analisi delle decisioni, programmazione lineare, simulazione) di ampia e sperimentata diffusione: nasce così il **concept** (concetto) di prodotto, ovvero la descrizione sintetica di come l'idea di prodotto selezionata potrà soddisfare le esigenze dei clienti.

### Progettazione del prodotto

Una volta definito il concept del prodotto, esso deve essere trasformato in specifiche via via più concrete (costo, prestazioni, scelta dei componenti) per consentirne l'ingegnerizzazione.

Inizia così la fase di progettazione, una tra le più importanti dell'intero ciclo produttivo, durante la quale vengono fissate le specifiche di produzione che consentono di stabilire le materie prime da utilizzare, le macchine e le attrezzature necessarie, le dimensioni del prodotto, il layout degli impianti, la tipologia, la quantità di manodopera da impiegare.

La fase di progettazione a sua volta si articola in due sotto-fasi:

- la progettazione preliminare;
- la progettazione finale.

Durante la progettazione preliminare sono studiate tutte le possibili soluzioni progettuali che soddisfano le specifiche fissate in sede di selezione.



Vengono fornite da parte dei progettisti le principali caratteristiche del prodotto e dei suoi componenti con l'indicazione dei materiali da utilizzare, mentre l'ufficio tecnico di produzione deve fornire una previsione di costo.

Le attività descritte vengono sottoposte ad approvazione da parte della Direzione che deve decidere se lo studio va interrotto o proseguito, valutando i risultati degli studi preliminari in termini di prezzi, costi, volumi, investimenti.

Tali confronti sono possibili grazie alle attività degli addetti al marketing, i quali, durante il lavoro dei progettisti, approfondiscono lo studio di mercato formulando ipotesi di prezzo e di volume: sono questi gli elementi sulla base dei quali viene decisa la prosecuzione o la sospensione della progettazione del prodotto.

Nel caso di mancata approvazione, il prodotto viene abbandonato senza causare un danno troppo oneroso all'azienda.

I prodotti che invece sono ritenuti validi di ulteriori investimenti, perché l'idea appare promettente, passano alla fase di progettazione finale, finalizzata all'ottenimento di un progetto dettagliato di prodotto realizzabile industrialmente.

In questa fase i progettisti devono concretizzare il concetto di prodotto nel pieno rispetto dei vincoli di costo e di investimenti, fornendone il progetto esecutivo, avvalendosi di schemi e adeguati database. Il progetto esecutivo viene successivamente trasformato in un prototipo, normalmente realizzato con materiali provvisori senza utilizzare le attrezzature relative alla produzione di serie, il quale è sottoposto a un apposito "programma di testaggio" che ha lo scopo di:

- verificare la rispondenza del prodotto alle specifiche prefissate;
- rilevare eventuali difetti, malfunzionamenti e difficoltà di produzione.

I risultati del test sono molto importanti, poiché costituiscono la base per eventuali modifiche da apportare al progetto finale.

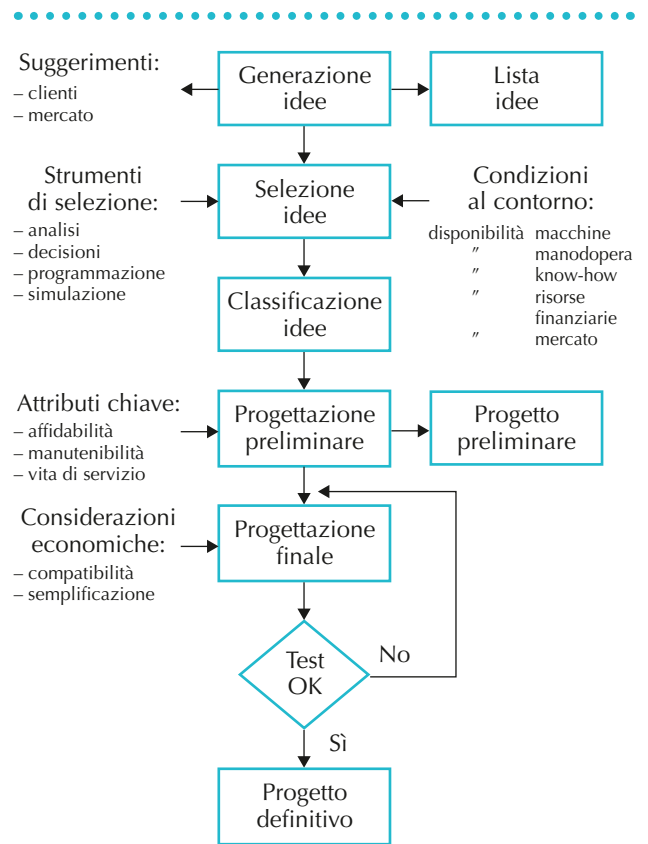
Il programma di testaggio viene ripetuto fino all'approvazione definitiva, da parte della Direzione aziendale, del progetto esecutivo finale.

È importante sottolineare che durante la fase di progettazione finale occorre tener presente, oltre gli aspetti tecnici, anche quelli economici: la configurazione finale del prodotto dovrà infatti risultare un giusto compromesso tra necessità tecniche e i vincoli economici dell'azienda (la ricerca di tale equilibrio è particolarmente importante in sede di scelta dei materiali da impiegare).

Nel caso di impianti complessi, comprendenti centinaia o migliaia di componenti, è indispensabile tener conto anche:

- della reciproca **compatibilità** dei materiali e dei componenti scelti;
- della **semplificazione**, per eliminare i componenti e i cicli di lavoro non standard che aumentano i costi di fabbricazione.

Nella **figura E2.4** sono infine schematizzate le fasi in cui si articola la procedura di scelta e progettazione del prodotto.



**Figura E2.4** Fasi di scelta e progettazione del prodotto.

Il progetto esecutivo finale viene utilizzato per la produzione di un primo lotto di prodotti, denominato **serie pilota** o anche **pre-serie**, allo scopo di studiarne la producibilità industriale e mettere a disposizione del marketing un certo numero di pezzi utili per un lancio di prova del nuovo prodotto sul mercato (test di mercato).

È a questo punto che viene definito il messaggio da lanciare al pubblico.

I risultati acquisiti dal test di mercato consentono di:

- accertare la reazione dei consumatori nei confronti del prodotto e valutare l'ampiezza del mercato;

- temporizzare il lancio, soprattutto nei casi di stagionalità del mercato, e decidere sul ritiro dal mercato di eventuali prodotti simili già esistenti (“cannibalizzazione”);
- definire dove effettuare il lancio, tenendo conto di alcune variabili come il mercato potenziale, l’immagine locale dell’azienda, il costo della distribuzione fisica;
- individuare, tra le aree di mercato prescelte, quelle sulle quali indirizzare il lancio; a tal fine è necessario individuare i gruppi di clienti potenziali ai quali orientare l’azione distributiva promozionale.
- stabilire la strategia di mercato mediante la quale effettuare il lancio: l’impresa deve mettere a punto un piano operativo per realizzare l’introduzione del prodotto nelle varie aree di mercato prescelte, per ciascuna delle quali deve essere predisposto uno specifico piano di marketing.

Sulla base del lancio di prova la funzione marketing verifica le informazioni raccolte e perfeziona le previsioni sia del volume di vendita sia del prezzo.

Attraverso la stima del volume di vendita sono calcolati i costi di produzione: questi ultimi, infatti, che dipendono dalle quantità da realizzare nel tempo (per esempio in un anno), determinano la cosiddetta “industrializzazione” del prodotto.

### Scelta del sistema di produzione

Una volta realizzato e approvato il progetto definitivo del prodotto si procede alla scelta dell’SP. In questa fase occorre tener presente una serie di parametri caratteristici del prodotto, cioè:

- quantità di pezzi da fabbricare;
- standardizzazione dei pezzi;
- ritmo di produzione.

Come visto nel paragrafo E2.3, al variare di tali parametri varia la tipologia dell’SP che può essere scelto in base alla matrice della **tabella E2.1**.

Una volta scelto l’SP più idoneo alle esigenze di produzione, occorre definire i macchinari da utilizzare: per esempio è più conveniente una macchina specializzata o una generica?

La prima alternativa consente elevate capacità produttive e costi di fabbricazione ridotti; per contro rende il sistema produttivo scarsamente flessibile; la seconda presenta invece vantaggi e svantaggi opposti.

Al riguardo è importante sottolineare che con un’automazione flessibile è possibile realizzare

piccoli volumi di produzione in maniera rapida ed economica, realizzando una produzione di tipo “**job-shop**”, conveniente nel caso di produzione di piccole quantità di prodotti diversificati. Per tale motivo è frequente trovare aziende che tendono a mediare vantaggi e svantaggi caratteristici delle due alternative, installando nello stesso centro di lavoro alcune macchine specialistiche e altre generiche.

D’altronde il diffondersi dell’impiego delle tecnologie elettroniche nel settore delle macchine e degli impianti ha reso compatibili le due alternative.

## E2.6 Il sistema di produzione nel caso di aziende con prodotti su commessa

L’attività di progettazione dei prodotti nelle aziende ETO assume connotati differenti rispetto alla stessa attività delle aziende che operano in base a un catalogo: ciò deriva dalla diversa filosofia che caratterizza le due categorie di aziende.

Come già detto nei paragrafi precedenti, le aziende che operano in base a un catalogo instaurano un rapporto con il mercato di tipo “propositivo”, in quanto propongono al cliente di acquistare un prodotto/servizio già completamente definito.

Le aziende della categoria ETO, invece, propongono al mercato la propria “candidatura” per l’assegnazione di una commessa: ciò, pur essendo una proposta, non rappresenta l’offerta di un prodotto già definito in tutte le sue caratteristiche.

Anche in questo caso l’attività di progettazione dei prodotti segue quella di “acquisizione della commessa”, dato che le risorse di progettazione vengono mobilitate solo dopo il perfezionamento del contratto con il committente, il quale è legato a due fattori fondamentali: il preventivo del prezzo e la data di consegna.

La data di consegna viene definita a partire da informazioni relative alle:

- commesse già acquisite e in corso di realizzazione, che rappresentano un carico di lavoro conosciuto (sono infatti conosciute le lavorazioni che dovranno essere eseguite poiché le attività relative alla progettazione sono già state completate);
- commesse già acquisite e ancora in fase di progettazione, che rappresentano un “carico” di lavoro già acquisito ma conosciuto solo approssimativamente;

- commesse in corso di acquisizione per le quali il “carico” è conosciuto solo in termini molto approssimati; si tratta di un carico “probabilistico”, poiché non è ancora certa l’acquisizione che dipende dall’accettazione dell’offerta da parte del committente.

Con queste informazioni e la capacità produttiva disponibile viene fatta una stima della data di consegna da proporre al committente.

Si tratta di una proposta che comporta un certo grado di incertezza a cui corrisponde un certo rischio di non poter far fronte agli impegni assunti. Analoga incertezza e analoghi rischi si hanno per la definizione del preventivo di prezzo da proporre al committente.

Tuttavia, per questo problema, la situazione di un’azienda che costruisce prodotti “caratterizzati” è di maggior sicurezza rispetto a quella che costruisce prodotti “differenziati”.

I prodotti caratterizzati sono riferiti al caso di aziende che costruiscono “cose diverse ma sempre uguali a se stesse”.

Un tipico esempio è costituito dalle aziende costruttrici di motori elettrici su commessa: si tratta di motori uno diverso dall’altro che vengono progettati in funzione delle esigenze del cliente/committente, i quali però sono tutti e sempre costituiti da uno statore, un rotore, un albero, due calotte ecc. (i prodotti sono, appunto, caratterizzati).

In tal caso, facendo riferimento alla propria esperienza, è possibile formulare un preventivo di costo in base a pochi e significativi dati del prodotto commissionato, che consentono di effettuare paragoni con altri prodotti già realizzati.

La formulazione del preventivo di prezzo presenta, invece, difficoltà maggiori nel caso di aziende con prodotti differenziati: è questo il caso di aziende che si propongono al mercato in termini di capacità di risolvere problemi piuttosto che di capacità fornire prodotti.

Consideriamo, per esempio, un’azienda che sei mesi fa si era impegnata nella realizzazione di un

nuovo aeroporto, mentre ora è impegnata nella costruzione di un acquedotto in una zona desertica e contemporaneamente sta trattando per aggiudicarsi una commessa per la costruzione di una strada.

In questo caso la preventivazione del costo, necessaria per definire il preventivo di prezzo da richiedere, può essere fatta solo dopo che il committente ha esaminato e accettato la proposta di soluzione del problema.

Si comprende, pertanto, come la preventivazione del costo nel caso delle aziende con prodotti differenziati risulti molto più complessa e anche rischiosa rispetto al caso delle aziende con prodotti caratterizzati.

## E2.7 Esempio di produzione su commessa: l’impianto elettrico

Si definisce **impianto elettrico** l’insieme delle apparecchiature elettriche, meccaniche e fisiche che consentono la trasmissione e l’utilizzo dell’energia elettrica.

Esistono due grandi categorie di impianti elettrici: **impianti civili** e **impianti industriali**.

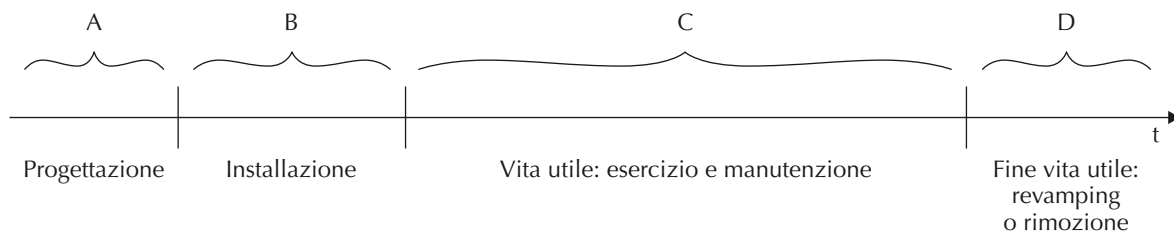
I primi si utilizzano nelle abitazioni private e nei luoghi di pubblico accesso come scuole e ospedali, i secondi nei luoghi di lavoro e di produzione.

La realizzazione degli impianti elettrici, e più in generale di tutti gli impianti, è disciplinata dalla Legge 5 marzo 1990, n. 46 e dal suo regolamento di attuazione D.P.R. 6 dicembre 1991, n. 447.

Questa attività è un tipico esempio di produzione su commessa, nella quale il committente stipula un accordo con un fornitore a seguito di un’offerta di quest’ultimo.

### Il ciclo di vita di un impianto elettrico

Il ciclo di vita di un di un impianto elettrico può essere schematizzato come mostrato nella **figura E2.5**.



**Figura E2.5** Fasi del ciclo di vita di un impianto elettrico.

La schematizzazione proposta suddivide la vita utile in quattro fasi principali:

- progettazione;
- installazione;
- vita utile;
- fine vita utile.

### Progettazione

La progettazione è la fase durante la quale viene realizzato il progetto dell'impianto in funzione degli accordi assunti con il committente e nel rispetto delle normative e prescrizioni di legge.

La progettazione è articolata su tre livelli, come di seguito indicato.

- 1. Progettazione preliminare.** Stabilisce i profili e le caratteristiche più significative degli elaborati dei successivi livelli di progettazione, in funzione della tipologia dell'impianto.
- 2. Progettazione definitiva.** È redatta sulla base delle indicazioni del progetto preliminare e contiene i criteri utilizzati per le scelte progettuali, le caratteristiche prestazionali e descrittive dei materiali prescelti e i criteri di progettazione delle strutture, in particolare per quanto riguarda la sicurezza, la funzionalità e l'economia di gestione.
- 3. Progettazione esecutiva.** Costituisce l'ingegnerizzazione delle attività necessarie alla realizzazione dell'impianto; in questa fase sono definiti in dettaglio i criteri utilizzati e i particolari costruttivi di ogni singolo componente.

La fase di progettazione dell'opera coinvolge differenti soggetti, ciascuno dei quali deve espletare le funzioni di seguito indicate.

- **Committente.** È la persona fisica o giuridica, che commissiona l'opera e che direttamente o indirettamente ne finanzia la realizzazione. Il Committente deve comunicare al progettista tutte le informazioni necessarie per la corretta progettazione degli impianti come per esempio le peculiarità dei processi produttivi, la presenza di particolari rischi, quali incendio o esplosione.
- **Progettista.** È la persona, fisica o giuridica, che redige il progetto dell'impianto.
- **Coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione.** Redige, ai fini dell'esecuzione in sicurezza dei lavori di installazione, il piano di sicurezza e coordinamento nel quale evidenzia eventuali criticità presenti nel processo di realizzazione e propone soluzioni organizzative del cantiere finalizzate a risolvere le cri-

icità stesse; la figura del coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione non è sempre presente tra i soggetti che concorrono alla progettazione dell'impianto. La tipologia delle opere che necessitano del Coordinatore è stabilita, dalla legislazione vigente, in funzione della durata dei lavori e del numero di lavoratori presenti.

- **Commissioni di Enti Pubblici.** Esaminano i progetti presentati e procedono all'autorizzazione o alla richiesta di chiarimenti e documentazione integrativa, qualora necessari; un esempio di controlli finalizzato all'autorizzazione, è l'esame del progetto, ai fini dell'applicazione della Normativa di prevenzione Incendi da parte del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco competente per il territorio.
- **Consulenti di parte.** Sono normalmente figure di ausilio al Committente.

La progettazione si conclude con la produzione degli elaborati di progetto cioè le relazioni descrittive, il capitolato speciale, e gli elaborati grafici: tali documenti descrivono l'opera e ne consentono la realizzazione.

### Installazione

La fase di installazione degli impianti è il periodo durante la quale il progetto viene realizzato.

Di seguito sono indicate le figure principali di questa fase.

- **Direttore dei Lavori.** È responsabile della corretta realizzazione dell'impianto in conformità al progetto redatto e del rispetto dei vincoli temporali, economici e amministrativi; cura la realizzazione delle eventuali varianti che si rendano necessarie in seguito a necessità sopraggiunte (le varianti, se comportano modifiche sostanziali al progetto, devono essere progettate). Per esempio, non costituisce variante sostanziale lo spostamento, di qualche metro, di una presa elettrica a spina mentre è variante sostanziale lo spostamento di un quadro elettrico, ovvero la modifica del sistema di distribuzione dell'energia elettrica previsto dal progetto.
- **Coordinatore per la sicurezza in fase di esecuzione.** Cura l'attuazione di tutte le misure relative alla sicurezza dei lavoratori durante le fasi di installazione.
- **Installatore.** È la figura che pone in opera l'impianto rispettando il progetto e le indicazioni impartite dal Direttore dei Lavori e rilascia, a fine dei lavori, la documentazione

di Legge (Dichiarazione di Conformità comprensiva degli allegati obbligatori) e la documentazione di impianto.

Al termine della fase di installazione deve essere eseguito il collaudo, che consiste nell'effettuare prove ed esami finalizzati ad accertare la rispondenza alla normativa vigente e la sussistenza delle condizioni di sicurezza.

### Vita utile: esercizio e manutenzione

È la fase operativa della vita, durante la quale l'impianto è utilizzato.

In questa fase vengono effettuati gli interventi di manutenzione volti a ripristinare lo stato iniziale dell'impianto in caso di malfunzionamento; possono essere effettuati interventi di manutenzione straordinaria, o di modifica dell'impianto in seguito ad ampliamenti o sopraggiunte necessità.

Durante la vita utile devono essere eseguite le verifiche periodiche stabilite dalla normativa vigente.

I soggetti presenti durante la vita utile sono:

- l'**Utente**, cioè l'utilizzatore dell'impianto, che non deve intenzionalmente manomettere i sistemi di protezione previsti e installati;
- il **Committente**;
- il **Responsabile della manutenzione**, cioè la figura che segue la vita dell'impianto e cura la realizzazione degli interventi di manutenzione e l'aggiornamento della documentazione integrando il contenuto degli elaborati e degli schemi secondo le modifiche apporta-

te, le quali devono essere progettate secondo quanto stabilito dalla Legge;

- il **Verificatore di Enti Pubblici**, cioè la figura che esegue le verifiche periodiche stabilite dalla Legge, il quale, effettuando esami e prove strumentali, accerta la permanenza delle condizioni di sicurezza; al termine delle verifiche deve essere rilasciata la documentazione di Legge (Rapporti di verifica).

### Fine vita utile: revamping o rimozione

Durante questa fase l'impianto può essere ricondizionato mediante radicali interventi o rimosso e smaltito.

Per esempio, gli impianti elettrici civili sono normalmente rimossi e sostituiti, mentre per gli impianti industriali può essere effettuato il revamping, ovvero la revisione e la ristrutturazione allo scopo di allungarne la vita utile all'interno del processo produttivo. Gli aspetti operativi legati alla fine della vita utile dell'impianto sono prevalentemente di carattere ambientale.

Alcuni componenti di impianto, infatti, contendo sostanze pericolose per l'ambiente e per le persone, devono essere smaltite secondo procedure stabilite dalla Legge, come per esempio gli accumulatori, le batterie, gli olii dielettrici contenenti PCB (con il termine generico **PCB**, policlorobifenile, si intende una famiglia di composti chimici, denominati congeneri, utilizzati come liquido di raffreddamento nei trasformatori).

Un eventuale intervento di revamping può essere considerato come la fase progettuale relativa a un nuovo impianto.

## CONTENUTI

- E3.1 Introduzione
- E3.2 Il metodo MRP
- E3.3 La distinta base



## Scorte di magazzino

# LA GESTIONE DEI MATERIALI NEL SISTEMA PRODUTTIVO

## E3.1 Introduzione

Le crescenti difficoltà nella conduzione degli impianti industriali complessi, hanno reso più frequente il ricorso a metodi analitici in grado di assicurare una razionale pianificazione e un efficace controllo dell'intero processo produttivo.

Il settore maggiormente interessato a questo processo di razionalizzazione delle procedure è la "gestione dei materiali", ovvero delle scorte di magazzino.

Infatti, spesso gli investimenti relativi alle scorte sono molto elevati e le materie prime incidono notevolmente sul costo del prodotto finito; pertanto le aziende, per limitare l'immobilizzo di risorse non produttive, tendono a minimizzare le scorte, aumentando però i rischi di un loro esaurimento, che può influire negativamente sul livello del servizio fornito ai clienti: l'ottimizzazione della gestione delle scorte costituisce pertanto un aspetto di grande importanza.

Il problema della gestione delle scorte si articola sostanzialmente nella ricerca della risposta a due quesiti fondamentali.

1. Quanto ordinare per ciascun prodotto?
2. Quando emettere l'ordine di approvvigionamento?

Per fornire un'adeguata risposta a questi quesiti esistono molti modelli matematici che possono essere riconducibili alle seguenti categorie fondamentali:

- modelli di gestione **a fabbisogno**, nei quali un ordine per un materiale viene emesso sulla previsione del fabbisogno;
- sistemi di gestione **a scorta**, nei quali un ordine per un materiale viene emesso perché la

scorta, a seguito di prelievi per fabbisogni in periodi passati, è diventata troppo piccola rispetto a quanto pianificato.

Questi due modelli hanno effetti diversi: con il primo si riduce la giacenza delle scorte e i relativi costi associati, mentre con il secondo si cerca di evitare la mancanza del materiale (rotture di stock) per la produzione.

In questa sede verrà preso in considerazione il modello di gestione a fabbisogno, con riferimento al metodo **Material Requirement Planning (MRP)**, utilizzato nella gestione di materiali con elevato consumo annuo per i quali, a fronte dell'alta incidenza economica, occorre limitare al massimo, o addirittura annullare, il livello di scorta (per la gestione dei prodotti a fabbisogno è oggi quasi sempre utilizzata questa metodologia).

### E3.2 Il metodo MRP

L'idea base del metodo MRP consiste nel partire dalla data di consegna del prodotto per determinare le date di inizio dell'attività di produzione (sia di lavorazione che di approvvigionamento materiali). Partendo dai seguenti dati:

- distinta base (*Bill Of Materials*, BOM), cioè la lista aggiornata e dettagliata dei materiali che compongono ogni prodotto che viene offerto sul mercato;
- situazione delle giacenze di magazzino (*Inventory status*) di ogni componente;
- tempi di approvvigionamento e di produzione (*Lead Time*).

L'MRP fornisce il programma dettagliato degli ordini di rifornimento, in modo che i materiali arrivino quando sono necessari per l'utilizzo e non per reintegrare la scorta.

Tale modello richiede un continuo adeguamento dei dati, poiché occorre aggiornare costantemente nei database aziendali la disponibilità di tutti i materiali presenti in magazzino e perciò è abbastanza complesso da gestire anche con l'ausilio di sistemi informatizzati.

Poiché ogni fase produttiva è programmata in funzione di quella successiva, ne consegue che la programmazione deve necessariamente partire dalla data di consegna del prodotto finito per risalire all'approvvigionamento della materia prima: tale metodologia è detta di tipo **top-down** o **programmazione in cascata**, poiché ripercorre in senso contrario il flusso fisico dei materiali.

L'istante temporale in cui emettere l'ordine di acquisto, evitando inutili costi di giacenza a magazzino dei materiali acquistati, dipende:

- dalla data di consegna programmata del prodotto finito;
- dal tempo di acquisto di ogni materiale (tempo che intercorre tra l'istante di emissione dell'ordine e l'arrivo del materiale);
- dal tempo di produzione (somma dei tempi di fabbricazione e/o assemblaggio), dipendente dalla capacità produttiva e dalle prestazioni delle attrezzature disponibili.

In definitiva, partendo dalla data di consegna del prodotto finito e risalendo a ritroso, tramite l'MRP si determinano i tempi di inizio di ciascuna attività necessaria all'ottenimento del prodotto finale, pianificando un programma di produzione tale da garantire la consegna alla data definita: se le stime dei tempi di produzione sono esatte, ciò consente di non avere materiali sempre a magazzino, ma di ordinarli e averli pronti quando necessari per la fabbricazione, il montaggio e la spedizione.

In sintesi gli obiettivi del MRP possono essere così riassunti:

- minimizzare le scorte a magazzino e i relativi costi di immobilizzazione;
- massimizzare l'efficienza del sistema produttivo, fornendo i dati per la pianificazione dei fabbisogni di capacità dei centri di lavorazione, aumentando la produttività della manodopera diretta.
- migliorare il servizio ai clienti, aumentando il numero dei prodotti finiti nel tempo prestabilito.

Vari studi hanno dimostrato che le imprese che utilizzano l'MRP solitamente portano a termine nei tempi stabiliti il 95% delle attività, poiché il completamento di un prodotto difficilmente può essere in ritardo per la mancanza di componenti.

### E3.3 La distinta base

La distinta base è l'elenco di tutti i componenti, semilavorati e materie prime necessari per realizzare un prodotto, ovvero un prospetto di dettaglio qualitativo-quantitativo che descrive la configurazione del prodotto.

Può essere considerata come la "ricetta tecnica di un prodotto", paragonabile alla lista di ingredienti di una torta: entrambe sono costituite da una serie





Nella **figura E3.2** è infine riportato un esempio di distinta base relativo alla produzione di scarpe.

### Tipologie della distinta base

La distinta base non è un semplice elenco di componenti e materiali, ma una lista strutturata che descrive anche le sequenze operazionali necessarie per la realizzazione del prodotto.

Ogni livello definisce una delle fasi della produzione: dalla trasformazione delle materie prime in semilavorati (livello più basso) fino all'imballaggio del prodotto finito (livello più alto).

Esistono due tipologie di distinte base:

- la **distinta base tecnica**;
- la **distinta base di produzione**;

La prima (distinta base tecnica) contiene l'insieme delle informazioni definite dai progettisti, ovvero i disegni che descrivono i vari componenti costituenti il prodotto e le relative specifiche di realizzazione, come per esempio le misure, le tolleranze e le attrezzature da utilizzare; non descrive però le fasi di lavorazione e la gestione dei materiali (fondamentalmente è un elenco delle parti costituenti il prodotto).

Nella seconda (distinta base di produzione) sono

descritte le modalità di gestione delle scorte di magazzino dei componenti e materiali riportati nella distinta base tecnica, i quali, opportunamente codificati, devono essere gestiti con le operazioni di carico (in cui alla quantità di un componente esistente a magazzino si aggiunge la quantità appena acquistata) e scarico (operazione inversa alla precedente, in cui si sottrae dal magazzino il materiale che esce a fronte di un ordine di produzione).

È fondamentale che tali operazioni siano registrate nei database aziendali, altrimenti il sistema informativo aziendale non fornirebbe informazioni utili alla gestione del processo produttivo.

L'MRP, infatti, fa riferimento all'inventario delle giacenze in magazzino, che se non viene continuamente aggiornato provocherebbe errori nella gestione dei materiali.

Le informazioni sulle scorte di magazzino riguardano la disponibilità di un certo componente o materiale, l'eventuale scorta di sicurezza (che rappresenta la quantità di materiale sotto la quale non si può scendere) e eventuali allocazioni del materiale in esame ad altri prodotti di cui esso è un componente. Dallo stato delle scorte, inoltre, vengono ricavate le informazioni relative ai tempi di approvvigionamento e alla dimensione del lotto di acquisto.

## CONTENUTI

- E4.1** Introduzione
- E4.2** Definizione e classificazioni dei rifiuti
- E4.3** Attribuzione codice CER ai rifiuti speciali
- E4.4** Divieti
- E4.5** Il deposito temporaneo
- E4.6** Formulario di identificazione del rifiuto
- E4.7** Il Registro di Carico e Scarico dei rifiuti
- E4.8** Il modello unico di dichiarazione ambientale



**Rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAAE)**

# SMALTIMENTO DEI RIFIUTI DI LAVORAZIONE

## E4.1 Introduzione

L'inquinamento provocato dai rifiuti generati dai processi di produzione industriale e dagli scarti post-consumo, costituisce un grave problema ambientale in tutto il mondo.

Tuttavia, adottando una corretta gestione dello smaltimento, ovvero dei processi di raccolta, trasporto e stoccaggio di tali sostanze, è possibile diminuire le emissioni inquinanti a livelli accettabili, con costi sostenibili.

Uno smaltimento inadeguato provoca veri e propri disastri ambientali, sia a breve che a lungo termine e i costi per contenerne i danni risultano molto superiori rispetto a quelli relativi al corretto smaltimento.

Infatti, l'inquinamento è difficilmente contenibile una volta che tali sostanze sono state immesse nell'ambiente mentre, tramite azioni preventive, è possibile abbattere i livelli di inquinamento fino al 90%; il contenimento post-smaltimento, ovvero dopo che le sostanze inquinanti sono state immesse nell'ambiente, ha un'efficacia che raramente raggiunge il 30-40%, con valori nettamente inferiori in caso di sostanze liquide o gassose.

## E4.2 Definizione e classificazioni dei rifiuti

I rifiuti sono materiali di scarto di attività umane: esempi tipici sono i rifiuti solidi urbani, le acque reflue (contenenti rifiuti corporei), i rifiuti radioattivi, i rifiuti di lavorazioni industriali.

In Italia, la definizione normativa di rifiuto, fornita dall'art. 183 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 (Testo unico ambientale), modificata dal decreto legislativo del 3 dicembre 2010,

n. 205 “Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive” (GU n. 288 del 10-12-2010 – Suppl. Ordinario n. 269), è la seguente:

*Qualsiasi sostanza o oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi.*

L'atto di “disfarsi” vale sia se il bene non è più utilizzabile sia se può essere potenzialmente riutilizzato.

In base a quanto indicato all'art. 184 del D.Lgs. n. 152/06, i rifiuti possono essere distinti:

- secondo l'origine in:
  - **rifiuti urbani**;
  - **rifiuti speciali**;
- secondo le caratteristiche di pericolosità in:
  - **rifiuti pericolosi**;
  - **rifiuti non pericolosi**.

I rifiuti urbani sono:

- i rifiuti domestici, anche ingombranti, provenienti da locali e luoghi adibiti a uso di civile abitazione;
- i rifiuti provenienti dallo spazzamento delle strade;
- i rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacenti sulle strade e aree pubbliche e sulle rive dei corsi d'acqua;
- i rifiuti vegetali provenienti da aree verdi, quali giardini e parchi.

I rifiuti speciali, invece, sono:

- i rifiuti di attività agricole e agro-industriali (ai sensi e per gli effetti dell'art. 2135 c.c.);
- i rifiuti derivanti dalle attività di demolizione, costruzione e quelli che derivano dalle attività di scavo;
- i rifiuti di lavorazioni industriali;
- i rifiuti di lavorazioni artigianali;
- i rifiuti di attività commerciali;
- i rifiuti di attività di servizio;
- i rifiuti derivanti dall'attività di recupero e smaltimento (i fanghi prodotti dalla potabilizzazione e dai trattamenti derivanti dalla depurazione delle acque reflue);
- i rifiuti derivanti da attività sanitarie.

Sono considerati pericolosi i rifiuti che presentano una o più delle caratteristiche descritte nell'allegato I del del D.Lgs. n. 152/06, ovvero:

- H1 “**Esplosivi**” – Sostanze che possono esplodere per effetto delle fiamme o che sono sensibili agli urti e agli attriti più del dinitrobenzene (un nitrocomposto aromatico che a temperatura ambiente si presenta come un solido giallo chiaro dall'odore caratteristico; è un composto tossico, pericoloso per l'ambiente);
- H2 “**Comburenti**” – Sostanze che, a contatto con altre sostanze, soprattutto se infiammabili, presentano una forte reazione esotermica;
- H3-A “**Facilmente infiammabili**” – Sostanze:
  - liquide, aventi punto di infiammabilità inferiore a 21 °C, che a contatto con l'aria e senza apporto di energia, possono riscaldarsi e infiammarsi;
  - solide, che possono facilmente infiammarsi per la rapida azione di una sorgente di accensione e che continuano a bruciare o a consumarsi anche dopo l'allontanamento di quest'ultimo;
  - gassose, che si infiammano a contatto con l'aria o che, a contatto con l'acqua o l'aria umida, sprigionano gas facilmente infiammabili in quantità pericolose;
- H3-B “**Infiammabili**” – Sostanze liquide aventi punto di infiammabilità pari o superiore a 21 °C e inferiore o pari a 55 °C;
- H4 “**Irritanti**” – Sostanze non corrosive il cui contatto prolungato o ripetuto con la pelle o le mucose può provocare reazioni infiammatorie;
- H5 “**Nocivi**” – Sostanze che, per inalazione, ingestione o penetrazione cutanea, possono comportare rischi per la salute di gravità limitata;
- H6 “**Tossici**” – Sostanze che, per inalazione, ingestione o penetrazione cutanea, possono comportare grave rischi per la salute e anche la morte;
- H7 “**Cancerogeni**” – Sostanze che, per inalazione, ingestione o penetrazione cutanea, possono produrre il cancro o aumentarne l'incidenza;
- H8 “**Corrosivi**” – Sostanze che, a contatto con tessuti vivi, possono esercitare su di essi un'azione distruttiva;
- H9 “**Infettivi**” – Sostanze contenenti microrganismi vitali o loro tossine, ritenute cause di malattie nell'uomo o in altri organismi viventi;
- H10 “**Tossici per la riproduzione**” – Sostanze che, per inalazione, ingestione o penetrazione cutanea, possono produrre malformazioni congenite non ereditarie o aumentarne la frequenza;

- H11 “**Mutageni**” – Sostanze che, per inalazione, ingestione o penetrazione cutanea, possono produrre difetti genetici ereditari o aumentare l'incidenza;
- H12 “**A contatto l'acqua libera gas tossici**” – Rifiuti che, a contatto con l'acqua, l'aria o un acido, sprigionano un gas tossico;
- H13 “**Sensibilizzanti**” – Sostanze che, per inalazione o penetrazione cutanea, possono dar luogo a una reazione di ipersensibilizzazione per cui una successiva esposizione a esse produce effetti nefasti caratteristici;
- H14 “**Ecotossici**” – Rifiuti che presentano o possono presentare rischi immediati o differiti per uno o più comparti ambientali.

### E4.3 Attribuzione codice CER ai rifiuti speciali

I rifiuti speciali sono classificati secondo il **Codice Europeo dei Rifiuti (CER)** composto da sei cifre, in base al quale sono distinti in:

- categoria o attività che genera il rifiuto (prima coppia di numeri);
- processo produttivo che ne ha causato la produzione (seconda coppia di numeri);
- caratteristiche specifiche del rifiuto (ultima coppia di numeri).

L'elenco CER è articolato in 20 classi, a seconda del ciclo produttivo che ha dato origine al rifiuto. All'interno dell'elenco, alcune tipologie sono classificate come pericolose altre come non pericolose: i rifiuti pericolosi sono contrassegnati da un asterisco.

Di seguito si riporta, a titolo di esempio, il significato del codice CER 06 03 13\*.

- La coppia 06 indica la categoria del rifiuto: **rifiuti di processi chimici inorganici**.
- La coppia 03 indica il processo produttivo che ha generato il rifiuto: **rifiuti di produzione**.
- La coppia 13 indica le caratteristiche del rifiuto: **sali e loro soluzioni contenenti metalli pesanti**.

L'asterisco indica che i rifiuti sono **pericolosi**.

L'elenco europeo dei rifiuti è riportato nell'allegato D alla parte quarta del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.

La corretta classificazione dei rifiuti è a carico di chi li produce.

### E4.4 Divieti (art. 187 e art. 192 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)

È severamente vietato miscelare rifiuti pericolosi aventi differenti caratteristiche di pericolosità e rifiuti pericolosi con rifiuti non pericolosi.

La violazione del divieto di miscelazione (per i rifiuti pericolosi) prevede l'arresto da sei mesi a due anni con un'ammenda da 2600 € a 26 000 €. È vietato anche l'abbandono e il deposito incontrollato di rifiuti pericolosi sul suolo, nonché l'immissione di rifiuti di qualsiasi genere, allo stato solido o liquido, nelle acque superficiali e sotterranee.

La violazione del divieto di deposito è punita con una sanzione amministrativa da 105 € a 620 €.

Se l'abbandono sul suolo riguarda rifiuti non pericolosi e non ingombranti si applica la sanzione amministrativa da 25 € a 155 €.

### E4.5 Il deposito temporaneo (art. 183, comma 1, lettera BB, del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)

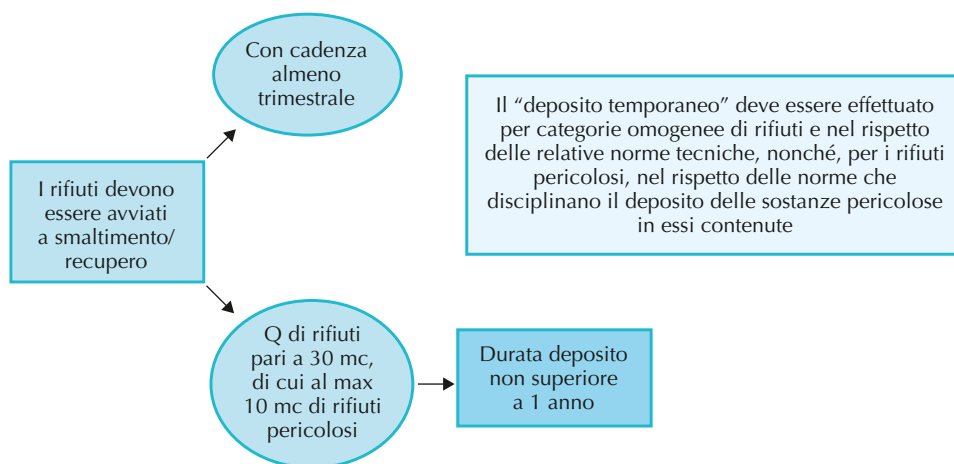
Per “deposito temporaneo” si intende il raggruppamento dei rifiuti effettuato nel luogo in cui essi sono prodotti.

I rifiuti, sia pericolosi che non, devono essere raccolti e avviati alle operazioni di recupero o di smaltimento secondo una delle seguenti modalità [fig. E4.1]:

- con cadenza almeno trimestrale indipendentemente dalle quantità in deposito;
- quando il quantitativo in deposito raggiunge complessivamente i 30 m<sup>3</sup>, di cui al massimo 10 m<sup>3</sup> di tipo pericoloso.

Il deposito temporaneo, che non può avere durata superiore a un anno, deve essere effettuato per categorie omogenee di rifiuti e nel rispetto delle relative norme tecniche, mentre nel caso di rifiuti pericolosi, nel rispetto delle norme che disciplinano il deposito delle sostanze pericolose in essi contenute.

\* Pericoloso.



**Figura E4.1** Regole per il deposito temporaneo.

Inoltre, devono essere rispettate anche le norme che disciplinano l’imballaggio e l’etichettatura dei rifiuti pericolosi.

Per quanto riguarda i luoghi di deposito temporaneo, le precauzioni generali da mettere in atto in presenza di rifiuti pericolosi sono le seguenti:

- i recipienti, fissi e mobili, comprese le vasche e i bacini, devono possedere adeguati requisiti di resistenza in relazione alle proprietà chimico-fisiche e alle caratteristiche di pericolosità dei rifiuti contenuti;
- i rifiuti incompatibili (suscettibili cioè di reagire pericolosamente tra di loro, dando luogo alla formazione di prodotti esplosivi, infiammabili e tossici, o allo sviluppo di notevoli quantità di calore), devono essere stoccati in modo che non possano venire a contatto tra di loro;
- i contenitori/serbatoi di rifiuti allo stato liquido devono essere raccolti all’interno di opportune vasche o “bacini di contenimento”, i quali devono essere realizzati con materiale idoneo, tale da assicurare un’adeguata tenuta in caso di sversamento accidentale dei reflui, impedendo così la contaminazione del suolo;
- nei luoghi di deposito esterni è buona norma proteggere i depositi con idonee tettoie per evitare l’irraggiamento diretto dei contenitori (con conseguenti pericoli di surriscaldamento e formazione di prodotti gassosi) e l’accumulo di acqua piovana nei bacini di contenimento; in ogni caso, occorre verificare periodicamente (soprattutto dopo piogge intense) lo stato dei bacini di contenimento;
- i serbatoi contenenti rifiuti liquidi devono essere provvisti di opportuni dispositivi antitraboccamento;

- qualora il deposito sia ubicato in un locale chiuso, è necessario garantire un’aerazione adeguata;
- i recipienti mobili devono essere provvisti di:
  - idonee chiusure per impedire la fuoriuscita del contenuto;
  - dispositivi accessori necessari per effettuare in condizioni di sicurezza le operazioni di riempimento e svuotamento;
  - mezzi di presa per rendere sicure e agevoli le operazioni di movimentazione.

È molto importante che in corrispondenza del deposito temporaneo sia installata un’idonea **segnaletica di sicurezza** per identificare la tipologia di materiale in stoccaggio, i principali rischi, nonché i divieti e le prescrizioni da osservare.

I recipienti (sia fissi che mobili), devono essere opportunamente contrassegnati con etichette o targhe ben visibili apposte su di essi, che evidenziano la natura e la pericolosità dei rifiuti, realizzate in conformità a quanto previsto dalla normativa in materia di segnaletica di sicurezza (Titolo V del D.Lgs. n. 81/08).

Si ricorda, nello specifico, che per contenitori di sostanze pericolose la normativa (All. XXVI al D.Lgs. n. 81/08) prevede che:

- i recipienti utilizzati per il magazzinaggio di sostanze pericolose devono essere muniti della seguente etichettatura:



oppure



- il deposito di un certo quantitativo di sostanze o preparati pericolosi deve essere indicato con il cartello di avvertimento “pericolo generico”, per esempio:



#### E4.6 Formulario di identificazione del rifiuto (art. 188 e art. 193 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i. e del D.M. 145 del 01/04/1998)

Gli oneri relativi alle attività di smaltimento sono a carico dell'azienda che li genera, la quale consegna i rifiuti a un'azienda autorizzata che ne effettua le operazioni di smaltimento.

Secondo quanto disposto dall'art. 193 del D.Lgs. n. 152/06, durante il trasporto i rifiuti devono essere accompagnati da un formulario di identificazione nel quale sono riportati i seguenti dati:

- nome e indirizzo del produttore dei rifiuti;
- origine, tipologia e quantità del rifiuto;
- impianto di destinazione;
- data e percorso dell'instradamento;
- nome e indirizzo del destinatario.

Il formulario di identificazione per il trasporto dei rifiuti, vidimato dall'Ufficio del Registro o dalle Camere di Commercio, deve essere redatto in quat-

tro esemplari, compilato, datato e firmato dal produttore dei rifiuti e controfirmato dal trasportatore. Una copia del formulario deve rimanere presso il produttore dei rifiuti e le altre tre, controfirmate e datate all'arrivo dal destinatario, sono acquisite una da quest'ultimo e due dal trasportatore, che provvede a trasmetterne una al produttore; quest'ultima copia deve pervenire al produttore entro tre mesi dal conferimento del rifiuto. Le copie del formulario devono essere conservate per cinque anni (all'interno del Registro di Carico e Scarico dei rifiuti). Chiunque effettua il trasporto di rifiuti senza il formulario o in esso indica dati incompleti o inesatti è punito con una sanzione amministrativa da 1600,00 € a 9300,00 €; se si tratta di rifiuti pericolosi si applica anche l'art. 483 del Codice Penale “falsità ideologica commessa dal privato in atto pubblico”.

#### E4.7 Il Registro di Carico e Scarico dei rifiuti (art. 190 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)

Per tutte le aziende produttrici di rifiuti speciali pericolosi è obbligatorio tenere il **Registro di Carico e Scarico**, nel quale devono essere annotate tutte le movimentazioni effettuate.

Per le aziende che producono solo rifiuti speciali non pericolosi non sussiste tale obbligo, anche se la tenuta del Registro è consigliata poiché costituisce un utile strumento di controllo degli

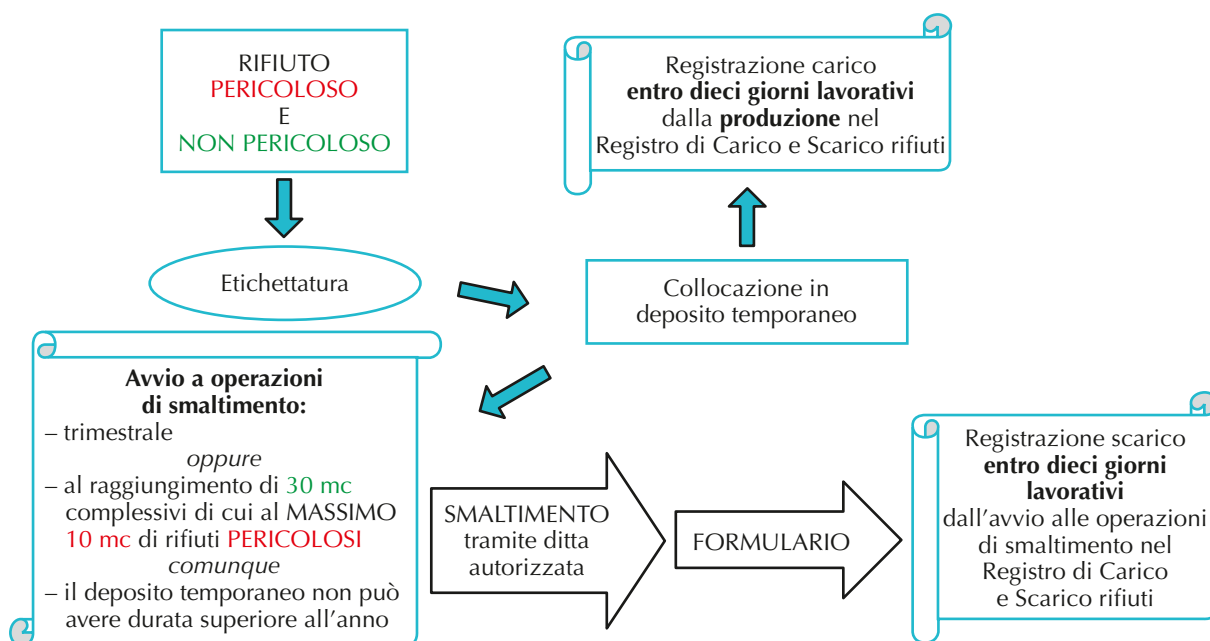


Figura E4.2 Principali operazioni da seguire per i rifiuti pericolosi e per i rifiuti non pericolosi.

smaltimenti effettuati e di verifica del rispetto dei limiti del Deposito Temporaneo. Nella **figura E4.2** sono riepilogate le principali operazioni da seguire per i rifiuti pericolosi e non pericolosi.

Sul Registro di Carico e Scarico devono essere riportate le informazioni sulla tipologia, sulle caratteristiche e sulle quantità dei rifiuti prodotti: tali informazioni verranno poi utilizzate per la compilazione della Comunicazione Annuale al Catasto Nazionale dei Rifiuti (paragrafo seguente). L'annotazione sul Registro delle operazioni di carico e scarico deve essere effettuata secondo precise scadenze temporali:

- il carico entro dieci giorni lavorativi dalla produzione del rifiuto;
- lo scarico entro dieci giorni lavorativi dal conferimento del rifiuto alla ditta autorizzata.

I registri devono essere tenuti e conservati presso ogni insediamento produttivo, unitamente ai formulari di identificazione dei rifiuti per 5 anni dalla data dell'ultima registrazione.

## **E4.8 Il modello unico di dichiarazione ambientale (art. 189 del D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i.)**

Il D.Lgs. n. 152/06 e s.m.i. prevede che entro il 30 aprile di ogni anno le Imprese e gli Enti che producono rifiuti pericolosi, debbano comunicare alle Camere di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura territorialmente competenti, le quantità e le caratteristiche qualitative dei rifiuti speciali prodotti.

Tale comunicazione deve essere effettuata mediante il **Modello Unico di Dichiarazione Ambientale (MUD)**.

Chi non effettua la comunicazione, o la effettua in modo incompleto o inesatto, è punibile con una sanzione amministrativa che va da 2600 € a 15 500 € (se la comunicazione è effettuata entro il sessantesimo giorno dalla scadenza del termine stabilito, si applica la sanzione ridotta da 26 € a 160 €).

.....  
[E1] Definisci il ciclo di vita di un prodotto.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E2] Quali sono le quattro fasi principali della LCA?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E3] L'unità funzionale rappresenta la quantità di prodotto che viene usata come riferimento per i calcoli dei flussi (in uscita e in entrata) di materiale e energia nel sistema.

VERO       FALSO

.....  
[E4] Qual è lo scopo della fase di inventario della LCA?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E5] La valutazione degli impatti ambientali consiste nella ..... degli effetti sull'ambiente causati dal .....

.....  
[E6] Definisci il sistema produttivo.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....



.....  
[E7] Per fabbricazione di un prodotto si intende l'insieme delle ..... che .....  
..... almeno una caratteristica del ..... in ingresso.

.....  
[E8] Che cosa sono i sistemi a flusso?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E9] Che cosa si intende per sistemi a prodotto singolo?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E10] Le aziende con prodotti su commessa sono denominate:

- a) MTO;
- b) ETO;
- c) ATO;
- d) MTS.

.....  
[E11] Nella gestione delle scorte a fabbisogno, un ordine per un determinato materiale viene rilasciato perché .....

.....

.....  
[E12] Che cos'è la distinta base?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

[E13] Descrivi brevemente il modello MRP.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

[E14] La distinta base è organizzata ..... e pertanto si rappresenta con un .....  
..... avente forma simile a un .....

.....

[E15] Per convenzione la cima dell'albero che rappresenta la distinta base, ovvero il prodotto finito, si trova a livello zero.

VERO       FALSO

[E16] Descrivi brevemente la distinta base tecnica.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

[E17] Quali sono le fasi del ciclo di vita di un impianto elettrico?

.....

.....

.....

[E18] Definisci il ruolo del Direttore dei Lavori.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....  
[E19] Qual è la funzione del coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione.

.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E20] Definisci il concetto di rifiuto.

.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E21] In base a quanto indicato all'art. 184 del D.Lgs. n. 152/06, i rifiuti possono essere distinti in:

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E22] Che cos'è il CER?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E23] Qual è la funzione del Registro di Carico e Scarico?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[E24] Che cos'è il MUD?

.....  
.....  
.....



# MODULO F

## Affidabilità e sicurezza

### Unità F1: Affidabilità di un sistema

- F1.1 Introduzione
- F1.2 Obiettivi dell'affidabilità
- F1.3 L'affidabilità come strumento di progettazione
- F1.4 Definizione quantitativa dell'affidabilità
- F1.5 Tipologie di affidabilità
- F1.6 I guasti
- F1.7 Parametri di affidabilità
- F1.8 Affidabilità durante il periodo di vita utile
- F1.9 Sistemi composti
- F1.10 Ridondanza

### Unità F2: Sicurezza sul luogo di lavoro

- F2.1 Il Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro
- F2.2 Il datore di lavoro
- F2.3 Il dirigente
- F2.4 Il preposto
- F2.5 I lavoratori
- F2.6 Il medico competente

- F2.7 Il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza
- F2.8 Il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione
- F2.9 Le squadre di emergenza
- F2.10 La formazione dei lavoratori

### Obiettivi

- Saper classificare le varie tipologie di guasto
- Saper valutare i parametri di affidabilità
- Conoscere le figure aziendali interessate alla sicurezza sul lavoro
- Conoscere le funzioni delle squadre di emergenza aziendali
- Conoscere il ruolo del lavoratore nel sistema di sicurezza aziendale

## CONTENUTI

- F1.1 Introduzione
- F1.2 Obiettivi dell'affidabilità
- F1.3 L'affidabilità come strumento di progettazione
- F1.4 Definizione quantitativa dell'affidabilità
- F1.5 Tipologie di affidabilità
- F1.6 I guasti
- F1.7 Parametri di affidabilità
- F1.8 Affidabilità durante il periodo di vita utile
- F1.9 Sistemi composti
- F1.10 Ridondanza



### Manutenzione dei sistemi

# AFFIDABILITÀ DI UN SISTEMA

## F1.1 Introduzione

L'affidabilità esprime la capacità di un sistema di rispettare le specifiche di funzionamento nel tempo. È una grandezza che comprende tutti gli elementi necessari per individuare i deterioramenti dei componenti del sistema, le strategie da attuare per prevenirne i guasti e gli interventi per ripristinarne rapidamente la funzionalità in caso di malfunzionamenti.

Non è una grandezza deterministica, ma una variabile aleatoria il cui valore può essere previsto solo attraverso considerazioni di tipo probabilistico: essa pertanto non fornisce la certezza sull'insorgere o meno di un guasto, ma esprime la probabilità che questo si verifichi, consentendo di definire le modalità di funzionamento più idonee per minimizzare tale probabilità e gli interventi correttivi per ripristinare nel più breve tempo possibile il normale funzionamento del sistema.

La sua origine risale al periodo tra la prima e la seconda guerra mondiale con la comparsa dei primi aerei, per i quali un malfunzionamento poteva pregiudicare la missione e la sicurezza del volo.

Il concetto di affidabilità non era ancora stato definito in modo rigoroso e gli studi inizialmente avevano carattere prettamente sperimentale.

A partire dal 1943, sia i tedeschi sia gli americani cercarono di dare una soluzione ingegneristica ai problemi affidabilistici: i missili tedeschi V1 e V2 furono i primi sistemi sui quali venne applicato con successo il concetto di affidabilità.

La diffusione della disciplina dall'ambito militare a quello civile si ebbe intorno agli anni Sessanta con l'aumentare della complessità dei sistemi dei vari settori industriali.

Alla fine degli anni Ottanta gli studi affidabilistici entrarono a far parte del **TQM** (*Total Quality*

*Management*) e i metodi di valutazione dell'affidabilità iniziarono a essere richiesti per ottenere la certificazione di qualità ISO-9000.

Oggi l'importanza dell'affidabilità è tale che in ambito industriale è stata creata una disciplina nota come **ingegneria dell'affidabilità**.

I motivi che spingono l'industria a impiegare sempre più le tecniche affidabilistiche nella produzione dei loro prodotti sono molteplici, i più importanti dei quali sono:

- l'aumentata complessità dei prodotti che incrementa le loro probabilità di guasto;
- la difficoltà di manutenzione per le parti meno accessibili di una macchina o di un impianto;
- l'esigenza di aumentare la durata di corretto funzionamento di un prodotto;
- la necessità di ridurre i pesi senza penalizzare la sicurezza di funzionamento.

## F1.2 Obiettivi dell'affidabilità

Nel corso degli anni il campo di studio dell'affidabilità si è progressivamente ampliato, diventando una disciplina di estrema importanza nella progettazione e ingegnerizzazione dei prodotti e servizi.

L'affidabilità, infatti, coinvolge quasi tutti gli aspetti legati alla produzione di un prodotto, cioè:

- **soddisfazione del cliente:** nel caso un prodotto non soddisfi le aspettative di affidabilità del cliente, può provocare disaffezione rispetto agli altri prodotti con conseguenti effetti negativi sull'immagine dell'azienda produttrice;
- **gestione delle risorse:** un prodotto avente un tasso di guasto elevato, oltre ad aver una influenza negativa sull'immagine, comporta anche costi aggiuntivi per la manutenzione la quale, nel periodo di garanzia, è a carico del produttore;
- **sicurezza:** l'analisi di affidabilità risulta particolarmente importante in quelle tipologie impiantistiche soggette a rischi di incidenti rilevanti, che possono coinvolgere anche aree adiacenti agli stabilimenti produttivi. Con uno studio affidabilistico si può valutare la probabilità che il guasto di un componente o di un sistema di sicurezza possa determinare una sequenza incidentale con conseguenze sulla incolumità delle persone;
- **qualità:** un prodotto di qualità deve avere le seguenti caratteristiche:
  - la durata (tempo di utilizzo);

- l'affidabilità (frequenza di guasto);
- la manutenibilità (facilità dell'intervento di riparazione).

## Costi di gestione

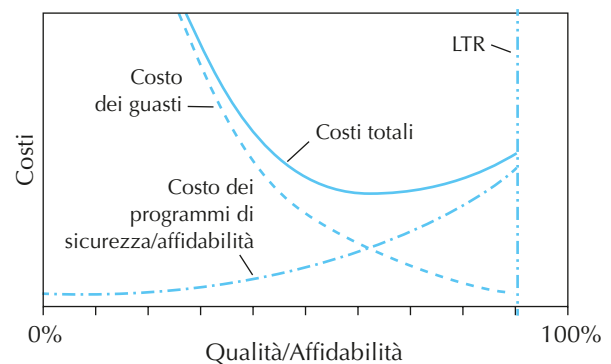
In un impianto industriale i costi di gestione comprendono:

- i costi di investimento, per esempio l'acquisto di nuove apparecchiature di sicurezza, da ammortizzare in un certo periodo di tempo;
- i costi di manutenzione degli impianti e delle apparecchiature di sicurezza;
- i costi operativi, come per esempio quelli per l'addestramento del personale.

Tali costi vengono valutati in funzione dell'affidabilità che si vuole raggiungere nel sistema, come per esempio:

- un prodotto con affidabilità molto elevata, comporta costi di progettazione, di produzione e quindi di acquisto elevati, ma minori costi di manutenzione (parti di ricambio e manodopera);
- un prodotto di affidabilità inferiore e quindi con costi di acquisto più bassi, necessita di un programma di manutenzione che ha costi più elevati.

Il costo totale minimo si ottiene quando i costi di acquisto e quelli di manutenzione si incrociano, come mostrato nella **figura F1.1**.



**Figura F1.1**

Nella **figura F1.1** è tracciata una retta verticale che rappresenta il **Limite Tecnicamente Raggiungibile** (LTR), ovvero il livello di qualità/affidabilità che non è opportuno superare; al riguardo è importante sottolineare che è impossibile raggiungere una sicurezza totale e quindi non con-

viene adottare sistemi di sicurezza molto spinti che sarebbero controproducenti a causa della loro complessità progettuale, funzionale e quindi di costo.

### F1.3 L'affidabilità come strumento di progettazione

Lo studio dell'affidabilità di un sistema fornisce risultati utili soprattutto se effettuato sin dalle fasi progettuali.

In fase di progettazione, infatti, è possibile individuare i punti deboli e i componenti critici del sistema, cioè quelli che ne influenzano maggiormente il funzionamento, consentendo così di configurarlo in modo che la sua affidabilità complessiva dipenda il meno possibile da essi.

In fase di esercizio è invece necessario definire una strategia di manutenzione che ottimizzi due aspetti molto importanti: riduzione dei tempi di fuori servizio del sistema, che comportano una diminuzione dei volumi di produzione, e costi di manutenzione.

Lo studio dell'affidabilità rappresenta pertanto un punto cruciale nella progettazione di un sistema, i cui risultati, sia pure in termini probabilistici, consentono non solo di soddisfare eventuali adempimenti richiesti dalle normative vigenti, ma anche di contenere i costi manutentivi e ottenere prodotti di qualità che risultino competitivi in mercati sempre più esigenti.

### F1.4 Definizione quantitativa dell'affidabilità

Si definisce affidabilità  $R(T)$  di un sistema, la probabilità di funzionamento senza guasti per un certo tempo  $T$  e in determinate condizioni ambientali.

Tale definizione presuppone che:

- siano definite le prestazioni richieste al sistema ("missione del sistema");
- sia definito l'intervallo di tempo  $0-T$  durante il quale il sistema deve funzionare correttamente;
- siano stabilite le condizioni ambientali e d'impiego che devono mantenersi costanti lungo il periodo di tempo  $0-T$ .

L'affidabilità di un sistema può variare anche notevolmente in funzione delle prestazioni che deve fornire: un sistema a cui sono richieste prestazioni

molto spinte, essendo notevolmente sollecitato, è caratterizzato da un valore dell'affidabilità minore rispetto allo stesso sistema al quale si richiedono prestazioni di livello inferiore.

Anche le condizioni di funzionamento influenzano l'affidabilità del sistema: per esempio, un isolante progettato per operare a 12 KV, per un certo periodo di tempo e con determinate condizioni ambientali di temperatura e umidità, avrà una durata inferiore se sottoposto a una tensione di 20 KV.

Per quanto riguarda invece il fattore tempo, l'invecchiamento riduce la probabilità di corretto funzionamento, poiché aumenta l'usura e quindi la probabilità di guasti.

L'affidabilità dipende pertanto di tre variabili:

$$R = f(C, A, T) \quad (1.1)$$

dove con  $C$  sono indicate le prestazioni richieste, con  $A$  le condizioni ambientali d'impiego, che devono rimanere costanti, e con  $T$  il tempo di funzionamento.

Considerando quindi  $C$  e  $A$  costanti, la 1.1 fornisce l'affidabilità in funzione del tempo di funzionamento e diventa:

$$R(t) = f(T) \quad (1.2)$$

È importante sottolineare che  $R(t)$  non è una funzione dell'istante  $T$ , ma dell'intero intervallo  $(0, T)$ : in altri termini, non esprime la probabilità che il componente non si guasti nell'istante  $T$ , ma la probabilità che funzioni in tutto l'intervallo  $0, T$ , cioè che si guasti dopo  $T$ .

È da osservare che  $R(t)$  ha valore unitario per un tempo  $t = 0$  (il prodotto esce dalla fabbrica perfettamente funzionante), decresce all'aumentare del tempo, tendendo a zero per  $t$  che tende all'infinito (traduzione matematica della legge naturale: "tutto ciò che inizia ha una fine"), come rappresentato qualitativamente nella curva [fig. F1.2].

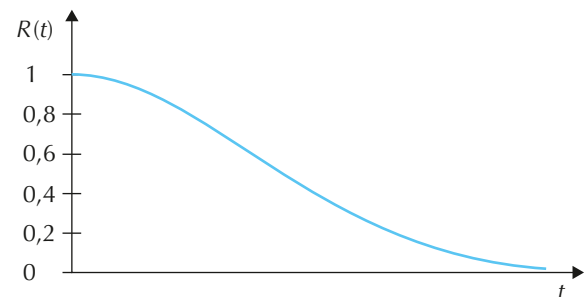


Figura F1.2 Andamento dell'affidabilità in funzione del tempo.



Specularmente, si può definire l'**inaffidabilità**  $F$ , come la probabilità di guasto prima del tempo  $T$ , espressa dal complemento a uno di  $R$ , cioè:

$$F = 1 - R \quad (1.3)$$

## F1.5 Tipologie di affidabilità

Non tutti i guasti hanno la stessa importanza: i malfunzionamenti di alcuni componenti, infatti, non comportano un'apprezzabile riduzione delle reali funzionalità del sistema, né creano dei rischi per la sicurezza; altri, invece, ne possono interrompere totalmente il funzionamento (componenti critici).

In base al tipo di guasto si possono allora definire le seguenti tipologie di affidabilità.

- **Affidabilità logistica.** Probabilità che non si verifichi alcun guasto.
- **Affidabilità di missione.** Probabilità che non intervengano guasti tali da pregiudicare la funzionalità del sistema e quindi di impedirgli il completamento della sua missione.
- **Affidabilità di sicurezza.** Probabilità che non si verifichino guasti con possibilità di conseguenze catastrofiche, tali cioè da produrre danni a persone, cose e al sistema stesso.

Per ciascuno delle tre tipologie si può definire, in fase di progettazione, il livello di affidabilità da raggiungere, come per esempio:

- Affidabilità logistica – Probabilità  $\sim 10^{-3}$ ;
- Affidabilità di missione – Probabilità  $< 10^{-5}$ ;
- Affidabilità di sicurezza – Probabilità  $< 10^{-9}$ .

## F1.6 I guasti

Qualsiasi sistema durante il suo normale funzionamento è sottoposto a diversi sollecitazioni che con il tempo possono portare alla perdita della sua capacità di funzionare correttamente, provocandone quello che in gergo tecnico è definito **guasto**.

Il guasto è un evento che provoca il passaggio del sistema da uno stato di corretto funzionamento a uno stato di funzionalità parziale o nulla, perdendo così la capacità di eseguire le funzioni per cui è stato progettato (definizione ISO 10147/UNI 9910).

Al riguardo si possono definire le tipologie di guasti di seguito indicate.

- **Guasti parziali.** Determinano una variazione delle prestazioni del sistema tali da non comprometterne del tutto il funzionamento (degrado delle prestazioni o perdita di qualità del prodotto).
- **Guasti totali.** Determinano una variazione delle prestazioni del dispositivo tale da impedirne il funzionamento.
- **Guasti intermittenti.** Successione casuale di periodi di guasto e di periodi di funzionamento.

La precedente classificazione tiene conto delle variazioni di prestazione che i guasti provocano sul sistema.

Tuttavia, esistono anche altre classificazioni in base alle quali i guasti possono essere classificati:

- rispetto alle cause che li generano:
  - **guasti dovuti a un impiego improprio del sistema;**
  - **guasti dovuti a deficienza intrinseca** (qualità scadente dei materiali utilizzati, problemi di progettazione);
- rispetto all'impatto che hanno sul sistema:
  - **guasti critici**, cioè che possono rappresentare un rischio per l'incolumità delle persone;
  - **guasti di primaria importanza**, cioè guasti che riducono o impediscono la funzionalità dell'intero sistema;
  - **guasti di secondaria importanza**, cioè che non riducono la funzionalità dell'intero sistema.

## Cause di guasto

Diverse sono le cause che generano i guasti, le più importanti delle quali sono:

- **sollecitazioni, urto e fatica:** dipendono dalla distribuzione temporale e spaziale delle condizioni di carico del sistema; in questo caso assumono un ruolo importante le caratteristiche strutturali, le quali devono essere valutate nella forma più ampia possibile, considerando anche possibili errori progettuali, realizzativi, e difetti del materiale;
- **temperatura:** è una variabile che influisce prevalentemente in funzione delle caratteristiche specifiche del materiale (inerzia termica), e della distribuzione spaziale e temporale delle sorgenti di calore;
- **usura:** è uno stato di degradazione fisica del componente che si manifesta in seguito a fe-

nomeni di invecchiamento causato, per esempio, da attrito fra materiali ed esposizione ad agenti dannosi;

- **corrosione:** è un fenomeno strettamente legato alle caratteristiche dell'ambiente in cui si trova a operare il sistema; queste condizioni possono comportare processi di degradazione fisica e chimica del materiale capaci di ridurre il livello prestazionale del sistema fino a renderlo non idoneo allo svolgimento della funzione preposta.

### Tasso di guasto

Supponiamo di mettere in prova, a partire dal tempo  $t = 0$  e per un tempo  $t = T$ ,  $N$  sistemi dello stesso tipo e ipotizziamo di trovare, al termine della prova, che  $N_g$  sistemi abbiano avuto guasti. A partire da questa osservazione empirica è possibile definire il **tasso di guasto** (o **rateo di guasto**)  $\lambda(T)$  di un sistema al tempo  $T$  come:

$$\lambda(T) = \frac{N_g(T)}{T} \quad (1.4)$$

Il tasso di guasto è quindi il numero di guasti nell'unità di tempo e perciò rappresenta una misura della velocità con la quale si verifica un guasto (velocità di guasto).

La conoscenza del tasso di guasto è molto importante in quanto consente di definire alcune funzioni affidabilistiche che vedremo in seguito.

### Guasti in funzione del tempo

Una ulteriore classificazione dei guasti, di fondamentale importanza, è effettuata in base alla loro distribuzione durante la vita del sistema; in tal senso si distinguono:

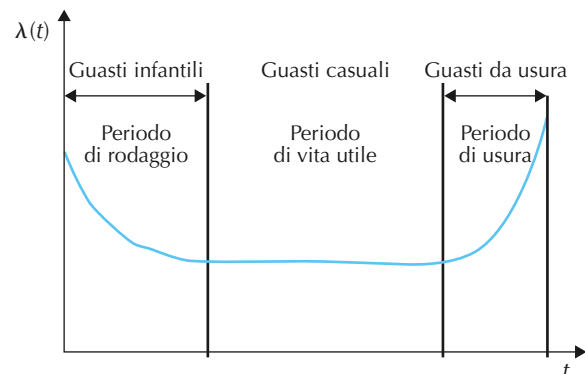
- **guasti infantili:** avvengono nel primo periodo di vita del sistema (periodo di rodaggio), dovuti essenzialmente a difetti intrinseci dei componenti che lo costituiscono non emersi durante i collaudi. Tale periodo può variare da poche decine ad alcune centinaia di ore di funzionamento. In termini di affidabilità un sistema soggetto a guasti infantili migliora il proprio stato con il tempo per effetto delle sostituzioni dei componenti difettosi: il tasso di guasto è perciò decrescente;
- **guasti casuali (o accidentali):** avvengono durante l'intera vita dei componenti (vita utile), la cui probabilità è indipendente dal tempo e quindi dal periodo di esercizio accumulato (tasso di guasto costante); sono dovuti a fattori incon-

trollabili che neanche una buona progettazione e una buona manutenzione possono eliminare; si verificano a intervalli casuali e quindi non sono prevedibili. Generalmente si presentano in condizioni di esercizio non nominali che determinano forti sollecitazioni sui componenti che ne compromettono le capacità operative;

- **guasti per usura:** si verificano nell'ultimo periodo della vita utile del sistema e sono dovuti a fenomeni di invecchiamento e deterioramento strutturale e materiale che tendono a mettere progressivamente fuori uso i vari componenti del sistema: per tale ragione il tasso di guasto aumenta con il tempo. L'inizio del periodo di usura è individuato da una rapida crescita della frequenza dei guasti. Per evitare questa tipologia di guasto si ricorre a un ricambio preventivo dei componenti, la quale però comporta il ritorno dei guasti di tipo infantile. È importante sottolineare che il degrado può essere naturale, se è in stretta relazione con la durata di vita del sistema, o forzato (o indotto), se provocato dalla negligenza dell'uomo, per esempio per mancata manutenzione: in tal caso la vita del sistema si riduce notevolmente rispetto a quella che potrebbe avere se il degrado fosse naturale.

Dalla precedente classificazione appare chiaro che le fasi di vita di un sistema sono determinate dall'andamento del tasso di guasto in funzione del tempo.

Al riguardo, considerando un sistema nuovo, appena uscito dall'azienda produttrice, a parità di condizioni ambientali e di funzionamento e a partire dal tempo  $t = 0$ , è possibile tracciare il diagramma mostrato in **figura F1.3**, in cui è riportato l'andamento del tasso di guasto in funzione dell'età del sistema.



**Figura F1.3** Andamento del tasso di guasto del sistema in funzione dell'età.

Data la forma particolare, il diagramma viene detto a “**vasca da bagno**” e consente di visualizzare in modo chiaro la precedente classificazione dei guasti infantili, casuali e per usura.

È importante osservare che la zona ottimale di lavoro è quella centrale, in cui possono manifestarsi solo guasti casuali; in questa zona pertanto si ha il minimo del rischio di guasto.

## F1.7 Parametri di affidabilità

Per quantificare l'affidabilità di un sistema, oltre al tasso di guasto, sono stati introdotti altri parametri, detti **parametri di affidabilità**.

Il primo, riferito a un sistema non riparabile per il quale il primo guasto è anche l'ultimo, è detto **MTTF** (*Mean Time To Failure*) ed esprime il tempo medio dopo il quale si può verificare un guasto: in tal caso il sistema deve essere sostituito: l'MTTF rappresenta pertanto la vita media del sistema.

Nel caso di sistemi riparabili (sostituibili), per i quali il guasto è eliminabile con un'operazione di manutenzione correttiva, sono stati introdotti i parametri **MTTR** (*Mean Time To Repair*, Tempo medio di riparazione) e **MTBF** (*Mean Time Between Failures*, Tempo medio tra guasti).

L'MTBF è il tempo medio tra l'inizio di un guasto e l'inizio del successivo (normalmente espresso in giorni) ed è la somma di due tempi: l'MTTF, cioè è il tempo medio dalla fine di un guasto all'inizio del successivo (il tempo di buon funzionamento) e l'MTTR, cioè il tempo medio di riparazione del guasto.

L'MTTR comprende il tempo di attesa per l'intervento e il tempo di riparazione; in sostanza esprime la “manutenibilità” del sistema: quanto più è organizzata la manutenzione tanto più piccolo sarà il valore dell'MTTR, normalmente espresso in ore.

## F1.8 Affidabilità durante il periodo di vita utile

L'intervallo di vita più importante ai fini dell'affidabilità è il periodo di vita utile, corrispondente alla zona centrale del diagramma a vasca da bagno. Dall'analisi di tale diagramma [fig. F1.3] si può osservare che durante il periodo di vita utile il tasso di guasto  $\lambda(t)$  assume un valore costante ( $\lambda$ ); in tal caso l'affidabilità può essere espressa con una legge esponenziale decrescente del tipo

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

Si può dimostrare che in questo caso il tempo medio di guasto MTBF assume un valore coincidente con l'inverso del tasso di guasto; cioè:

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.6)$$

La costanza di  $\lambda$  implica un valore medio dell'intervallo di tempo tra due guasti (MTBF) anch'esso costante, per cui è possibile definire con una certa precisione l'intervallo temporale tra un guasto e il successivo.

## F1.9 Sistemi composti

Un sistema composto è formato da più componenti interconnessi tra loro.

Per un sistema del genere, soprattutto se costituito da un elevato numero di componenti, il calcolo dell'affidabilità può risultare molto laborioso e complesso; tuttavia il calcolo si semplifica notevolmente considerando il sistema costituito da un certo numero di componenti fondamentali (sottosistemi), per i quali è più semplice determinarne l'affidabilità.

Considerato allora un sistema costituito da  $n$  componenti, l'affidabilità può essere calcolata in funzione delle affidabilità di questi ultimi.

Occorre pertanto conoscere:

- la struttura del sistema, in particolare l'interconnessione dei singoli componenti;
- l'affidabilità di ogni componente.

È importante sottolineare che per “componente” si intende una qualsiasi parte del sistema di cui si conosca l'affidabilità, che può essere ricavata da estrapolazioni statistiche dei dati di campo, da prove di laboratorio effettuate su di un lotto di componenti identici, o fornita direttamente dal costruttore insieme alle specifiche di funzionamento.

Al riguardo occorre precisare che due o più componenti sono definiti **statisticamente indipendenti** se i rispettivi eventi di funzionamento sono reciprocamente indipendenti, cioè se la probabilità di buon funzionamento, per esempio del componente  $C_1$ , non dipende dal buon funzionamento del componente  $C_2$ ; in altri termini, un malfunzionamento di  $C_2$  non deve avere alcuna influenza su  $C_1$  e viceversa.

Con tale ipotesi, l'affidabilità  $R$  del sistema può

essere espressa in funzione delle affidabilità  $r_j$  dei singoli componenti tramite la relazione:

$$R = \phi(r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (1.7)$$

dove la funzione  $\phi$ , detta **funzione di affidabilità strutturale**, gode delle seguenti proprietà:

- un guasto su tutti i componenti implica il guasto del sistema;
- la funzionalità di tutti i componenti implica la funzionalità del sistema;
- l'aumento dell'affidabilità di un componente implica l'aumento dell'affidabilità del sistema.

Anche se tali proprietà possono apparire ovvie, esistono alcuni sistemi particolari (non considerati in questa sede) che non le rispettano: i sistemi per i quali tali proprietà sono valide sono detti **coerenti**.

La funzione  $\Phi$  ha un ruolo molto importante poiché consente di determinare a priori l'affidabilità del sistema, e quindi di valutare tempestivamente eventuali modifiche in sede di progetto nel caso l'affidabilità risulti insufficiente.

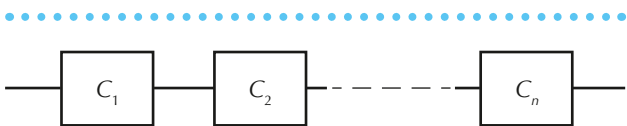
Inoltre, determinare l'affidabilità del sistema in funzione di quelle dei singoli componenti, evita di effettuare prove sul sistema stesso, che possono richiedere tempi lunghi e costi di una certa entità; in alcuni casi tali prove possono essere addirittura rischiose (si pensi, per esempio, alla valutazione di affidabilità di una centrale nucleare).

### Sistemi in serie

È un sistema costituito da  $n$  elementi connessi in modo che il guasto (considerato come evento indipendente) di uno qualsiasi di essi determina lo stato di guasto dell'intero sistema; in altre parole, un sistema serie funziona solo se funzionano tutti i suoi componenti.

Per esempio, il sistema di produzione dell'energia elettrica costituito da una turbina e un alternatore, funziona solo se operano correttamente entrambi i componenti.

La rappresentazione grafica di un sistema serie è mostrata in **figura F1.4**: il collegamento ingresso-uscita del sistema è assicurato solo se tutti i componenti del sistema funzionano (si pensi a un



**Figura F1.4** Sistema in serie.

segnale elettrico che, partendo dal nodo iniziale di sinistra, deve raggiungere il nodo terminale di destra).

Si può dimostrare che se tutti i componenti hanno la stessa affidabilità  $r$ , l'affidabilità  $R$  del sistema serie vale:

$$R = r^n \quad (1.8)$$

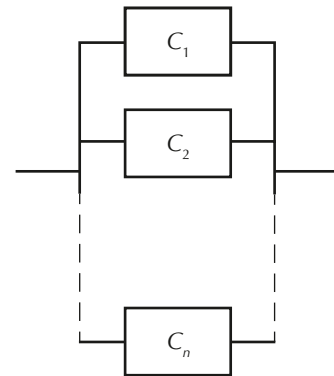
Tale relazione mostra che a parità di  $r$ ,  $R$  diminuisce al crescere del numero  $n$  di componenti, mentre, a parità di  $n$ , aumenta all'aumentare di  $r$ .

### Sistemi in parallelo

Sono sistemi costituiti da  $n$  elementi connessi in modo tale che la loro funzionalità è garantita anche quando è funzionante soltanto uno di essi.

In altre parole, il guasto del sistema (considerato come evento indipendente) si verifica solo se tutti gli  $n$  elementi sono guasti.

La rappresentazione del sistema parallelo è del tipo indicata nella **figura F1.5**.



**Figura F1.5** Sistema in parallelo.

Si può osservare che per avere il collegamento ingresso-uscita è sufficiente la funzionalità di un solo componente.

Il sistema parallelo è un esempio di sistema "ridondante", in quanto, nel caso tutti gli  $n$  componenti funzionano correttamente,  $n-1$  sono ridondanti, cioè non necessari ai fini del funzionamento del sistema.

Teoricamente, aumentando il numero dei componenti in parallelo, si può giungere a un sistema di affidabilità molto elevata: ciò, però, comporta costi elevati.

Ne consegue che la configurazione ottimale di un sistema deve scaturire da un compromesso tra elevata affidabilità e costi contenuti (due caratteristiche in contrasto tra di loro).

## F1.10 Ridondanza

In generale la ridondanza consiste nella duplicazione dei componenti critici di un sistema per aumentarne l'affidabilità nel tempo, ai fini di garantire la continuità di funzionamento.

Poiché la ridondanza aumenta la complessità del sistema, le sue dimensioni fisiche e i costi, generalmente è impiegata solo quando i benefici che ne derivano sono superiori ai costi connessi: per tale ragione necessita di una adeguata valutazione tecnico-economica.

Per esempio, nei sistemi elettronici per navicelle spaziali la ridondanza rappresenta un aspetto fondamentale: per garantire il corretto funzionamento del sistema per un lungo periodo di tempo nello spazio, ogni suo componente deve essere sempre ridondato, cioè devono esserci una o più copie pronte a entrare in funzione in caso di guasto.

Esistono due tipi di ridondanza:

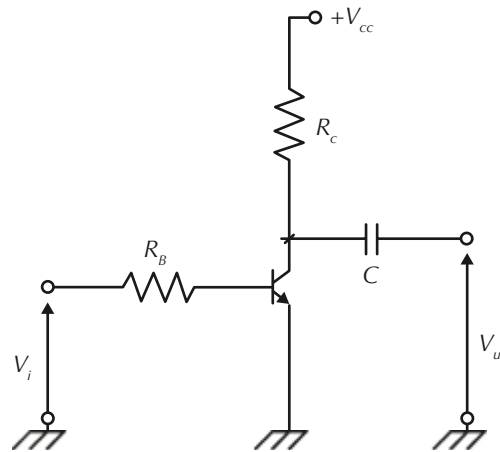
- **ridondanza calda** (sistema doppio con elementi contemporaneamente in funzione);
- **ridondanza fredda** (sistema doppio, ma solo quando l'elemento funzionante si guasta l'altro entra in funzione).

Per esempio il ricevitore del sistema di ricezione della navicella dovrà avere ridondanza calda: infatti, se si guasta un ricevitore e l'altro non è in funzione non è possibile ricevere i comandi dalla stazione terrestre.

### ESEMPIO

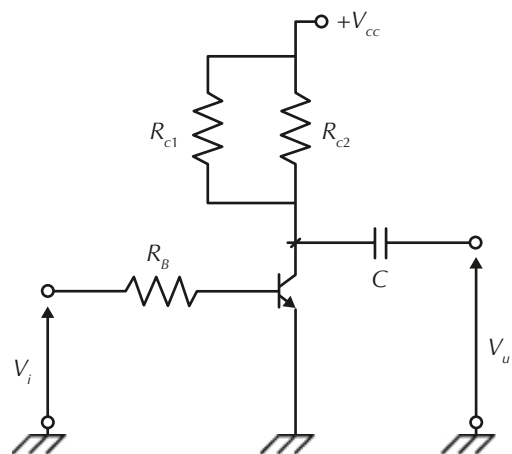
Considerato il circuito elettronico mostrato nella [figura F1.6](#) (amplificatore a emettitore comune), se la resistenza  $R_C$  si guasta, il segnale di uscita  $V_u$  si annulla e il sistema diventa inutilizzabile: per tale ragione è necessario che la resistenza  $R_C$  abbia un elevato grado di affidabilità.

Per aumentare l'affidabilità di  $R_C$  si possono, per esempio, inserire al posto della singola resistenza  $R_C$ , due resistenze in



**Figura F1.6** Schema di principio di un amplificatore a emettitore comune.

parallelo ( $R_{C1}$  e  $R_{C2}$ ) il cui valore complessivo è uguale a  $R_C$ , come mostrato nella [figura F1.7](#).



**Figura F1.7** Amplificatore a emettitore comune ridondato.

In tal caso, infatti, anche se una delle due resistenze si guasta, l'altra garantisce il funzionamento del circuito: il sistema risulta così più affidabile.

## CONTENUTI

- F2.1 Il Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro
- F2.2 Il datore di lavoro
- F2.3 Il dirigente
- F2.4 Il preposto
- F2.5 I lavoratori
- F2.6 Il medico competente
- F2.7 Il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza
- F2.8 Il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione
- F2.9 Le squadre di emergenza
- F2.10 La formazione dei lavoratori



Dispositivi di protezione individuale

# SICUREZZA SUL LUOGO DI LAVORO

## F2.1 Il Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro

Il tema della sicurezza sul lavoro costituisce un argomento molto importante, oggetto di costante impegno anche in ambito istituzionale, per una piena tutela della salute, dell'integrità e della dignità dei lavoratori in ogni ambiente di lavoro.

In tal senso, e nel rispetto di quanto stabilito dagli artt. 1 e 4 della Costituzione, promuovere la salute e la sicurezza nell'ambiente di lavoro significa attivare misure adeguate e azioni positive che assicurino al lavoratore la possibilità di esercitare compiutamente il proprio diritto al lavoro.

La salute e la sicurezza sul lavoro vanno perseguite tramite la cultura della prevenzione che si crea con la formazione e l'informazione.

I lavoratori non sono solo soggetti tutelati, ma anche attori attivi: devono essere consapevoli delle condizioni del proprio ambiente di lavoro, dell'utilizzo dei dispositivi di sicurezza e partecipare alla valutazione dei rischi e alla prevenzione.

La norma di riferimento è il **Testo Unico della sicurezza sul lavoro** (D.Lgs. n. 81/08), elaborato in base alle direttive comunitarie incentrate sul principio della partecipazione di tutti i soggetti coinvolti sul luogo di lavoro.

Il Testo definisce le misure generali di tutela del sistema di sicurezza aziendale, integrate dalle misure di sicurezza previste per specifici rischi o settori di attività (per esempio l'esposizione agli agenti fisici, biologici e cancerogeni).

Tale norma di legge si applica a tutti i settori di attività, privati e pubblici, e a tutte le tipologie di rischio.

Nel D.Lgs. n. 81/08 sono individuate alcune figure che ricoprono ruoli importanti per la sicurezza dei luoghi di lavoro; tali figure, titolari di "posizio-

ni di garanzia” sull’incolumità fisica e psichica dei lavoratori, devono essere individuate specificando anche i relativi ambiti di responsabilità.

## F2.2 Il datore di lavoro

L’art. 2, comma 1 lettera b) del D.Lgs. n. 81/08 descrive il datore di lavoro come “il soggetto titolare del rapporto di lavoro con il lavoratore o, comunque, il soggetto che, secondo il tipo e l’assetto dell’organizzazione nel cui ambito il lavoratore presta la propria attività, ha la responsabilità dell’organizzazione stessa o dell’unità produttiva in quanto esercita i poteri decisionali e di spesa”. Sulla base della norma richiamata, si possono definire tre tipologie di datore di lavoro:

1. il datore di lavoro in senso civilistico, ossia colui che sul piano formale ha stipulato il contratto di lavoro con il lavoratore ai sensi dell’art. 2082 c.c.;
2. il datore di lavoro delegato, ossia il soggetto cui sono delegate, entro certi limiti, le funzioni di datore di lavoro;
3. il datore di lavoro di fatto, ossia colui che in base al principio di effettività ricopre detto ruolo, avendone i necessari poteri decisionali e di spesa.

Il datore di lavoro è responsabile della tutela della salute e della sicurezza sul lavoro dei dipendenti. Il D.Lgs. n. 81/08 impone a questo soggetto l’organizzazione di un sistema di gestione della sicurezza con l’obiettivo primario della riduzione dei fattori di rischio.

Alcuni degli obblighi del datore di lavoro non sono delegabili e restano comunque di sua responsabilità; essi sono:

- la valutazione dei rischi;
- l’elaborazione del **Documento di Valutazione dei Rischi** (DVR) contenente i criteri adottati per la valutazione;
- il programma delle misure ritenute opportune per garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di sicurezza;
- la nomina del **Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione** (RSPP).

Il datore di lavoro, anche tramite il parere dei dirigenti nell’ambito delle loro attribuzioni e competenze, effettua le seguenti funzioni:

- nomina il medico competente;
- designa preventivamente i lavoratori incaricati

dell’attuazione delle misure di prevenzioni incendi, di evacuazione dei lavoratori e delle persone, di pronto soccorso e di gestione dell’emergenza,

- fornisce ai lavoratori i necessari e idonei Dispositivi di Protezione Individuali (DPI);
- fornisce ai lavoratori l’informazione sui rischi specifici e la formazione richiesta, in particolare per:
  - l’uso corretto delle attrezzature di lavoro (macchine, attrezzature ecc.);
  - l’uso dei dispositivi di protezione individuale;
  - la movimentazione manuale dei carichi;
  - l’uso dei videoterminali;
  - l’esposizione ad agenti cancerogeni;
  - l’esposizione ad agenti biologici.

## F2.3 Il dirigente

L’art. 2, comma 1, lettera d) del D.Lgs. n. 81/08 descrive il **dirigente** come “la persona che, in ragione di competenze professionali e di poteri gerarchici e funzionali adeguati alla natura dell’incarico conferitogli, attua le direttive del datore di lavoro organizzando l’attività lavorativa e vigilando sulla stessa”.

Da tale definizione normativa emerge:

- l’esigenza che il dirigente sia in possesso di adeguate competenze professionali in materia di sicurezza, la cui verifica compete al datore di lavoro;
- che il fulcro dell’attività svolta dal dirigente sta nel potere organizzativo dell’attività lavorativa e nel dovere di vigilanza sulla stessa.

Egli, in sostanza, è l’*alter ego* del datore di lavoro, in quanto svolge funzioni gestionali e organizzative nella conduzione dell’azienda, espressamente conferite dal datore di lavoro, attuando le direttive impartite da quest’ultimo.

Pertanto, a differenza del datore di lavoro, che ha la responsabilità dell’organizzazione dell’azienda o dell’unità produttiva in virtù dei poteri decisionali e di spesa, il dirigente coordina l’attività produttiva senza disporre di poteri decisionali e finanziari riguardanti la gestione complessiva dell’azienda.

Rientrano dunque in questa categoria coloro che sono preposti alla direzione tecnico-amministrativa dell’azienda o di un reparto di essa, come per esempio, i direttori tecnici o amministrativi, i capi ufficio e i capi reparto.

Per i dirigenti, come per i datori di lavoro, vale il

principio dell'effettività delle funzioni esercitate, nel senso che un dirigente è colui che di fatto dirige l'attività, anche se sprovvisto della qualifica formale.

Ne consegue che il dirigente non deve essere necessariamente inquadrato contrattualmente nella categoria dei dirigenti, ma è essenziale che svolga, all'interno dell'impresa, come dipendente o come soggetto legato al datore di lavoro da un rapporto professionale, le funzioni tipiche del dirigente.

L'art. 18 del D.Lgs. n. 81/08 pone come comportamenti del datore di lavoro e dei dirigenti una lunga serie di obblighi in materia di sicurezza.

A eccezione della predisposizione del DVR e della nomina dell'RSPP, che rientrano tra gli obblighi non delegabili del datore di lavoro, al dirigente competono, secondo le attribuzioni a lui conferite, gli stessi obblighi sulla sicurezza del datore di lavoro.

Il dirigente, dunque, è uno dei soggetti titolari di "posizioni di garanzia", in quanto è destinatario degli obblighi di sicurezza in via diretta, indipendentemente dal conferimento di una delega *ad hoc* da parte del datore di lavoro.

Egli, pertanto, per il fatto di essere formalmente o in via di fatto nella posizione di chi dirige l'attività lavorativa è tenuto, al pari del datore di lavoro, a predisporre nel settore di propria competenza tutte le misure di sicurezza necessarie a tutelare i lavoratori, i quali devono adeguatamente essere informati e addestrati sulle corrette modalità attuative.

## F2.4 Il preposto

L'art. 2, comma 1, lettera e) del D.Lgs. n. 81/08 descrive il **preposto** come "la persona che, in ragione delle competenze professionali e nei limiti dei poteri gerarchici e funzionali adeguati alla natura dell'incarico conferitogli, sovrintende all'attività lavorativa e garantisce l'attuazione delle direttive ricevute, controllandone la corretta esecuzione da parte dei lavoratori ed esercitando un funzionale potere di iniziativa".

Dalla definizione normativa emerge che il preposto:

- deve essere in possesso di adeguate competenze professionali in materia di sicurezza, la cui verifica compete al datore di lavoro;
- è una figura professionale che si colloca, nella struttura organizzativa dell'impresa, in posizione intermedia tra i dirigenti e gli altri lavoratori.

Infatti, spetta al preposto verificare l'applicazione da parte dei lavoratori delle direttive impartite dal

datore di lavoro o dal dirigente, anche mediante l'esercizio di un potere di iniziativa, finalizzato alla concreta attuazione degli ordini e delle istruzioni ricevute.

Come per il dirigente, anche per il preposto l'individuazione all'interno della struttura aziendale deve essere fatta alla luce del principio di effettività: soprattutto per la figura del preposto, infatti, spesso è assente un'investitura formale, per cui occorre guardare alle mansioni che effettivamente egli svolge all'interno dell'azienda, con particolare riferimento all'attività di controllo circa il rispetto delle norme di sicurezza da parte dei lavoratori.

L'art. 19 del D.Lgs. n. 81/08 pone a carico del preposto una serie di compiti specifici, che si riassumono fondamentalmente nell'obbligo di vigilare sulle prestazioni lavorative dei dipendenti, al fine di verificarne la conformità alle prescrizioni in materia di salute e sicurezza.

Il preposto, infatti, deve sovrintendere e vigilare sulla osservanza, da parte dei lavoratori, degli obblighi di legge e delle disposizioni aziendali in materia di sicurezza e di uso di mezzi di protezione, informando, in caso di persistenza della inosservanza, i diretti superiori dei lavoratori.

Deve informare tempestivamente il personale delle situazioni di rischio a cui è esposto, indicando le misure di protezione da adottare, e deve segnalare al datore di lavoro o al dirigente eventuali carenze riscontrate nelle attrezzature di lavoro e nei dispositivi di protezione individuale, nonché ogni altra situazione di pericolo della quale venga a conoscenza.

Come il dirigente, anche il preposto è titolare di una posizione di garanzia, in quanto l'art. 19 pone a carico dello stesso una serie di obblighi specifici, della cui mancata attuazione egli è direttamente responsabile.

## F2.5 I lavoratori

L'art. 2, comma 1, lettera a) del D.Lgs. n. 81/08 descrive il **lavoratore** come "la persona che, indipendentemente dalla tipologia contrattuale, svolge un'attività lavorativa nell'ambito dell'organizzazione di un datore di lavoro pubblico o privato, con o senza retribuzione, anche al solo fine di apprendere un mestiere, un'arte o una professione, esclusi gli addetti ai servizi domestici e familiari". Il D.Lgs. n. 81/08 pone la partecipazione dei lavoratori alla gestione della sicurezza e della salute sul luogo di lavoro come elemento fortemente innovativo della legislazione previgente.



In particolare l'art. 5 del decreto richiama i lavoratori a prendersi cura, come uno degli attori del sistema di prevenzione, della propria salute, della propria sicurezza e di quella delle persone presenti sul luogo di lavoro.

I lavoratori contribuiscono insieme al datore di lavoro, ai dirigenti e ai preposti all'adempimento di tutti gli obblighi imposti dall'autorità competente, verificando, per mezzo del proprio rappresentante per la sicurezza, l'applicazione delle misure di sicurezza e di tutela della salute.

## F2.6 Il medico competente

L'art. 2, comma 1, lettera h) del D.Lgs. n. 81/08 descrive il **medico competente** come "il medico in possesso di uno dei titoli e dei requisiti formativi e professionali che collabora con il datore di lavoro ai fini della valutazione dei rischi ed è nominato dallo stesso per effettuare la sorveglianza sanitaria e per tutti gli altri compiti di cui al presente decreto".

Il medico competente è nominato dal datore di lavoro qualora la valutazione dei rischi imponga la sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti a rischi specifici, come per gli addetti:

- ai videoterminali;
- alla movimentazione manuale dei carichi;
- a rischio cancerogeno;
- a rischio biologico.

Il medico competente ha i seguenti compiti:

- effettua gli accertamenti sanitari nei casi previsti dalla normativa vigente per mezzo di accertamenti preventivi e periodici;
- esprime i giudizi di idoneità per iscritto, informando sia il datore di lavoro che il lavoratore;
- istituisce e aggiorna la cartella sanitaria e di rischio per ogni lavoratore sottoposto a sorveglianza sanitaria;
- fornisce ai lavoratori informazioni sul significato degli accertamenti sanitari e sui risultati degli stessi;
- visita gli ambienti di lavoro almeno una volta l'anno;
- collabora alla predisposizione del pronto soccorso;
- collabora all'attività di formazione e informazione.

Il medico competente può avvalersi per gli accertamenti sanitari di medici specialisti.

## F2.7 Il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza

L'art. 2, comma 1, lettera i) del D.Lgs. n. 81/08 descrive il **Rappresentante dei Lavoratori per la Sicurezza (RLS)** come "la persona eletta o designata per rappresentare i lavoratori per quanto concerne gli aspetti della salute e della sicurezza durante il lavoro".

L'RLS viene eletto dai lavoratori e resta in carica per cinque anni.

Una volta eletto, deve essere adeguatamente formato, tramite un corso di formazione specifico della durata minima di 32 ore.

Deve disporre del tempo necessario allo svolgimento dell'incarico senza perdita di retribuzione, nonché dei mezzi necessari per l'esercizio delle funzioni e delle facoltà riconosciutegli.

Nel caso di dimissioni, esercita le proprie funzioni fino a nuova elezione che deve avvenire entro 60 giorni. Su iniziativa dei lavoratori, l'RLS può essere revocato con una maggioranza del 50%+1 degli aventi diritto al voto, risultante da atto scritto da consegnare alla direzione aziendale.

La direzione aziendale può consultare l'RLS per:

- la valutazione dei rischi;
- la designazione degli addetti alle squadre di emergenza;
- l'organizzazione della formazione dei lavoratori;
- il controllo dei luoghi di lavoro in cui si svolgono le attività aziendali.

Inoltre l'RLS:

- riceve le informazioni e la documentazione aziendale inerente la valutazione dei rischi e le relative misure di prevenzione, relativamente alle sostanze pericolose, alle macchine, agli impianti, all'organizzazione degli ambienti di lavoro, agli infortuni e alle malattie professionali;
- promuove l'elaborazione, l'individuazione e l'attuazione delle misure di prevenzione idonee a tutelare la salute e l'integrità fisica dei lavoratori;
- formula osservazioni in occasione di visite e verifiche effettuate dalle autorità competenti;
- partecipa alla riunione periodica con il medico competente, l'RSPP e il datore di lavoro;
- avverte il datore di lavoro e l'RSPP dei rischi individuati nel corso della sua attività;
- può fare ricorso alle autorità competenti qualora ritenga che le misure di prevenzione e

protezione dai rischi adottate dal datore di lavoro e i mezzi impiegati per attuarle non siano idonei a garantire la sicurezza e la salute durante il lavoro.

## F2.8 Il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione

L'art. 2, comma 1, lettera f) del D.Lgs. n. 81/08 descrive il **Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione** (RSPP) come “la persona in possesso delle capacità e dei requisiti professionali di cui all'art. 32 designata dal datore di lavoro, a cui risponde, per coordinare il servizio di prevenzione e protezione dai rischi”.

È una figura particolarmente importante ai fini della tutela della sicurezza e salute dei lavoratori, in quanto è il soggetto chiamato a collaborare con il datore di lavoro al fine di verificare l'adeguatezza delle misure antinfortunistiche adottate.

La nomina dell'RSPP rappresenta uno degli adempimenti più significativi del datore di lavoro, tanto da rientrare tra gli obblighi non delegabili, insieme alla valutazione dei rischi e alla redazione del relativo documento.

Il soggetto designato quale responsabile del servizio di prevenzione e protezione può essere sia un soggetto esterno che interno all'azienda e quindi può trattarsi anche di un lavoratore, purché munito delle capacità e dei requisiti professionali richiesti dalla legge per lo svolgimento di tale delicato incarico.

Infatti, tale soggetto deve avere competenze tecniche e professionali adeguate a garantire un'idonea capacità nello svolgimento dell'incarico, anche alla luce della natura dei rischi presenti sul luogo di lavoro.

L'istituzione del servizio di prevenzione e protezione è obbligatoria all'interno di ogni azienda; per le aziende fino a 30 lavoratori, il datore di lavoro può svolgere direttamente i compiti propri del servizio di prevenzione e protezione.

L'art. 33 del D.Lgs. n. 81/08 definisce i compiti spettanti al servizio di prevenzione, che fondamentalmente sono l'individuazione dei fattori di rischio e l'elaborazione di adeguate misure di prevenzione e di sicurezza, nonché la proposizione di programmi di informazione e formazione per i lavoratori.

Dall'analisi dei compiti descritti emerge che all'RSPP compete essenzialmente una funzione di consulenza nei confronti del datore di lavoro, senza avere autonomi poteri decisionali e operativi.

Per tale ragione, la collaborazione prestata dall'RSPP al datore di lavoro, non dà luogo di per sé a specifiche responsabilità penali.

Infatti, coerentemente con il ruolo consultivo svolto, l'RSPP non riveste alcuna posizione di garanzia e pertanto non rientra tra i soggetti chiamati a rispondere direttamente del loro operato; il D.Lgs. n. 81/08 sulla sicurezza, infatti, diversamente da quanto previsto per il datore di lavoro, il dirigente e il preposto, non contempla alcuna sanzione penale a suo carico.

Naturalmente, anche se il legislatore non ha previsto responsabilità dirette a carico dell'RSPP, non significa che questo soggetto non debba rispondere di eventuali inosservanze dei compiti attribuiti, soprattutto in caso di infortuni sul lavoro.

Infatti, nell'ipotesi in cui l'evento lesivo a danno del lavoratore sia direttamente riconducibile a un errore di valutazione dell'RSPP e/o alla mancata segnalazione al datore di lavoro di carenze, rispetto a quanto previsto nel documento di valutazione dei rischi e rilevato nel corso della sua attività, esso può essere coinvolto, anche se l'infortunio non è conseguenza di una sua specifica violazione delle norme in materia di sicurezza.

In tali circostanze, infatti, il comportamento dell'RSPP concorre alla produzione dell'evento lesivo e di conseguenza può essere sottoposto a sanzione penale per i reati di lesione o di omicidio colposo conseguenti all'infortunio che si è verificato.

Infine, è del tutto evidente che, nei casi in cui l'RSPP svolga di fatto anche il ruolo di datore di lavoro, dirigente o preposto, in base al principio di effettività che regola la materia della sicurezza, su di esso incombono anche gli obblighi che fanno tipicamente capo a tali figure.

L'art. 32 del D.Lgs. n. 81/08 (Capacità e requisiti professionali del responsabile del servizio di prevenzione e protezione) definisce in otto comma i requisiti dell'RSPP; che possono essere così riassunti:

- i requisiti professionali dell'RSPP devono essere adeguati alle attività lavorative e alla tipologia di rischi presenti in azienda;
- l'RSPP deve possedere un titolo di studio non inferiore al diploma di istruzione secondaria superiore, nonché di un attestato di frequenza, con verifica dell'apprendimento, a specifici corsi di formazione, come previsto dalla normativa, inerenti i concetti di ergonomia, stress lavoro correlato, organizzazione e gestione delle attività tecnico amministrative, tecniche di comunicazione aziendale e di relazioni sindacali.

## F2.9 Le squadre di emergenza

Fra gli obblighi del datore di lavoro e del dirigente, all'art. 18 comma 1, lettera b) del D.Lgs. n. 81/08, è previsto che "il datore di lavoro debba designare preventivamente i lavoratori incaricati dell'attuazione delle misure di prevenzione incendi e lotta antincendio, di evacuazione dei luoghi di lavoro in caso di pericolo grave e immediato, di salvataggio, di primo soccorso e, comunque, di gestione dell'emergenza". Al riguardo il datore di lavoro, in relazione alle dimensioni e ai rischi aziendali, nomina gli addetti alla prevenzione incendi, evacuazione e di primo soccorso.

### Addetti antincendio

Gli **addetti antincendio** sono un insieme di lavoratori addestrati e formati al fine di prevenire l'insorgere di incendi e, in caso di emergenza, di limitare i danni a cose e persone.

Essi svolgono un importante ruolo nella prevenzione antincendio, attraverso il controllo periodico dei luoghi di lavoro e la segnalazione al datore di lavoro di eventuali anomalie che possono sviluppare un focolaio o, in caso di incendio, di facilitare la propagazione dello stesso.

Al verificarsi di un'emergenza intervengono per controllarne l'evoluzione, per allertare i lavoratori in caso si renda necessario allontanarli dal luogo in cui si trovano, assicurandone un esodo sicuro.

Agli addetti antincendio è anche affidata la funzione di intervenire sugli impianti di servizio, allo scopo di interromperne l'erogazione, e sugli impianti antincendio al fine di azionarli manualmente, nonché di indirizzare eventuali Enti Esterni (VVF, Assistenza Medica e altri) verso i luoghi in stato di emergenza.

Gli addetti antincendio vengono designati dal datore di lavoro, il quale deve provvedere alla loro formazione e addestramento attraverso corsi specifici ed esercitazioni: essi non possono rifiutare la designazione se non per giustificati motivi.

In caso di incendio le principali funzioni dell'addetto antincendio sono:

- attivare lo stato di preallarme (vocale o telefonico);
- recarsi immediatamente nel luogo del pericolo e valutare l'entità dello stesso;
- verificare l'effettiva presenza di una situazione di emergenza;
- nel caso di incendio facilmente controllabile, intervenire immediatamente in quanto addestrato all'uso degli estintori;

- nel caso non sia sicuro di poter controllare l'incendio o comunque di intervenire sul pericolo, deve evitare di perdere tempo in vani tentativi dando inizio alle procedure di evacuazione, provvedendo immediatamente a:
  - attivare il dispositivo acustico per la divulgazione dell'allarme o, alternativamente, chiedere ad altri di provvedere, fornendo precise istruzioni in merito;
  - avvisare coloro che sono incaricati della chiamata dei soccorsi;
  - intercettare le alimentazioni di gas ed elettricità direttamente o fornendo precisi ordini a coloro che si trovano in prossimità di esse;
  - isolare il più possibile il luogo in cui si è sviluppato l'incendio o altra anomalia, chiudendo le porte di accesso dopo essersi assicurati che non siano rimaste persone all'interno;
  - occuparsi di coloro che necessitano assistenza, conducendoli al più presto nel luogo di raccolta più vicino;
- controllare e coordinare il flusso delle persone in esodo;
- verificare per ciascun piano l'avvenuta evacuazione, controllando ciascun locale, compresi i bagni, e chiudendo le relative porte di accesso dopo aver verificato che nessuno è rimasto all'interno;
- verificare l'avvenuta evacuazione delle persone;
- in caso di persone non presenti alla verifica finale, l'addetto antincendio deve informare le squadre di soccorso esterne per iniziare le ricerche;
- affiancare i VVF durante l'intervento fornendo tutte le informazioni del caso;
- verificare che alle eventuali persone ferite siano state apportate cure adeguate;
- segnalare il cessato allarme, quando l'emergenza è conclusa;
- disporre la rimessa in esercizio degli impianti e la ripresa delle attività dopo aver verificato la sussistenza di tutte le condizioni di sicurezza.

### Addetti al primo soccorso

Gli addetti di primo soccorso sono un insieme di lavoratori incaricati dell'attuazione dei provvedimenti previsti in materia di primo soccorso, ovvero di semplici manovre orientate a mantenere in vita l'infortunato e a prevenire le complicazioni, senza l'utilizzo di farmaci e/o di strumentazioni. Sono designati dal datore di lavoro e devono essere formati con istruzione teorica e pratica svolta da personale medico, in collaborazione, dove

possibile, con il sistema di emergenza del Servizio Sanitario Nazionale.

Nello svolgimento della parte pratica della formazione il personale medico può avvalersi della collaborazione di personale infermieristico o di altro personale specializzato.

I principali compiti svolti dagli addetti al primo soccorso sono:

- mantenere efficienti i presidi medico chirurgici aziendali (pacchetto di medicazione, cassetta di pronto soccorso, infermeria);
- aggiornare i numeri telefonici dei presidi sanitari esterni;
- intervenire in caso di infortunio allo scopo di evitare che all'infortunato vengano prestate azioni di soccorso non idonee.

Anche gli addetti di primo soccorso sono nominati dal datore di lavoro e non possono rifiutare la designazione se non per giustificati motivi.

## F2.10 La formazione dei lavoratori

È obbligo del datore di lavoro fornire ai lavoratori una adeguata informazione e formazione sui principi base della prevenzione incendi e sulle azioni da attuare in presenza di un incendio, in particolare:

- sui rischi di incendio legati alle specifiche mansioni svolte;
- sulle misure di prevenzione e di protezione incendi adottate nel luogo di lavoro con particolare riferimento:

- all'osservanza delle misure di prevenzione degli incendi e relativo corretto comportamento negli ambienti di lavoro;
- al divieto di utilizzo degli ascensori per l'evacuazione in caso di incendio;
- all'importanza di tenere chiuse le porte resistenti al fuoco;
- alla modalità di apertura delle porte delle uscite;
- all'ubicazione delle vie di uscita;
- alle procedure da adottare in caso di incendio, e in particolare:
  - alle azioni da attuare in caso di incendio;
  - all'azionamento dell'allarme;
  - alle procedure da attuare in caso di allarme e di evacuazione fino al punto di raccolta in luogo sicuro;
  - alla modalità di chiamata dei vigili del fuoco.

La formazione impartita ai lavoratori deve essere:

- basata sulla valutazione dei rischi;
- fornita al lavoratore all'atto dell'assunzione in azienda;
- essere aggiornata nel caso in cui si verifichi un mutamento della situazione del luogo di lavoro che comporti una variazione della valutazione stessa.

Devono essere fornite adeguate informazioni anche agli addetti alla manutenzione di aziende esterne per garantire che essi siano a conoscenza delle misure generali di sicurezza antincendio nel luogo di lavoro, delle azioni da adottare in caso di incendio e delle procedure di evacuazione.

.....  
[F1] Che cosa rappresenta la disponibilità di un sistema?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[F2] L'affidabilità è una grandezza deterministica.

VERO       FALSO

.....  
[F3] Quali sono gli obiettivi dell'affidabilità?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[F4] Quali sono le variabili da cui dipende l'affidabilità?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[F5] Quali tipi di affidabilità conosci?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

[F6] Fornisci la definizione di guasto.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

[F7] Che cosa determina un guasto totale?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

[F8] Che cos'è il tasso di guasto?

.....

.....

.....

.....

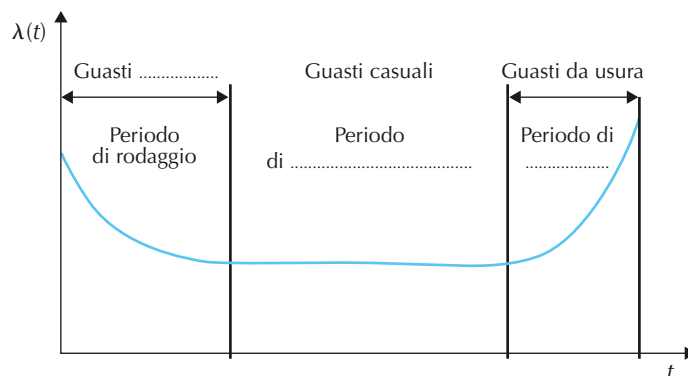
.....

.....

[F9] I guasti per usura si verificano nell'ultimo periodo della vita utile del sistema.

VERO       FALSO

[F10] Completa il seguente diagramma a vasca da bagno.



.....  
[F11] Che cos'è l'MTTF?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[F12] L'MTBF è:

- a) il tempo medio tra la fine di un guasto e l'inizio del successivo;
- b) il tempo medio tra l'inizio di un guasto e la fine del successivo;
- c) il tempo medio tra la fine di un guasto e la fine del successivo;
- d) il tempo medio tra l'inizio di un guasto e l'inizio del successivo.

.....  
[F13] Descrivi un sistema serie.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[F14] Qual è la differenza sostanziale tra un sistema serie e uno parallelo?

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

.....  
[F15] Dai una definizione di datore di lavoro.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

[F16] Dai una definizione di preposto.

.....

.....

.....

.....

[F17] Qual è il ruolo del dirigente nell'ambito della sicurezza aziendale?

.....

.....

.....

.....

[F18] Quali sono le funzioni dell'RSPP?

.....

.....

.....

.....

[F19] L'RLS è nominato dal datore di lavoro.

VERO       FALSO

[F20] L'RSPP è nominato dal .....

.....

[F21] Descrivi le principali funzioni degli addetti antincendio.

.....

.....

.....

.....

[F22] Il medico competente è nominato dal:

- a) dirigente;
- b) preposto;
- c) datore di lavoro;
- d) RSPP.







VERSIONE  
SCARICABILE  
**EBOOK**

e-ISBN 978-88-203-6200-3

**[www.hoepli.it](http://www.hoepli.it)**

Ulrico Hoepli Editore S.p.A.  
via Hoepli, 5 - 20121 Milano  
e-mail [hoepli@hoepli.it](mailto:hoepli@hoepli.it)







## **Come utilizzare il coupon per scaricare la versione digitale del libro**

Il coupon riportato nella pagina a fronte (terza di copertina) è utilizzabile una sola volta per accedere alla versione digitale del libro, scaricabile dal sito **www.scuolabook.it**.

Segui questi passaggi.

- 1) Registrati su Scuolabook utilizzando un indirizzo email valido. Se hai già un account, accedi con le tue credenziali.
- 2) Accedi alla pagina "Acquisti" dove troverai il campo per inserire il tuo codice seriale, nascosto sotto la vernice grattabile del coupon.
- 3) Una volta inserito il codice seriale, scarica e installa l'applicazione Scuolabook Reader adatta per il tuo sistema operativo. All'interno della tua libreria digitale troverai tutti i tuoi libri, compresi quelli associati al tuo coupon, e potrai scaricarli e leggerli con Scuolabook Reader semplicemente cliccando su ciascuna copertina.

La versione digitale del libro (eBook+) è **disponibile a partire da settembre 2015**.