1 2 3 Idee per il tuo futuro

Paolo Guidi

# Sistemi automatici

## per Elettronica ed elettrotecnica

Risposta dei sistemi
nel dominio del tempo e della frequenza
Automazione industriale e PLC
Microcontrollori e microprocessori

Contiene un CD-ROM con
NI Circuit Design Suite software
POWERED BY NATIONAL INSTRUMENTS™

e con Zelio Soft 2
di Schneider Electric
Schneider Electric

TECNOLOGIA ZANICHELLI

Paolo Guidi

# Sistemi automatici

per Elettronica ed elettrotecnica

Risposta dei sistemi
nel dominio del tempo e della frequenza
Automazione industriale e PLC
Microcontrollori e microprocessori

TECNOLOGIA ZANICHELLI

Copyright © 2012 Zanichelli editore S.p.A., Bologna [9387]
www.zanichelli.it

I diritti di elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale su supporti di qualsiasi tipo (inclusi magnetici e ottici), di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche), i diritti di noleggio, di prestito e di traduzione sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume. Le richieste per tale tipo di riproduzione vanno inoltrate a

Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi)
Corso di Porta Romana, n. 108
20122 Milano
e-mail autorizzazioni@clearedi.org e sito web www.clearedi.org

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale, consultabile al sito www.zanichelli.it/f_catalog.html.
La fotocopia dei soli esemplari esistenti nelle biblioteche di tali opere è consentita, oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei ed archivi, la facoltà di cui all'art. 71 - ter legge diritto d'autore.
Maggiori informazioni sul nostro sito: www.zanichelli.it/fotocopie/

---

Realizzazione editoriale:
- Coordinamento editoriale: Matteo Fornesi
- Collaborazione redazionale, impaginazione e illustrazioni: Conedit Libri, Cormano (MI)
- Progetto grafico: Editta Gelsomini
- Segreteria di redazione: Deborah Lorenzini

Copertina:
- Progetto grafico: Miguel Sal & C., Bologna
- Realizzazione: Roberto Marchetti
- Immagine di copertina: © Adam Gault/Getty Images

Prima edizione: marzo 2012

L'impegno a mantenere invariato il contenuto di questo volume per un quinquennio (art. 5 legge n. 169/2008) è comunicato nel catalogo Zanichelli, disponibile anche online sul sito www.zanichelli.it, ai sensi del DM 41 dell'8 aprile 2009, All. 1/B.

---

**File per diversamente abili**
L'editore mette a disposizione degli studenti non vedenti, ipovedenti, disabili motori o con disturbi specifici di apprendimento i file pdf in cui sono memorizzate le pagine di questo libro. Il formato del file permette l'ingrandimento dei caratteri del testo e la lettura mediante software screen reader. Le informazioni su come ottenere i file sono sul sito www.zanichelli.it/diversamenteabili

---

**Suggerimenti e segnalazione degli errori**
Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra essi. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli.
Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro scrivere al seguente indirizzo:

lineazeta@zanichelli.it

Le correzioni di eventuali errori presenti nel testo sono pubblicate nel sito www.zanichelli.it/aggiornamenti

---

Zanichelli editore S.p.A. opera con sistema qualità certificato CertiCarGraf n. 477 secondo la norma UNI EN ISO 9001:2008

Realizzazione CD-ROM:
- Redazione: Matteo Fornesi, Renata Schivardi
- Segreteria di redazione: Deborah Lorenzini
- Progettazione esecutiva e sviluppo software: duDAT s.r.l., Bologna
- Interfaccia grafica: Miguel Sal & C., Bologna

Il software installato sul CD-ROM allegato è copyright 2011 National Instruments Corporation.
Tutti i diritti riservati.
LabVIEW, MULTISIM, National Instruments, NI, Ultiboard, il logo di LabVIEW e il logo di National Instruments sono marchi di proprietà di National Instruments.
Il corso, il libro *Sistemi automatici* e il CD-ROM allegato sono prodotti da Zanichelli editore S.p.A.
Zanichelli editore S.p.A. è la sola responsabile sia del corso sia del libro *Sistemi automatici* sia del CD-ROM, nonché dei loro relativi contenuti.
Né questo testo, né qualsiasi altro libro o servizio offerto da Zanichelli editore S.p.A. sono pubblicazioni o servizi ufficiali di National Instruments o sono attribuibili in qualsiasi modo a National Instruments.
Il CD-ROM allegato al presente libro di testo include il software Circuit Design Suite versione Education della National Instruments.
L'utilizzo del software Circuit Design Suite versione Education è **limitato a fini didattici in ambito domestico**.

Il software Zelio Soft 2 è proprietà di Schneider Electric S.p.A.

# Indice

## 1 Risposta nel dominio del tempo


1 Concetti introduttivi 2
2 Trasformate funzionali 3
3 Trasformata di Laplace 4
4 Principali proprietà delle trasformate 5
5 Impiego delle tabelle 8
6 Scomposizione in fratti semplici 12
7 Funzione di trasferimento in *s* 15
8 Forme fattorizzate della f.d.t. 17
9 Risposta di un sistema alle sollecitazioni 19
10 Teoremi del valore iniziale e del valore finale 20
11 Considerazioni sulla stabilità di un sistema 22
ESERCIZI SVOLTI 27
ESERCIZI 29
DOMANDE a risposta aperta 30
DOMANDE a risposta multipla 31


## 2 Risposta nel dominio della frequenza


1 Concetti introduttivi 33
2 F.d.t. in regime sinusoidale 33
3 Forme fattorizzate della f.d.t. 35
4 Funzioni elementari 36
5 Diagrammi di Bode 39
6 Rappresentazione di funzioni elementari 42
7 Rappresentazione di funzioni complesse 52
8 Diagrammi di Nyquist 56
9 Considerazioni sui sistemi retroazionati 65
ESERCIZI SVOLTI 74
ESERCIZI 77
DOMANDE a risposta aperta 79
DOMANDE a risposta multipla 80





Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 3 Esercitazioni applicate alla teoria dei sistemi


1 Concetti introduttivi 81
2 Applicazioni con Excel 82
3 Applicazioni con Multisim 98
4 Applicazioni con Matlab 110
5 Applicazioni con linguaggi evoluti 113
ESERCITAZIONI 123


## 4 Automazione industriale


1 Concetti introduttivi 124
2 Impianti per l'automazione industriale 127
3 Logiche di comando 130
4 Azionamenti elettromeccanici 134
5 Azionamenti idropneumatici 136
6 Componenti per azionamenti pneumatici 140
7 Circuiti per azionamenti pneumatici 152
8 Impianti in logica elettromeccanica 156
DOMANDE a risposta aperta 166
DOMANDE a risposta multipla 167


## 5 Controllori a logica programmabile


1 Concetti introduttivi 169
2 Classificazione dei PLC 171
3 Architettura dei PLC 172
4 Unità centrale di processo 173
5 Memorie 177
6 Periferiche 177
7 Alimentazione 178
8 Terminale di programmazione 179
9 Acquisizione di ingressi 180
10 Comando di uscite 183
11 Sicurezza 186
12 Normativa 188
13 Sistemi di comunicazione 188
14 Linguaggi di programmazione 191
15 Linguaggio a contatti 193
16 Applicazioni di azionamenti elettromeccanici 198
17 Applicazioni di azionamenti pneumatici 203
DOMANDE a risposta aperta 212
DOMANDE a risposta multipla 213




Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 6 Esercitazioni applicate al PLC


1 Concetti introduttivi 214
2 Impiego di Multisim per la simulazione con il PLC 214
3 Applicazioni di Multisim 218
4 Moduli Zelio Logic 228
5 Applicazioni del software Zelio Soft 2 236
ESERCITAZIONI 240


## 7 Introduzione ai sistemi a microprocessore


1 Concetti introduttivi 241
2 Struttura interna del microprocessore 242
3 Trasferimento dati 246
4 Caratteristiche del microprocessore Z80 251
5 Programmazione dei microprocessori 259
6 Carta di riferimento dello Z80 261
7 Esempi di programmazione 280
DOMANDE a risposta aperta 284
DOMANDE a risposta multipla 284


## 8 Introduzione ai microcontrollori


1 Concetti introduttivi 285
2 Caratteristiche del PIC 16F84 287
3 Architettura interna 289
4 Set di istruzioni 293
5 Sottoprogrammi e interruzioni 298
6 Esempi di programmazione 298
DOMANDE a risposta aperta 301
DOMANDE a risposta multipla 301


## 9 Sistemi di sviluppo per microcontrollori


1 Concetti introduttivi 302
2 Compilazione 303
3 Programmazione 304
4 Sistema di sviluppo MPLAB 305
5 Applicazioni con MPLAB 312
DOMANDE a risposta aperta 317
ESERCITAZIONI 317

**Indice analitico** 318





Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

1 Risposta nel dominio del tempo

2 Risposta nel dominio della frequenza

3 Esercitazioni applicate alla teoria dei sistemi

4 Automazione industriale

5 Controllori a logica programmabile

6 Esercitazioni applicate al PLC

7 Introduzione ai sistemi a microprocessore

8 Introduzione ai microcontrollori

9 Sistemi di sviluppo per microcontrollori

# 1 Risposta nel dominio del tempo

## 1 Concetti introduttivi

Lo studio di un sistema viene condotto con il duplice scopo di:

- determinare l'andamento nel tempo dell'uscita corrispondente a un qualsiasi ingresso specifico;
- esaminare le proprietà globali del sistema, ovvero quelle proprietà che ne definiscono le caratteristiche di funzionamento indipendentemente dallo specifico ingresso a cui esso è sottoposto.

Le analisi che vengono effettuate con questi scopi sono rispettivamente denominate:

- *studio della risposta nel dominio del tempo*;
- *studio della risposta in frequenza.*

In particolare vengono studiate le caratteristiche dei sistemi lineari e tempo invarianti importanti sia dal punto di vista pratico sia teorico; imponendo ipotesi semplificative lo studio di sistemi non lineari e tempo varianti può infatti essere ricondotto a quello di sistemi lineari e tempo invarianti che, almeno dal punto di vista matematico, sono più facilmente trattabili.

Nel caso di variabili continue i sistemi lineari e tempo invarianti vengono descritti da *equazioni algebriche* se statici, da *equazioni differenziali* (equazioni le cui soluzioni sono rappresentate da funzioni) se dinamici.

### 1.1 Segnali di prova

Lo studio della **risposta nel dominio del tempo** viene affrontato eccitando il sistema con i *segnali di prova* riprodotti in FIGURA **1** e denominati rispettivamente:

- *impulso unitario*;
- *gradino unitario*;
- *rampa unitaria*;
- *parabola unitaria.*


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

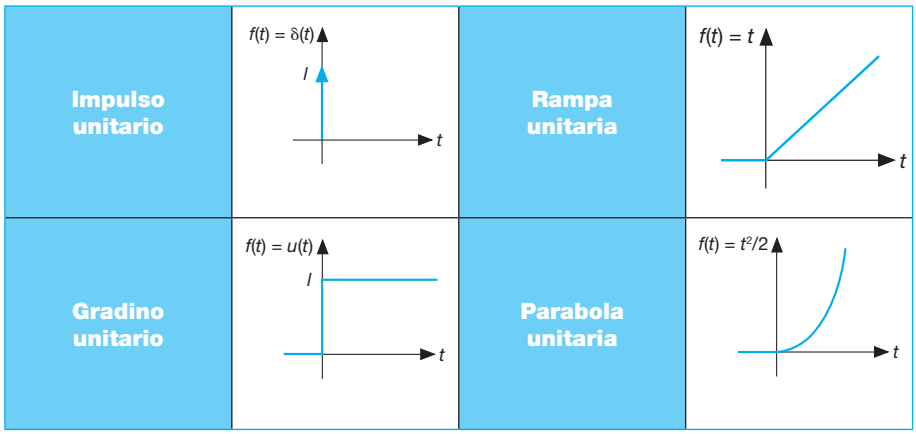



FIGURA **1**
Segnali di prova.

## 1.2 Tipologie di risposta

L'andamento nel tempo dell'uscita di un sistema deriva dal contributo di due componenti che sono:

- la *risposta libera*, dovuta alle condizioni iniziali con ingresso nullo;
- la *risposta forzata*, dovuta agli effetti prodotti dagli ingressi con condizioni iniziali nulle.

Le *condizioni iniziali* definiscono lo stato in cui si trova il sistema nel momento in cui viene applicato un segnale d'ingresso.

Si cita come esempio il caso del condensatore in un circuito RC alimentato in continua che può essere carico o scarico nell'istante in cui viene applicato il segnale d'ingresso.

Condizioni iniziali con ingresso nullo significa che al sistema non vengono applicati segnali d'ingresso di qualsiasi natura e che si tiene conto dell'evoluzione del sistema dovuta alle sole condizioni iniziali.

Risulta inoltre importante la seguente osservazione:

- a definire la parte transitoria della risposta concorrono sia la risposta libera sia la risposta forzata;
- a definire la parte a regime della risposta concorre soltanto la risposta forzata.

Si impiegano come strumenti matematici per lo studio della risposta nel dominio del tempo:

- *equazioni differenziali*;
- *trasformate funzionali* (come la *trasformata di Laplace*).

# 2 Trasformate funzionali

L'impiego delle **equazioni differenziali** come metodo di calcolo nello studio dei sistemi si presenta alquanto complicato poiché richiede una conoscenza non certo superficiale di argomenti di matematica piuttosto complessi.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Risolvere un'equazione differenziale significa determinarne le soluzioni che però non sono semplicemente di tipo numerico come per le equazioni algebriche (di facile soluzione almeno fino al quarto grado) ma funzioni che, nei casi in cui saranno oggetto di studio, hanno come variabile indipendente il tempo.

Chi non possiede ancora gli strumenti matematici adatti per lo studio di queste equazioni (nozioni relative a derivate e integrali) può aggirare l'ostacolo utilizzando le **trasformate funzionali** (trasformazioni che associano funzioni a funzioni) che consentono di ricondurre la soluzione di equazioni differenziali a quella di equazioni algebriche.

Per inquadrare l'argomento con lo scopo di comprendere l'utilità di queste trasformate si consideri lo schema riprodotto in FIGURA **2**.

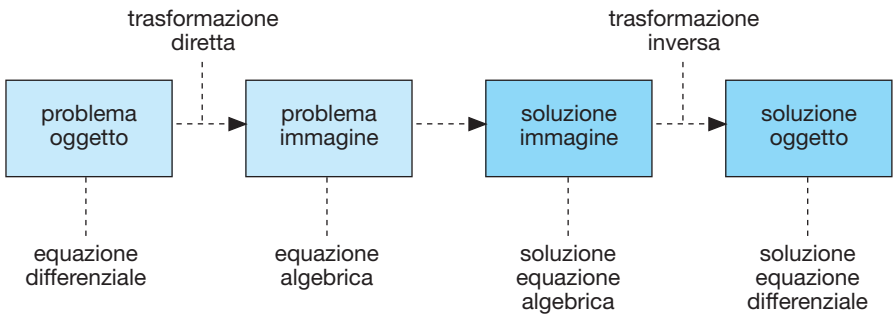



FIGURA **2**
Modi di impiego delle trasformate funzionali.

In generale questo metodo consente di risolvere un *problema oggetto* di difficile soluzione risolvendo al suo posto un *problema immagine* di più facile soluzione ricavato per *trasformazione diretta*; dalla soluzione del problema immagine, definita *soluzione immagine*, si ricava per *trasformazione inversa* la *soluzione oggetto*.

In questo caso si parte da un'equazione differenziale che, per trasformazione diretta, diventa un'equazione algebrica; dalla soluzione dell'equazione algebrica si passa, per trasformazione inversa, alla soluzione dell'equazione differenziale.

## 3 Trasformata di Laplace

▶ La **trasformata di Laplace** stabilisce una corrispondenza biunivoca tra una *funzione oggetto* $f(t)$ definita nel dominio del tempo e una *funzione immagine* $F(s)$ definita nel dominio della variabile complessa $s$.

Per indicare in modo sintetico l'operazione di trasformata si usa l'espressione seguente:

$$F(s) = \mathcal{L}\,[f(t)]$$

Dopo aver effettuato i calcoli, essendo il *dominio s* un *dominio astratto*, per poter ottenere dall'indagine risultati effettivamente valutabili si deve passare nuovamente nel dominio del tempo.

Il passaggio inverso, dalla funzione immagine alla funzione oggetto, si


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

realizza utilizzando l'operazione di *antitrasformata*; per indicarla in modo sintetico si usa l'espressione seguente:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\,[F(s)]$$

Il procedimento viene sintetizzato in FIGURA **3**.

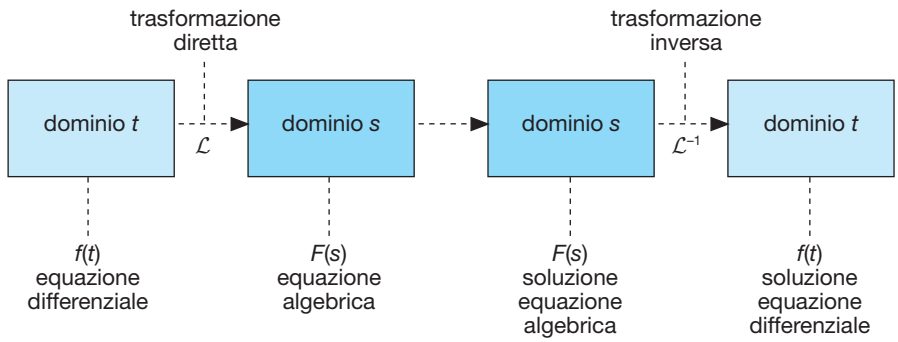



FIGURA **3**
Modalità d'impiego della trasformata di Laplace.

I calcoli che vengono effettuati facendo uso della trasformata di Laplace sono relativamente semplici in quanto, per effettuare le trasformazioni, non si usa direttamente la definizione di trasformata la cui formulazione, essendo argomento puramente matematico che richiede lo svolgimento di operazioni di integrazione, non viene riportata.

Si usano invece le *tabelle di trasformate* delle funzioni più comunemente utilizzate che derivano dall'applicazione diretta della definizione di trasformata.

## 4 Principali proprietà delle trasformate

Nello svolgimento di calcoli, per esempio per la risoluzione di sistemi elettrici, sono utili le proprietà di cui gode la trasformata di Laplace e principalmente:

- la trasformata del prodotto di una costante per una funzione;
- la trasformata di una somma di funzioni.

Senza entrare in dettagli matematici verranno utilizzate anche altre due proprietà che riguardano gli strumenti matematici denominati *derivate* e *integrali*; tali proprietà coinvolgono lo studio sia di induttori e condensatori sia di componenti equivalenti di sistemi non elettrici.

Risultano per queste proprietà i seguenti enunciati:

**1** la *trasformata del prodotto di una costante per una funzione* si ottiene moltiplicando la costante per la trasformata della funzione

$$\mathcal{L}[k \cdot f(t)] = k \cdot F(s)$$

**2** la *trasformata di una somma di funzioni* è uguale alla somma delle trasformate delle singole funzioni

$$\mathcal{L}[f_1(t) + f_2(t)] = F_1(s) + F_2(s)$$


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**3** la *trasformata della derivata di una funzione* si ottiene moltiplicando per il fattore $s$ la trasformata della funzione;

**4** la *trasformata dell'integrale di una funzione* si ottiene dividendo per il fattore $s$ la trasformata della funzione.

Le proprietà 1 e 2 si applicano per esempio quando si devono scrivere relazioni che implicano l'impiego delle leggi di Ohm e di Kirchhoff.

Le proprietà 3 e 4 hanno conseguenze dal punto di vista applicativo per esempio nello studio delle reti elettriche in quanto, per esprimere le relazioni nel dominio del tempo che legano tensione e corrente negli induttori e nei condensatori, vengono usati tali operatori.

Nel *dominio s* le relazioni citate diventano molto semplici.

## 4.1 Applicazioni alle reti elettriche

Si indichino con $V(s)$ e $I(s)$ tensioni e correnti espresse nel dominio $s$.

Estendendo la legge di Ohm valida per i resistori a induttori e condensatori si ottengono le relazioni che legano tensioni e correnti sostituendo al coefficiente di proporzionalità $R$ le corrispondenti espressioni $sL$ per le bobine e $1/sC$ per i condensatori.

Risulta di conseguenza:

$$V(s) = R \cdot I(s)$$

per il resistore,

$$V(s) = \frac{1}{sC} \cdot I(s)$$

per il condensatore,

$$V(s) = sL \cdot I(s)$$

per l'induttore.

Genericamente, indicando con $Z(s)$ l'impedenza del componente, risulta la relazione:

$$V(s) = Z \cdot I(s)$$

**ESEMPIO 1**

Si vuole rappresentare nel *dominio s* la legge di Ohm generalizzata relativa a un circuito RLC serie al quale viene applicato un generico segnale di tensione.

### Soluzione

Si indichi con $V(s)$ il generico segnale di tensione applicato al circuito e con $I(s)$ la corrente in esso circolante.

La legge di Ohm generalizzata applicata al circuito, in accordo con le considerazioni svolte in precedenza, risulta la seguente:

$$V(s) = V_R(s) + V_L(s) + V_C(s) = R\,I(s) + sL\,I(s) + I(s)/sC$$

Nel primo passaggio, in cui viene effettuata una somma di tensioni, viene applicata la proprietà 2; nel secondo passaggio, quando vengono esplicitate le relazioni che legano tensione e corrente, vengono applicate le proprietà 1, 3 e 4.

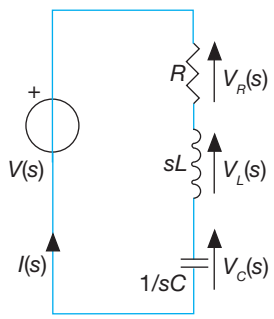



FIGURA **4**
Applicazione della trasformata al circuito RLC serie.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 2**

Si vogliono rappresentare nel *dominio s* le equazioni relative alle maglie d'ingresso e d'uscita del circuito riportato in FIGURA **5**.

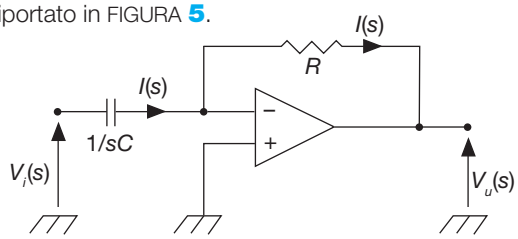



FIGURA **5**
Schema elettrico del circuito.

## Soluzione

Adottando le normali ipotesi semplificative tipiche dei circuiti con operazionali risulta

$$V_i(s) = \frac{1}{sC} I(s)$$

per la maglia d'ingresso e

$$V_i(s) = -R\, I(s)$$

per la maglia d'uscita.

## 4.2 Applicazioni a sistemi non elettrici

Si estende ora la trattazione svolta per i componenti dei sistemi elettrici ai componenti dei sistemi meccanici, idraulici e termici.

### Sistemi meccanici

Per lo *smorzatore* (equivalente a un resistore) risulta la relazione

$$F(s) = \beta \cdot v(s)$$

essendo $v$ la velocità, $F$ la forza l'effetto e $\beta$ il *coefficiente di attrito viscoso*.

Per la *molla* (equivalente a un condensatore) risulta la relazione

$$v(s) = \frac{1}{K} \cdot s\, F(s)$$

essendo $K$ la *costante della molla*.

Sempre per la molla risulta anche vera la più utilizzata relazione

$$F(s) = K \cdot \frac{v(s)}{s} = K \cdot x(s)$$

essendo $x$ la variazione di lunghezza della molla.

Per la *massa* (equivalente a un induttore) risulta la relazione

$$F(s) = M \cdot s\, v(s)$$

essendo $M$ la massa del corpo in movimento.

### Sistemi idraulici

Per la *condotta* (equivalente a un resistore) risulta la relazione:

$$p(s) = R_L \cdot Q(s)$$

essendo $Q$ la *portata volumetrica* causa, $p$ la *pressione* è l'effetto, $R_L$ la *resistenza idraulica*.

Per il *serbatoio* (equivalente a un condensatore) risulta la relazione:

$$Q(s) = C_L \cdot s\, p(s)$$

essendo $C_L$ la *capacità idraulica* del serbatoio.

Per la *condotta* (equivalente a un induttore) risulta la relazione:

$$p(s) = I_L \cdot s\, Q(s)$$

essendo $I_L$ l'*inerzia idraulica* della condotta.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Sistemi termici

Per lo *scambiatore di calore* (equivalente a un resistore) risulta la relazione:

$$\theta(s) = R_T \cdot Q(s)$$

essendo $Q$ il *flusso termico*, $\theta$ la temperatura, $R_T$ la *resistenza termica*.

Per la *massa* (equivalente a un condensatore) risulta la relazione:

$$Q(s) = C_T \cdot s\,\theta(s)$$

essendo $C_T$ la *capacità termica* della massa.

# 5 Impiego delle tabelle

Utilizzando direttamente la definizione sono state ricavate le *tabelle di trasformate* di una grande quantità di funzioni che trovano impiego dal punto di vista pratico nello studio della teoria dei sistemi.

Le tabelle possono essere utilizzate in entrambi i sensi ovvero:

- per passare da $t$ a $s$ (operazione di trasformata);
- per passare da $s$ a $t$ (operazione di antitrasformata).

Vengono di seguito proposte tabelle di trasformate appartenenti alle seguenti categorie:

- segnali di prova;
- forme d'onda esponenziali e trigonometriche;
- altre funzioni notevoli che sono combinazioni di segnali elementari (a rampa, esponenziali e trigonometrici);
- segnali tipici di sistemi con coefficiente di smorzamento inferiore all'unità.

## 5.1 Segnali di prova

Nella TABELLA **1** vengono riportate le trasformate dei segnali di prova.

| $f(t)$ | $F(s)$ |
|---|---|
| $\delta(t)$, *impulso unitario* | 1 |
| $u(t)$, *gradino unitario* | $1/s$ |
| $t$, *rampa unitaria* | $1/s^2$ |
| $t^2/2$, *parabola unitaria* | $1/s^3$ |

TABELLA **1**
Trasformate dei segnali di prova.

**ESEMPIO 3**

Si vuole ricavare la trasformata di un segnale che presenta le seguenti caratteristiche:

– passa per l'origine degli assi;
– al tempo $t = 2$ $s$ assume il valore 4.

### Soluzione

Il segnale ha le caratteristiche di una rampa evidentemente non unitaria; la sua equazione assume la seguente espressione:

$$f(t) = 2t$$

Applicando la proprietà 1 e utilizzando la trasformata della rampa si ottiene:

$$F(s) = \frac{2}{s^2}$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 4**

Si vuole ricavare la trasformata di un segnale che presenta le seguenti caratteristiche:

– nell'origine assume il valore 2;
– al tempo $t = 2\ s$ assume il valore 6.

### Soluzione

Dal punto di vista matematico il segnale viene rappresentato da una retta che non passa per l'origine degli assi; la sua equazione assume la seguente espressione:

$$f(t) = 2 + 2t$$

Il segnale è in effetti la somma tra un gradino e una rampa entrambi non unitari; applicando la proprietà 1 e utilizzando le trasformate del gradino e della rampa si ottiene:

$$F(s) = \frac{2}{s} + \frac{2}{s^2}$$

## 5.2 Funzioni esponenziali e trigonometriche

Nella TABELLA **2** vengono proposte le trasformate delle funzioni esponenziali e trigonometriche fondamentali riprodotte in FIGURA **6**.

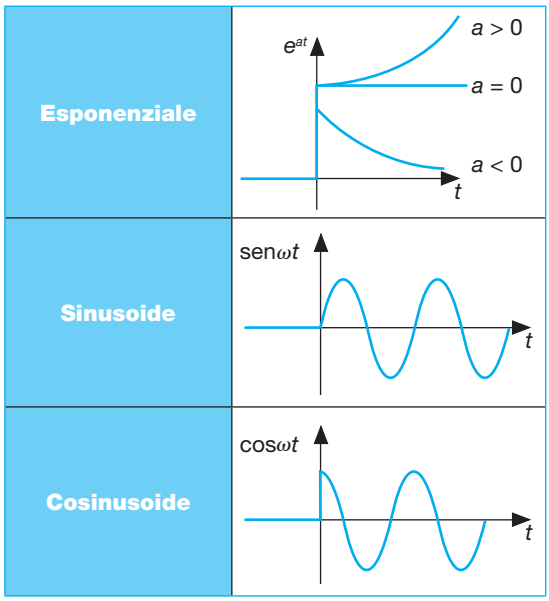



FIGURA **6**
Funzioni esponenziali e trigonometriche.

| $f(t)$ | $F(s)$ |
|---|---|
| $e^{at}$, *esponenziale* | $\frac{1}{(s-a)}$ |
| sen$\omega t$, *sinusoide* | $\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$ |
| cos$\omega t$, *cosinusoide* | $\frac{s}{s^2+\omega^2}$ |

TABELLA **2**
Trasformate di funzioni esponenziali e trigonometriche.

Si osservi in particolare che la tipologia dell'esponenziale cambia in relazione al segno del coefficiente $a$; se questo è positivo l'esponenziale è crescente, in caso contrario decrescente.

**ESEMPIO 5**

Si vuole ricavare la trasformata di un segnale che presenta le seguenti caratteristiche:

– è sinusoidale con pulsazione 10 rad/s;
– ha valore massimo 2 e valore minimo 0.

### Soluzione

Dal punto di vista matematico il segnale viene rappresentato da una sinusoide traslata di 1 verso l'alto.

Il segnale è dunque la somma tra un gradino unitario e una sinusoide; la sua equazione assume la seguente espressione:

$$f(t) = 1 + \text{sen}10t$$

Applicando la proprietà 2 e utilizzando le trasformate del gradino e della sinusoide si ottiene:

$$F(s) = \frac{1}{s} + \frac{10}{s^2+100}$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 6**

Si vuole ricavare l'antitrasformata di un segnale che, nel dominio $s$, assume la seguente espressione:

$$F(s) = \frac{1}{s} + \frac{1}{s+5}$$

### Soluzione

L'espressione risulta dalla somma di due termini.

Al primo termine corrisponde un segnale a gradino unitario; al secondo termine corrisponde un esponenziale con coefficiente $a$ negativo (quindi decrescente).

Nel suo complesso l'andamento nel tempo della funzione è quello di un esponenziale decrescente che, essendo traslato di 1 verso l'alto (in quanto sommato al gradino unitario), presenta le seguenti caratteristiche:

- vale 2 al tempo $t = 0$;
- vale 1 a transitorio esaurito.

Dal punto di vista matematico la forma d'onda viene rappresentata dall'espressione:

$$f(t) = 1 + e^{-5t}$$

**ESEMPIO 7**

Si vuole ricavare l'antitrasformata di un segnale che, nel dominio $s$, assume la seguente espressione:

$$F(s) = \frac{2}{s} + \frac{2s}{s^2+100}$$

### Soluzione

L'espressione risulta dalla somma di due termini.

Al primo termine corrisponde un segnale a gradino di ampiezza 2; al secondo termine corrisponde una cosinusoide di valore massimo 2 e pulsazione 10 rad/s.

Nel suo complesso l'andamento nel tempo della funzione è quello di una cosinusoide di ampiezza 2 con valore massimo 4 e valore minimo 0.

Dal punto di vista matematico la forma d'onda viene rappresentata dall'espressione:

$$f(t) = 2 + 2\cos 10t$$

## 5.3 Altre funzioni notevoli

Le funzioni che si incontrano nello studio della teoria dei sistemi non si esauriscono con i segnali di prova e con le funzioni esponenziali e trigonometriche.

Di notevole interesse pratico sono alcune funzioni più complesse che risultano dalle combinazioni di segnali elementari (a rampa, esponenziali e trigonometrici).

Si riportano elencate nella TABELLA **3** le trasformate di alcune di queste funzioni.

| $f(t)$ | $F(s)$ |
|---|---|
| $te^{-at}$ | $\frac{1}{(s+a)^2}$ |
| $\frac{1}{a}(1-e^{-at})$ | $\frac{1}{s(s+a)}$ |
| $\frac{1}{b-a}(e^{-at}-e^{-bt})$ | $\frac{1}{(s+a)(s+b)}$ |
| $\frac{1}{ab}\left(1+\frac{b}{a-b}e^{-at}-\frac{a}{a-b}e^{-bt}\right)$ | $\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$ |
| $\frac{1}{a-b}(ae^{-at}-be^{-bt})$ | $\frac{s}{(s+a)(s+b)}$ |
| $t\,\mathrm{sen}\,\omega t$ | $\frac{2\omega t}{(s^2+\omega^2)^2}$ |
| $t\cos\omega t$ | $\frac{s^2-\omega^2}{(s^2+\omega^2)^2}$ |
| $e^{-at}\mathrm{sen}\,\omega t$ | $\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$ |
| $e^{-at}\cos\omega t$ | $\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$ |

TABELLA **3**
Trasformate di funzioni notevoli.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 8**

Si vuole ricavare la trasformata di un segnale il cui andamento nel tempo viene riprodotto in FIGURA **7** (si imponga $a = 10$).

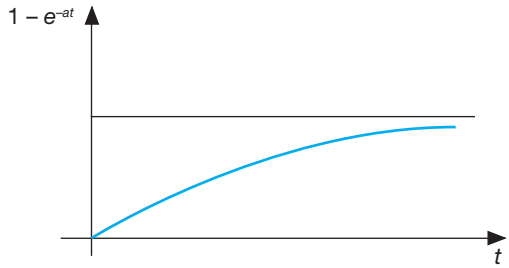



FIGURA **7**
Andamento nel tempo del segnale.

## Soluzione

Dalla tabella delle funzioni notevoli si ricava che:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}\left[\frac{1}{a}(1-e^{-at})\right] = \frac{1}{s(s+a)}$$

Moltiplicando e dividendo per 10 si ottiene quindi:

$$F(s) = 10\,\mathcal{L}\left[\frac{1}{10}(1-e^{-10t})\right] = \frac{10}{s(s+10)}$$

**ESEMPIO 9**

Si vuole ricavare la trasformata di un segnale il cui andamento nel tempo viene riprodotto in FIGURA **10** (si impongano $a = 8$ e $\omega = 6$ rad/s).

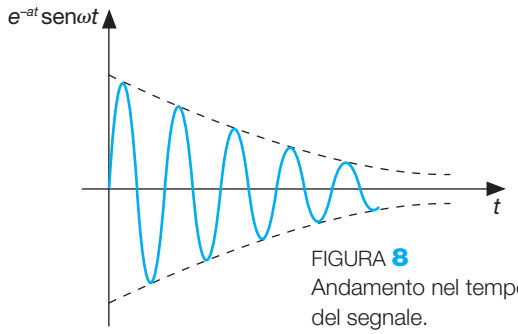



FIGURA **8**
Andamento nel tempo del segnale.

## Soluzione

Dalla tabella delle funzioni notevoli si ricava che:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}\left[e^{-at}\operatorname{sen}\omega t\right] = \frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$$

Moltiplicando e dividendo per 10 si ottiene quindi:

$$F(s) = \frac{6}{(s+8)^2+36} = \frac{6}{s^2+16s+64+36} = \frac{6}{s^2+16s+100}$$

**ESEMPIO 10**

Si richiede di antitrasformare la seguente funzione:

$$F(s) = \frac{s}{s^2+5s+6}$$

## Soluzione

Si risolve il polinomio di secondo grado che si trova al denominatore; le soluzioni sono reali e distinte e valgono rispettivamente –2 e –3; si utilizza pertanto l'antitrasformata

$$F(s) = \frac{s}{(s+a)(s+b)}$$

Sostituendo $a = 2$ e $b = 3$ si ottiene la seguente funzione in $s$:

$$F(s) = \frac{s}{(s+2)(s+3)}$$

e la conseguente funzione in $t$:

$$f(t) = \frac{1}{a-b}(ae^{-at} - be^{-bt}) = 3e^{-3t} - 2e^{-2t}$$

**ESEMPIO 11**

Si richiede di antitrasformare la seguente funzione:

$$F(s) = \frac{10}{s^2+18s+9}$$

## Soluzione

Si risolve il polinomio di secondo grado che si trova al denominatore; le soluzioni, reali e coincidenti, valgono – 3; si può infatti riconoscere nell'espressione al denominatore il quadrato di un binomio; si utilizza pertanto l'antitrasformata

$$F(s) = \frac{1}{(s+a)^2}$$

Sostituendo $a = 3$ si ottiene la funzione in $s$

$$F(s) = \frac{1}{(s+3)^2}$$

e la conseguente funzione in $t$

$$f(t) = te^{-at} = te^{-2t}$$

Moltiplicando infine per il fattore 10 si ottiene l'espressione cercata:

$$f(t) = 10te^{-2t}$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 5.4 Segnali con andamento oscillatorio smorzato

Di particolare interesse pratico sono le funzioni che presentano un andamento oscillatorio smorzato ovvero funzioni trigonometriche modulate da esponenziali decrescenti.

Due modalità di rappresentazione vengono riportate nella TABELLA **4**.

TABELLA **4**
Trasformate di funzioni con soluzioni complesse coniugate.

| *f(t)* | *F(s)* |
|---|---|
| $\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \operatorname{sen}\omega_n t \sqrt{1-\xi^2}$ | $\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}$ |
| $2\sqrt{a^2+b^2}\, e^{ct}\cos(dt+\arctan b/a)$ | $\frac{(a+jb)}{s+(c+jd)}+\frac{(a-jb)}{s+(c-jd)}$ |

**ESEMPIO 12**

Si richiede di antitrasformare la funzione la cui f.d.t. assume la seguente espressione:

$$F(s)=\frac{18}{s^2+3s+9}$$

**Soluzione**

Dal confronto con l'espressione

$$F(s)=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}$$

si deduce immediatamente il valore della pulsazione naturale che è di 3 rad/s.

Per il coefficiente di smorzamento risulta

$$2\xi\omega_n = 3$$

e di conseguenza

$$\xi=\frac{3}{2\omega_n}=\frac{3}{2\cdot 3}=0{,}5$$

Affinchè le due espressioni siano effettivamente confrontabili si deve far assumere alla funzione la forma seguente:

$$F(s)=2\cdot\frac{9}{s^2+3s+9}$$

Utilizzando la tabella delle trasformate si ottiene:

$$f(t)=2\cdot\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t}\operatorname{sen}\omega_n t\sqrt{1-\xi^2}=6{,}9\, e^{-1{,}5t}\operatorname{sen}2{,}6t$$

# 6 Scomposizione in fratti semplici

Le funzioni che si presentano nei casi che sono oggetto di studio sono *funzioni razionali fratte* ovvero funzioni esprimibili come rapporto tra due polinomi di cui quello al numeratore ha un grado non superiore a quello del denominatore.

▶ Il *metodo della scomposizione in fratti semplici* (denominato anche **metodo di Heaviside**) si utilizza per antitrasformare una *funzione razionale fratta* quando sulle tabelle non è presente la funzione richiesta.

Il metodo, che prevede l'utilizzo del *principio di identità dei polinomi*, consiste nello scomporre una funzione complessa in una somma di funzioni più semplici (tante quante sono le soluzioni del polinomio al denominatore tenendo anche conto della loro molteplicità) le cui trasformate si trovano nelle tabelle.

Per spiegare il metodo si procede con alcuni esempi tipici distinguendo i casi in cui il polinomio al denominatore ha soluzioni:

- semplici;


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- multiple;
- complesse coniugate.

## 6.1 Soluzioni semplici

Se le soluzioni sono semplici come per la funzione

$$F(s) = \frac{(s+d)}{(s+a)\,(s+b)\,(s+c)}$$

deve risultare vera la seguente identità:

$$\frac{(s+d)}{(s+a)\,(s+b)\,(s+c)} = \frac{A}{(s+a)} + \frac{B}{(s+b)} + \frac{C}{(s+c)}$$

Applicando il principio di identità dei polinomi si devono ricavare i coefficienti $A$, $B$ e $C$.

**ESEMPIO 13**

Si individui l'andamento nel tempo della funzione che ha come trasformata

$$F(s) = \frac{10}{(s+1)\,(s+2)}$$

L'antitrasformata di questa funzione si può anche ricavare utilizzando direttamente le tabelle a disposizione; scopo dell'esempio è dimostrare che la scomposizione in fratti semplici porta al medesimo risultato.

### Soluzione

Data la presenza di due soluzioni distinte si deve scomporre la funzione in due frazioni; si ottiene:

$$F(s) = \frac{10}{(s+1)\,(s+2)} = \frac{A}{(s+1)} + \frac{B}{(s+2)}$$

Il procedimento consiste nel calcolare i termini incogniti $A$ e $B$ sfruttando il principio di identità dei polinomi.

Con semplici passaggi risulta:

$$F(s) = \frac{10}{(s+1)\,(s+2)} = \frac{(A+B)s + (2A+2B)}{(s+1)\,(s+2)}$$

Eguagliando i termini dello stesso ordine che si trovano al numeratore delle due frazioni si ottiene il sistema:

$$\begin{cases} A+B=0 \\ 2A+2B=0 \end{cases}$$

Risolvendo si ottiene infine $A = 2{,}5$ e $B = -2{,}5$.

Sostituendo si ha:

$$F(s) = \frac{A}{(s+1)} + \frac{B}{(s+2)} = \frac{2{,}5}{(s+1)} - \frac{2{,}5}{(s+2)}$$

Dalle tabelle, essendo:

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+a}\right) = e^{-at}$$

si ottiene l'espressione cercata:

$$f(t) = 2{,}5\,(e^{-t} = e^{-2t})$$

È la stessa espressione che si otterrebbe utilizzando direttamente le tabelle.

## 6.2 Soluzioni multiple

Se le soluzioni sono multiple come per la funzione

$$F(s) = \frac{(s+d)}{(s+a)^2\,(s+b)\,(s+c)}$$

deve risultare vera la seguente identità:

$$\frac{(s+d)}{(s+a)^2\,(s+b)\,(s+c)} = \frac{A}{(s+a)^2} + \frac{B}{(s+a)} + \frac{C}{(s+b)} + \frac{D}{(s+c)}$$

In questo caso si ha una soluzione doppia; di questa se ne deve tenere conto due volte con molteplicità diversa.

Applicando il principio di identità dei polinomi si devono ricavare i coefficienti $A$, $B$, $C$ e $D$.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 14**

Si individui l'andamento nel tempo di una funzione che ha come trasformata

$$F(s)=\frac{s+5}{s(s+1)^2}$$

L'antitrasformata di questa funzione non si può ricavare utilizzando direttamente le tabelle a disposizione; pertanto bisogna utilizzare il metodo della scomposizione in fratti semplici.

### Soluzione

Data la presenza di una soluzione semplice e di una con molteplicità due si deve scomporre la funzione in tre frazioni (si tiene infatti conto della molteplicità della soluzione):

$$F(s)=\frac{s+5}{s(s+1)^2}=\frac{A}{s}+\frac{B}{(s+1)}+\frac{C}{(s+1)^2}$$

Il procedimento consiste nel calcolare i termini incogniti $A$, $B$ e $C$ sfruttando il principio di identità dei polinomi.

Con semplici passaggi risulta:

$$F(s)=\frac{s+5}{s(s+1)^2}=\frac{(A+B)s^2+(2A+B+C)s+A}{s(s+1)^2}$$

Eguagliando i termini dello stesso ordine che si trovano al numeratore delle due frazioni si ottiene il sistema:

$$\begin{cases} A+B=0 \\ 2A+B+C=1 \\ A=5 \end{cases}$$

Risolvendo si ottiene infine $A = 5$, $B = -5$ e $C = -4$.

Sostituendo si ha:

$$F(s)=\frac{A}{s}+\frac{B}{(s+1)}+\frac{C}{(s+1)^2}=\frac{5}{s}-\frac{5}{(s+1)}-\frac{4}{(s+1)^2}$$

Dalle tabelle, essendo

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s}\right)=1(t)$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+a}\right)=e^{-t}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{(s+a)^2}\right)=te^{-kt}$$

si ottiene sostituendo l'espressione cercata:

$$f(t)=5+5e^{-t}-4te^{-t}=5e^{-t}-4te^{-t}$$

## 6.3 Soluzioni complesse coniugate

Se le soluzioni sono complesse coniugate come per la funzione

$$F(s)=\frac{(s+c)}{(s+a+jb)\,(s+a-jb)}$$

deve risultare vera la seguente identità:

$$\frac{(s+c)}{s(s+a+jb)\,(s+a-jb)}=\frac{A}{s}+\frac{B}{(s+a+jb)}+\frac{C}{(s+a-jb)}$$

Applicando il principio di identità dei polinomi si devono ricavare i coefficienti $A$, $B$ e $C$; i coefficienti $B$ e $C$ possono anche essere complessi coniugati.

**ESEMPIO 15**

Si individui l'andamento nel tempo di una funzione che ha come trasformata

$$F(s)=\frac{10}{s^3+s^2+5s}$$

L'antitrasformata di questa funzione non si può ricavare utilizzando direttamente le tabelle a disposizione; pertanto bisogna utilizzare il metodo della scomposizione in fratti semplici.

### Soluzione

Raccogliendo $s$ al denominatore si ottiene:

$$F(s)=\frac{10}{s(s^2+s+5)}$$

Risolvendo l'equazione di secondo grado al denominatore si ottengono due soluzioni complesse coniugate ($-1 \pm j2$); si ha quindi:

$$F(s)=\frac{A}{s}+\frac{B}{s+1+j2}+\frac{C}{s+1-j2}$$

Il procedimento consiste nel calcolare i termini incogniti $A$, $B$ e $C$ sfruttando il principio di identità dei polinomi.

Con semplici passaggi risulta:

$$\frac{10}{s(s^2+s+5)}=$$

$$=\frac{(A+B+C)s^2+(A+B+C+2Bj-2Cj)s+5A}{s(s^2+s+5)}$$

Eguagliando i termini dello stesso ordine che si trovano ▶



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 15**

al numeratore delle due frazioni si ottiene il sistema:

$$\begin{cases} A+B+C=0 \\ A+B+C+2Bj-2Cj=0 \\ 5A=10 \end{cases}$$

Risolvendo si ottiene infine:

- $A = 2$;
- $B = -1$;
- $C = -1$.

Sostituendo si ha:

$$F(s)=\frac{A}{s}+\frac{B}{s+1+j2}+\frac{C}{s+1-j2}=$$

$$=\frac{2}{s}-\left(\frac{1}{s+1+j2}+\frac{1}{s+1-j2}\right)$$

Dalle tabelle, essendo

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s}\right)=1(t)$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+1-j2}+\frac{1}{s+1+j2}\right)=2e^{-t}\cos 2t$$

si ottiene sostituendo l'espressione cercata:

$$f(t)=2-2e^{-t}\cos 2t$$

# 7 Funzione di trasferimento in *s*

Per le applicazioni affrontate nel seguito (*sistemi lineari tempo invarianti a costanti concentrate*) la f.d.t. di un sistema, intesa come rapporto tra uscita $Y(s)$ e ingresso $U(s)$, viene rappresentata da *funzioni razionali fratte* ovvero da rapporti tra due polinomi $N(s)$ e $D(s)$ che si trovano rispettivamente al numeratore e al denominatore della f.d.t. stessa; da qui l'espressione generale:

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{N(s)}{D(s)}$$

▶ Le *radici* del polinomio al numeratore vengono denominate **zeri**, quelle del polinomio al denominatore **poli**.

Le soluzioni possono essere:

- reali (in particolare anche nulle);
- complesse coniugate (hanno la medesima parte reale e parte immaginaria di segno opposto);
- semplici o multiple.

Significativo dal punto di vista pratico è il caso di radici con parte reale negativa.

Zeri e poli possono essere rappresentati sul piano complesso riprodotto in FIGURA **9**.

In genere i poli vengono rappresentati con una crocetta, gli zeri con un cerchio.

In un sistema fisicamente realizzabile il numero degli zeri non supera quello dei poli.

Di interesse pratico sono i casi in cui nella f.d.t. sono presenti poli nulli (si usa anche il termine equivalente *poli nell'origine*) siano essi semplici o multipli.

Legata alla presenza di poli nulli è la seguente classificazione dei sistemi in:

- *sistemi di tipo 0* se non sono presenti poli nulli;
- *sistemi di tipo 1* se è presente un polo nullo;
- *sistemi di tipo 2* se sono presenti due poli nulli.

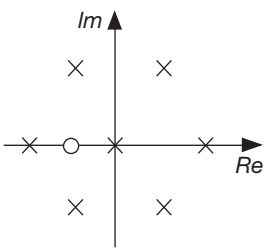



FIGURA **9**
Posizione di zeri e poli sul piano complesso.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

▶ Ponendo $s = 0$ in una f.d.t. si ottiene un valore costante denominato **costante di guadagno**.

La costante di guadagno viene valutata anche in presenza di poli nell'origine assumendo nomi e significati diversi e precisamente:

- *costante di posizione* se non sono presenti poli nulli;
- *costante di velocità* se è presente un polo nullo;
- *costante di accelerazione* se sono presenti due poli nulli.

Si precisa che quando sono presenti poli nulli la costante di guadagno si calcola facendo riferimento alla f.d.t. priva dei poli nulli.

Si dimostra che poli e zeri hanno le dimensioni dell'inverso di una costante di tempo e pertanto si misurano in $s^{-1}$.

**ESEMPIO 16**

Si vuole individuare la f.d.t. di un circuito RC serie riportato in FIGURA **10** assumendo per ipotesi:

– come ingresso $X(s)$ la tensione imposta dal generatore;
– come uscita $Y(s)$ la tensione prelevata ai capi del condensatore (a) e del resistore (b).

Si consideri nulla la tensione ai capi del condensatore nel momento in cui il sistema viene sollecitato (condizioni iniziali nulle).

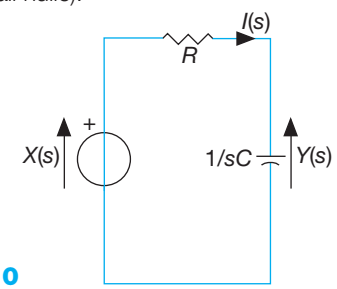



FIGURA **10**
Circuito RC con grandezze espresse nel dominio $s$.

## Soluzione

Per la corrente si ha:

$$I(s) = \frac{X(s)}{R + \frac{1}{sC}}$$

– caso a

La tensione ai capi del condensatore vale:

$$Y(s) = I(s)/sC$$

Sostituendo l'espressione della corrente e con opportuni passaggi si ottiene quanto richiesto:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + sRC}$$

La f.d.t. è caratterizzata dalla presenza di un polo reale semplice di valore negativo.

– caso b

Se la tensione venisse prelevata ai capi del resistore si otterrebbe:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{sRC}{1 + sRC}$$

La f.d.t. è caratterizzata dalla presenza di un polo reale semplice di valore negativo e di uno zero nell'origine.

**ESEMPIO 17**

Si vuole individuare la f.d.t. di un circuito RLC serie assumendo per ipotesi:

– come ingresso $X(s)$ la tensione imposta dal generatore;
– come uscita $Y(s)$ la tensione prelevata ai capi del resistore (a), del condensatore (b) e dell'induttore (c).

Si considerino nulle tensioni e correnti nel momento in cui il sistema viene sollecitato.

## Soluzione

Per la corrente risulta:

$$I(s) = \frac{X(s)}{R + \frac{1}{sC} + sL}$$

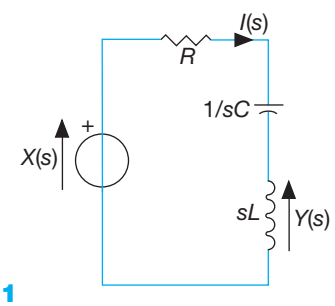



FIGURA **11**
Circuito RLC con grandezze espresse nel dominio $s$.

– caso a

La tensione ai capi del resistore vale:

$$X(s) = R\, I(s)$$

▶



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 17**

Sostituendo l'espressione della corrente e con opportuni passaggi si ottiene quanto richiesto.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{sRC}{1 + sRC + s^2LC}$$

La f.d.t. è caratterizzata dalla presenza di due poli (la cui natura è legata ai valori di resistenza, capacità e induttanza dei tre componenti) e di uno zero nell'origine.

– caso b

Se la tensione venisse prelevata ai capi del condensatore si otterrebbe:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + sRC + s^2LC}$$

In questo caso la f.d.t. è caratterizzata dalla sola presenza dei due poli.

– caso c

Se la tensione venisse prelevata ai capi dell'induttore si otterrebbe:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{(sL)^2}{1 + sRC + s^2LC}$$

La f.d.t. è caratterizzata, oltre che dalla presenza dei soliti due poli, anche da quella di uno zero nell'origine con molteplicità due.

# 8 Forme fattorizzate della f.d.t.

La f.d.t. nella sua forma generale espressa nel dominio della variabile $s$

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$$

può essere espressa in due *forme fattorizzate* con lo scopo di mettere in evidenza poli, zeri, costanti di tempo e costante di guadagno.

La **prima forma fattorizzata** consente di rendere direttamente riconoscibili i valori degli zeri e dei poli.

La sua espressione generale in forma semplificata è la seguente:

$$G(s) = k \cdot \frac{(s - z_1)(s - z_2) \ldots\ldots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \ldots\ldots (s - p_n)}$$

Con $m$ viene indicato il numero degli zeri, con $n$ il numero dei poli, $k$ è una costante di proporzionalità.

Viene messa in evidenza la sola presenza di zeri e poli semplici (nei casi pratici risulta $m < n$).

Per semplicità di trattazione non si evidenzia esplicitamente l'eventuale presenza di zeri e poli nulli o complessi coniugati; neppure si tiene conto della possibile molteplicità di zeri e poli.

La **seconda forma fattorizzata** consente di rendere direttamente riconoscibili i valori delle costanti di tempo corrispondenti a zeri e poli e della costante di guadagno.

La sua espressione generale in forma semplificata è la seguente:

$$G(s) = G_0 \cdot \frac{(1 + s\tau_{z1})(1 + s\tau_{z2}) \ldots\ldots (1 + s\tau_{zm})}{(1 + s\tau_{p1})(1 + s\tau_{p2}) \ldots\ldots (1 + s\tau_{pn})}$$

Con il simbolo $\tau_z$ viene rappresentata la costante di tempo corrispondente a uno zero, con il simbolo $\tau_p$ la costante di tempo corrispondente a un polo; $G_0$ è il guadagno statico.

Poiché zeri e poli sono il reciproco cambiato di segno di una costante di tempo, sostituendo le relazioni



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

$$z = -\frac{1}{\tau_z}$$

$$p = -\frac{1}{\tau_p}$$

si ottiene l'espressione equivalente

$$G(s) = G_0 \cdot \frac{\left(1-\frac{s}{z_1}\right)\left(1-\frac{s}{z_2}\right)\ldots\ldots\left(1-\frac{s}{z_m}\right)}{\left(1-\frac{s}{p_1}\right)\left(1-\frac{s}{p_2}\right)\ldots\ldots\left(1-\frac{s}{p_n}\right)}$$

che esplicita zeri, poli e costante di guadagno.

Il coefficiente $k$, presente nella prima forma, rappresenta un semplice fattore moltiplicativo; ponendo $s = 0$ e moltiplicando per $k$ si ottiene la costante di guadagno $G_0$ che compare nella seconda forma.

Risulta di conseguenza la seguente relazione:

$$G_0 = k \cdot \frac{(-z_1)(-z_2)\ldots\ldots(-z_m)}{(-p_1)(-p_2)\ldots\ldots(-p_n)}$$

**ESEMPIO 18**

Si vogliono rappresentare le due forme fattorizzate corrispondenti a una f.d.t. che presenta le seguenti caratteristiche:

- ha costante di guadagno 2;
- uno zero reale ($z_1 = -1$);
- due poli reali semplici ($p_1 = -2$ e $p_2 = -5$).

### Soluzione

La *prima forma fattorizzata*, sostituendo i valori di poli e zeri, assume la seguente espressione:

$$G(s) = \frac{k(s+1)}{(s+2)(s+5)}$$

Ponendo $s = 0$ si ottiene:

$$F(s) = k/10$$

Per ottenere come costante di guadagno 2 si deve imporre $k = 20$; risulta quindi:

$$G(s) = \frac{20(s+1)}{(s+2)(s+5)}$$

Per rappresentare la *seconda forma fattorizzata* si devono calcolare le costanti di tempo corrispondenti a poli e zeri che valgono rispettivamente:

- 1s (corrispondente allo zero);
- 0,5 s (corrispondente al primo polo);
- 0,2 s (corrispondente al secondo polo).

Sostituendo anche il valore della costante di guadagno risulta in conclusione la seguente espressione:

$$G(s) = \frac{2(1+s)}{(1+s\cdot 0{,}5)(1+s\cdot 0{,}2)}$$

Per esplicitare zeri, poli e costante di guadagno bisogna far assumere alla f.d.t. la forma

$$G(s) = \frac{2(1-s)}{\left(1+\frac{s}{2}\right)\left(1+\frac{s}{5}\right)}$$

**ESEMPIO 19**

Per il sistema con f.d.t.

$$G(s) = \frac{2}{(s+1)(s+2)}$$

si richiede di individuare:

- tipo di sistema;
- tipo di forma fattorizzata;
- costante di guadagno, zeri e poli

### Soluzione

Non essendo presenti poli nulli il sistema viene definito di tipo 0; essendo esplicitati poli e zeri, la forma fattorizzata che esprime la f.d.t. è la prima.

Ponendo $s = 0$ si ottiene la costante di guadagno (guadagno di posizione) che vale 1.

Non ci sono zeri; i poli sono due e valgono rispettivamente –1 e –2.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 20**

Per il sistema con f.d.t.

$$G(s) = \frac{300}{s(1+s\cdot 50)(1+s\cdot 2)}$$

si richiede di individuare:

- tipo di sistema;
- tipo di forma fattorizzata;
- costante di guadagno, zeri e poli.

### Soluzione

Essendo presente un polo nullo il sistema viene definito di tipo 1.

Poiché vengono esplicitate le costanti di tempo la forma fattorizzata che esprime la f.d.t. è la seconda.

La costante di guadagno (guadagno di velocità) vale 300.

Non si evidenzia la presenza di zeri.

I poli sono tre di cui uno nullo.

Gli altri due poli sono reali e distinti; poiché le costanti di tempo valgono 50s e 2s, i poli valgono rispettivamente 0,02 e 0,5.

# 9 Risposta di un sistema alle sollecitazioni

Nota la f.d.t. di un sistema $G(s)$ e la trasformata del segnale d'ingresso $X(s)$, si può ricavare la trasformata del segnale d'uscita $Y(s)$ e di conseguenza il suo andamento nel tempo; risulta infatti:

$$Y(s) = \frac{G(s)}{X(s)}$$

$$Y(s) = G(s)\cdot X(s)$$

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[G(s)\cdot X(s)\right]$$

Particolarmente importanti sono le seguenti tipologie di risposta:

- risposta al gradino unitario;
- risposta all'impulso unitario.

## 9.1 Risposta al gradino unitario

Per la risposta al gradino unitario si ha:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[G(s)\cdot X(s)\right] = \mathcal{L}^{-1}\left[G(s)\cdot \frac{1}{s}\right]$$

**ESEMPIO 21**

Si consideri un circuito RCL serie con l'uscita prelevata dal resistore.

Per i componenti si hanno i valori $R = 10\ \Omega$, $C = 1$ mF ed $L = 0{,}1$ H.

Si individui l'andamento nel tempo del segnale d'uscita in risposta al gradino unitario (in questo caso un gradino di tensione di ampiezza 1 V).

### Soluzione

La f.d.t. del sistema assume la forma seguente:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{sRC}{1+sRC+s^2LC}$$

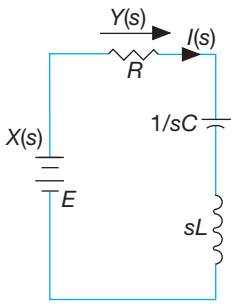



FIGURA **12**
Circuito RLC rappresentato nel dominio $s$.

Essendo $Y(s) = V_R(s)$ e $X(s) = E$, la tensione ai capi del ▶



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 21**

resistore vale pertanto:

$$V_R(s) = \frac{sRC}{s^2LC + sRC + 1} \cdot E = \frac{s}{0{,}0001s^2 + 0{,}01s + 1} \cdot \frac{1}{s}$$

Semplificando l'espressione si ottiene:

$$V_R(s) = \frac{1}{0{,}0001s^2 + 0{,}01s + 1}$$

Dividendo numeratore e denominatore per 0,0001 si ottiene:

$$V_R(s) = \frac{10\,000}{s^2 + 100s + 10\,000}$$

Essendo il discriminante negativo si hanno due poli complessi coniugati; la funzione corrispondente della tabella di trasformate è pertanto la seguente:

$$F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Per confronto tra le due espressioni si ricavano la pulsazione naturale (100 rad/s) e il coefficiente di smorzamento (0,5).

Sostituendo tali valori nella funzione antitrasformata risulta infine:

$$v_R(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \operatorname{sen} \omega_n t \sqrt{1-\xi^2} =$$

$$= 115{,}5\, e^{-50t} \operatorname{sen} 86{,}6t$$

## 9.2 Risposta all'impulso unitario

Per la risposta all'impulso unitario si ha:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}[G(s) \cdot X(s)] = \mathcal{L}^{-1}[G(s) \cdot 1] = \mathcal{L}^{-1}[G(s)]$$

Consegue che la risposta, in questo caso, coincide proprio con la f.d.t. del sistema.

**ESEMPIO 22**

Si consideri un sistema la cui f.d.t. ha la seguente espressione:

$$G(s) = \frac{128}{s^2 + 4s + 64}$$

Si individui l'andamento nel tempo del segnale d'uscita in risposta all'impulso unitario.

### Soluzione

La f.d.t. si può porre nella seguente forma:

$$G(s) = \frac{64 \cdot 2}{s^2 + 8s + 64}$$

In risposta al segnale impulsivo si ha:

$$y(t) = 2 \cdot \mathcal{L}^{-1}[G(s)] = 2 \cdot \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{64}{s^2 + 8s + 64}\right]$$

Essendo il discriminante negativo si hanno due poli complessi coniugati; la funzione corrispondente della tabella di trasformate è pertanto la seguente:

$$F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Per confronto tra le due espressioni si ricavano la pulsazione naturale (8 rad/s) e il coefficiente di smorzamento (0,5).

Sostituendo tali valori nella funzione antitrasformata risulta infine:

$$y(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \operatorname{sen} \omega_n t \sqrt{1-\xi^2} =$$

$$= 9{,}2\, e^{-4t} \operatorname{sen} 6{,}9t$$

# 10 Teoremi del valore iniziale e del valore finale

I teoremi del valore iniziale e del valore finale vengono utilizzati per analizzare il comportamento di un generico segnale d'uscita di un sistema in due momenti particolari:

- nel momento in cui esso viene sollecitato (istante iniziale $0^+$);
- a regime ($t \to +\infty$), quando gli effetti della sollecitazione si sono esauriti.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 10.1 Teorema del valore iniziale

Sia $y(t)$ il generico segnale d'uscita del sistema.

▶ Il *teorema del valore iniziale* si esprime attraverso la relazione seguente:

$$y(0^+) = \lim_{s \to \infty} sY(s)$$

Il vantaggio derivante dall'impiego di questo teorema si ha quando si vuole conoscere il solo comportamento di un segnale d'uscita nell'istante in cui viene applicata la sollecitazione senza antitrasformare la funzione.

**ESEMPIO 23**

Si consideri un sistema la cui f.d.t. è rappresentata dalla seguente espressione:

$$G(s) = \frac{20\,(1 + s \cdot 0{,}1)}{(1 + s)\,(1 + s \cdot 0{,}05)}$$

Si individui il valore che il segnale d'uscita del sistema assume nell'istante in cui il sistema stesso viene sollecitato in risposta a un segnale d'ingresso costituito da un gradino unitario.

### Soluzione

Essendo l'ingresso del sistema un gradino di ampiezza unitaria per l'uscita risulta:

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s)\,\frac{20\,(1 + s \cdot 0{,}1)}{(1 + s)\,(1 + s \cdot 0{,}05)} \cdot \frac{1}{s}$$

Per il *teorema del valore iniziale* si ha:

$$y(0^+) = \lim_{s \to \infty} sY(s) = \lim_{s \to \infty} s\,\frac{20\,(1 + s \cdot 0{,}1)}{(1 + s)\,(1 + s \cdot 0{,}05)} \cdot \frac{1}{s} = 0$$

Il risultato al quale si perviene è evidente in quanto il grado del denominatore è maggiore di quello del numeratore.

## 10.2 Teorema del valore finale

Sia $y(t)$ il generico segnale d'uscita del sistema.

▶ Il *teorema del valore finale* si esprime attraverso la relazione seguente:

$$\lim_{t \to +\infty} f(t) = \lim_{s \to 0} sF(s)$$

Il vantaggio derivante dall'impiego di questo teorema si ha quando si vuole conoscere il solo comportamento del sistema a regime senza antitrasformare la funzione.

**ESEMPIO 24**

Si consideri un sistema la cui f.d.t. è rappresentata dalla seguente espressione:

$$G(s) = \frac{20\,(1 + s \cdot 0{,}1)}{(1 + s)\,(1 + s \cdot 0{,}05)}$$

Si individui il valore che il segnale d'uscita del sistema assume in condizioni di regime in risposta a una sollecitazione d'ingresso costituita da un gradino unitario.

### Soluzione

Essendo l'ingresso del sistema un gradino di ampiezza unitaria per l'uscita risulta:

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s)\,\frac{20\,(1 + s \cdot 0{,}1)}{(1 + s)\,(1 + s \cdot 0{,}05)} \cdot \frac{1}{s}$$

Per il *teorema del valore finale* si ha:

$$\lim_{t \to +\infty} y(t) = \lim_{s \to 0} sY(s) = \lim_{s \to 0} s\,\frac{20\,(1 + s \cdot 0{,}1)}{(1 + s)\,(1 + s \cdot 0{,}05)} \cdot \frac{1}{s} = 20$$

Il risultato al quale si perviene era atteso in quanto in questo caso, visto che la f.d.t. è espressa nella forma fattorizzata che evidenzia la costante di guadagno, il valore della risposta a regime doveva coincidere con la costante di guadagno.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 11 Considerazioni sulla stabilità di un sistema

▶ La stabilità di un sistema lineare tempo invariante a costanti concentrate dipende dalla posizione dei poli della f.d.t. nel piano complesso.

Per la coincidenza della f.d.t. con l'uscita del sistema, è evidente come dalla risposta all'impulso si possano ottenere informazioni sulla stabilità del sistema stesso.

Si consideri in proposito la FIGURA **13** nella quale vengono rappresentate le principali tipologie di risposta di un sistema al segnale impulsivo.

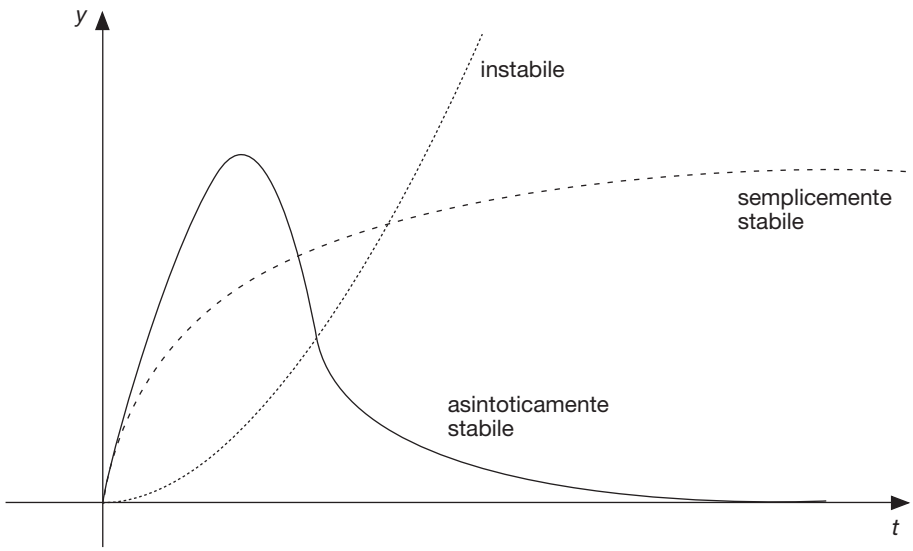



FIGURA **13**
Tipologie di risposta all'impulso.

Si possono verificare i seguenti casi:

- il sistema è **asintoticamente stabile** se l'uscita converge al valore iniziale supposto nullo;
- il sistema è **semplicemente stabile** se l'uscita non converge al valore iniziale ma nemmeno diverge (tende a infinito);
- il sistema è **instabile** se l'uscita diverge.

È evidente che:

- la condizione *asintoticamente stabile* è più restrittiva della condizione *semplicemente stabile*;
- un sistema asintoticamente stabile è anche semplicemente stabile.

Tra posizione dei poli del sistema sul piano complesso e stabilità sussistono le seguenti importanti relazioni:

- affinché un sistema risulti **semplicemente stabile** è necessario e sufficiente che la f.d.t. non presenti alcun polo a parte reale positiva e che gli eventuali poli a parte reale nulla siano semplici;
- affinché un sistema risulti **asintoticamente stabile** è necessario e sufficiente che tutti i poli abbiano parte reale negativa.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 11.1 Applicazioni

In FIGURA **14** vengono riportati alcuni esempi significativi di disposizione di poli sul piano complesso.

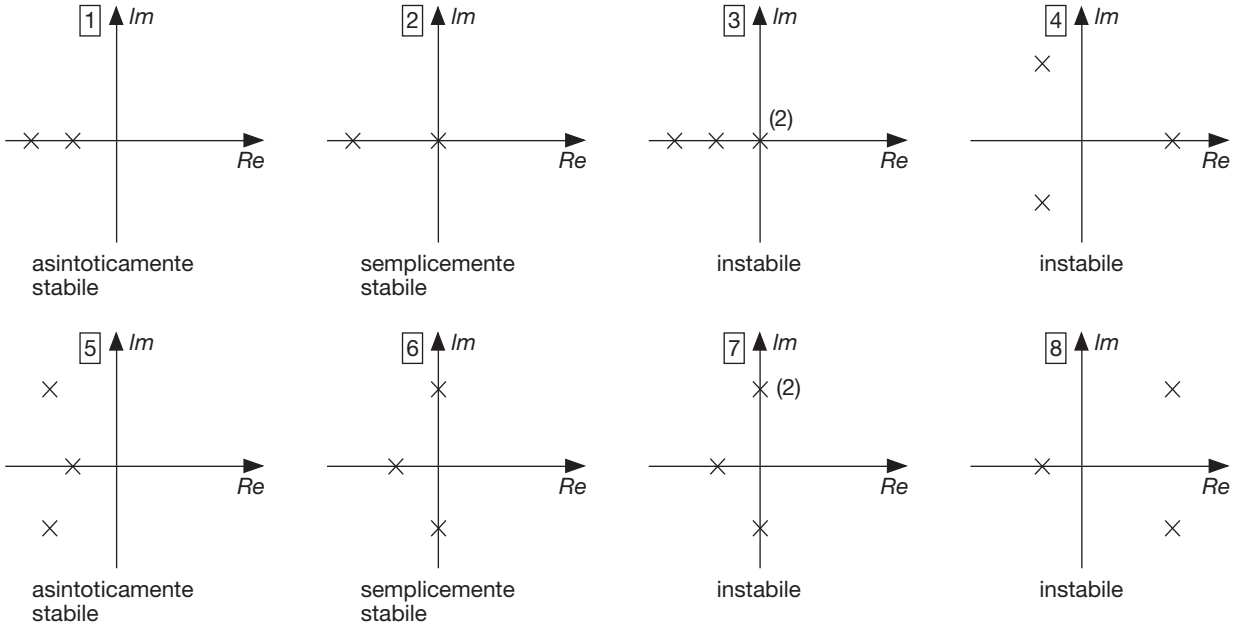



FIGURA **14**
Stabilità di un sistema in relazione alla posizione dei poli sul piano complesso.

Analizzando la figura si traggono le seguenti conclusioni:

- il sistema 1 è asintoticamente stabile perché tutti i suoi poli hanno parte reale negativa;
- il sistema 2 è semplicemente stabile perché, oltre al polo con parte reale negativa, è presente un polo nell'origine;
- il sistema 3 è instabile per la presenza di due poli nulli coincidenti;
- il sistema 4 è instabile per la presenza di un polo con parte reale positiva;
- il sistema 5 è asintoticamente stabile perché tutti i poli hanno parte reale negativa;
- il sistema 6 è semplicemente stabile perché, oltre al polo con parte reale negativa, è presente una coppia di poli complessi coniugati a parte reale nulla;
- il sistema 7 è instabile per la presenza di una coppia di poli complessi coniugati a parte reale nulla con molteplicità due;
- il sistema 8 è instabile per la presenza di una coppia di poli complessi coniugati con parte reale positiva.

## 11.2 Modi di risposta

Strettamente correlate alle considerazioni relative alla posizione dei poli sul piano complesso sono le diverse tipologie di risposta che derivano dall'applicazione di un segnale impulsivo ovvero i *modi di risposta*.

Si distinguono i seguenti casi:

- *poli semplici di molteplicità uno*;
- *poli semplici di molteplicità due*;
- *poli complessi coniugati di molteplicità uno*;
- *poli complessi coniugati di molteplicità due*.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Poli semplici di molteplicità uno

Come evidenziato in FIGURA **15**, si verifica che la risposta:

- tende a zero se il polo è reale negativo;
- rimane limitata se il polo è nell'origine;
- diverge se il polo è reale positivo.

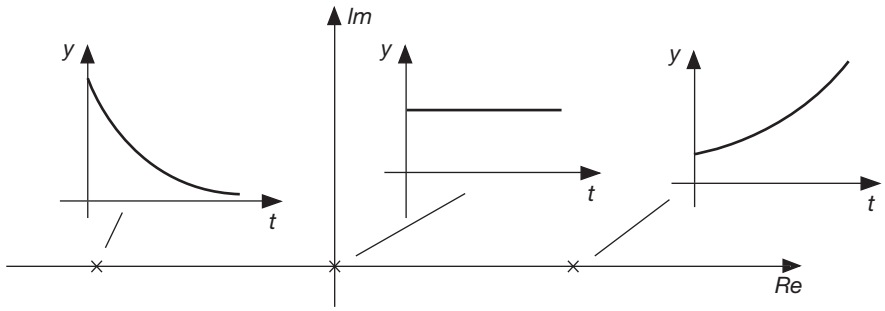



FIGURA **15**
Modi di risposta in caso di poli semplici di molteplicità uno.

### Poli semplici di molteplicità due

Come evidenziato in FIGURA **16**, si verifica che la risposta:

- tende a zero se i poli sono reali negativi;
- diverge se i poli sono nell'origine;
- diverge se i poli sono reali positivi.

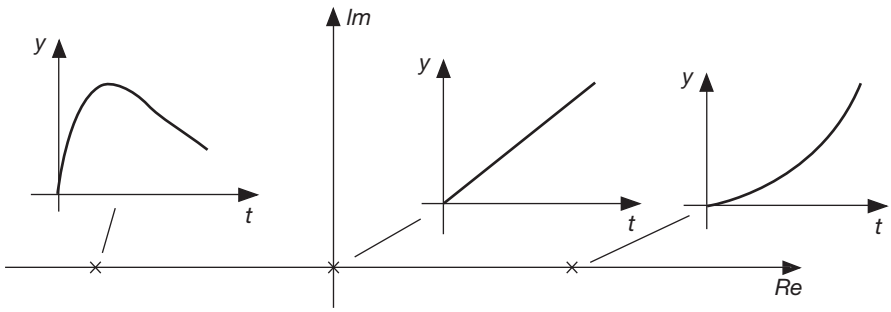



FIGURA **16**
Modi di risposta in caso di poli semplici di molteplicità due.

### Poli complessi coniugati di molteplicità uno

Come evidenziato in FIGURA **17**, si verifica che la risposta:

- tende a zero se i poli sono a parte reale negativa;
- rimane limitata se i poli sono a parte reale nulla;
- diverge se i poli sono a parte reale positiva.

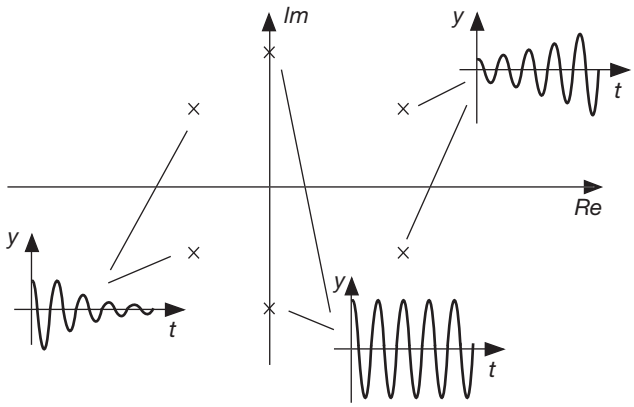



FIGURA **17**
Modi di risposta in caso di poli complessi coniugati di molteplicità uno.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Poli complessi coniugati di molteplicità due

Come evidenziato in FIGURA **18**, si verifica che la risposta:

- tende a zero se i poli sono a parte reale negativa;
- diverge se i poli sono a parte reale nulla;
- diverge se i poli sono a parte reale positiva.

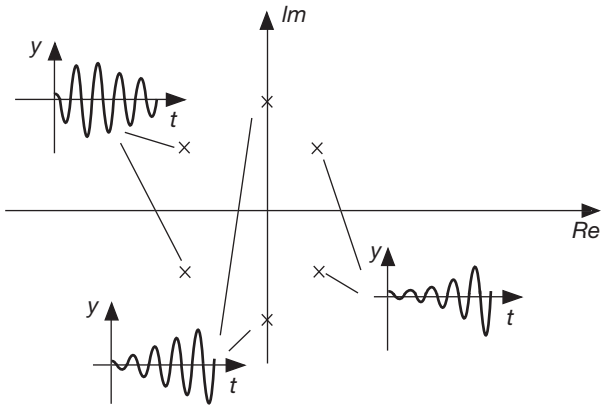



FIGURA **18**
Modi di risposta in caso di poli complessi coniugati di molteplicità due.

## 11.3 Poli complessi coniugati

Le funzioni che hanno poli complessi coniugati hanno un andamento di tipo oscillatorio caratterizzato da due parametri fondamentali che sono la pulsazione naturale e il coefficiente di smorzamento.

In FIGURA **19** vengono rappresentati sul piano complesso due poli complessi coniugati con parte reale $a$ e parte immaginaria $b$.

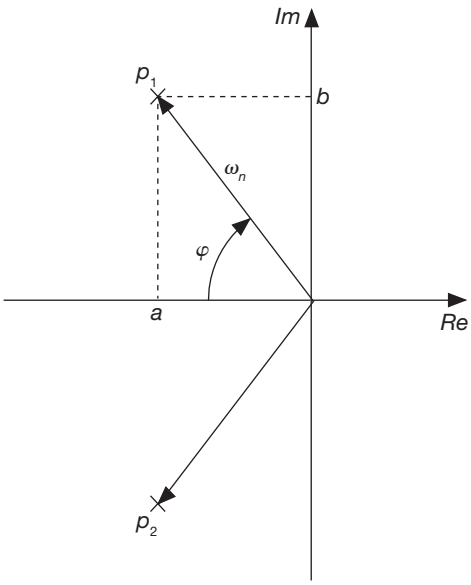



FIGURA **19**
Poli complessi coniugati sul piano immaginario.

I poli possono quindi essere rappresentati nel modo seguente:

$$p_1 = a + jb$$
$$p_2 = a - jb$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Pulsazione naturale e coefficiente di smorzamento sono legati a parte reale e a parte immaginaria dalle seguenti relazioni:

$$\omega_n = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\xi = \cos\varphi = -\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

**ESEMPIO 25**

Si analizzi la stabilità del sistema la cui f.d.t. assume l'espressione seguente:

$$G(s) = \frac{10}{s^2 + 2s + 2}$$

## Soluzione

Risolvendo il polinomio che si trova al denominatore si individuano due poli complessi coniugati; essi valgono rispettivamente:

- $p_1 = -1 + j$;
- $p_2 = -1 - j$.

Avendo i due poli parte reale negativa il sistema risulta asintoticamente stabile.

**ESEMPIO 26**

Si analizzi la stabilità del sistema la cui f.d.t. assume l'espressione seguente:

$$G(s) = \frac{5}{s(s^2 + 4s + 3)}$$

## Soluzione

Risolvendo il polinomio che si trova al denominatore si individuano:

- due poli reali e distinti che valgono rispettivamente $p_1 = -1$ e $p_2 = -3$;
- un polo nell'origine.

Avendo i due poli parte reale negativa ed essendo semplice il polo nell'origine il sistema risulta semplicemente stabile.

**ESEMPIO 27**

Si analizzi la stabilità del sistema la cui f.d.t. assume l'espressione seguente:

$$G(s) = \frac{10}{s^2 - 1}$$

## Soluzione

Risolvendo il polinomio che si trova al denominatore si individuano:

- un polo a parte reale negativa $p_1 = -1$;
- un polo a parte reale positiva $p_2 = +1$.

La presenza di un polo a parte reale positiva conferisce instabilità al sistema.

**ESEMPIO 28**

Si analizzi la stabilità del sistema retroazionato le cui caratteristiche vengono evidenziate nello schema a blocchi di FIGURA **20**.

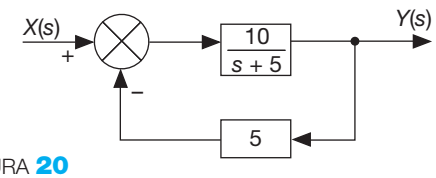



FIGURA **20**
Schema a blocchi del sistema.

Commentare i risultati che si ottengono retroazionando il sistema facendo riferimento alla costante di tempo e a quella di guadagno.

## Soluzione

Dallo schema a blocchi del sistema retroazionato si deduce l'espressione della f.d.t.:

$$G(s) = \frac{A}{1 + AB} = \frac{\frac{10}{s+5}}{1 + \frac{50}{s+5}} = \frac{10}{s + 55}$$

Il sistema non retroazionato ha costante di guadagno 2 e costante di tempo data dalla relazione:

$$\tau_p = -\frac{1}{p} = \frac{1}{5} = 0{,}2s$$

Chiuso in retroazione il sistema ha costante di guadagno 0,18 e costante di tempo data dalla relazione:

$$\tau_p = -\frac{1}{p} = \frac{1}{55} = 0{,}18s$$

Si deduce che la retroazione ha portato a una diminuzione sia della costante di guadagno sia di quella di tempo.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## ESERCIZIO 1

Si vogliono individuare le f.d.t. di un sistema elettrico costituito dal circuito RL serie riportato in FIGURA **21** assumendo:

- come ingresso $V(s)$ la tensione imposta dal generatore e come uscita la tensione prelevata ai capi dell'induttore $V_L(s)$ (caso a);
- come ingresso $V(s)$ la tensione imposta dal generatore e come uscita la tensione prelevata ai capi del resistore $V_R(s)$ (caso b).

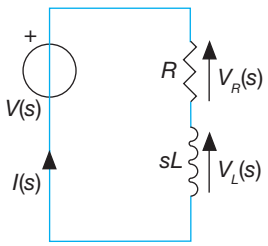



FIGURA **21**
Circuito RL.

### Soluzione

Per la corrente si ha:

$$I(s) = \frac{V(s)}{R + sL}$$

– caso a

La tensione ai capi della bobina vale:

$$V_L(s) = s\,LI(s)$$

Sostituendo l'espressione della corrente e con opportuni passaggi si ottiene quanto richiesto:

$$\frac{V_L(s)}{V(s)} = \frac{sL}{R + sL}$$

La f.d.t. è caratterizzata dalla presenza di un polo a parte reale negativa e di uno zero nell'origine.

– caso b

Se la tensione venisse prelevata ai capi della resistenza si otterrebbe:

$$\frac{V_R(s)}{V(s)} = \frac{R}{R + sL}$$

La f.d.t. è caratterizzata dalla presenza di un solo polo a parte reale negativa.

## ESERCIZIO 2

Si vuole individuare la f.d.t. del sistema elettrico costituito dal circuito riportato in FIGURA **22** assumendo come uscita e come ingresso quelli evidenziati nella figura stessa.

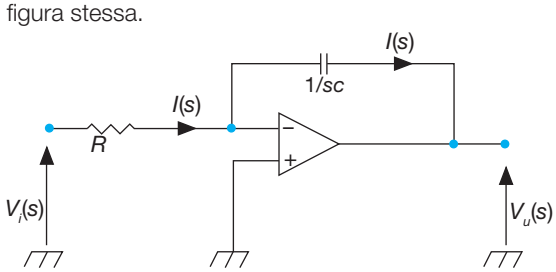



FIGURA **22**
Schema elettrico del circuito.

### Soluzione

Adottando le normali ipotesi semplificative tipiche dei circuiti con operazionali risulta:

$$V_u(s) = -\frac{1}{sC} I(s)$$

per la maglia d'uscita e

$$V_i(s) = R\,I(s)$$

per la maglia d'ingresso.

La f.d.t. del sistema assume pertanto la seguente espressione:

$$G(s) = \frac{V_U(s)}{V_I(s)} = -\frac{\frac{1}{sC} I(s)}{R\,I(s)} = \frac{\frac{1}{sC}}{R} = \frac{1}{sRC}$$

## ESERCIZIO 3

Si vuole antitrasformare la seguente funzione:

$$F(s) = \frac{10}{s^2 + 5s + 6}$$

### Soluzione

Si risolve il polinomio di secondo grado che si trova al denominatore; le soluzioni sono reali e distinte e valgono rispettivamente –2 e –3; si utilizza pertanto l'antitrasformata

$$F(s) = \frac{1}{(s + a)(s + b)}$$

Sostituendo $a = 2$ e $b = 3$ si ottiene la seguente funzione in $s$:

$$F(s) = \frac{10}{(s + 2)(s + 3)}$$

e la conseguente funzione in $t$:

$$f(t) = \frac{1}{b - a}(e^{-at} - e^{-bt}) = e^{-2t} - e^{-3t}$$

Moltiplicando infine per il fattore 10 si ottiene l'espressione cercata:

$$f(t) = 10(e^{-2t} - e^{-3t})$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## ESERCIZIO 4

Si individui tipo di sistema, tipo di forma fattorizzata, costante di guadagno, zeri e poli per il sistema con f.d.t.

$$G(s)=\frac{(s+0{,}1)}{(s+1)(s+0{,}05)}$$

### Soluzione

Non essendo presenti poli nulli il sistema può essere definito di tipo 0.

Essendo esplicitati poli e zeri la forma fattorizzata che esprime la f.d.t. è la prima.

Ponendo $s = 0$ si ottiene la costante di guadagno (guadagno di posizione):

$$G_0=\frac{(s+0{,}1)}{(s+1)(s+0{,}05)}=\frac{0{,}1}{1\cdot 0{,}05}=2$$

Risultano infine presenti:

- uno zero che vale –0,1;
- due poli reali e distinti che valgono rispettivamente –1 e –0,05.

## ESERCIZIO 5

Si individui tipo di sistema, tipo di forma fattorizzata, costante di guadagno, zeri e poli per il sistema con f.d.t.

$$G(s)=\frac{10}{(1+s\cdot 0{,}01)(1+s\cdot 0{,}1)}$$

### Soluzione

Non essendo presenti poli nulli il sistema può essere definito di tipo 0.

Essendo esplicitate le costanti di tempo la forma fattorizzata che esprime la f.d.t. è la seconda.

La funzione evidenzia direttamente il guadagno statico che vale 10.

Poiché le costanti di tempo valgono 0,01$s$ e 0,1$s$, i due poli reali e distinti assumono rispettivamente i valori –10 e –100.

## ESERCIZIO 6

Si analizzi la stabilità del sistema con f.d.t.

$$G(s)=\frac{5}{s^2(s^2+2s+2)}$$

### Soluzione

Risolvendo il polinomio che si trova al denominatore si individuano due poli reali e distinti che valgono rispettivamente $p_1 = -1 + j$ e $p_2 = -1 - j$ e un polo nell'origine con molteplicità 2.

Il sistema risulta instabile proprio per la presenza di un polo nell'origine con molteplicità 2.

## ESERCIZIO 7

Si analizzi la stabilità del sistema con f.d.t.

$$G(s)=\frac{5}{(s^2+4s+3)}$$

### Soluzione

Risolvendo il polinomio che si trova al denominatore si individuano due poli reali e distinti che valgono rispettivamente $p_1 = -1$ e $p_2 = -3$.

Essendo presenti soltanto poli con parte reale negativa il sistema risulta asintoticamente stabile.

## ESERCIZIO 8

Si analizzi la stabilità del sistema retroazionato le cui caratteristiche vengono evidenziate nello schema a blocchi di FIGURA **23**.

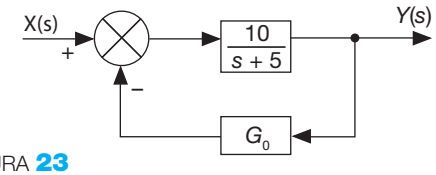



FIGURA **23**
Schema a blocchi del sistema.

Si vuole stabilire il valore che si deve assegnare alla costante di guadagno del blocco di retroazione in modo tale da ridurre alla metà la costante di guadagno del sistema; in queste condizioni si richiede il calcolo della costante di tempo del sistema.

### Soluzione

Dallo schema a blocchi del sistema retroazionato si deduce l'espressione della f.d.t.:

$$G(s)=\frac{A}{1+AB}=\frac{\frac{10}{s+5}}{1+\frac{10G_0}{s+5}}=\frac{10}{s+5+10G_0}$$

Il sistema non retroazionato ha costante di guadagno 2.

Chiuso in retroazione il sistema ha costante di guadagno che dipende dalla costante di guadagno del blocco di retroazione.

Per ottenere una costante di guadagno del sistema retroazionato pari a 1 deve risultare:

$$\frac{10}{5+10G_0}=1$$

Con facili calcoli si ottiene per la costante di guadagno del blocco di retroazione un valore pari a 0,5.

In queste condizioni la costante di tempo vale:

$$\tau_p=-\frac{1}{p}=\frac{1}{10}=0{,}1s$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**1** **Si rappresenti nel dominio della variabile *s* la legge di Ohm generalizzata relativa al circuito riprodotto in** FIGURA **24** **al quale viene applicato un generico segnale di tensione.**

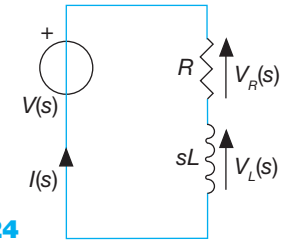



FIGURA **24**

**2** **Si rappresenti nel dominio della variabile *s* la legge di Ohm generalizzata relativa al circuito riprodotto in** FIGURA **25** **al quale viene applicato un generico segnale di tensione.**

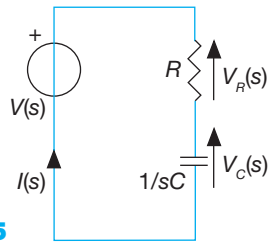



FIGURA **25**

**3** **Si rappresenti nel dominio della variabile *s* la relazione che la tensione di uscita e la tensione d'ingresso del circuito riprodotto in** FIGURA **26**.

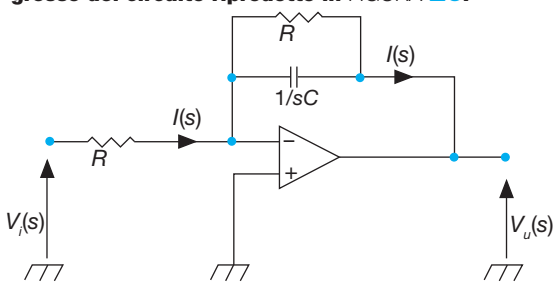



FIGURA **26**

**4** **Si individui la trasformata della seguente funzione:**

$$f(t) = 0{,}2(1 - e^{-2t})$$

**Considerando poi la *f*(*t*) come uscita di un sistema si calcoli *f*(*o*) utilizzando il teorema del valore iniziale.**

**5** **Si individui la trasformata della seguente funzione:**

$$f(t) = e^{-3t} - e^{-t}$$

**Considerando poi la *f*(*t*) come uscita di un sistema si calcoli *f*(*o*) utilizzando il teorema del valore iniziale.**

**6** **Si individui la trasformata della seguente funzione:**

$$f(t) = 2(1 + 2e^{-3t} - 3e^{-2t})$$

**Considerando poi la *f*(*t*) come uscita di un sistema si calcoli *f*(*o*) utilizzando il teorema del valore iniziale.**

**7** **La forma d'onda d'uscita di un sistema viene rappresentata dall'espressione:**

$$y(t) = 2(2e^{-2t} - 3e^{-3t})$$

**Si utilizzi il teorema del valore iniziale per determinare il valore che l'uscita assume al tempo *t* = 0 e il teorema del valore finale per calcolare il valore di regime.**

**8** **La forma d'onda d'uscita di un sistema viene rappresentata dall'espressione**

$$y(t) = 10 + \text{sen}628t$$

**Si utilizzi il teorema del valore finale per determinare il valore che l'uscita assume a transitorio esaurito e il teorema del valore finale per calcolare il valore di regime.**

**9** **Si individui l'antitrasformata della seguente funzione:**

$$F(s) = \frac{5}{s(2s+5)}$$

**10** **Si individui l'antitrasformata della seguente funzione:**

$$F(s) = \frac{1}{(2s+1)(3s+2)}$$

**11** **Si individui l'antitrasformata della seguente funzione:**

$$F(s) = \frac{1}{s^2+8s+8}$$

**12** **La forma d'onda d'uscita di un sistema viene rappresentata dall'espressione:**

$$F(s) = \frac{5}{s} + \frac{5}{s^2+2s+1}$$

**Si utilizzi il teorema del valore iniziale per determinare il valore che l'uscita assume al tempo *t* = 0.**

**13** **La forma d'onda d'uscita di un sistema viene rappresentata dall'espressione**

$$F(s) = \frac{10}{s} + \frac{50}{s^2+100}$$

**Si utilizzi il teorema del valore finale per determinare il valore che l'uscita assume a transitorio esaurito.**

**14** **Si rappresentino sul piano complesso poli e zeri relativi a un sistema rappresentato dalla f.d.t. che ha la seguente espressione:**

$$F(s) = \frac{5}{s(2s+10)}$$

**15** **Si rappresentino sul piano complesso poli e zeri relativi a un sistema rappresentato dalla f.d.t. che ha la seguente espressione:**

$$F(s) = \frac{s+1}{(2s+4)(3s-6)}$$

**16** **Si rappresentino sul piano complesso poli e zeri relativi a un sistema rappresentato dalla f.d.t. che ha la seguente espressione:**

$$F(s) = \frac{s+1}{s^2+2s+1}$$

**17** **Si rappresentino sul piano complesso poli e zeri relativi a un sistema rappresentato dalla f.d.t. che ha la seguente espressione:**

$$F(s) = \frac{s+1}{s^2+2s}$$

**18** **Si rappresentino sul piano complesso poli e zeri relativi a un sistema rappresentato dalla f.d.t. che ha la seguente espressione:**

$$F(s) = \frac{s+1}{s^3+2s^2+s}$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# DOMANDE a risposta aperta

**1** **Completare lo schema riportato in** FIGURA **27** **inserendo in modo opportuno gli elementi mancanti (i nomi dei segnali abbinati ai grafici o i grafici abbinati ai nomi dei segnali).**

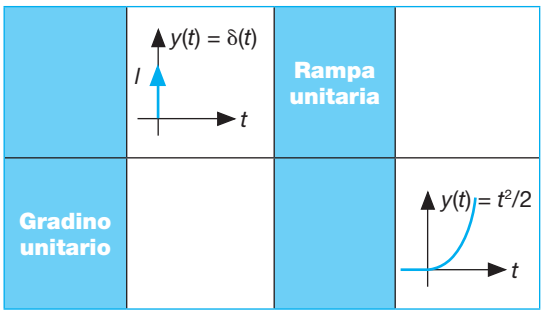



FIGURA **27**

**2** **Completare lo schema riportato in** FIGURA **28** **inserendo in modo opportuno all'interno del blocco gli elementi mancanti (il tipo di problema e di soluzione corrispondente).**

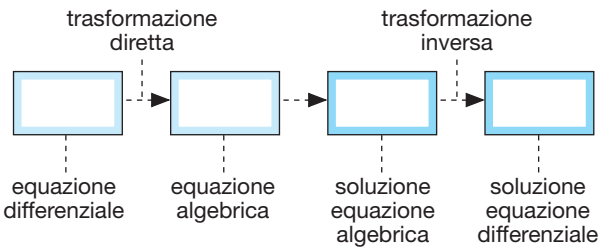



FIGURA **28**

**3** **Completare lo schema riportato in** FIGURA **29** **inserendo in modo opportuno all'interno del blocco gli elementi mancanti (il tipo di dominio corrispondente).**

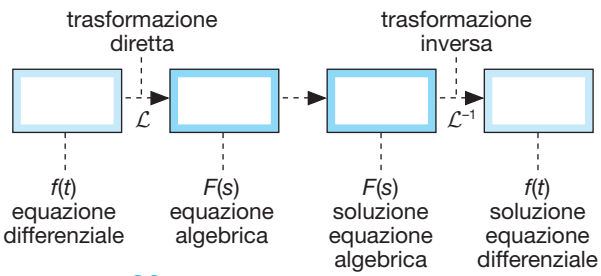



FIGURA **29**

**4** **Stabilire se il l'andamento nel tempo della risposta di un sistema riprodotto in** FIGURA **30** **è tipico di un sistema semplicemente stabile, asintoticamente stabile o instabile.**

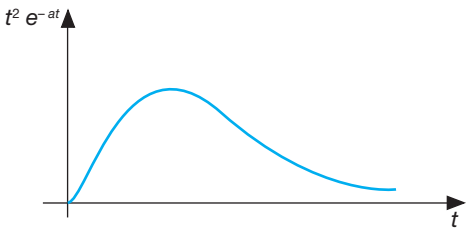



FIGURA **30**

**5** **Stabilire se l'andamento nel tempo della risposta di un sistema riprodotto in** FIGURA **31** **è tipico di un sistema semplicemente stabile, asintoticamente stabile o instabile.**

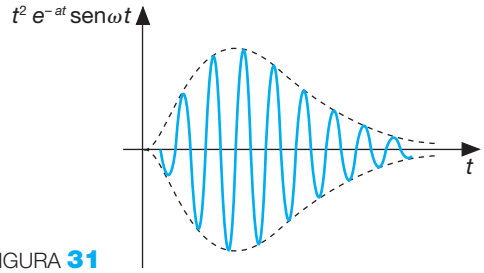



FIGURA **31**

**6** **Individuare il componente al quale far corrispondere la seguente relazione:**

$$v(s) = \frac{1}{K} \cdot sF(s)$$

**7** **Individuare il componente al quale far corrispondere la seguente relazione:**

$$p(s) = I_L \cdot s\, Q(s)$$

**8** **Individuare il componente al quale far corrispondere la seguente relazione:**

$$Q(s) = C_T \cdot s\, \theta(s)$$

**9** **Individuare le caratteristiche delle seguenti espressioni:**

$$G(s) = k \cdot \frac{(s - z_1)(s - z_2) \ldots\ldots (s - z_m)}{(s - p_1)(s - p_2) \ldots\ldots (s - p_n)}$$

$$G(s) = G_0 \cdot \frac{(1 + s\tau_{z1})(1 + s\tau_{z2}) \ldots\ldots (1 + s\tau_{zm})}{(1 + s\tau_{p1})(1 + s\tau_{p2}) \ldots\ldots (1 + s\tau_{pn})}$$

**10** **Spiegare l'utilizzo pratico dei teoremi del valore iniziale e finale.**

**11** **Analizzare la stabilità del sistema i cui poli sono disposti sul piano complesso come nella rappresentazione di** FIGURA **32**.

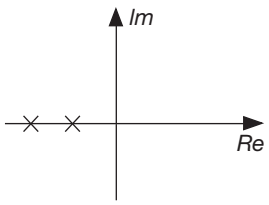



FIGURA **32**

**12** **Analizzare la stabilità del sistema i cui poli sono disposti sul piano complesso come nella rappresentazione di** FIGURA **33**.

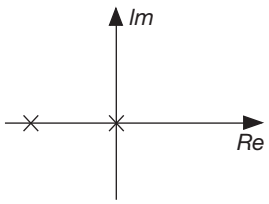



FIGURA **33**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**13** **Analizzare la stabilità del sistema i cui poli sono disposti sul piano complesso come nella rappresentazione di** FIGURA **34**.

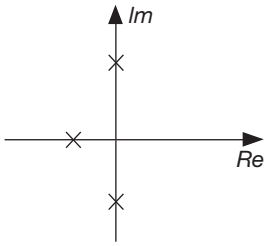



FIGURA **34**

**14** **Analizzare la stabilità del sistema i cui poli sono disposti sul piano complesso come nella rappresentazione di** FIGURA **35**.

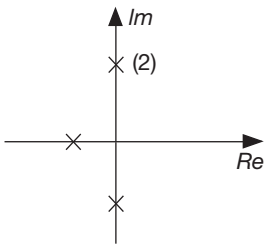



FIGURA **35**

**15** **Relativamente alla tipologia di risposta all'impulso di un sistema correggere gli errori che si riscontrano nella** FIGURA **36**.

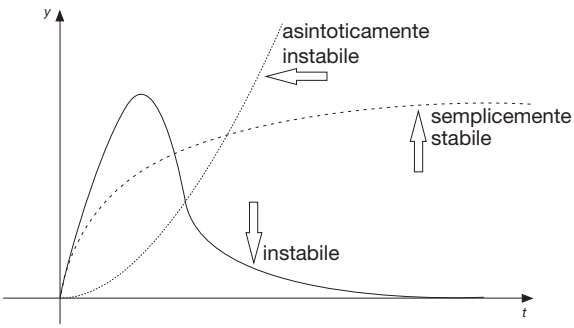



FIGURA **36**

**16** **Completare la tabella riportata in** FIGURA **37** **inserendo la trasformata corrispondente alla funzione.**

| *f*(*t*) | *F*(*s*) |
|---|---|
| $\delta(t)$, *impulso unitario* | |
| $u(t)$, *gradino unitario* | |
| $t$, *rampa unitaria* | |
| $t^2/2$, *parabola unitaria* | |

FIGURA **37**

**17** **Completare la tabella riportata in** FIGURA **38** **inserendo la funzione corrispondente alla trasformata.**

| *f*(*t*) | *F*(*s*) |
|---|---|
| | $\dfrac{1}{(s-a)}$ |
| | $\dfrac{\omega}{s^2+\omega^2}$ |
| | $\dfrac{s}{s^2+\omega^2}$ |

FIGURA **38**

**18** **In relazione ai modi di risposta all'impulso riprodotti in** FIGURA **39** **individuare la posizione dei poli sul piano complesso e la loro molteplicità.**

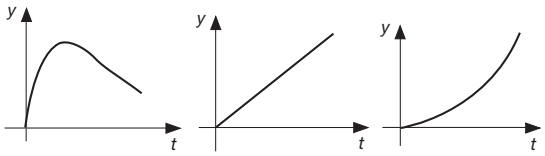



FIGURA **39**

## DOMANDE a risposta multipla

**1** **Il grafico della funzione di prova riprodotto in** FIGURA **40** **rappresenta:**

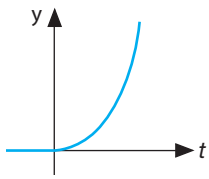



FIGURA **40**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria

**2** **Il grafico della funzione di prova riprodotto in** FIGURA **41** **rappresenta:**

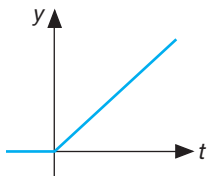



FIGURA **41**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**3** **Il grafico della funzione di prova riprodotto in** FIGURA **42** **rappresenta:**

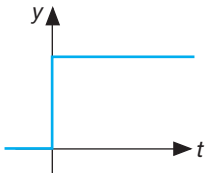



FIGURA **42**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria

**4** **Il grafico della funzione di prova riprodotto in** FIGURA **43** **rappresenta:**

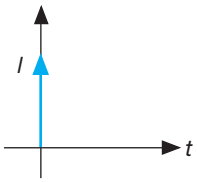



FIGURA **43**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria

**5** **La funzione $F(s) = 1/s$ rappresenta la trasformata di Laplace di:**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria

**6** **La funzione $F(s) = 1/s^2$ rappresenta la trasformata di Laplace di:**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria

**7** **La funzione $F(s) = 1$ rappresenta la trasformata di Laplace di:**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria

**8** **La funzione $F(s) = 1/s^3$ rappresenta la trasformata di Laplace di:**

A una parabola unitaria

B un impulso unitario

C un gradino unitario

D una rampa unitaria

**9** **Il modo di risposta all'impulso riprodotto in** FIGURA **44** **è tipico di un sistema caratterizzato dalla presenza di:**

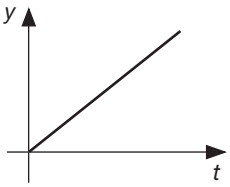



FIGURA **44**

A poli complessi coniugati nell'origine di molteplicità uno

B poli complessi coniugati nell'origine di molteplicità due

C poli semplici nell'origine di molteplicità uno

D poli semplici nell'origine di molteplicità due

**10** **Il modo di risposta all'impulso riprodotto in** FIGURA **45** **è tipico di un sistema caratterizzato dalla presenza di:**

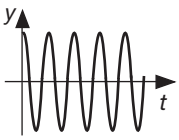



FIGURA **45**

A poli complessi coniugati nell'origine di molteplicità uno

B poli complessi coniugati nell'origine di molteplicità due

C poli semplici nell'origine di molteplicità uno

D poli semplici nell'origine di molteplicità due

**11** **Per rappresentare analiticamente un impulso unitario si utilizza l'espressione:**

A $\delta(t)$

B $t$

C $u(t)$

D $t^2/2$

**12** **Per rappresentare analiticamente un gradino unitario si utilizza l'espressione:**

A $\delta(t)$

B $t$

C $t^2/2$

D $u(t)$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# Risposta nel dominio della frequenza

# 2

## 1 Concetti introduttivi

Si considerino sistemi continui e lineari.

▶ Con il termine **risposta nel dominio della frequenza** si intende la *risposta a regime* di un sistema a seguito dell'applicazione di un segnale di prova costituito da una *sinusoide di ampiezza costante e frequenza variabile da zero a infinito.*

Questo metodo di indagine è interessante perché consente di determinare la risposta del sistema stesso a un *segnale periodico* di diversa natura.

▶ Il **teorema di Fourier** afferma infatti che un generico segnale periodico è scomponibile nella somma di una serie di sinusoidi (*armoniche*) di ampiezza e fase opportune.

La prima armonica (*armonica fondamentale*) ha la stessa frequenza del segnale da scomporre; le armoniche successive hanno frequenze multiple della fondamentale; per identificare a esempio un'armonica con frequenza tre volte superiore alla fondamentale si utilizza il termine *armonica di ordine 3.*

È di notevole interesse pratico il fatto che le armoniche del segnale possano essere rappresentate nel dominio della frequenza tramite due grafici che mettono in relazione le frequenze delle armoniche con le corrispondenti ampiezze e fasi; per identificare questo tipo di rappresentazione si utilizzano i termini *spettro delle ampiezze* e *spettro delle fasi.*

▶ Nota la risposta del sistema a tutte le armoniche in cui viene scomposto un segnale periodico è anche nota la risposta del sistema al segnale nel suo complesso.

Affinché questo metodo di indagine possa essere applicato anche a un *segnale comunque variabile nel tempo* si deve considerare quest'ultimo come un *segnale periodico con periodo infinito.*

## 2 F.d.t. in regime sinusoidale

▶ La f.d.t. di un sistema in regime sinusoidale si ottiene dalla f.d.t. espressa nel dominio della variabile $s$ sostituendo la variabile $j\omega$ alla variabile $s$ ($\omega$ è la pulsazione del segnale sinusoidale).



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

La f.d.t. di un sistema, nel caso più generale, è infatti funzione della variabile complessa

$$s = \sigma + j\omega$$

definita nel piano complesso; il termine $\sigma$ rappresenta la parte reale, $\omega$ il coefficiente della parte immaginaria.

Nel caso particolare di funzionamento in regime sinusoidale si annulla la parte reale; ciò equivale a far assumere alla f.d.t. i soli valori immaginari.

Pertanto dall'espressione generale della f.d.t.

$$G(s) = G(\sigma + j\omega)$$

ponendo $\sigma = 0$ si ottiene:

$$G(s) = G(j\omega)$$

che è appunto l'espressione di solito utilizzata in regime sinusoidale.

Si consideri come esempio la f.d.t.

$$G(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}}$$

Ponendo $s = j\omega$ si ottiene

$$G(j\omega) = \frac{\frac{1}{RC}}{j\omega + \frac{1}{RC}}$$

## 2.1 Espressione generale

Per analogia con l'espressione generale della f.d.t. nel dominio della variabile complessa

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{N(s)}{D(s)}$$

si ottiene l'espressione

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)}$$

valida in regime sinusoidale.

In relazione a queste considerazioni si deduce che:

- permane il concetto di f.d.t. intesa come rapporto tra uscita $Y(j\omega)$ e ingresso $X(j\omega)$ di un sistema,
- la f.d.t. in regime sinusoidale viene ancora espressa come rapporto tra due polinomi nella variabile $j\omega$ in cui $N(j\omega)$ è il polinomio al numeratore e $D(j\omega)$ il polinomio al denominatore.

## 2.2 Schema a blocchi

Dallo schema a blocchi della f.d.t. nel dominio della variabile complessa si passa per analogia allo schema a blocchi in regime sinusoidale riprodotto in FIGURA **1**.

Come conseguenza dalla relazione

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$$

si ricava l'espressione:

$$Y(j\omega) = G(j\omega) \cdot X(j\omega)$$


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Analizzandola si deduce che, considerando come ingresso un segnale sinusoidale $X(j\omega)$ di pulsazione $\omega$, si otterrà in uscita un segnale $Y(j\omega)$ anch'esso sinusoidale che, sempre sotto l'ipotesi di linearità, ha la medesima pulsazione del segnale d'ingresso ma modulo e fase differenti.

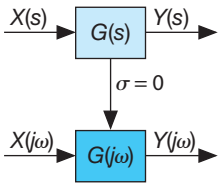



FIGURA **1**
Passaggio da $G(s)$ a $G(j\omega)$.

## 3 Forme fattorizzate della f.d.t.

Nel passare dal dominio della variabile complessa al dominio della frequenza viene mantenuto il significato di zeri, poli, costanti di tempo e costante di guadagno.

La f.d.t. in regime sinusoidale

$$G(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{D(j\omega)}$$

può essere espressa nelle due **forme fattorizzate** proprio con lo scopo di mettere in evidenza poli e zeri (prima forma) e costanti di tempo e di guadagno (seconda forma); risulta quindi

$$G(j\omega) = k \cdot \frac{(j\omega - z_1)(j\omega - z_2) \ldots\ldots (j\omega - z_m)}{(j\omega - p_1)(j\omega - p_2) \ldots\ldots (j\omega - p_n)}$$

per la *prima forma* e

$$G(j\omega) = G_0 \cdot \frac{\left(1 - \frac{j\omega}{z_1}\right)\left(1 - \frac{j\omega}{z_2}\right) \ldots\ldots \left(1 - \frac{j\omega}{z_m}\right)}{\left(1 - \frac{j\omega}{p_1}\right)\left(1 - \frac{j\omega}{p_2}\right) \ldots\ldots \left(1 - \frac{j\omega}{p_n}\right)}$$

per la *seconda forma.*

Le due forme evidenziano la presenza di $m$ zeri ed $n$ poli semplici (nei casi pratici risulta $m < n$).

Per semplicità di trattazione non si evidenzia esplicitamente l'eventuale presenza di poli e zeri nulli o complessi coniugati; neppure si tiene conto della possibile molteplicità di poli e zeri.

Poiché poli e zeri sono il reciproco cambiato di segno di una costante di tempo, sostituendo le relazioni

$$z = -\frac{1}{\tau_z}$$

$$p = -\frac{1}{\tau_p}$$

nella seconda forma fattorizzata si ottiene l'espressione equivalente

$$G(j\omega) = G_0 \cdot \frac{(1 + j\omega\tau_{z1})(1 + j\omega\tau_{z2}) \ldots\ldots (1 + j\omega\tau_{zm})}{(1 + j\omega\tau_{p1})(1 + j\omega\tau_{p2}) \ldots\ldots (1 + j\omega\tau_{pn})}$$

che esplicita appunto le costanti di tempo.

Il coefficiente $k$, presente nella prima forma, rappresenta un semplice fattore moltiplicativo; ponendo $j\omega = 0$ e moltiplicando per $k$ si ottiene la costante di guadagno $G_0$ che compare nella seconda forma.

Risulta di conseguenza la seguente relazione:

$$G_0 = k \cdot \frac{(-z_1)(-z_2) \ldots\ldots (-z_m)}{(-p_1)(-p_2) \ldots\ldots (-p_n)}$$



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 4 Funzioni elementari

Ciascun termine che compare nelle forme fattorizzate della f.d.t. rappresenta la f.d.t. di una funzione elementare.

Vengono di seguito considerate funzioni elementari che rappresentano blocchi delle seguenti tipologie:

- *proporzionali*;
- *con un polo* (eventualmente nell'origine);
- *con uno zero* (eventualmente nell'origine);
- *con poli complessi coniugati* (non esplicitamente evidenziati nelle due forme).

## 4.1 Blocco proporzionale

La f.d.t. di un blocco semplicemente proporzionale viene rappresentata con una *costante di proporzionalità k*; la sua espressione generale

$$G(j\omega) = k$$

mostra che la f.d.t. è indipendente dalla pulsazione.

Un blocco proporzionale inserito in una f.d.t. altera soltanto l'ampiezza del segnale d'uscita.

Quest'ultima osservazione è evidente quando si studiano reti puramente resistive (gli esempi più semplici sono i partitori di tensione e di corrente).

## 4.2 Blocco con un polo

La f.d.t. di un blocco con un polo viene rappresentata con le seguenti espressioni equivalenti:

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega - p}$$

che corrisponde alla prima forma fattorizzata e

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

che corrisponde alla seconda forma fattorizzata.

Caso particolare è quello di una *costante di tempo infinita* a cui corrisponde un **polo nullo** (*polo nell'origine* del piano complesso); l'espressione conseguente risulta del tipo

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$$

**ESEMPIO 1**

Si consideri un sistema elettrico del primo ordine costituito da un circuito RC serie; si scelga come ingresso la tensione di alimentazione e come uscita la tensione ai capi del condensatore.

Si ricavi la f.d.t. in regime sinusoidale e si evidenzi il fatto che la costante di tempo del circuito è la stessa che si ottiene analizzando la risposta al gradino.

### Soluzione

Le caratteristiche del circuito vengono evidenziate in FIGURA **2**.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 1**

Tenendo conto delle note relazioni che governano il funzionamento del resistore e del condensatore in regime sinusoidale, la f.d.t., intesa come rapporto tra la tensione $V_c$ prelevata ai capi del condensatore e la tensione $V$ impressa dal generatore di alternata, assume la seguente forma:

$$G(j\omega) = \frac{V_c(j\omega)}{V(j\omega)} = \frac{-j\,X_c \cdot I(j\omega)}{(R - j\,X_c)\cdot I(j\omega)} = \frac{-j\,X_c}{(R - j\,X_c)}$$

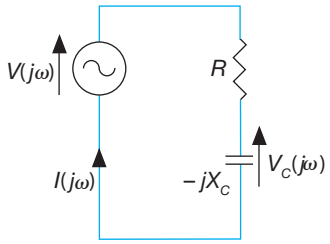



FIGURA **2**
Circuito RC in regime sinusoidale con uscita sul condensatore.

Essendo $X_c = 1/\omega C$, sviluppando si perviene alla seguente espressione (seconda forma fattorizzata della f.d.t.):

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Dal confronto con l'espressione generale valida per un blocco con un polo

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

si evidenzia che la costante di tempo coincide proprio con quella che si ricava analizzando il transitorio di un circuito RC in risposta a un segnale a gradino.

Dall'analisi della $G(j\omega)$ emergono le seguenti considerazioni:

- il polinomio al denominatore è di primo grado;
- risolvendo rispetto a $j\omega$ si ottiene un polo $p$ pari a $-1/R \cdot C$;
- ponendo $j\omega = 0$ si ottiene una costante di guadagno unitaria.

Per la f.d.t. espressa nella prima forma fattorizzata risulta:

$$G(j\omega) = \frac{\frac{1}{RC}}{j\omega + \frac{1}{RC}}$$

Analizzandola si raggiungono le medesime conclusioni.

## 4.3 Blocco con uno zero

La f.d.t. viene rappresentata con le seguenti espressioni equivalenti:

$$G(j\omega) = j\omega - z$$

che corrisponde alla prima forma fattorizzata e

$$G(j\omega) = 1 + j\omega\tau$$

che corrisponde alla seconda forma fattorizzata.

Caso particolare è quello di una *costante di tempo infinita* a cui corrisponde uno **zero nullo** (*zero nell'origine* del piano complesso); l'espressione corrispondente risulta del tipo

$$G(j\omega) = j\omega$$

**ESEMPIO 2**

Si consideri un sistema elettrico del primo ordine costituito da un circuito RC serie; si scelga come ingresso la tensione di alimentazione e come uscita la tensione ai capi del resistore.

Si ricavi la f.d.t. in regime sinusoidale per entrambe le forme fattorizzate mettendo in evidenza le funzioni elementari in esse contenute.

### Soluzione

Le caratteristiche del circuito vengono evidenziate in FIGURA **3**.

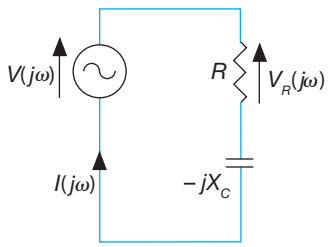



FIGURA **3**
Circuito RC in regime sinusoidale con uscita sul resistore.

Tenendo conto delle note relazioni che governano il funzionamento del resistore e del condensatore in re-



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 2**

gime sinusoidale, la f.d.t., intesa come rapporto tra la tensione $V_R$ prelevata ai capi del resistore e la tensione $V$ impressa dal generatore di alternata, assume la seguente forma:

$$G(j\omega)=\frac{V_R(j\omega)}{V(j\omega)}=\frac{R\cdot I(j\omega)}{(R-j\,X_c)\cdot I(j\omega)}=\frac{R}{(R-j\,X_c)}$$

Essendo $X_c = 1/\omega C$, sviluppando si perviene alla seguente espressione:

$$G(j\omega)=\frac{j\omega RC}{1+j\omega RC}$$

caratteristica della seconda forma fattorizzata della f.d.t. di un sistema.

Si evidenzia la presenza di un polo ($p = -1/R \cdot C$), di uno zero nullo ($j\omega$) e di una costante di guadagno ($G_0 = R \cdot C$).

In relazione a queste considerazioni la f.d.t. può essere espressa come prodotto fra tre funzioni elementari:

$$G(j\omega)=\frac{(j\omega)\cdot(RC)}{(1+j\omega RC)}$$

Per la prima forma fattorizzata della f.d.t. risulta invece la seguente espressione:

$$G(j\omega)=\frac{j\omega}{j\omega+\dfrac{1}{RC}}$$

## 4.4 Blocco con poli complessi coniugati

La f.d.t. di un blocco con poli complessi coniugati viene espressa nella forma

$$G(j\omega)=\frac{1}{1+2\xi j(\omega/\omega_n)-(\omega/\omega_n)^2}$$

che esplicita pulsazione naturale $\omega_n$ e coefficiente di smorzamento $\xi$.

Questa espressione ha senso soltanto quando il coefficiente di smorzamento è inferiore a uno; diversamente le radici del polinomio al denominatore non sono complesse coniugate e di conseguenza il termine di secondo grado è equivalente al prodotto di due termini di primo grado (corrispondenti a due blocchi collegati in serie).

**ESEMPIO 3**

Si consideri un sistema elettrico del secondo ordine costituito da un circuito RLC serie.

Per il sistema si considerino:

- come ingresso la tensione di alimentazione;
- come uscita la tensione ai capi del condensatore.

Si scelgano per i componenti reattivi i seguenti valori:

- $L$ = 10 mH;
- $C$ = 1 μF.

Si individuino:

- l'espressione della f.d.t. del sistema in regime sinusoidale;
- il valore assunto dalla pulsazione naturale;
- il valore limite da assegnare a $R$ per ottenere un coefficiente di smorzamento sicuramente inferiore all'unità.

### Soluzione

Con semplici considerazioni sullo schema riprodotto in FIGURA **4** che coinvolgono nozioni di elettrotecnica di base (leggi di Ohm e di Kirchhoff) la f.d.t. assume la seguente espressione:

$$G(j\omega)=\frac{V_C(j\omega)}{V(j\omega)}=\frac{1}{1+j\omega RC-\omega^2 LC}$$

Confrontando il terzo termine dell'espressione

$$G(j\omega)=\frac{1}{1+2\xi j(\omega/\omega_n)-(\omega/\omega_n)^2}$$

con il terzo termine dell'espressione

$$G(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega RC-\omega^2 LC}$$

risulta immediatamente il valore della pulsazione naturale:

$$\omega_n=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{10^{-2}\cdot 10^{-6}}}=10\,000\ \text{rad/s}$$

Dal confronto con il secondo termine risulta invece:

$$\xi=\frac{R}{2}\cdot\sqrt{\frac{C}{L}}$$

Per ottenere un coefficiente di smorzamento inferiore all'unità deve risultare:

$$R<2\cdot\sqrt{\frac{L}{C}}<2\cdot\sqrt{\frac{10^{-2}}{10^{-6}}}<200\ \Omega$$

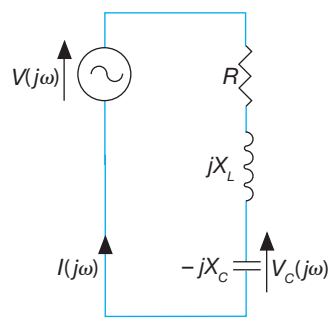



FIGURA **4**
Circuito RLC in regime sinusoidale.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 5 Diagrammi di Bode

Per una f.d.t. in regime sinusoidale è possibile definire per ciascun valore di pulsazione:

- un'*ampiezza* (*modulo*);
- una *fase* (*argomento*).

▶ I diagrammi di Bode vengono utilizzati per rappresentare l'ampiezza e la fase della f.d.t. stessa al variare della pulsazione (o anche della frequenza vista la proporzionalità tra le due grandezze).

Si possono così ottenere due diagrammi denominati rispettivamente:

- *diagramma delle ampiezze*;
- *diagramma delle fasi*.

## 5.1 Scale di rappresentazione

Per la rappresentazione dei diagrammi di Bode si usa in genere:

- una *doppia scala logaritmica* come quella riportata in FIGURA **5** per il diagramma delle ampiezze;
- una *scala semilogaritmica* come quella riportata in FIGURA **6** per il diagramma delle fasi.

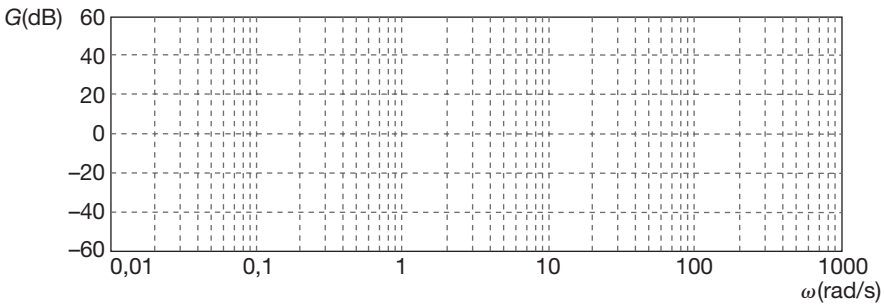



FIGURA **5**
Sistema di coordinate per la rappresentazione del diagramma delle ampiezze.

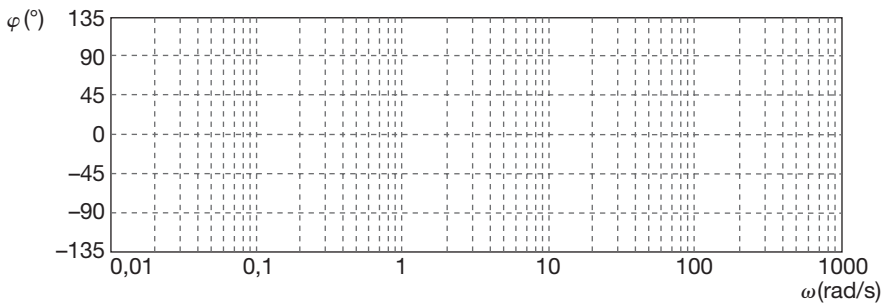



FIGURA **6**
Sistema di coordinate per la rappresentazione del diagramma delle fasi.

La scala adottata per l'asse delle ascisse riporta i logaritmi delle pulsazioni (che vengono misurate in rad/s); un esempio viene riprodotto in FIGURA **7**.

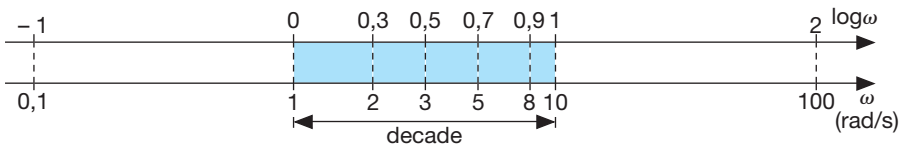



FIGURA **7**
Scala logaritmica adottata per l'asse delle ascisse.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Con il termine **decade**, evidenziato in figura, si intende la *distanza unitaria* espressa nella scala logaritmica; due estremi di una decade differiscono tra loro per il fattore moltiplicativo 10; in figura vengono rappresentate tre *decadi*.

Viene anche evidenziata la corrispondenza tra i valori di pulsazione (scala inferiore) e i corrispondenti logaritmi (scala superiore); su una di queste decadi sono anche riportati alcuni valori intermedi standard.

La scala adottata per l'asse delle ordinate è diversa nei due diagrammi in quanto l'ampiezza $G$ viene espressa in *decibel* (dB) e la fase $\varphi$ è riportata in gradi (°).

Il **decibel** è l'unità logaritmica convenzionale impiegata per esprimere il guadagno di un amplificatore.

Per esprimere una grandezza (in questo caso l'ampiezza) in dB si utilizza la relazione:

$$G_{dB} = 20 \log G$$

Nella TABELLA **1** vengono riportate alcune conversioni di uso frequente.

| $G$ | $G_{dB}$ | $G$ | $G_{dB}$ |
|---|---|---|---|
| $10^{-3}$ | –60 | $\sqrt{2}$ | 3 |
| $10^{-2}$ | –40 | 0,2 | –14 |
| $10^{-1}$ | –20 | 2 | 6 |
| $10^{0}$ | 0 | 20 | 26 |
| $10^{1}$ | 20 | 0,5 | –6 |
| $10^{2}$ | 40 | 5 | 14 |
| $10^{3}$ | 60 | 50 | 34 |

TABELLA **1** Conversioni di uso frequente.

## 5.2 Concetto di pendenza

Poiché molto spesso i diagrammi delle f.d.t. vengono rappresentati in modo approssimato sotto forma di spezzate è utile soffermarsi sul concetto di pendenza che, adottando scale in dB, assume un significato particolare.

Le pendenze caratteristiche delle rette che compongono le spezzate vengono infatti espresse:

- per il diagramma delle ampiezze in dB/dec (decibel/decade);
- per il diagramma delle fasi in °/dec (gradi centigradi/decade).

Sono esempi di pendenze in un diagramma delle ampiezze:

- 0 dB/dec;
- ± 20 dB/dec;
- ± 40 dB/dec;
- ± 60 dB/dec.

Per esprimere il medesimo concetto si può anche usare la notazione semplificata corrispondente:


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

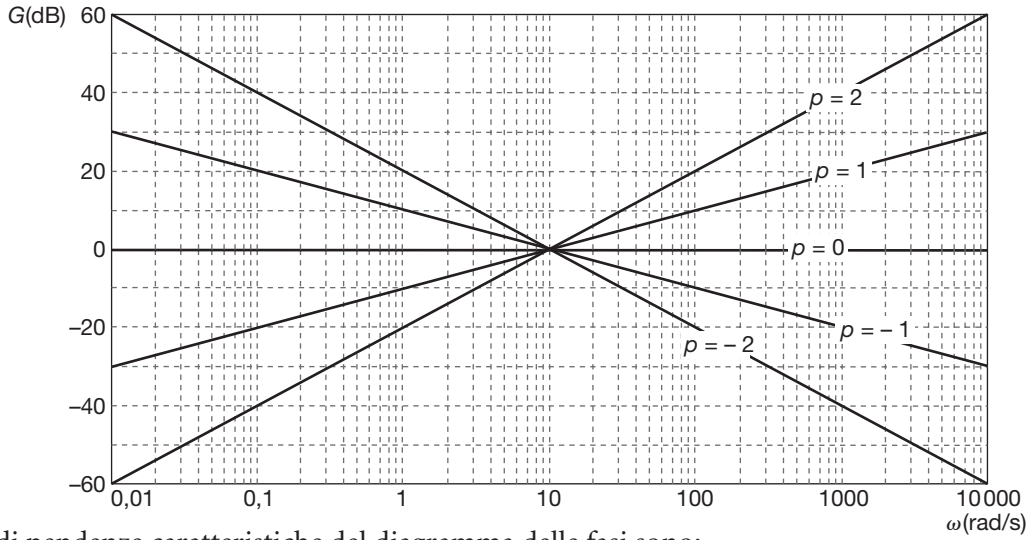
- $p = 0$;
- $p = \pm 1$;
- $p = \pm 2$;
- $p = \pm 3$.

In particolare si ha che:

- una retta parallela all'asse delle pulsazioni ha pendenza 0 dB/dec ($p = 0$);
- una retta con pendenza –20 dB/dec ($p = -1$) si abbassa di una decade sull'asse delle ordinate in corrispondenza di un incremento di una decade sull'asse delle ascisse;
- una retta con pendenza 20 dB/dec ($p = 1$) si alza di una decade sull'asse delle ordinate in corrispondenza di un incremento di una decade sull'asse delle ascisse.

Esempi di pendenze caratteristiche del diagramma delle ampiezze vengono riportate in FIGURA **8**.

FIGURA **8**
Pendenze caratteristiche del diagramma delle ampiezze.




Esempi di pendenze caratteristiche del diagramma delle fasi sono:

- ± 45 °/dec;
- ± 90 °/dec.

In particolare si ha che:

- una retta con pendenza 45 °/dec si alza di 45° sull'asse delle ordinate in corrispondenza di un incremento di una decade sull'asse delle ascisse;
- una retta con pendenza –45 °/dec si abbassa di 45° sull'asse delle ordinate in corrispondenza di un incremento di una decade sull'asse delle ascisse.

## 5.3 Vantaggi d'impiego

I vantaggi derivanti dall'uso dei diagrammi di Bode sono i seguenti:

- la possibilità di ottenere una rappresentazione dettagliata di grandezze che, come le pulsazioni, variano su intervalli molto ampi;
- la possibilità di rappresentare diagrammi di funzioni espresse in forma fattorizzata come somma dei diagrammi elementari dei singoli fattori e questo per le proprietà dei logaritmi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In relazione a quest'ultima considerazione i diagrammi di funzioni complesse vengono tracciati a partire dai diagrammi delle funzioni elementari di cui sono composte sfruttando le principali proprietà del calcolo con i logaritmi che sono:

- il logaritmo del prodotto tra due funzioni è uguale alla somma dei logaritmi delle due funzioni;
- il logaritmo del rapporto tra due funzioni è uguale alla differenza dei logaritmi delle due funzioni;
- il logaritmo di una potenza è uguale all'esponente per il logaritmo della base.

Le espressioni matematiche corrispondenti sono le seguenti:

$$\log(G_1 \cdot G_2) = \log G_1 + \log G_2$$

$$\log \frac{G_1}{G_2} = \log G_1 - \log G_2$$

$$\log G^n = n \cdot \log G$$

Il tracciamento manuale dei diagrammi assume attualmente un'importanza più teorica che applicativa in quanto esistono in commercio dei prodotti software come *Multision*, *Matlab* e *PSpice* che tracciano automaticamente e con notevole precisione i corrispondenti diagrammi del guadagno e della fase.

Anche un foglio elettronico come *Excel* può essere predisposto per il tracciamento dei diagrammi di *Bode*.

# 6 Rappresentazione di funzioni elementari

Si considerano come funzioni elementari:

- il *blocco proporzionale*;
- il *blocco con un polo* (e come caso particolare il *polo nullo*);
- il *blocco con uno zero* (e come caso particolare lo *zero nullo*);
- il *blocco con poli complessi coniugati*.

Di essi si rappresentano i diagrammi delle ampiezze $G$ e delle fasi $\varphi$ considerando due tipologie di curve:

- la *curva reale* ovvero la *curva effettiva* che si ottiene rappresentando puntualmente la funzione senza procedere per approssimazione;
- la *curva approssimata* denominata anche *curva asintotica* perché si ottiene, per approssimazione, facendo riferimento agli asintoti della curva stessa.

## 6.1 Blocco proporzionale

Facendo riferimento alla sua f.d.t.

$$G(j\omega) = k$$


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

si deduce che i diagrammi delle ampiezze e delle fasi presentano entrambi andamento costante al variare della pulsazione.

Per l'ampiezza espressa in dB risulta:

$$G_{dB} = 20 \log k = k'$$

Per la fase, ipotizzando soltanto valori positivi per la costante di proporzionalità, risulta invece:

$$\varphi = 0°$$

In FIGURA **9** viene riportato il diagramma delle ampiezze di un generico blocco proporzionale, in FIGURA **10** il diagramma delle fasi.

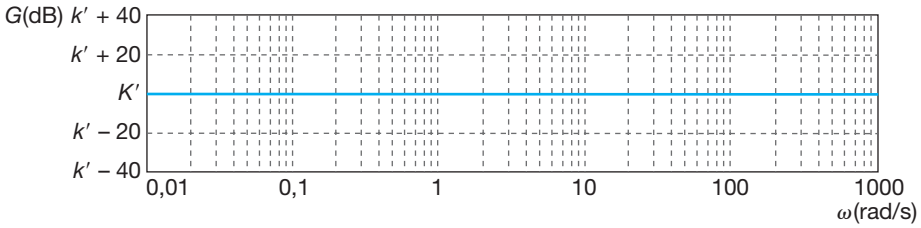



FIGURA **9**
Diagramma delle ampiezze di un blocco proporzionale.

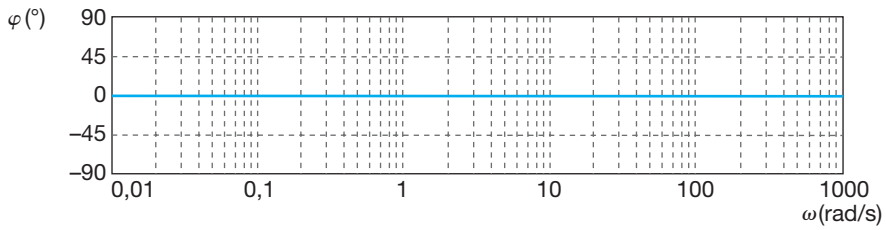



FIGURA **10**
Diagramma delle fasi di un blocco proporzionale.

**ESEMPIO 4**

Si rappresentino i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un blocco semplicemente proporzionale caratterizzato da una costante di proporzionalità pari a 10 nell'intervallo di pulsazioni compreso tra 0,1 rad/s e 100 rad/s.

### Soluzione

Essendo la costante di proporzionalità pari a 10 l'ampiezza vale costantemente 20 dB, la fase è ovviamente nulla.

Nella FIGURA **11** si rappresentano i due diagrammi con l'asse delle ascisse in comune per poter leggere in corrispondenza ampiezza e fase per una determinata pulsazione.

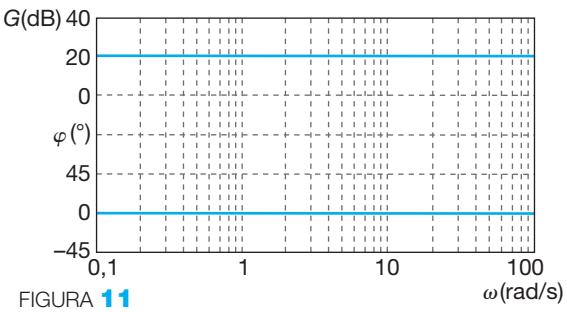



FIGURA **11**
Diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi.

## 6.2 Blocco con un polo

Facendo riferimento alla sua f.d.t.

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

si deduce che:

- per bassi valori di pulsazione il termine $j\omega\tau$ è trascurabile rispetto a 1 e quindi si può porre $1 + j\omega\tau \approx 1$;
- per valori elevati di pulsazione 1 è trascurabile rispetto al termine $j\omega\tau$ e quindi si può porre $1 + j\omega\tau \approx j\omega\tau$.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il **diagramma delle ampiezze** ha pertanto le seguenti caratteristiche:

- vale 1 e quindi 0 dB per bassi valori di pulsazione;
- per valori elevati diventa una retta con pendenza negativa (–20 dB/dec);
- la pulsazione in corrispondenza della quale si verifica il cambiamento di pendenza è la pulsazione corrispondente al polo che viene denominata *pulsazione di taglio* $\omega_t$.

Il valore della pulsazione di taglio dipende, con proporzionalità inversa, dal valore assunto dalla costante di tempo; risulta:

$$\omega_t = \frac{1}{\tau}$$

Il diagramma delle ampiezze, con l'asse delle ascisse in cui vengono riportati i valori di pulsazione rapportati al valore della pulsazione di taglio, viene riportato in FIGURA **12**.

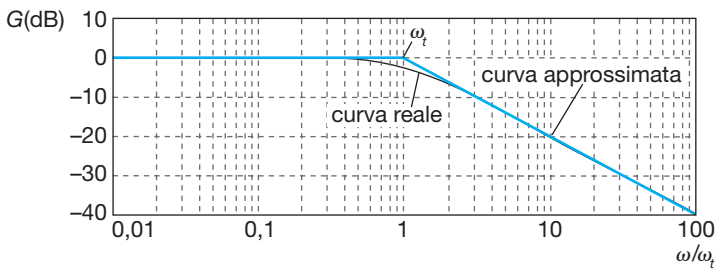



FIGURA **12**
Diagramma delle ampiezze di un blocco con un polo.

Sul diagramma vengono rappresentate sia la *curva approssimata* sia la *curva reale*; l'errore massimo che si commette considerando la curva approssimata si ha proprio in corrispondenza della pulsazione di taglio e vale 3 dB.

Il **diagramma delle fasi** ha le seguenti caratteristiche:

- è costante con fase nulla fino a una decade prima della pulsazione di taglio;
- assume pendenza negativa di –45°/dec fino a una decade dopo la pulsazione di taglio;
- è costante con fase –90° a partire da una decade dopo la pulsazione di taglio.

Il diagramma delle fasi, con l'asse delle ascisse in cui vengono riportati i valori di pulsazione rapportati al valore della pulsazione di taglio, viene riportato in forma approssimata nella FIGURA **13**.

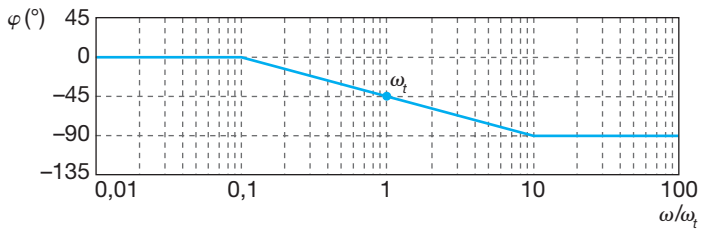



FIGURA **13**
Diagramma delle fasi di un blocco con un polo (forma approssimata).

Con questa approssimazione l'errore massimo che si commette è di 6° e si verifica in corrispondenza di $\omega_t/10$ e $10\omega_t$.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Un diagramma più preciso si ottiene considerando la retta tangente alla curva reale nel *punto di flesso* che ha:

- per ascissa la pulsazione di taglio;
- per ordinata –45°.

Per rappresentare graficamente la tangente si tenga presente che interseca:

- l'asse a 0° alla pulsazione 0,2 $\omega_t$;
- l'asse a –90° alla pulsazione 4,8 $\omega_t$.

Il diagramma più preciso viene riportato in FIGURA **14**.

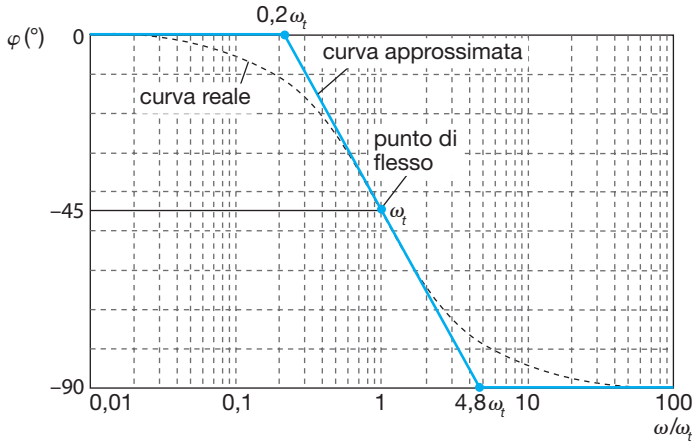



FIGURA **14**
Diagramma delle fasi di un blocco con un polo (più preciso).

Sul diagramma vengono rappresentate sia la *curva approssimata* sia la *curva reale*.

Nel caso particolare di **polo nell'origine** dall'espressione della f.d.t.

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$$

si deduce che:

- il diagramma delle ampiezze, che assume pendenza –1, passa per il punto che ha come ascissa 1 rad/s e ordinata 0 dB;
- il diagramma delle fasi è costante e vale –90°.

In FIGURA **15** viene rappresentato il diagramma delle ampiezze, in FIGURA **16** il corrispondente diagramma delle fasi.

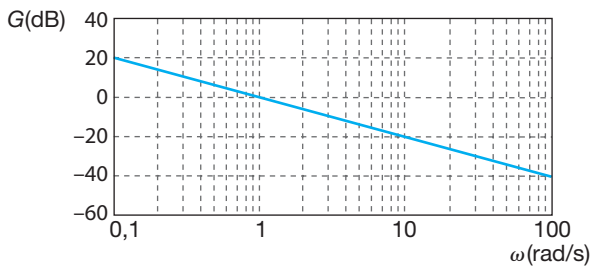



FIGURA **15**
Diagramma delle ampiezze di un blocco con un polo nullo.

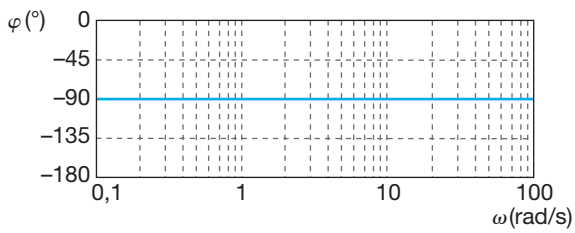



FIGURA **16**
Diagramma delle fasi di un blocco con un polo nullo.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 5

Dopo avere individuato la f.d.t. corrispondente si rappresentino i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un blocco con un polo che ha una frequenza di taglio di 10 rad/s.

## Soluzione

L'espressione generale della f.d.t. è la seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

Risultando

$$\tau = \frac{1}{\omega_t} = \frac{1}{10} = 0{,}1\,\text{s}$$

si perviene alla relazione

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega 0{,}1}$$

Nella FIGURA **17** si rappresentano i due diagrammi uno sopra l'altro con l'asse delle ascisse in comune; in questo modo è possibile leggere in corrispondenza ampiezza e fase per una determinata pulsazione.

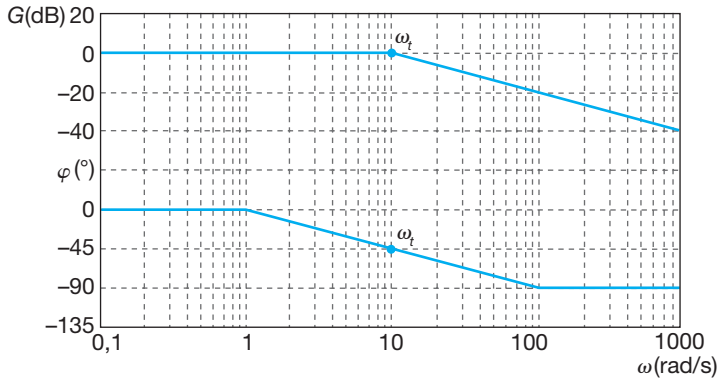



FIGURA **17**
Diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi.

## 6.3 Blocco con uno zero

Facendo riferimento alla sua f.d.t.

$$G(j\omega) = 1 + j\omega\tau$$

si osserva che:

- per bassi valori di pulsazione $j\omega\tau$ è trascurabile rispetto a 1 e quindi $1 + j\omega\tau \approx 1$;
- per valori elevati di pulsazione 1 è trascurabile rispetto a $j\omega\tau$ e quindi $1 + j\omega\tau \approx j\omega\tau$.

Il **diagramma delle ampiezze** ha le seguenti caratteristiche:

- vale 1 e quindi 0 dB per bassi valori di pulsazione;
- per valori elevati assume pendenza positiva (+20 dB/dec);
- la pulsazione in corrispondenza della quale si verifica il cambiamento di pendenza è la pulsazione corrispondente allo zero che viene denominata *pulsazione di taglio* $\omega_t$.

Il diagramma delle ampiezze, con l'asse delle ascisse in cui vengono riportati i valori di pulsazione rapportati al valore della pulsazione di taglio, viene riportato in FIGURA **18**.

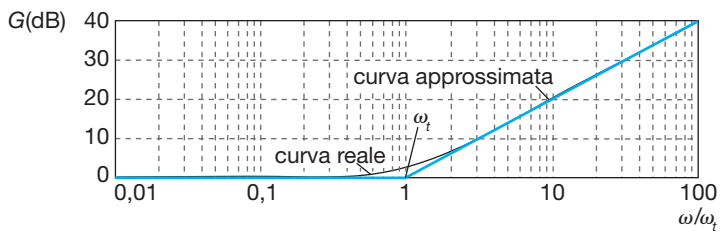



FIGURA **18**
Diagramma delle ampiezze di un blocco con uno zero.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Come nel caso del blocco con un polo la pulsazione di taglio è inversamente proporzionale alla costante di tempo; con la notazione usata in precedenza risulta:

$$\omega_t = \frac{1}{\tau}$$

Sul diagramma vengono rappresentate sia la *curva approssimata* sia la *curva reale* e l'errore massimo che si commette considerando quella approssimata è ancora di 3 dB in corrispondenza della pulsazione di taglio.

Il **diagramma delle fasi** ha le seguenti caratteristiche:

- è costante con fase nulla fino a una decade prima della pulsazione di taglio;
- assume pendenza positiva di –45°/dec fino a una decade dopo la pulsazione di taglio;
- è costante con fase +90° a partire da una decade dopo la pulsazione di taglio.

Il diagramma delle fasi, con l'asse delle ascisse in cui vengono riportati i valori di pulsazione rapportati al valore della pulsazione di taglio, viene riprodotto in forma approssimata nella FIGURA **19**.

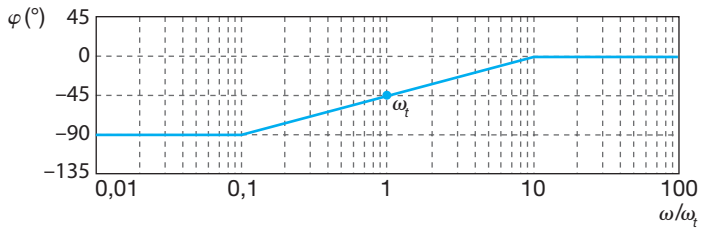



FIGURA **19**
Diagramma delle fasi di un blocco con uno zero (forma approssimata).

Con questa approssimazione l'errore massimo che si commette è di 6° e si verifica in corrispondenza di $\omega_t/10$ e $10\omega_t$.

Come per il polo un diagramma più preciso si ottiene considerando la retta tangente alla curva reale nel punto di flesso.

Un diagramma più preciso in cui vengono riprodotte sia la curva *approssimata* sia la curva *reale* viene riprodotto in FIGURA **20**.

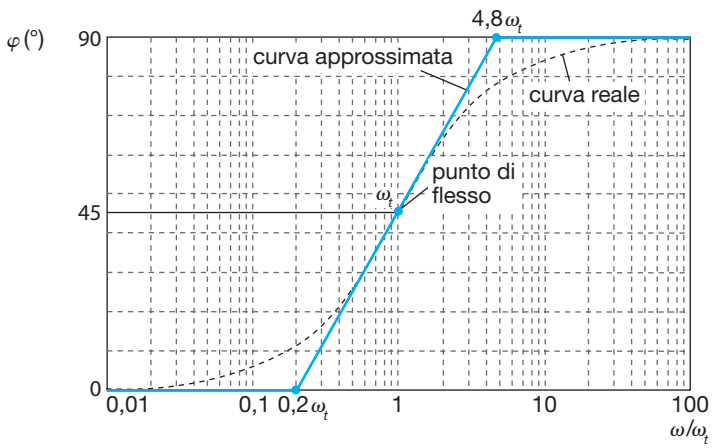



FIGURA **20**
Diagramma delle fasi di un blocco con uno zero (più preciso).

Nel caso particolare di **zero nell'origine** dall'espressione della f.d.t.

$$G(j\omega) = j\omega$$

si deduce che:

- il diagramma delle ampiezze, che assume pendenza +1, passa per il punto che ha come ascissa 1 rad/s e ordinata 0 dB;
- il diagramma delle fasi è costante e vale 90°.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **21** viene rappresentato il diagramma delle ampiezze, in FIGURA **22** quello corrispondente delle fasi.

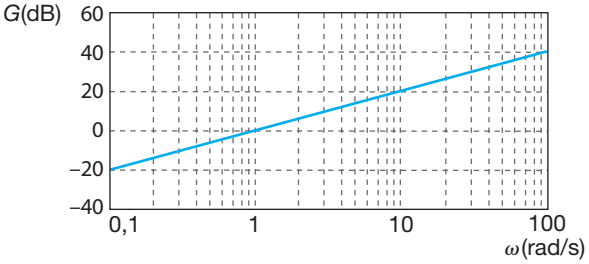



FIGURA **21**
Diagramma delle ampiezze di un blocco con uno zero nullo.

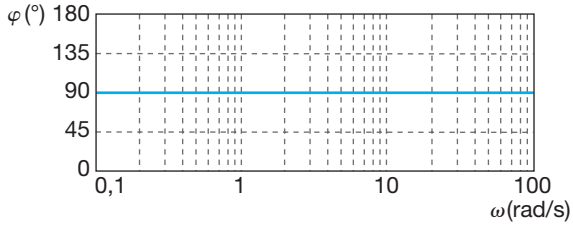



FIGURA **22**
Diagramma delle fasi di un blocco con uno zero nullo.

**ESEMPIO 6**

Dopo avere individuato la f.d.t. corrispondente, si rappresentino i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un blocco con uno zero che ha una frequenza di taglio di 0,1 rad/s.

## Soluzione

L'espressione generale della f.d.t. è la seguente:

$$G(j\omega) = 1 + j\omega\tau$$

Risultando

$$\tau = \frac{1}{\omega_t} = \frac{1}{0{,}1} = 10\text{s}$$

si perviene alla relazione

$$G(j\omega) = 1 + j\omega 10$$

Nella FIGURA **23** si rappresentano i due diagrammi con l'asse delle ascisse in comune in modo da poter leggere in corrispondenza ampiezza e fase per una determinata pulsazione.

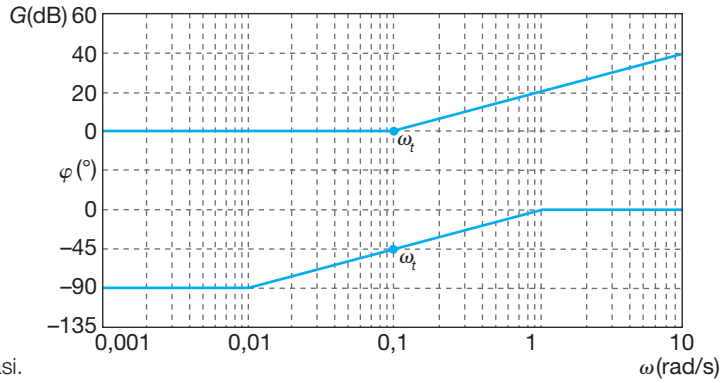



FIGURA **23**
Diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi.

## 6.4 Blocco con poli complessi coniugati

I diagrammi delle ampiezze e delle fasi di un blocco con poli complessi coniugati hanno un andamento fortemente dipendente dal valore assunto dal coefficiente di smorzamento.

Quanto più questo si avvicina all'unità tanto meno l'andamento dei diagrammi si discosta dal caso limite caratterizzato dalla presenza di due soluzioni reali e coincidenti.

In quest'ultimo caso la f.d.t. assume la forma

$$G(j\omega) = \frac{1}{(1 + j\omega\tau)^2}$$

e i corrispondenti diagrammi delle ampiezze presentano l'andamento approssimato riprodotto in FIGURA **24**.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

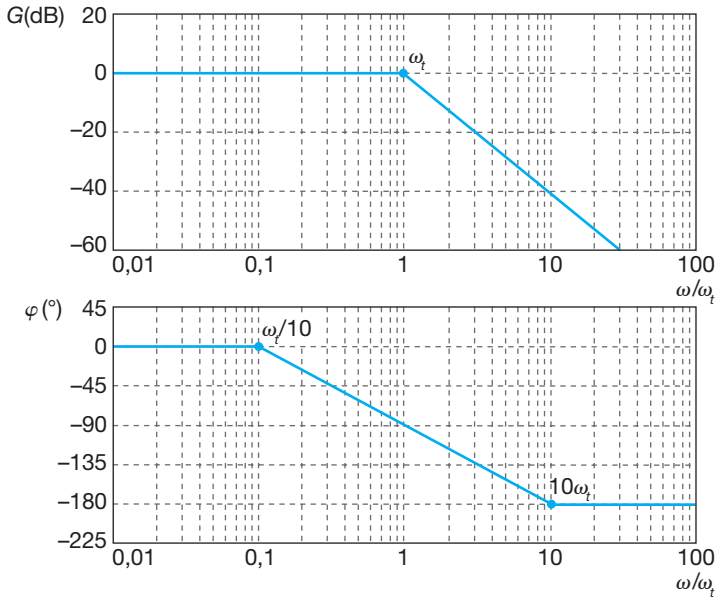



FIGURA **24**
Diagrammi approssimati di un blocco con poli complessi coniugati nel caso limite di coefficiente di smorzamento unitario.

I diagrammi, tracciati per valori di pulsazione rapportati al valore della pulsazione di taglio, presentano le seguenti caratteristiche:

- il diagramma delle ampiezze mostra un passaggio immediato da pendenza 0 a pendenza –40 dB/dec in corrispondenza della pulsazione di taglio;
- il diagramma delle fasi mostra un passaggio progressivo da 0° a –180° e che assume il valore –90° in corrispondenza della pulsazione di taglio.

Nella realtà i diagrammi di un blocco con poli complessi coniugati assumono nell'intorno della pulsazione di taglio un andamento alquanto diverso da quello mostrato dai diagrammi approssimati.

Gli errori che si commettono considerando la *curva approssimata* al posto della *curva reale* sono talvolta notevoli; una rappresentazione di questo tipo in alcuni casi è pertanto poco significativa. Le curve assumono un significato pratico in termini di precisione solo se vengono tracciate con andamenti differenti in relazione al valore assunto dal coefficiente di smorzamento.

In FIGURA **25** vengono tracciate le curve reali per valori differenti di smorzamento e per valori di pulsazione rapportati alla pulsazione di taglio.

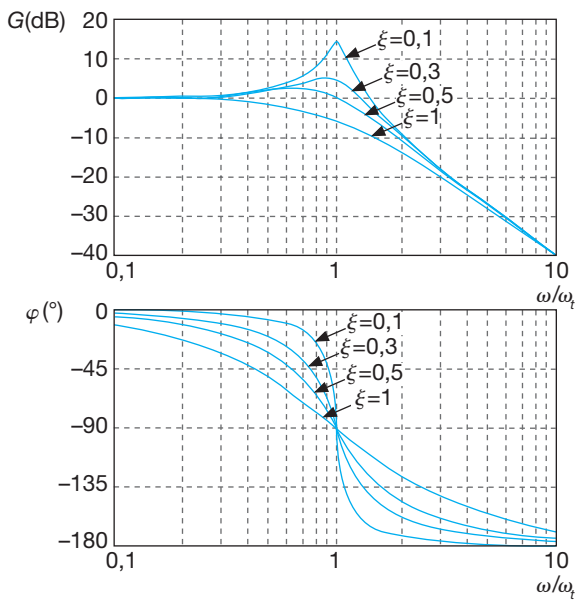



FIGURA **25**
Diagrammi reali di un blocco con poli complessi coniugati.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Facendo riferimento al diagramma delle ampiezze, dall'osservazione diretta risulta evidente che:

- quanto più il coefficiente di smorzamento è prossimo all'unità (caso limite corrispondente a quello tipico di due poli reali e coincidenti) tanto più la curva reale si avvicina a quella approssimata;
- per valori del coefficiente di smorzamento superiori a 0,7 le curve non intersecano l'asse delle ascisse (si trovano pertanto sotto alla curva approssimata);
- per valori di coefficiente di smorzamento compresi tra 0,5 e 0,7 le curve intersecano l'asse delle ascisse a sinistra della pulsazione di taglio;
- per valori di coefficiente di smorzamento inferiori a 0,5 le curve intersecano l'asse delle ascisse a destra della pulsazione di taglio (si trovano pertanto sopra alla curva approssimata);
- al limite con coefficiente di smorzamento nullo l'asse delle ordinate diventa per la curva un asintoto al quale la curva stessa tende sia da destra sia da sinistra.

Si osserva inoltre che per valori del coefficiente di smorzamento inferiori a 0,7 si ha un massimo per la curva che si accentua quanto più il coefficiente di smorzamento stesso si avvicina a zero.

Questo fenomeno è conosciuto come **risonanza**, il punto di massimo viene denominato **picco di risonanza** e la pulsazione alla quale si verifica **pulsazione di risonanza**.

La pulsazione di risonanza non coincide con la pulsazione di taglio ma si avvicina a essa quanto più il coefficiente di smorzamento tende a zero.

Si può dimostrare che il legame che sussiste tra *pulsazione di risonanza* $\omega_r$, *pulsazione di taglio* $\omega_t$ e *smorzamento* $\xi$ è dato dalla relazione

$$\omega_r = \omega_t \sqrt{1 - 2\xi^2}$$

che convalida quanto in precedenza affermato.

La formula è ovviamente valida solo per valori di coefficiente di smorzamento inferiori a 0,7.

I picchi di risonanza si esaltano quanto più il coefficiente di smorzamento si avvicina a zero.

Come condizione limite si avrà un *picco di risonanza* infinito quando il coefficiente di smorzamento è nullo.

Si può dimostrare che il legame che sussiste tra picco di risonanza $G_r$ e coefficiente di smorzamento è dato dalla relazione

$$G_r = \frac{1}{2\xi\sqrt{1 - \xi^2}}$$

che convalida quanto in precedenza affermato.

In FIGURA **26** viene mostrata la curva che riporta l'andamento del picco di risonanza al variare del coefficiente di smorzamento.

Facendo riferimento al diagramma delle fasi si può osservare che:

- quanto più il coefficiente di smorzamento è prossimo all'unità (caso limite corrispondente a quello tipico di due poli reali e coincidenti) tanto più la curva reale si avvicina a quella approssimata;
- quanto più il coefficiente di smorzamento è prossimo allo zero tanto più la curva reale si discosta da quella approssimata;


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

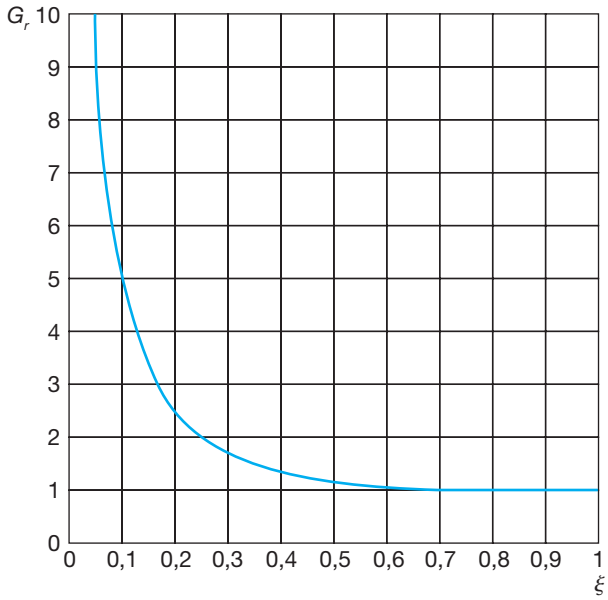



FIGURA **26**
Andamento del picco di risonanza al variare del coefficiente di smorzamento.

- al limite, con coefficiente di smorzamento nullo, si ha un passaggio immediato da 0° a –180°.

**ESEMPIO 7**

Si rappresentino i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi (approssimati nel caso limite di coefficiente di smorzamento unitario) di un blocco con poli complessi coniugati in un intervallo di pulsazioni compreso tra 0,1 rad/s e 1000 rad/s; si consideri una frequenza di taglio di 10 rad/s.

Determinare poi quel valore di coefficiente di smorzamento che porta la pulsazione di risonanza a 8 rad/s e il corrispondente valore del picco di risonanza.

## Soluzione

Nella FIGURA **27** si rappresentano i due diagrammi con l'asse delle ascisse in comune in modo da poter leggere in corrispondenza ampiezza e fase per una determinata pulsazione.

Dalla relazione

$$\omega_r = \omega_t \sqrt{1-2\xi^2}$$

sostituendo i valori dati si ottiene:

$$8 = 10\sqrt{1-2\xi^2}$$

Con semplici calcoli risulta un coefficiente di smorzamento pari a 0,42; in corrispondenza il picco di risonanza vale:

$$G_r = \frac{1}{2\sqrt{1-2\xi^2}} = 1{,}31 = 2{,}36\ \text{dB}$$

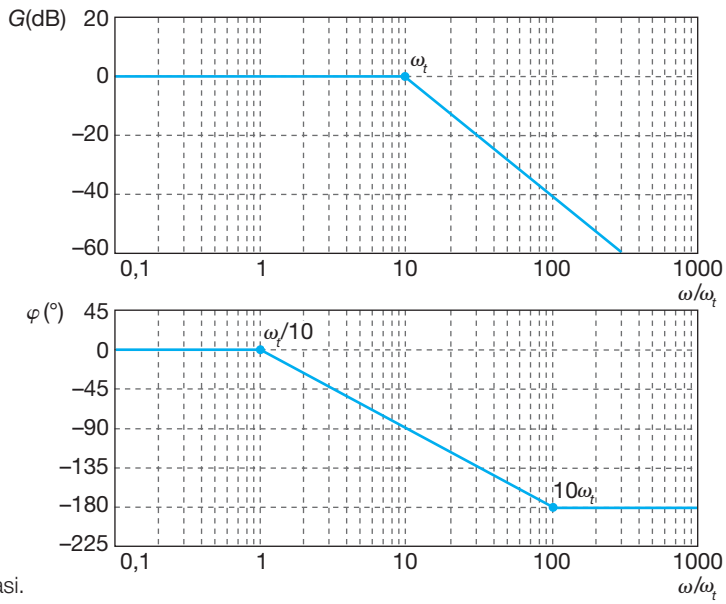



FIGURA **27**
Diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 7 Rappresentazione di funzioni complesse

Con il termine funzione complessa si intende una funzione composta da un insieme di funzioni elementari come quelle descritte in precedenza (blocchi proporzionali, con uno zero o con un polo eventualmente nulli, con poli complessi coniugati).

La f.d.t. complessiva di un sistema che viene espressa attraverso la forma fattorizzata

$$G(j\omega) = G_0 \cdot \frac{\left(1 - \frac{j\omega}{z_1}\right)\left(1 - \frac{j\omega}{z_2}\right) \ldots\ldots \left(1 - \frac{j\omega}{z_m}\right)}{\left(1 - \frac{j\omega}{p_1}\right)\left(1 - \frac{j\omega}{p_2}\right) \ldots\ldots \left(1 - \frac{j\omega}{p_n}\right)}$$

non rappresenta altro che il prodotto delle f.d.t. di singoli blocchi elementari collegati tra loro in serie.

Nell'espressione non viene esplicitata la presenza di soluzioni nulle, multiple o complesse coniugate.

Considerando la natura dei blocchi e applicando le regole proprie del calcolo con i logaritmi, la f.d.t. complessiva si trasforma nella somma algebrica dei termini dovuti ai singoli blocchi elementari.

Per il diagramma delle ampiezze la generica f.d.t. assume la forma seguente:

$$\log|G(j\omega)| = \log|G_0| + \log\left|\left(1 - \frac{j\omega}{z_1}\right)\right| + \log\left|\left(1 - \frac{j\omega}{z_2}\right)\right| +$$
$$+ \ldots\ldots\ldots\ldots + \log\left|\left(1 - \frac{j\omega}{z_m}\right)\right| - \log\left|\left(1 - \frac{j\omega}{p_1}\right)\right| +$$
$$- \log\left|\left(1 - \frac{j\omega}{p_2}\right)\right| - \ldots\ldots\ldots\ldots - \log\left|\left(1 - \frac{j\omega}{p_n}\right)\right|$$

Dalla relazione si deduce che il diagramma delle ampiezze può essere tracciato in via approssimativa sommando algebricamente i diagrammi delle ampiezze (moduli) dei blocchi elementari in cui la f.d.t. può essere scomposta.

Per il diagramma delle fasi la generica f.d.t. assume la forma seguente:

$$\arg G(j\omega) = \arg G_0 + \arg\left(1 - \frac{j\omega}{z_1}\right) + \arg\left(1 - \frac{j\omega}{z_2}\right) +$$
$$+ \ldots\ldots\ldots\ldots + \arg\left(1 - \frac{j\omega}{z_n}\right) - \arg\left(1 - \frac{j\omega}{p_1}\right) +$$
$$+ \arg\left(1 - \frac{j\omega}{p_2}\right) - \ldots\ldots\ldots\ldots - \arg\left(1 - \frac{j\omega}{p_m}\right)$$

Dalla relazione si deduce che il diagramma delle fasi può essere tracciato in via approssimativa sommando algebricamente i diagrammi delle fasi (argomenti) dei blocchi elementari in cui la f.d.t. può essere scomposta.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 7.1 Diagramma delle ampiezze

Per tracciare il diagramma delle ampiezze in forma approssimata si procede rappresentando i diagrammi delle ampiezze dei singoli blocchi in cui la funzione è scomponibile.

Il diagramma complessivo si ottiene sommando punto per punto le ampiezze delle funzioni elementari; la pendenza totale, punto per punto, sarà uguale alla somma algebrica delle pendenze dei singoli blocchi.

Per chiarire il procedimento si utilizza un esempio.

**ESEMPIO 8**

Si rappresenti il diagramma delle ampiezze relativo a un sistema la cui f.d.t. viene espressa attraverso la seguente relazione:

$$G(j\omega) = \frac{10(1 + j\omega 0{,}1)}{(1 + j\omega 0{,}01)(1 + j\omega)}$$

### Soluzione

La f.d.t. del sistema evidenzia la presenza di:

- un blocco proporzionale;
- un blocco con uno zero;
- due blocchi con un polo.

Siano essi:

$$G_1(j\omega) = 10$$

$$G_2(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega 0{,}01}$$

$$G_3(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega}$$

$$G_4(j\omega) = 1 + j\omega 0{,}1$$

Il blocco proporzionale ha ampiezza 10 e di conseguenza 20 dB.

Allo zero corrisponde la pulsazione 10 rad/s che è l'inverso della costante di tempo 0,1 s.

I due poli sono caratterizzati rispettivamente dalle pulsazioni 1 rad/s e 100 rad/s (sono rispettivamente gli inversi delle costanti di tempo 1 s e 0,01 s).

Evidenziando le pulsazioni di taglio ed elaborando il prodotto la f.d.t. assume la forma seguente:

$$G(j\omega) = G_1(j\omega) \cdot G_2(j\omega) \cdot G_3(j\omega) \cdot G_4(j\omega) =$$

$$= \frac{10\left(1 + \frac{j\omega}{10}\right)}{\left(1 + \frac{j\omega}{100}\right)(1 + j\omega)}$$

In FIGURA **28** vengono rappresentati i diagrammi delle ampiezze delle funzioni elementari e quello complessivo.

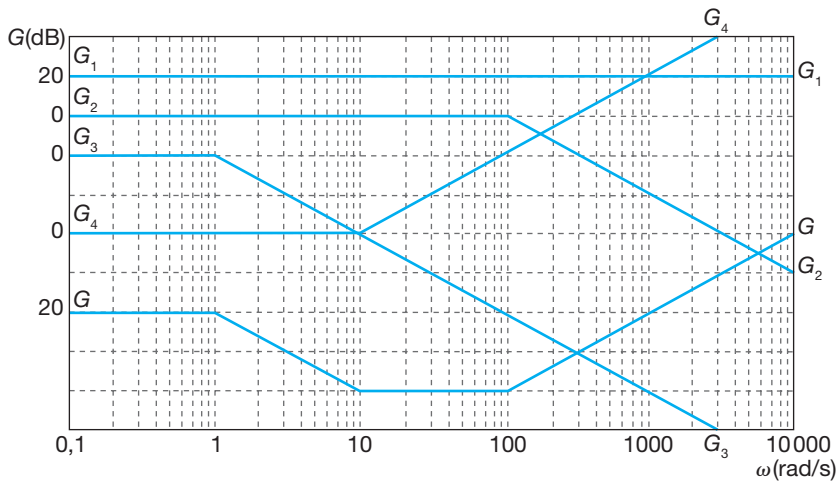



FIGURA **28**
Diagramma del modulo di una funzione complessa.

La lettura del diagramma si effettua tenendo conto del fatto che per ciascuna funzione è stato definito, per la scala delle ordinate, un riferimento iniziale; partendo da questo è possibile ricavare, tenendo conto delle pendenze, i valori assunti dalla funzione stessa al variare della pulsazione.

In pratica, per ottenere il diagramma complessivo, si procede nel modo seguente:

- si sommano le ampiezze delle singole funzioni soltanto nei punti in cui si ha cambiamento di pendenza;
- si raccordano i punti ricavati con spezzate la cui pendenza è la somma delle pendenze delle singole funzioni.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 8**

Facendo riferimento a questo diagramma risulta che:

- nella prima decade (tra 0,1 rad/s e 1 rad/s) l'ampiezza vale 20 dB (il valore assunto dal guadagno statico) perché tale è la somma delle ampiezze dei singoli blocchi tutti a pendenza nulla;
- alla pulsazione di 10 rad/s l'ampiezza complessiva è nulla e pertanto da 1 rad/s a 10 rad/s il diagramma si raccorda con un tratto a pendenza – 1;
- alla pulsazione di 100 rad/s l'ampiezza complessiva è sempre nulla e pertanto da 10 rad/s a 100 rad/s il diagramma si raccorda con un tratto a pendenza nulla;
- alla pulsazione di 1000 rad/s l'ampiezza complessiva vale 20 dB e pertanto da 100 rad/s a 1000 rad/s il diagramma si raccorda con un tratto a pendenza +1;
- alla pulsazione di 10 000 rad/s l'ampiezza complessiva vale 40 dB e pertanto da 1000 rad/s a 10 000 rad/s la pendenza non cambia e il diagramma si raccorda ancora con un tratto a pendenza –1.

## 7.2 Diagramma delle fasi (con poli e zeri distanti)

Il diagramma delle fasi nella forma approssimata può essere ricavato molto semplicemente a partire dal diagramma delle ampiezze soltanto per quei sistemi con pulsazioni di taglio sufficientemente lontane tra loro (ovvero distanti almeno due decadi).

Il diagramma si ricava tenendo conto delle sole relazioni tra pendenza del diagramma del modulo $p$ e fase corrispondente $\varphi$:

$$\varphi = (\pi/2)\, p$$

Lontano da poli e zeri risultano in particolare le relazioni riportate nella TABELLA **2**.

TABELLA **2**
Corrispondenza tra pendenza del diagramma del modulo e fase.

| $p$ | $p$(dB/decade) | $\varphi$(°) |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 20 | +90 |
| –1 | –20 | –90 |
| 2 | +40 | +180 |
| –2 | –40 | –180 |

Nelle vicinanze di poli e zeri le curve vanno raccordate in modo opportuno:

- fino a una decade prima della pulsazione di taglio la fase si può ritenere costante e definita dalla sua relazione con la pendenza;
- superata di una decade la pulsazione di taglio la fase si può ritenere sempre costante e definita ancora dalla sua relazione con la pendenza;
- i tratti a pendenza nulla devono essere raccordati con tratti a pendenza –45°/dec o +45°/dec.

**ESEMPIO 9**

Si ricavi l'espressione della f.d.t. di un sistema caratterizzato dalla presenza di:

- due poli distanti tre decadi tra loro e precisamente in corrispondenza delle pulsazioni 10 rad/s e 10 000 rad/s;
- una costante di guadagno unitaria.

Si rappresenti poi il corrispondente diagramma delle fasi.

### Soluzione

La f.d.t. assume la seguente espressione:

$$G(j\omega) = \frac{1}{\left(1+\frac{j\omega}{10}\right)\left(1+\frac{j\omega}{10\,000}\right)}$$

Per la rappresentazione del diagramma delle fasi si deve tenere presente che:

- fino a una decade prima del primo polo la fase è



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 9

nulla in quanto il diagramma delle ampiezze ha pendenza nulla;
- superato di una decade il primo polo la fase vale –90° in quanto il diagramma delle ampiezze ha pendenza –1;
- nella zona di raccordo (tra 1 rad/s e 100 rad/s) si ha un tratto a pendenza negativa (–45°/decade);
- la fase si mantiene poi costante a –90° fino a una decade prima del secondo polo;
- superato di una decade il secondo polo la fase vale –180° in quanto il diagramma del guadagno ha pendenza –2;
- anche nella seconda zona di raccordo (tra 1 krad/s e 100 krad/s) si ha un tratto a pendenza negativa (–45°/decade).

In FIGURA **29** viene riportato il diagramma delle fasi; le pulsazioni corrispondenti ai poli vengono indicate con $\omega_1$ e $\omega_2$.

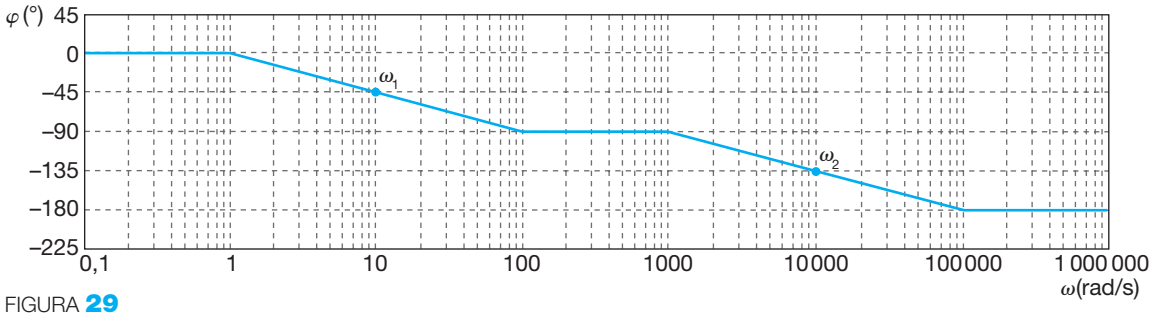



FIGURA **29**
Diagramma delle fasi.

## 7.3 Diagramma delle fasi (con poli e zeri ravvicinati)

Quando poli e zeri sono poco distanti tra loro (meno di due decadi) il tracciamento del diagramma delle fasi necessita di qualche osservazione aggiuntiva.

Come avviene per il diagramma delle ampiezze, è infatti opportuno tracciare il diagramma complessivo come somma dei diagrammi parziali relativi ai singoli poli e zeri sfruttando le possibilità offerte dal calcolo logaritmico.

ESEMPIO 10

Si rappresenti il diagramma delle fasi relativo a un sistema la cui f.d.t. assume la forma seguente:

$$G(j\omega) = \frac{10}{(1+j\omega)(1+j\omega 0{,}1)}$$

### Soluzione

Si evidenziano nella f.d.t. un blocco proporzionale e due blocchi con un polo che hanno le seguenti caratteristiche:
- il blocco proporzionale ha ampiezza 10;
- il primo polo è in corrispondenza della pulsazione $\omega_1$ = 1 rad/s;
- il secondo polo è in corrispondenza della pulsazione $\omega_2$ = 10 rad/s.

Il diagramma complessivo delle fasi si ricava tracciando i diagrammi delle fasi relative ai singoli poli e sommandone i contributi.

Risulta in particolare che:
- il blocco proporzionale non dà contributo in quanto ha fase nulla;
- il blocco corrispondente al primo polo è costante con fase nulla fino a 0,1 rad/s, ha fase –180° a partire da 10 rad/s e si raccorda nell'intervallo compreso tra i due valori;
- il blocco corrispondente al secondo polo è costante con fase nulla fino a 1 rad/s, ha fase –180° a partire da 100 rad/s e si raccorda nell'intervallo compreso tra i due valori.

Il diagramma complessivo presenta pertanto il seguente andamento:
- è costante con fase nulla fino a una decade prima del primo polo;
- ha pendenza –45°/dec fino al primo polo;
- ha pendenza –90°/dec nell'intervallo compreso tra i due poli;
- ha pendenza –45°/dec fino a una decade dopo il secondo polo;
- è costante con fase –180° per valori superiori a 100 rad/s.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 10

Il diagramma delle fasi viene riportato in FIGURA **30**.

Nella figura viene indicato con A il diagramma del primo polo, con B quello del secondo polo, con A + B il diagramma complessivo.

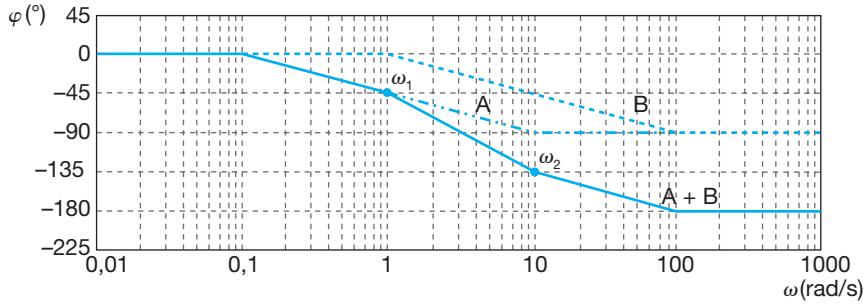



FIGURA **30**
Diagramma delle fasi.

## 8 Diagrammi di Nyquist

Un metodo ulteriore per rappresentare graficamente la risposta in frequenza di un sistema sono i diagrammi di Nyquist che costituiscono pertanto un'alternativa ai diagrammi di Bode.

▶ I **diagrammi di Nyquist** consentono di rappresentare sul piano complesso l'insieme dei punti corrispondenti ai valori assunti dalla f.d.t. al variare della pulsazione per valori compresi tra $-\infty$ e $+\infty$.

Per ciascun valore di pulsazione sul diagramma di Nyquist si individuano non più, come sul diagramma di Bode, il modulo e la fase della f.d.t. ma la parte reale e la parte immaginaria.

In pratica è come rappresentare la $G(j\omega)$ tramite un vettore uscente dall'origine del piano complesso; l'estremo di questo vettore viene a trovarsi in un punto del piano complesso le cui coordinate sono la parte reale e il coefficiente della parte immaginaria della $G(j\omega)$.

Per ciascun valore di pulsazione risultano pertanto le seguenti corrispondenze:

- il modulo del vettore è l'ampiezza della $G(j\omega)$;
- l'angolo che il vettore forma con l'asse reale è la fase della $G(j\omega)$.

Punto per punto si viene a formare il diagramma; un esempio viene riportato in FIGURA **31**.

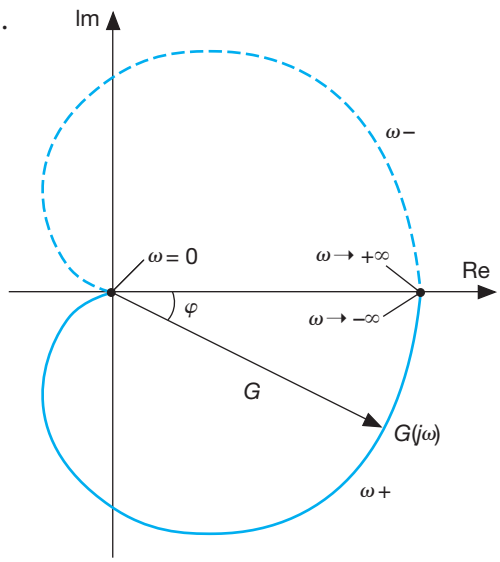



FIGURA **31**
Esempio di rappresentazione di un diagramma di Nyquist.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

La parte tratteggiata viene riferita a pulsazioni negative, la parte a tratto intero a pulsazioni positive.

Molto spesso i diagrammi fanno riferimento alle sole pulsazioni positive da cui i *diagrammi polari*.

▶ Il **diagramma polare** è un caso particolare del diagramma di Nyquist che si ottiene facendo variare la pulsazione tra $0^+$ e $+\infty$; viceversa il diagramma di Nyquist può essere considerato come un'estensione del diagramma polare.

In FIGURA **32** viene riportato un esempio di diagramma polare sul quale vengono evidenziati i valori di pulsazione.

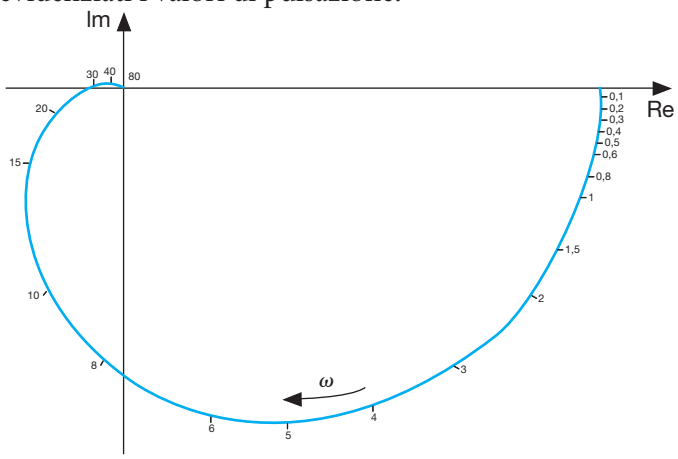



FIGURA **32**
Esempio di rappresentazione di un diagramma polare.

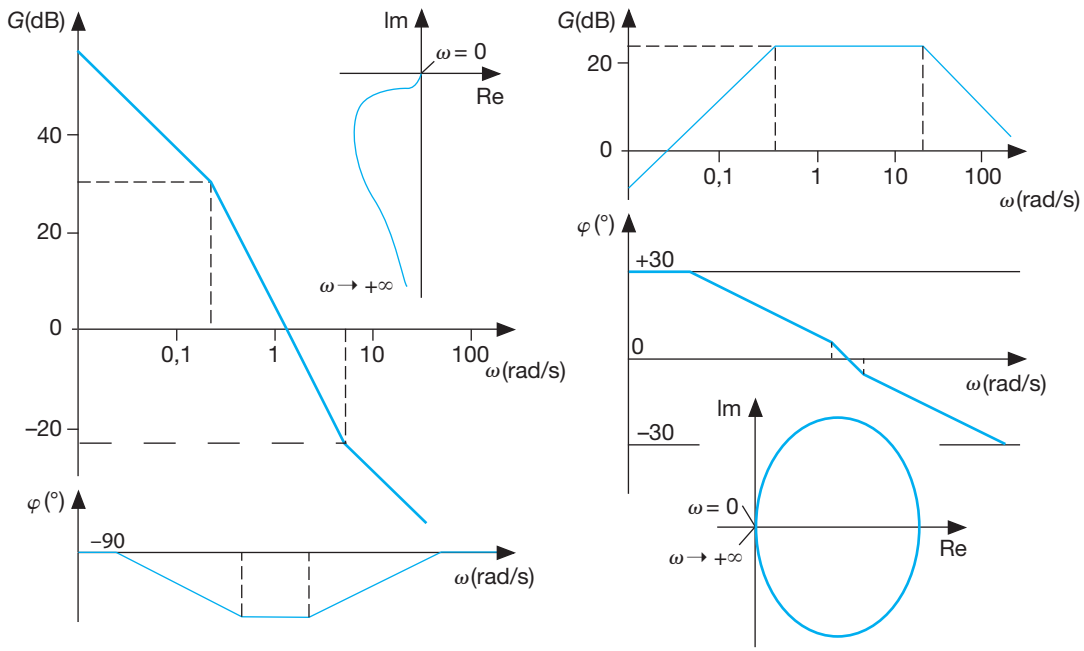
Nei casi più semplici il diagramma di Nyquist si ricava dal diagramma polare tenendo presente la simmetricità della funzione rispetto all'asse reale.

Nella realtà i termini diagramma polare e diagramma di Nyquist si confondono in quanto viene usato il termine diagramma di Nyquist anche quando viene tracciato un diagramma polare.

Da quanto esposto risulta evidente che, avendo a disposizione i diagrammi di Bode, si possono tracciare, almeno in modo approssimato, i diagrammi di Nyquist.

Due esempi di tracciamento comparato vengono riportati in FIGURA **33**.

FIGURA **33**
Diagrammi polari tracciati a partire dai diagrammi di Bode.






Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 8.1 Tracciamento dei diagrammi

Per poter tracciare almeno qualitativamente e in maniera sufficientemente corretta un diagramma polare è necessario individuare il comportamento della f.d.t. nei seguenti casi:

- alle *basse frequenze*, determinando il punto di partenza del diagramma (comportamento della f.d.t. per $\omega \to 0^+$) e le modalità con le quali parte;
- alle *alte frequenze*, determinando il punto di arrivo del diagramma (comportamento della f.d.t. per $\omega \to +\infty$);
- a *frequenze intermedie*, determinando alcuni punti notevoli come i punti d'incontro con l'asse reale.

### Basse frequenze

Per individuare il punto di partenza del diagramma bisogna tenere conto della presenza o meno di poli nell'origine; si distinguono i seguenti tre casi:

- se non ci sono poli nell'origine il diagramma parte da un punto dell'asse reale;
- se è presente un polo nell'origine il diagramma ha un asintoto verticale che si determina calcolando il valore della parte reale per $\omega \to 0^+$;
- se sono presenti più poli nell'origine il diagramma inizia in un punto all'infinito e non ci sono asintoti.

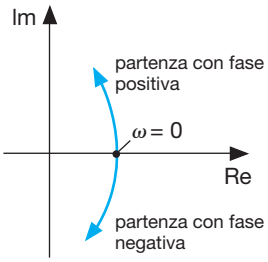



FIGURA **34**
Modalità di partenza del diagramma.

Nel *primo caso*, come viene evidenziato in FIGURA **34**, il diagramma può lasciare l'asse reale in due modi:

- con fase negativa ovvero ruotando in senso orario;
- con fase positiva ovvero ruotando in senso antiorario.

Le modalità con le quali parte il diagramma possono essere ricavate in diversi modi:

- con un ragionamento intuitivo;
- utilizzando i diagrammi di Bode;
- analiticamente trascurando i termini del secondo ordine e superiori dei polinomi che si trovano al numeratore e al denominatore e valutando il segno della fase;
- tenendo conto del fatto che se la radice di valore più basso è un polo la rotazione è oraria (partenza con fase negativa), se è uno zero la rotazione è antioraria (partenza con fase positiva).

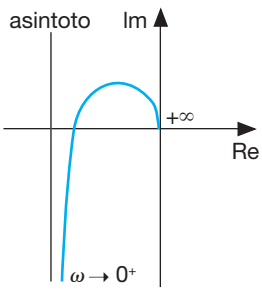



FIGURA **35**
Presenza di un asintoto.

Nel *secondo caso*, come evidenziato in FIGURA **35**, si ha un asintoto dovuto alla presenza nella f.d.t. di un polo nell'origine.

L'ascissa dell'asintoto si calcola valutando la parte reale della f.d.t. per $\omega \to 0^+$.

Si tenga presente che l'esistenza di uno zero modifica la partenza del diagramma.

Nel *terzo caso*, come evidenziato in FIGURA **36**, si ha un *punto all'infinito* dovuto alla presenza di più di un polo nell'origine.

Si tenga presente che l'esistenza di uno zero modifica la partenza del diagramma.

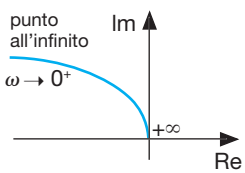



FIGURA **36**
Presenza di un punto all'infinito.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Alte frequenze

Per individuare il punto di arrivo del diagramma bisogna tenere conto del grado dei polinomi che si trovano al numeratore e denominatore della f.d.t.; si evidenziano in particolare due casi:

- se i polinomi che si trovano al numeratore e al denominatore hanno lo stesso grado il diagramma termina in un punto dell'asse reale;
- se prevale invece il grado del denominatore il diagramma termina nell'origine degli assi ed è tangente a uno di essi (a ogni grado in più del denominatore rispetto al numeratore corrisponde una rotazione della tangente di –90°).

In FIGURA **37** si evidenziano due casi in cui il diagramma ha rispettivamente tangente orizzontale (caso a) e verticale (caso b). Si tenga presente che l'esistenza di uno zero modifica l'arrivo del diagramma.

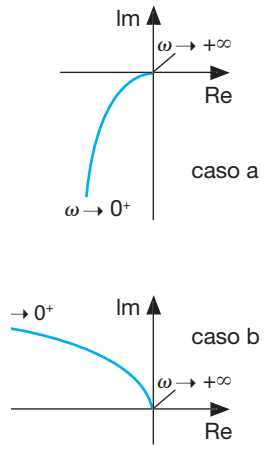



FIGURA **37**
Comportamento alle alte frequenze quando prevale il grado del denominatore.

## Frequenze intermedie

In molti casi si rende necessario determinare ulteriori punti del diagramma come per esempio le intersezioni con gli assi (reale e immaginario).

Se si vogliono individuare i punti d'incontro con l'asse reale si devono calcolare i valori di pulsazione che rendono nulla la parte immaginaria della f.d.t. e valutando poi, per tali valori, la parte reale.

Se si vogliono individuare i punti d'incontro con l'asse immaginario si devono calcolare i valori di pulsazione che rendono nulla la parte reale della f.d.t. e valutando poi, per tali valori, la parte immaginaria.

**ESEMPIO 11**

Per il sistema che ha f.d.t.

$$G(j\omega) = \frac{100}{(1+j\omega)(1+j\omega 2)(1+j\omega 4)}$$

si tracci qualitativamente il diagramma polare dopo aver individuato nell'ordine:

– il punto di partenza del diagramma;
– il punto di arrivo del diagramma;
– i punti di intersezione con gli assi.

### Soluzione

– Punto di partenza

Si individua il punto di partenza del diagramma ponendo $\omega = 0$ nella f.d.t.; si ottiene $G(j0) = 100$ ovvero un punto che si trova sull'asse reale.

Non essendo presenti degli zeri il diagramma parte con fase negativa e scorre quindi in senso orario.

– Punto di arrivo

Si individua il punto di arrivo del diagramma valutando la f.d.t. per valori di pulsazione molto elevati.

Essendo il grado del denominatore superiore a quello del numeratore il diagramma termina nell'origine degli assi ed è tangente a uno di essi.

In questo caso il diagramma è tangente all'asse verticale con fase pari a –270° in quanto il denominatore ha tre gradi in più rispetto al numeratore.

– Intersezioni con gli assi

Con facili passaggi si ottiene l'espressione

$$G(j\omega) = \frac{100}{(1-14\omega^2) + j\omega(10-8\omega^2)}$$

che evidenzia la parte reale e la parte immaginaria.

Il punto d'incontro con l'asse reale si ottiene ponendo uguale a zero la parte immaginaria; risolvendo l'equazione

$$8\omega^2 - 10 = 0$$

si ottiene

$$\omega = 1{,}12 \text{ rad/s}$$

e quindi, sostituendo in $G(j\omega)$, si ricava il punto d'incontro che vale

$$G(j1{,}12) = \frac{100}{(1-14\cdot 1{,}12^2)} = -6$$

Il punto d'incontro con l'asse immaginario si ottiene ponendo uguale a zero la parte reale; risolvendo l'equazione

$$1 - 14\omega^2 = 0$$

si ottiene

$$\omega = 0{,}27 \text{ rad/s}$$

e quindi, sostituendo in $G(j\omega)$, si ricava il punto d'in- ▶



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 11

contro che vale

$$G(j0{,}27) = \frac{100}{j0{,}27\,(10 - 8 \cdot 0{,}27^2)} = -39{,}3$$

– Diagramma

Tenendo presenti le considerazioni di cui ai punti precedenti il diagramma assume l'aspetto evidenziato in FIGURA **38**.

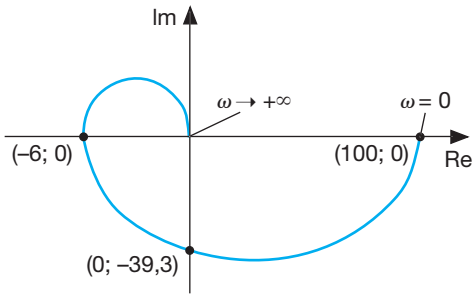



FIGURA **38**
Diagramma polare della f.d.t.

## 8.2 Diagrammi di funzioni notevoli

Vengono di seguito analizzati i diagrammi delle seguenti funzioni di impiego comune nella teoria dei sistemi:

- *blocco con un polo nell'origine*;
- *blocco con un polo*;
- *blocco con uno zero nell'origine e un polo*;
- *blocco con due poli di cui uno nell'origine*;
- *blocco con due poli*;
- *blocco con tre poli di cui uno nell'origine*;
- *blocco con tre poli*;
- *blocco con poli complessi coniugati.*

### Blocco con un polo nell'origine

In FIGURA **39** viene riportato il diagramma di Nyquist di un *blocco con un polo nell'origine* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$$

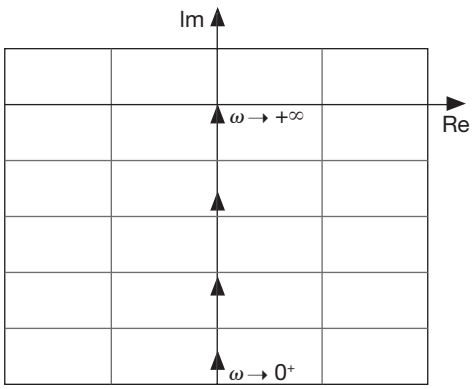



FIGURA **39**
Diagramma di un blocco con un polo nell'origine.

Sul grafico vengono indicati in particolare i valori assunti dalla funzione per $\omega \to 0^+$ e per $\omega \to +\infty$.

È evidente che:

- la parte reale è nulla al variare della pulsazione;
- il diagramma percorre l'asse immaginario per valori negativi fino a raggiungere l'origine degli assi a frequenze elevate.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Blocco con un polo

In FIGURA **40** viene riportato il diagramma di un *blocco con un polo* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{(1 + j\omega\tau)}$$

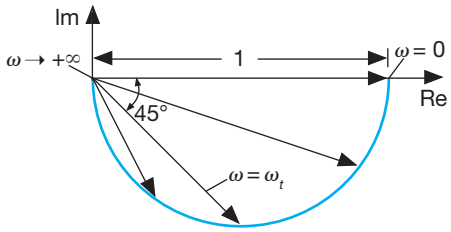



FIGURA **40**
Diagramma di un blocco con un polo.

Nel diagramma vengono evidenziati i punti salienti:

- per $\omega = 0$ l'ampiezza vale 1 con fase nulla e il diagramma parte con rotazione oraria;
- per $\omega \to \infty$ l'ampiezza vale 0 e la fase –90° (tangente all'asse verticale);
- in corrispondenza della pulsazione di taglio l'ampiezza vale $1/\sqrt{2}$ con fase –45°.

**ESEMPIO 12**

Si consideri un sistema la cui f.d.t. assume la forma seguente:

$$G(j\omega) = \frac{10}{1 + j\omega}$$

Si calcolino i valori delle coordinate che la f.d.t. assume nel piano complesso in corrispondenza dei seguenti punti:

– $\omega = 0^+$;
– $\omega \to +\infty$;
– $\omega = 1$ rad/s;
– $\omega = 10$ rad/s.

### Soluzione

Per $\omega = 0^+$ si ottiene:

$$G(j\omega) = 10$$

Essendo nulla la parte immaginaria, il punto appartiene al semipiano positivo dell'asse reale e vale 10 (coincide con la costante di guadagno del sistema).

Per $\omega \to +\infty$ si ottiene:

$$G(j\omega) = 0$$

Il punto coincide quindi con l'origine degli assi.

Per individuare gli altri punti si procede razionalizzando la f.d.t. per ottenere separatamente la parte reale e la parte immaginaria; con opportuni passaggi si ottiene:

$$G(j\omega) = \frac{10\,(1 - j\omega)}{(1 + j\omega)\,(1 - j\omega)} = \frac{10}{1 + \omega^2} - j\,\frac{10\omega}{1 + \omega^2}$$

Per $\omega = 1$ rad/s risulta:

$$G(j\omega) = 5 - j5$$

Il punto si trova esattamente sulla retta parallela all'asse immaginario e passante per il centro della circonferenza.

Per $\omega = 10$ rad/s si ottiene:

$$G(j\omega) \cong 0{,}1 - j0{,}1$$

Il punto si trova, come era logico aspettarsi, molto vicino all'origine degli assi.

## Blocco con uno zero nell'origine e con un polo

In FIGURA **41** viene riportato il diagramma di un *blocco con uno zero nell'origine e con un polo* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{j\omega}{1 + j\omega\tau}$$

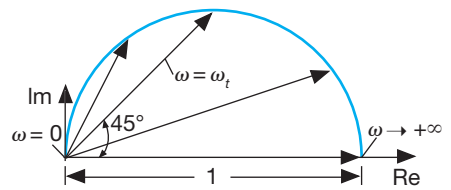



FIGURA **41**
Diagramma di un blocco con uno zero nell'origine e un polo.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Nel diagramma vengono evidenziati i punti salienti:

- per $\omega = 0$ l'ampiezza vale 0 con fase +90° e il diagramma, data la presenza dello zero, parte con rotazione oraria (la fase rimane sempre positiva);
- per $\omega \to \infty$ l'ampiezza vale 1 con fase nulla;
- in corrispondenza della pulsazione di taglio l'ampiezza vale $1/\sqrt{2}$ con fase +45°.

### Blocco con due poli di cui uno nell'origine

In FIGURA **42** viene riportato il diagramma di un *blocco con due poli di cui uno nell'origine* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega\,(1 + j\omega\tau)}$$

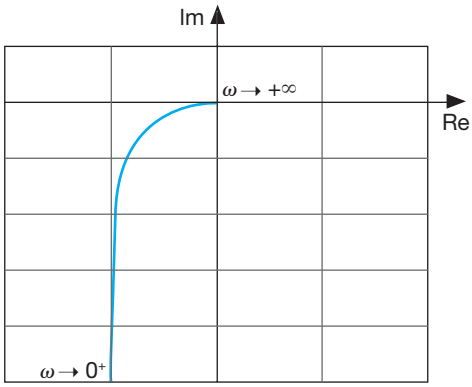



FIGURA **42**
Diagramma di un blocco con due poli di cui uno nell'origine.

Si evidenzia in particolare che:

- essendo presente un polo nell'origine il diagramma ha un asintoto verticale per $\omega \to 0^+$;
- a frequenze elevate il diagramma termina nell'origine degli assi.

### Blocco con due poli

In FIGURA **43** viene riportato il diagramma di un *blocco con due poli* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{(1 + j\omega\tau_1)\,(1 + j\omega\tau_2)}$$

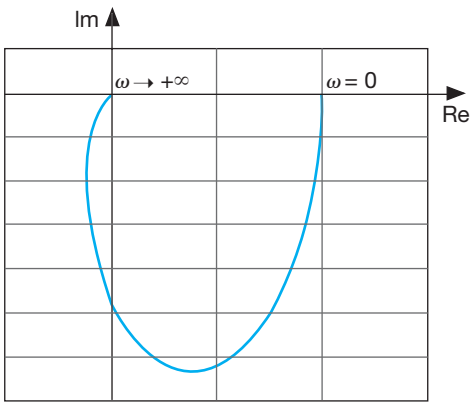



FIGURA **43**
Diagramma di un blocco con due poli.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Si evidenzia in particolare che:

- il diagramma, non essendo presenti poli nell'origine, parte da un punto dell'asse reale in senso orario (non potrebbe essere altrimenti in quanto non ci sono zeri);
- per pulsazioni elevate il diagramma termina nell'origine degli assi;
- si ha un punto d'incontro con l'asse immaginario.

### Blocco con tre poli di cui uno nell'origine

In FIGURA **44** viene riportato il diagramma di un *blocco con tre poli di cui uno nell'origine* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega(1+j\omega\tau_1)\,(1+j\omega\tau_2)}$$

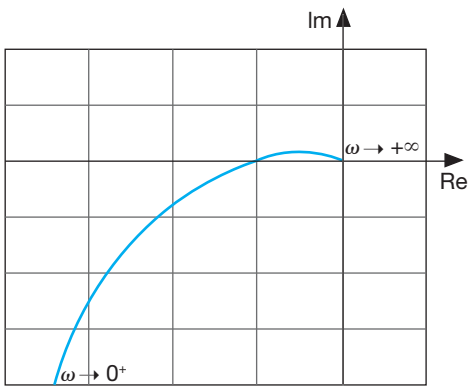



FIGURA **44**
Diagramma di un blocco con tre poli di cui uno nell'origine.

Si evidenzia in particolare che:

- essendo presente un polo nell'origine il diagramma ha un asintoto verticale (poco evidenziato in figura) per $\omega \to 0^+$;
- a frequenze elevate il diagramma termina nell'origine degli assi;
- si ha di un punto d'incontro con l'asse reale.

### Blocco con tre poli

In FIGURA **45** viene riportato il diagramma di un *blocco con tre poli* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{(1+j\omega\tau_1)\,(1+j\omega\tau_2)\,(1+j\omega\tau_3)}$$

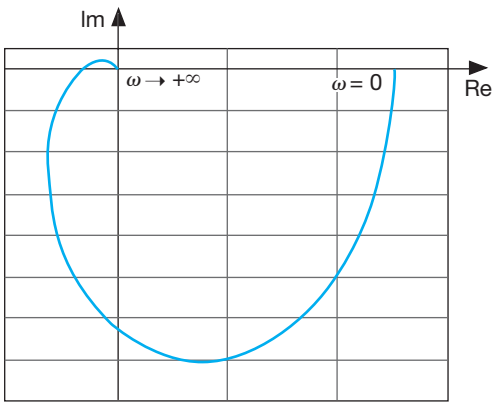



FIGURA **45**
Diagramma di un blocco con tre poli.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Si evidenzia in particolare che:

- il diagramma, non essendo presenti poli nell'origine, parte da un punto dell'asse reale in senso orario (non potrebbe essere altrimenti in quanto non ci sono zeri);
- per pulsazioni elevate il diagramma termina nell'origine degli assi;
- si hanno un punto d'incontro con l'asse immaginario e uno con l'asse reale.

### Blocco con poli complessi coniugati

In FIGURA **46** viene riportato il diagramma di un *blocco con poli complessi coniugati* che ha la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + 2\xi j(\omega/\omega_n) - (\omega/\omega_n)^2}$$

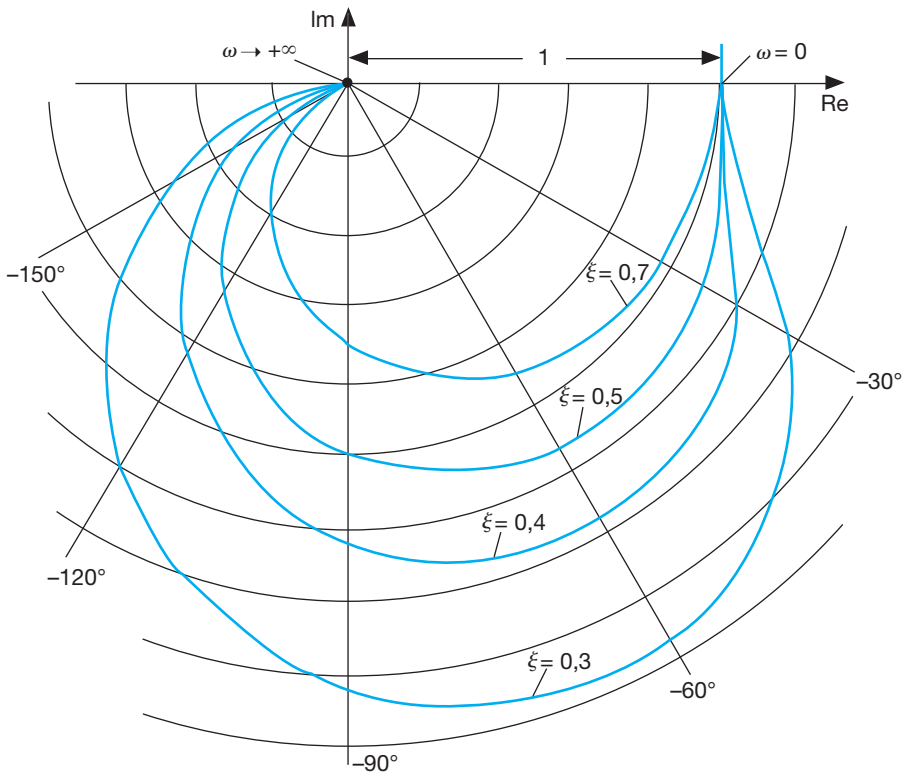



FIGURA **46**
Diagramma di un blocco con poli complessi coniugati.

Il tracciamento dei diagrammi è conseguente al valore imposto al coefficiente di smorzamento.

In particolare il diagramma tracciato per un valore di coefficiente di smorzamento pari a 0,7 ha in pratica lo stesso andamento di quello relativo a due poli reali e coincidenti.

Per valori di coefficiente di smorzamento inferiori a 0,7 si osserva un incremento delle ampiezze.

Per qualsiasi valore di coefficiente di smorzamento coincidono invece i punti di partenza e di arrivo del diagramma:

- per $\omega = 0$ l'ampiezza vale 1 con fase nulla;
- per $\omega \to \infty$ l'ampiezza vale 0 e la fase –180° (tangente all'asse orizzontale).

Si osserva infine che i punti di intersezione con l'asse immaginario variano in relazione al valore imposto al coefficiente di smorzamento.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 9 Considerazioni sui sistemi retroazionati

Dai diagrammi di risposta in frequenza di un sistema si possono trarre importanti informazioni sul comportamento dei sistemi retroazionati in termini di:

- *prontezza di risposta*;
- *fedeltà di risposta e banda passante*;
- *banda passante*;
- *stabilità*.

## 9.1 F.d.t. d'anello

Prima di procedere all'analisi è necessario introdurre il concetto di *f.d.t. d'anello* tipico dei sistemi retroazionati.

▶ Indicando con $A$ la f.d.t. del blocco di andata e con $B$ la f.d.t. del blocco di ritorno si definisce **f.d.t. d'anello** $AB$ il prodotto delle f.d.t. dei blocchi $A$ e $B$.

Come evidenziato schematicamente in FIGURA **47**, la f.d.t. d'anello di un sistema retroazionato si ottiene in pratica annullando il segnale di riferimento e interrompendo l'anello in un punto qualsiasi.

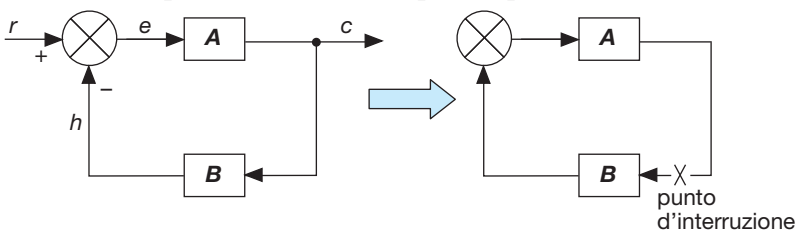



FIGURA **47** Rappresentazione della f.d.t. d'anello.

Nota la f.d.t. del blocco di andata e considerando il blocco di retroazione semplicemente proporzionale (ipotesi semplificativa ma non limitativa) risulta agevole tracciare la f.d.t. d'anello per poi dedurre importanti informazioni sul sistema retroazionato.

Il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello $AB(j\omega)$, essendo il blocco di retroazione semplicemente proporzionale, si ottiene traslando verso l'alto il diagramma delle ampiezze della f.d.t. del blocco di andata $A(j\omega)$ di una quantità pari alla costante di guadagno del blocco di retroazione.

Per individuare l'andamento del diagramma delle ampiezze del sistema retroazionato si analizzi la relazione generale che esprime la f.d.t. a esso corrispondente:

$$G(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + AB(j\omega)}$$

Risulta in particolare che il diagramma delle ampiezze della $G(j\omega)$ può essere ritenuto approssimativamente coincidente:

- con l'inverso della costante di guadagno del blocco di retroazione per quei valori di frequenza per cui $AB(j\omega)$ risulta maggiore di 1 (0 dB in scala logaritmica);



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- con il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello per quei valori di frequenza per cui $AB(j\omega)$ risulta minore di 1 (0 dB in scala logaritmica).

In FIGURA **48** viene mostrato un diagramma delle ampiezze che comprende i diagrammi relativi a:

- blocco di andata;
- f.d.t. d'anello;
- sistema retroazionato.

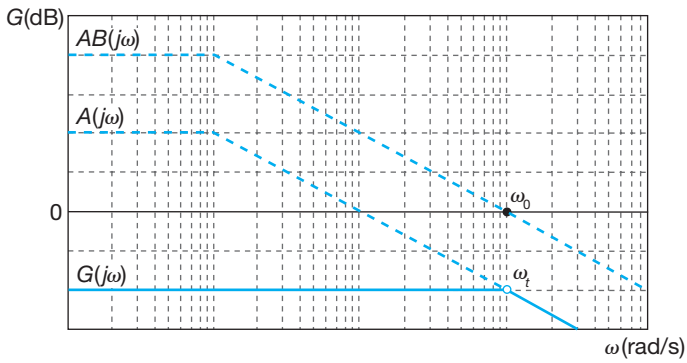



FIGURA **48**
Diagramma delle ampiezze per un sistema retroazionato.

Nella figura vengono anche evidenziati:

- la pulsazione $\omega_0$ corrispondente al punto in cui il diagramma di $AB(j\omega)$ incontra l'asse a 0 dB (pulsazione di attraversamento a 0 dB);
- la pulsazione di taglio $\omega_t$ del sistema retroazionato che ha lo stesso valore di $\omega_0$.

Quest'ultima uguaglianza, molto rilevante ai fini pratici, si può considerare approssimativamente vera nella maggior parte dei casi.

Dall'osservazione dei diagrammi si deducono due ulteriori importanti considerazioni:

- la retroazione determina un aumento della pulsazione di taglio del sistema (effetto positivo);
- la retroazione determina una riduzione della costante di guadagno del sistema (effetto negativo).

**ESEMPIO 13**

Si consideri un sistema retroazionato in cui:

– la f.d.t. del blocco di andata è costituita da un blocco con un polo avente pulsazione di taglio 1000 rad/s in serie a un blocco proporzionale con costante di guadagno 20 dB;
– il blocco di retroazione, semplicemente proporzionale, ha costante di guadagno 10.

Si vogliono ricavare i diagrammi delle ampiezze relativi a:

– f.d.t. del blocco di andata;
– f.d.t. d'anello;
– f.d.t. del sistema retroazionato nel suo complesso.

## Soluzione

Il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello $AB(j\omega)$ si ottiene traslando verso l'alto il diagramma della f.d.t. del blocco di andata $A(j\omega)$ di una quantità pari a 20 dB.

L'operazione di traslazione non influisce sulla pulsazione di taglio che rimane di 1000 rad/s.

Il diagramma delle ampiezze della f.d.t. del sistema retroazionato $G(j\omega)$ assume il seguente andamento:

– vale –20 dB (reciproco della costante di guadagno del blocco di retroazione) fino alla pulsazione $\omega_0$ (10 000 rad/s);


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 13

– coincide con il diagramma del blocco di andata per valori superiori a $\omega_0$.

Il valore 10 000 rad/s che separa i due tratti rappresenta *la pulsazione di taglio del sistema retroazionato*.

I diagrammi vengono riportati in FIGURA **49**.

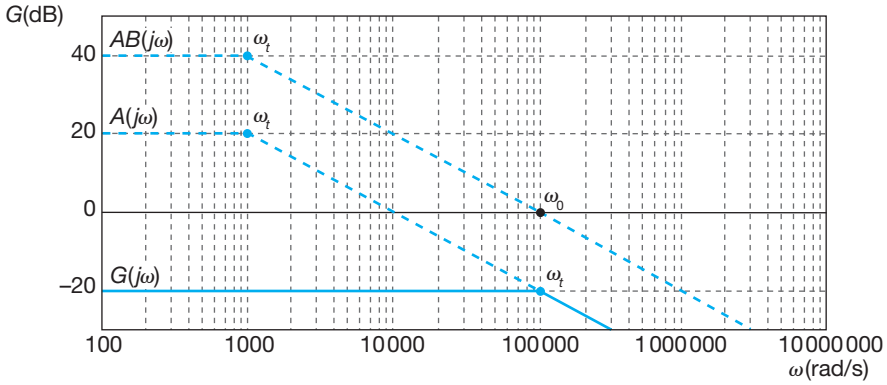



FIGURA **49**
Diagrammi delle ampiezze.

## 9.2 Prontezza di risposta

▶ Il **tempo di risposta** di un sistema rappresenta il tempo necessario a raggiungere una nuova posizione di equilibrio a seguito di una perturbazione.

La definizione, di carattere generale, è valida per qualsiasi sistema.

Per i sistemi del primo e del secondo ordine è agevole ottenere informazioni sul tempo di risposta.

Per sistemi più complessi come i sistemi retroazionati si possono ricavare informazioni sulla prontezza di risposta se si ha a disposizione il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello.

Questo perché dal punto di vista fisico la prontezza di risposta è legata alle costanti di tempo del sistema e quindi anche alle pulsazioni di taglio (con proporzionalità inversa).

Vista la coincidenza tra $\omega_t$ e $\omega_0$, è evidente che per ottenere una prontezza di risposta elevata la pulsazione di attraversamento a 0 dB della f.d.t. d'anello deve essere la più elevata possibile.

Nell'esempio riprodotto in FIGURA **50** il sistema 2 ha pulsazione di attraversamento a 0 dB superiore e quindi una maggior prontezza di risposta rispetto al sistema 1.

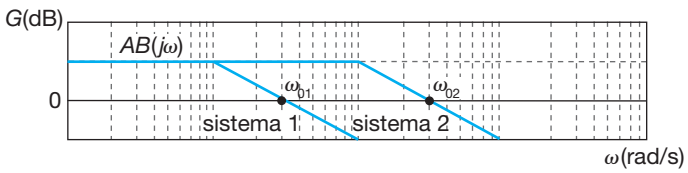



FIGURA **50**
Valutazione della prontezza di risposta.

## 9.3 Fedeltà di risposta e banda passante

▶ Un sistema si dice **fedele nella risposta** quando, facendo riferimento al diagramma delle ampiezze, la costante di guadagno del sistema non subisce attenuazioni in un determinato intervallo di pulsazioni.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Consegue la definizione di banda passante.

▶ Con una terminologia derivata dall'elettronica si definisce **banda passante** l'intervallo di pulsazioni in cui la costante di guadagno rimane costante.

Come evidenziato dal diagramma delle ampiezze riportato in FIGURA **51**, tra fedeltà di risposta e banda passante esiste un legame diretto; è di facile comprensione l'affermazione che più ampia è la banda passante, tanto maggiore è la fedeltà di risposta del sistema.

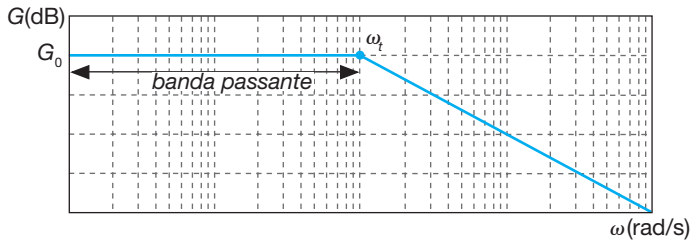



FIGURA **51**
Legame tra fedeltà di risposta e banda passante.

Due importanti considerazioni che si traggono dall'analisi del diagramma sono le seguenti:

- visto il legame tra $\omega_0$ e $\omega_t$ del sistema retroazionato si deduce che è la pulsazione di attraversamento a 0 dB della f.d.t. d'anello a limitare la banda passante del sistema retroazionato;
- la retroazione, determinando un incremento della pulsazione di taglio, porta anche a un conseguente allargamento della banda passante.

**ESEMPIO 14**

Il blocco di andata di un sistema retroazionato ha le caratteristiche di un blocco con un polo avente costante di tempo 10 ms.

Si vogliono esaminare la prontezza di risposta e la fedeltà di risposta del sistema quando il blocco di ritorno è semplicemente proporzionale con costante di guadagno 10 e 100.

## Soluzione

La prontezza di risposta viene valutata tracciando il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello che assume la forma

$$AB(j\omega) = \frac{G_0}{1 + j\omega 0{,}01}$$

essendo $G_0$ la costante di guadagno complessiva dell'anello variabile in relazione al valore assunto dalla costante di guadagno del blocco di retroazione.

I diagrammi delle ampiezze, nei due casi, vengono riportati in FIGURA **52**.

Con costante di guadagno 10 l'attraversamento a 0 dB avviene alla pulsazione di 1000 rad/s, con costante di guadagno 100 alla pulsazione di 10 000 rad/s.

Il sistema che ha costante di guadagno 100 ha una maggior prontezza di risposta rispetto al sistema con costante di guadagno 10.

È evidente che un aumento della costante di guadagno (da 10 a 100) ha determinato un miglioramento della prontezza di risposta.

I valori delle pulsazioni di attraversamento a 0 dB rappresentano anche l'ampiezza della banda passante del sistema retroazionato; per il secondo caso si deduce che, con una banda passante più ampia (che raggiunge i 10 kHz), si ha anche una maggiore fedeltà di risposta.

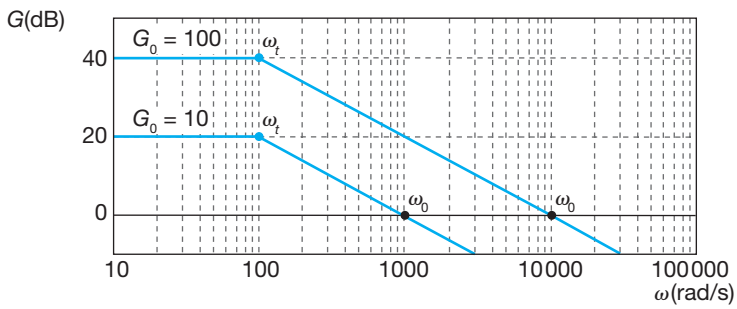



FIGURA **52**
Diagrammi delle ampiezze.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 9.4 Stabilità

La stabilità è una caratteristica intrinseca del sistema indipendente dal tipo di regime.

L'indagine sulla stabilità effettuata in regime sinusoidale basata sulla risposta in frequenza presenta i seguenti vantaggi:

- anche una conoscenza non esatta della f.d.t. d'anello porta a risultati almeno qualitativamente attendibili;
- è possibile definire dei margini di stabilità che indicano quanto il sistema è vicino o lontano da essa;
- è possibile ricavare sperimentalmente la risposta in frequenza applicando all'ingresso del sistema ad anello aperto un segnale sinusoidale di ampiezza fissa e frequenza crescente e valutando l'uscita in modulo e fase.

L'indagine sulla stabilità di un sistema retroazionato può essere effettuata utilizzando:

- il *criterio di Bode*;
- il *criterio di Nyquist*.

I due criteri consentono di individuare la stabilità di un sistema retroazionato facendo riferimento soltanto ai diagrammi della f.d.t. d'anello.

I criteri che utilizzano il tracciamento dei diagrammi di Bode e di Nyquist vengono presentati in *forma semplificata* ovvero ipotizzando il sistema *stabile ad anello aperto*.

## 9.5 Criterio di Bode

Il criterio di Bode consente in molti casi di individuare la stabilità di un sistema retroazionato tracciando soltanto il diagramma di Bode delle ampiezze della f.d.t. d'anello.

▶ Il **criterio di Bode** afferma che il sistema è stabile se, in corrispondenza della pulsazione in cui il diagramma delle ampiezze attraversa l'asse tracciato a 0 dB (*pulsazione di attraversamento a 0 dB*), l'angolo di fase è minore di 180°.

In realtà per avere una stabilità certa l'angolo di fase deve essere minore di 180° (si considera un limite per la stabilità di 135°).

Se poli e zeri sono piuttosto distanti tra loro lo sfasamento di –135° si ha proprio in corrispondenza del cambiamento di pendenza da –1 a –2.

Dalla sola lettura del diagramma delle ampiezze si deduce come conseguenza che:

- quando il taglio avviene con pendenza –1 il sistema è sicuramente stabile;
- quando il taglio avviene con prolungata pendenza –2 e oltre, il sistema è sicuramente instabile;
- quando il taglio avviene immediatamente dopo il punto di cambiamento di pendenza da –1 a –2 o immediatamente prima del punto di cambiamento di pendenza da –2 a –1 il sistema potrebbe essere stabile ma si richiedono ulteriori accertamenti utilizzando il diagramma delle fasi.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Per chiarire meglio il concetto si osservino gli esempi riportati in FIGURA **53**.

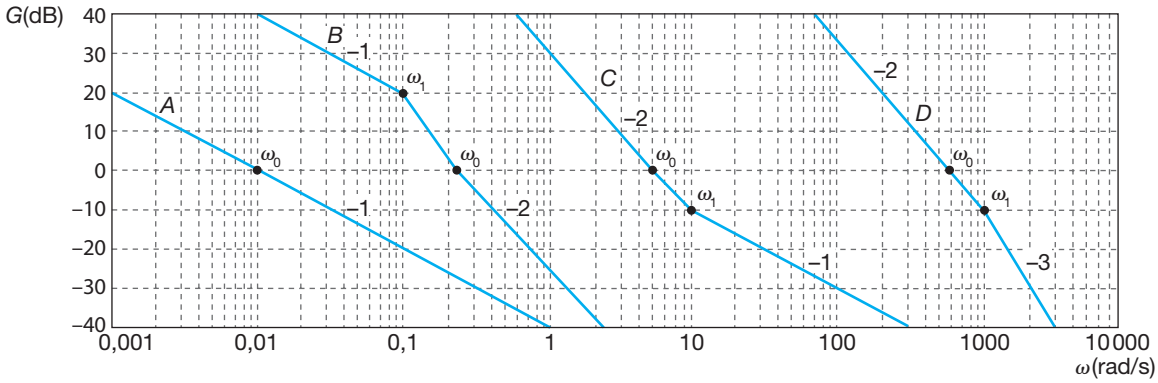



FIGURA **53**
Esempi applicativi del criterio di stabilità di Bode.

Dall'analisi dei diagrammi si evidenzia che:

- il *sistema A* è sicuramente stabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene con prolungata pendenza –1;
- per il *sistema B* (teoricamente stabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene con pendenza –2 preceduta da pendenza –1) è meglio procedere con ulteriori accertamenti;
- per il *sistema C* (teoricamente stabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene con pendenza –2 seguita da pendenza –1) è meglio procedere con ulteriori accertamenti;
- il *sistema D* è sicuramente instabile perché il punto d'attraversamento con l'asse a 0 dB avviene con prolungata pendenza –2 seguita da pendenza –3.

**ESEMPIO 15**

Si studi la stabilità del sistema retroazionato la cui f.d.t. d'anello è rappresentata dalla seguente espressione:

$$AB(j\omega) = \frac{1000}{(1+j\omega)(1+j\omega 0{,}1)(1+j\omega 0{,}001)}$$

## Soluzione

Il sistema ha costante di guadagno d'anello pari a 1000 (60 dB) e tre poli; le pulsazioni corrispondenti valgono 1 rad/s, 10 rad/s e 1000 rad/s.

Il diagramma delle ampiezze viene riportato in FIGURA **54**.

Il sistema non è stabile perché l'attraversamento a 0 dB della f.d.t. d'anello avviene con prolungata pendenza –2 (la distanza tra il punto di cambiamento della pendenza da –1 a –2 e il punto di attraversamento è di una decade) seguita da pendenza –3.

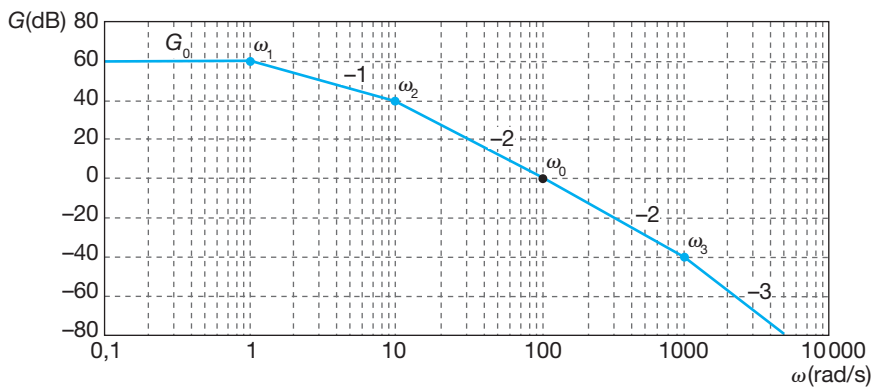



FIGURA **54**
Diagramma delle ampiezze.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESEMPIO 16**

Si studi la stabilità del sistema retroazionato la cui f.d.t. d'anello è rappresentata dalla seguente espressione:

$$AB(j\omega) = \frac{10}{(1+j\omega)(1+j\omega 0{,}001)}$$

### Soluzione

Il sistema ha costante di guadagno d'anello 10 (20 dB) e due poli; le pulsazioni corrispondenti valgono 1 rad/s e 1000 rad/s.

Il diagramma delle ampiezze (in cui non è rappresentato il secondo polo perché non influenza lo studio della stabilità) viene riportato in FIGURA **55**.

Il sistema è sicuramente stabile perché l'attraversamento a 0 dB della f.d.t. d'anello avviene con pendenza –1.

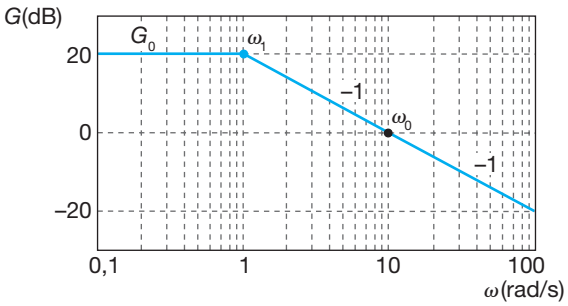



FIGURA **55**
Diagramma delle ampiezze.

## 9.6 Margine di fase

In particolar modo nei casi incerti per uno studio più preciso della stabilità ci si deve avvalere delle considerazioni relative al **margine di fase** che si traggono appunto dal diagramma delle fasi.

Affinché la stabilità del sistema sia garantita contro eventuali disturbi ci deve sempre essere un *margine di fase sufficiente*.

▶ Il **margine di fase** (brevemente m.d.f.) viene definito come il complemento a 180° dell'angolo di fase misurato in corrispondenza della pulsazione di attraversamento a 0 dB.

Per ottenere una stabilità soddisfacente il margine di fase deve essere positivo e superiore a 40/45°; l'angolo di fase corrispondente non deve superare i 135/140°.

La verifica dell'm.d.f. può avvenire tramite lettura diretta di entrambi i diagrammi della f.d.t. d'anello o attraverso un calcolo approssimato derivato dalla sola lettura del diagramma delle ampiezze.

Il **primo metodo** consiste nel leggere l'm.d.f. direttamente sul diagramma delle fasi della f.d.t. d'anello in corrispondenza della pulsazione di attraversamento a 0 dB ricavata sul corrispondente diagramma delle ampiezze.

In FIGURA **56** viene riportato un esempio di lettura diretta del margine di fase.

Il **secondo metodo** prevede nell'ordine:

- il rilievo per via grafica dal diagramma delle ampiezze della pulsazione di attraversamento a 0 dB;
- il calcolo dell'angolo di sfasamento totale sommando algebricamente gli angoli di sfasamento $\varphi_i$ dovuti a ciascun polo e a ciascuno zero in corrispondenza della pulsazione di attraversamento a 0 dB;
- il calcolo dell'm.d.f. eseguendo la differenza tra 180° e l'angolo di sfasamento totale.

Gli angoli di sfasamento si calcolano utilizzando la relazione:

$$\varphi_i = \arctan \omega_0 \tau_i = \arctan \omega_0 / \omega_i$$

Il contributo è negativo nel caso di un polo, positivo nel caso di uno zero; $\tau_i$ e $\omega_i$ sono rispettivamente la costante di tempo e la pulsazione di taglio relativi a ciascun polo o zero.

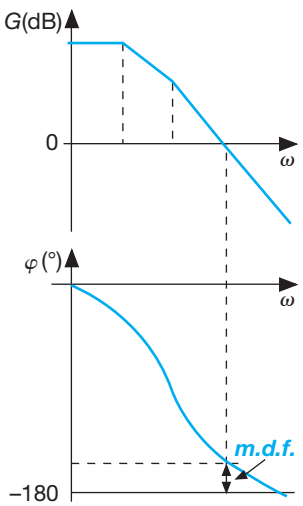



FIGURA **56**
Esempio di lettura diretta del margine di fase.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Risulta quindi per il margine di fase: $m.d.f. = 180° - \Sigma\varphi_i$ essendo $\Sigma\varphi_i$ la sommatoria dei singoli angoli di sfasamento.

**ESEMPIO 17**

Analizzando il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello di un sistema retroazionato con tre poli si rileva che la pulsazione di attraversamento a 0 dB vale 100 rad/s.

Le pulsazioni corrispondenti ai poli valgono rispettivamente 1 rad/s, 10 rad/s e 1000 rad/s.

Si vuole verificare se il margine di fase risulta sufficiente per una buona stabilità del sistema.

### Soluzione

Per il calcolo dei contributi dovuti alle singole pulsazioni si ha:

$$\varphi_1 = \arctan \omega_0/\omega_1 = \arctan 100/1 = 89°$$
$$\varphi_2 = \arctan \omega_0/\omega_2 = \arctan 100/10 = 84°$$
$$\varphi_3 = \arctan \omega_0/\omega_3 = \arctan 100/1000 = 6°$$

Risulta quindi:

$$\Sigma\varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 89° + 84° + 6° = 179°$$
$$m.d.f. = 180° - \Sigma\varphi_i = 180° - 179° = 1°$$

Il valore non è compatibile con la stabilità.

**ESEMPIO 18**

Analizzando il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello di un sistema retroazionato con due poli si rileva che la pulsazione di attraversamento a 0 dB vale 10 rad/s.

Le pulsazioni corrispondenti ai poli valgono rispettivamente 1 rad/s e 1000 rad/s.

Si vuole verificare se il margine di fase risulta sufficiente per una buona stabilità del sistema.

### Soluzione

Per il calcolo dei contributi dovuti alle singole pulsazioni si ha:

$$\varphi_1 = \arctan \omega_0/\omega_1 = \arctan 10/1 = 84°$$
$$\varphi_2 = \arctan \omega_0/\omega_2 = \arctan 10/1000 = 6°$$

Risulta quindi:

$$\Sigma\varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 = 84° + 6° = 90°$$
$$m.d.f. = 180° - \Sigma\varphi_i = 180° - 90° = 90°$$

Il valore garantisce una buona stabilità.

## 9.7 Criterio di Nyquist

Il criterio di Nyquist consente di individuare la stabilità di un sistema ad anello chiuso tracciando il solo diagramma polare della f.d.t. d'anello.

▶ Il **criterio di Nyquist semplificato** afferma che condizione necessaria e sufficiente affinché un sistema retroazionato sia sicuramente stabile è che il diagramma polare della f.d.t. d'anello sia esterno al punto del piano complesso di coordinate (–1; 0) denominato **punto critico**.

In FIGURA **57** vengono riportati due esempi di diagrammi corrispondenti a un sistema stabile e a uno instabile.

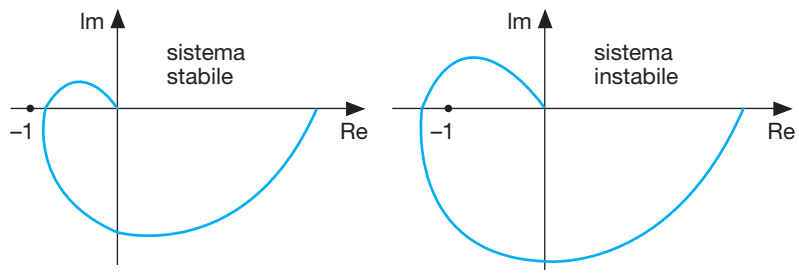



FIGURA **57**
Diagrammi di sistemi stabili e instabili.

Sul diagramma polare si può anche individuare il *margine di fase* del sistema che si ottiene calcolando l'angolo corrispondente alla retta che congiunge l'origine degli assi con il punto d'intersezione tra la circonferenza di raggio unitario e il diagramma della funzione stessa.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **58** viene riportato un esempio di rappresentazione del margine di fase di un sistema.

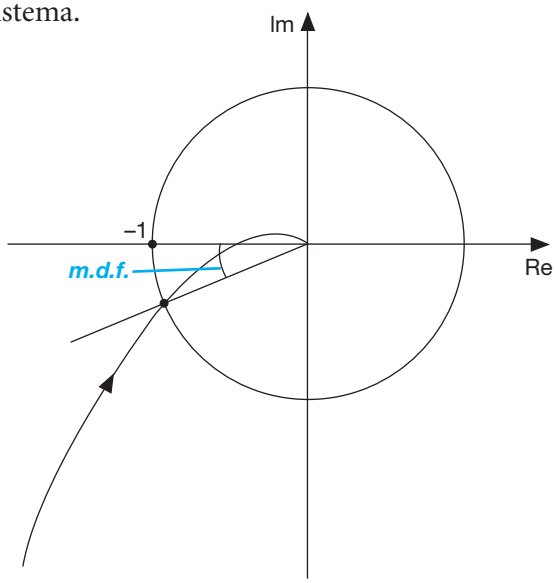



FIGURA **58**
Rappresentazione del margine di fase.

**ESEMPIO 19**

Un sistema retroazionato ha la seguente f.d.t. d'anello:

$$AB(j\omega)=\frac{10}{j\omega(1+j\omega)(1+j\omega 0{,}01)}$$

Sulla linea di andata, immediatamente a valle del nodo di confronto, viene inserito in serie un blocco proporzionale avente costante di guadagno regolabile tra 5 e 15 (il blocco viene anche denominato regolatore proporzionale).

Si valuti la stabilità del sistema al variare della costante di guadagno e, riferendosi ai diagrammi polari, si propongano due esempi di sistema stabile e instabile.

## Soluzione

Con facili passaggi si ottiene l'espressione in forma complessa che evidenzia le parti reale e immaginaria della funzione; tenendo conto della costante di guadagno del regolatore, indicato con $k$, e razionalizzando risulta:

$$AB(j\omega)=\frac{j10k(1-j\omega)\left(1-\frac{j\omega}{100}\right)}{j\omega(1+\omega^2)\left(1+\frac{\omega^2}{10^4}\right)}$$

Con ulteriori passaggi si ha:

$$AB(j\omega)=$$

$$=-10k\left[\frac{1{,}01}{(1+\omega^2)\left(1+\frac{\omega^2}{10^4}\right)}+j\frac{\left(1-\frac{\omega^2}{100}\right)}{\omega(1+\omega^2)\left(1+\frac{\omega^2}{10^4}\right)}\right]$$

La pulsazione corrispondente al punto di intersezione con l'asse reale si ottiene per quel valore di pulsazione che annulla il numeratore della parte immaginaria ovvero per 10 rad/s.

In corrispondenza del valore trovato, per l'ascissa del punto d'intersezione con l'asse reale, deve risultare:

$$-10k\left[\frac{1{,}01}{(1+\omega^2)\left(1+\frac{\omega^2}{10^4}\right)}\right]=$$

$$=-10k\left[\frac{1{,}01}{(1+100)\left(1+\frac{1}{100}\right)}\right]\cong\frac{10k}{101}$$

In base al criterio di Nyquist si deduce che il sistema è sicuramente stabile per

$$\frac{10k}{101}<1$$

ovvero per valori di $k$ compresi tra 5 e 10,1 (estremo superiore escluso).

Il diagramma polare del sistema viene rappresentato in FIGURA **59** per due differenti valori di $k$ corrispondenti a situazioni di stabilità ($k$ = 7) e instabilità ($k$ = 12).

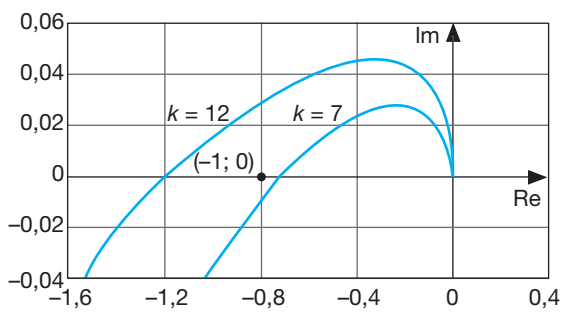



FIGURA **59**
Diagrammi polari per due differenti valori di $k$.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## ESERCIZIO 1

Si rappresentino i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un blocco semplicemente proporzionale caratterizzato da una costante di guadagno unitaria nell'intervallo di pulsazioni compreso tra 0,1 rad/s e 10 rad/s.

### Soluzione

A una costante di guadagno unitaria corrisponde un tratto orizzontale a 0 dB, la fase corrispondente è di 0°.

I diagrammi pertanto sono quelli rappresentati in FIGURA **60**.

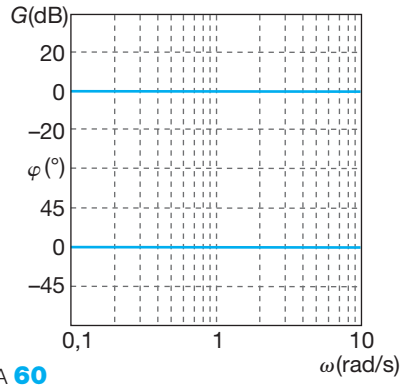



FIGURA **60**
Diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi.

## ESERCIZIO 2

Si rappresentino i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un sistema costituito da un blocco con un polo in serie a un blocco proporzionale; le caratteristiche del sistema sono le seguenti:

- la pulsazione di taglio vale 100 rad/s;
- la costante di proporzionalità vale 10.

### Soluzione

La costante di tempo vale:

$$\tau = \frac{1}{\omega_t} = \frac{1}{100} = 0{,}01 \text{ rad/s}$$

Risulta pertanto la f.d.t. seguente:

$$G(j\omega) = \frac{10}{1 + j\omega 0{,}01}$$

Con una costante di proporzionalità pari a 10 si ha una costante di guadagno di 20 dB.

I diagrammi di Bode sono pertanto quelli rappresentati in FIGURA **61**.

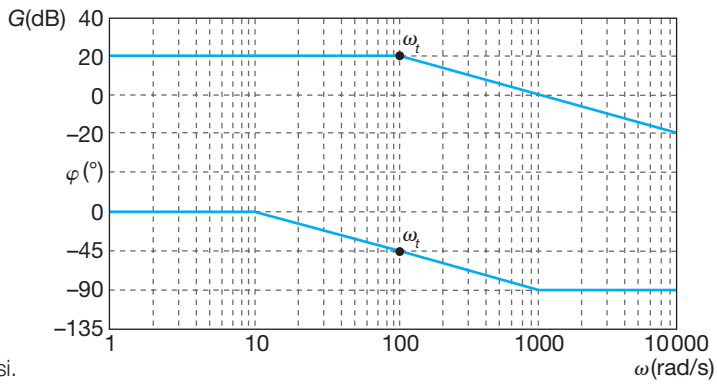



FIGURA **61**
Diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi.

## ESERCIZIO 3

Si rappresenti il diagramma delle ampiezze relativo a un sistema la cui f.d.t. è la seguente:

$$G(j\omega) = \frac{100}{(1 + j\omega)(1 + j\omega 0{,}1)}$$

### Soluzione

Si evidenziano nella f.d.t. un blocco proporzionale e due blocchi con un polo che hanno le seguenti caratteristiche:

- il blocco proporzionale ha ampiezza 100;
- il primo polo è in corrispondenza della pulsazione $\omega_1$ = 1 rad/s;
- il secondo polo è in corrispondenza della pulsazione $\omega_2$ = 10 rad/s.

Il diagramma delle ampiezze presenta di conseguenza il seguente andamento:

- rimane costante (40 dB) fino alla pulsazione 1 rad/s;
- ha pendenza –1 nell'intervallo compreso tra 1 rad/s e 10 rad/s perché prevale il contributo del primo polo;
- da 10 rad/s in poi ha pendenza –2 in quanto alla pendenza –1 caratteristica del primo polo viene sommato il contributo del secondo polo.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESERCIZIO 3

Il diagramma delle ampiezze viene riportato in FIGURA **62**.

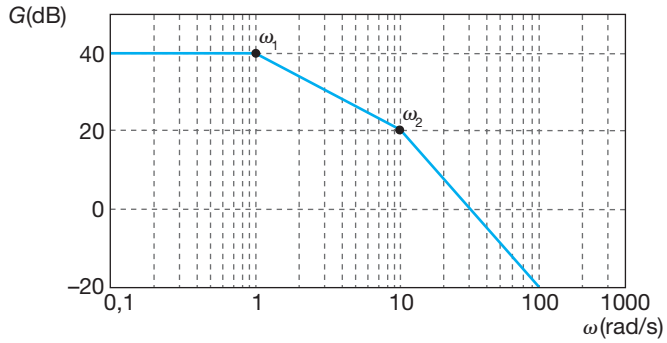



FIGURA **62**
Diagramma delle ampiezze.

ESERCIZIO 4

Utilizzando il solo diagramma delle ampiezze si discuta la stabilità di un sistema retroazionato che, ad anello aperto, ha la seguente f.d.t. d'anello:

$$AB(j\omega) = \frac{100}{(1+j\omega)(1+j\omega 0{,}1)}$$

## Soluzione

Il diagramma delle ampiezze con evidenziata la pulsazione di attraversamento a 0 dB viene riportato in FIGURA **63**.

Con il solo diagramma delle ampiezze non è possibile definire la stabilità del sistema in quanto l'attraversamento a 0 dB avviene con pendenza –2 piuttosto lontano dalla pulsazione alla quale avviene il cambiamento di pendenza da –1 a –2; per completare l'indagine è quindi necessario anche il diagramma delle fasi.

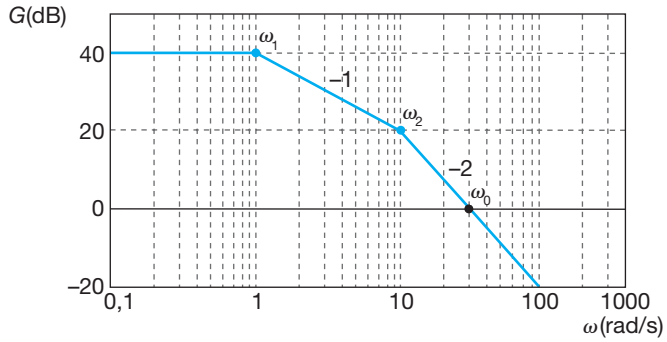



FIGURA **63**
Diagramma delle ampiezze.

ESERCIZIO 5

Utilizzando il solo diagramma delle ampiezze si discuta la stabilità di un sistema retroazionato che, ad anello aperto, ha la seguente f.d.t. d'anello:

$$AB(j\omega) = \frac{3{,}16}{(1+j\omega)(1+j\omega 0{,}1)}$$

## Soluzione

Il diagramma delle ampiezze con evidenziata la pulsazione di attraversamento a 0 dB viene riportato in FIGURA **64**.

Si evidenzia il fatto che la costante di guadagno espressa in dB vale 10; risulta infatti:

$$20 \log 3{,}16 = 10 \text{ dB}$$

Poiché l'attraversamento a 0 dB della f.d.t. d'anello avviene con pendenza –1 si conclude che il sistema è sicuramente stabile.

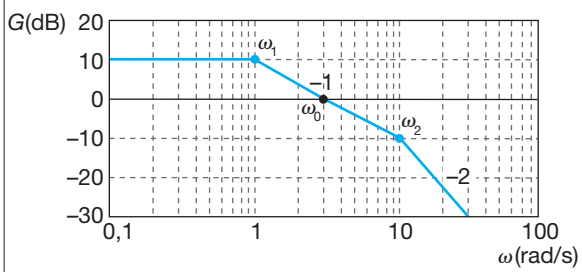



FIGURA **64**
Diagramma delle ampiezze.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESERCIZIO 6

Analizzando il diagramma delle ampiezze della f.d.t. d'anello di un sistema retroazionato con due poli si rileva che la pulsazione di attraversamento a 0 dB vale 30 rad/s.

Le pulsazioni corrispondenti ai poli valgono rispettivamente 1 rad/s e 10 rad/s.

Si verifichi se il margine di fase risulta sufficiente per una buona stabilità del sistema.

## Soluzione

Per il calcolo dei contributi dovuti alle singole pulsazioni si ha:

$$\varphi_1 = \arctan \omega_0/\omega_1 = \arctan 30/1 = 88°$$
$$\varphi_2 = \arctan \omega_0/\omega_2 = \arctan 30/10 = 72°$$

Risulta quindi:

$$\Sigma\varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 = 88° + 72° = 160°$$
$$m.d.f. = 180° - \Sigma\varphi_i = 180° - 160° = 20°$$

Il margine di fase non è sufficiente per avere una condizione di stabilità accettabile.

ESERCIZIO 7

Si consideri un sistema retroazionato di cui è noto il diagramma delle ampiezze riportato in FIGURA **65**.

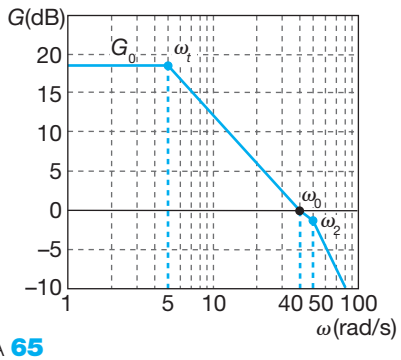



FIGURA **65**
Diagramma delle ampiezze.

Si studi la stabilità del sistema con il criterio di Bode calcolando il margine di fase che si ricava utilizzando le informazioni contenute nei diagrammi.

## Soluzione

Il punto di attraversamento a 0 dB avviene con pendenza –1 e quindi il sistema è stabile.

Per il calcolo dei contributi dovuti alle singole pulsazioni si ha:

$$\varphi_1 = \arctan \omega_0/\omega_1 = \arctan 40/5 = 83°$$
$$\varphi_2 = \arctan \omega_0/\omega_2 = \arctan 40/50 = 39°$$

Risulta quindi:

$$\Sigma\varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 = 83° + 39° = 122°$$
$$m.d.f. = 180° - \Sigma\varphi_i = 180° - 122° = 58°$$

Il margine di fase è sufficiente per avere una condizione di stabilità accettabile.

ESERCIZIO 8

Un sistema retroazionato ha la seguente f.d.t. d'anello:

$$AB(j\omega) = \frac{8{,}4}{(1 + j\omega 0{,}2)(1 + j\omega 0{,}02)(1 + j\omega 0{,}002)}$$

Tracciando il diagramma polare e utilizzando il criterio di Nyquist si discuta la stabilità del sistema.

## Soluzione

Data la presenza di tre poli di cui nessuno nell'origine il diagramma presenta le seguenti caratteristiche.

- parte da un punto dell'asse reale in senso orario (non potrebbe essere altrimenti in quanto non ci sono zeri);
- per pulsazioni elevate il diagramma termina nell'origine degli assi;
- si hanno un punto d'incontro con l'asse immaginario e uno con l'asse reale.

Quello che interessa ai fini della stabilità è il punto d'incontro con l'asse reale.

Per calcolarlo si può razionalizzare e, di seguito, calcolare la parte reale e la parte immaginaria della funzione.

Razionalizzando risulta:

$$AB(j\omega) = 8{,}4\,\frac{(1 - j\omega 0{,}002)(1 - j\omega 0{,}02)(1 - j\omega 0{,}2)}{\left(1 + \frac{\omega^2}{250\,000}\right)\left(1 + \frac{\omega^2}{2500}\right)\left(1 + \frac{\omega^2}{25}\right)}$$

Con ulteriori passaggi si ottengono la parte reale e la parte immaginaria della funzione:

$$Re\,[AB(j\omega)] =$$
$$= 8{,}4\left[\frac{1 - \omega^2 0{,}00444}{\left(1 + \frac{\omega^2}{250\,000}\right)\left(1 + \frac{\omega^2}{2500}\right)\left(1 + \frac{\omega^2}{25}\right)}\right]$$

$$Im\,[AB(j\omega)] =$$
$$= j8{,}4\left[\frac{\omega(\omega^2 0{,}000008 - 0{,}222)}{\left(1 + \frac{\omega^2}{250\,000}\right)\left(1 + \frac{\omega^2}{2500}\right)\left(1 + \frac{\omega^2}{25}\right)}\right]$$

La pulsazione corrispondente al punto di intersezione con l'asse reale si ottiene annullando il numeratore della parte immaginaria ▶


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**ESERCIZIO 8**

$$\omega^2\, 0{,}000008 - 0{,}222 = 0$$

e ciò avviene per 166,6 rad/s.

In corrispondenza del valore trovato, per l'ascissa del punto d'intersezione con l'asse reale, deve risultare:

$$8{,}4\left[\frac{1-\omega^2 0{,}00444}{\left(1+\frac{\omega^2}{250\,000}\right)\left(1+\frac{\omega^2}{2500}\right)\left(1+\frac{\omega^2}{25}\right)}\right]=$$

$$=\left[\frac{-1026{,}7}{1{,}1\cdot 12{,}1\cdot 1111{,}2}\right]=-0{,}069$$

Il diagramma polare del sistema, nell'intorno dell'origine, presenta le caratteristiche riprodotte in FIGURA **66**.

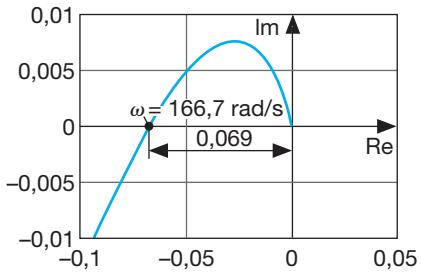



FIGURA **66**
Diagramma polare nell'intorno dell'origine.

Pertanto, in base al criterio di Nyquist si deduce che il sistema è sicuramente stabile perché il valore trovato è sensibilmente inferiore a –1.

## ESERCIZI

**1** **Si consideri un sistema elettrico costituito da un circuito RL serie; si scelga come ingresso la tensione di alimentazione e come uscita la tensione ai capi dell'induttore.**
**Si ricavi la f.d.t. in regime sinusoidale e si evidenzi il fatto che la costante di tempo del circuito è la stessa che si ottiene analizzando la risposta al gradino.**

**2** **Si consideri un sistema elettrico del primo ordine costituito da un circuito RL serie; si scelga come ingresso la tensione di alimentazione e come uscita la tensione ai capi del resistore.**
**Si ricavi la f.d.t. in regime sinusoidale per entrambe le forme fattorizzate mettendo in evidenza le funzioni elementari in esse contenute.**

**3** **Si consideri un sistema elettrico del secondo ordine costituito da un circuito RLC serie.**
**Come evidenziato in** FIGURA **67** **si scelga come ingresso la tensione di alimentazione e come uscita la tensione ai capi dell'induttore.**

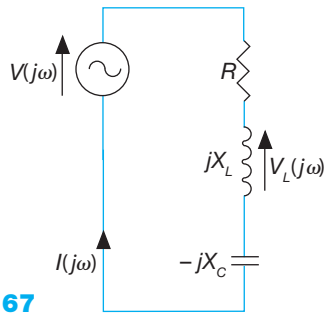



FIGURA **67**

**Si determini l'espressione della f.d.t. in regime sinusoidale e si individuino le caratteristiche dei blocchi elementari in cui può essere scomposta.**

**4** **Si consideri un sistema elettrico del secondo ordine costituito da un circuito RLC serie.**
**Come evidenziato in** FIGURA **68** **si scelga come ingresso la tensione di alimentazione e come uscita la tensione ai capi del resistore.**

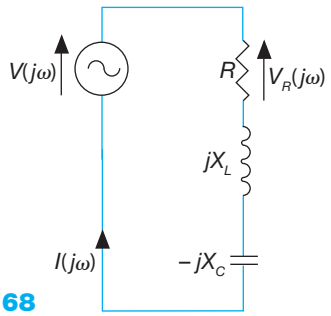



FIGURA **68**

**Si determini l'espressione della f.d.t. in regime sinusoidale e si individuino le caratteristiche dei blocchi elementari in cui può essere scomposta.**

**5** **Si rappresentino i diagrammi delle ampiezze e delle fasi relativi a un sistema che presenta la f.d.t. seguente:**

$$G(j\omega)=\frac{100}{(1+j\omega 100)\,(1+j\omega 1000)}$$

**6** **Si rappresentino i diagrammi delle ampiezze e delle fasi relativi a un sistema che presenta la f.d.t. seguente:**

$$G(j\omega)=\frac{10\,(1+j\omega 0{,}01)}{(1+j\omega)}$$

**7** **Si rappresenti il diagramma polare relativo a un sistema che presenta la f.d.t. seguente:**

$$G(j\omega)=\frac{10}{(1+j\omega 0{,}1)\,(1+j\omega 10)}$$

**Si individui con esattezza il punto d'intersezione con l'asse verticale.**

**8** **Si rappresenti il diagramma polare relativo a un sistema che presenta la f.d.t. seguente:**

$$G(j\omega)=\frac{10}{(1+j\omega 0{,}1)\,(1+j\omega 10)\,(1+j\omega 1000)}$$

**Si individuino con esattezza i punti di intersezione con gli assi orizzontale e verticale.**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**9** **Si individui la f.d.t. del sistema che ha come diagramma polare quello riprodotto in** FIGURA **69** **sapendo che la costante di tempo del sistema stesso vale 10 s.**

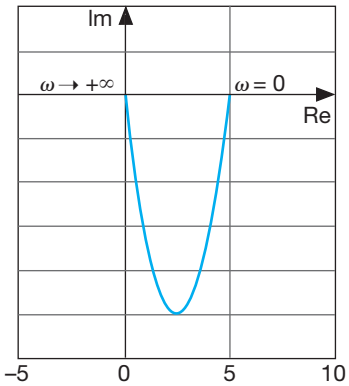



FIGURA **69**

**10** **Il diagramma delle ampiezze ad anello aperto di un sistema retroazionato viene rappresentato in** FIGURA **70**; **si analizzi la stabilità del sistema stesso.**

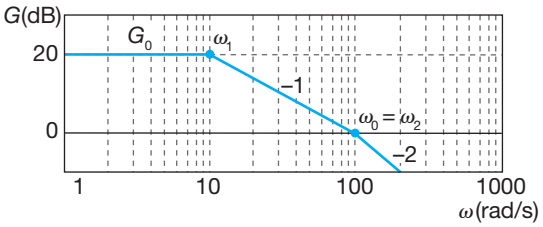



FIGURA **70**

**11** **Si individui la f.d.t. del sistema caratterizzato dal diagramma delle ampiezze riprodotto in** FIGURA **71**.

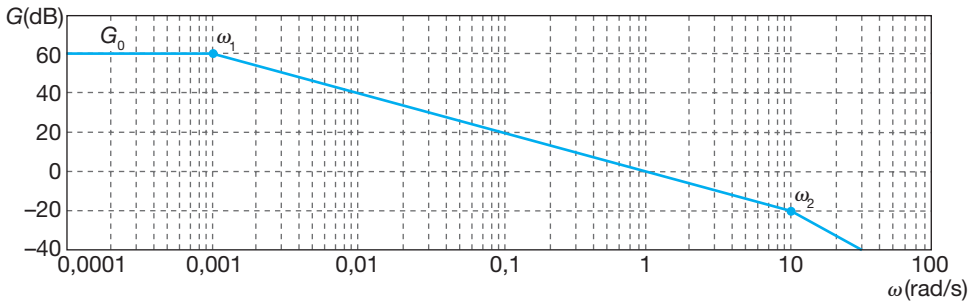



FIGURA **71**

**12** **Il diagramma delle ampiezze riprodotto in** FIGURA **72** **è tipico del blocco di andata di un sistema retroazionato; sapendo che il blocco di retroazione è semplicemente proporzionale con costante di proporzionalità pari a 10; si individuino le espressioni:**

- **della f.d.t. del blocco di andata;**
- **della f.d.t. d'anello;**
- **della f.d.t. del sistema retroazionato nel suo complesso.**

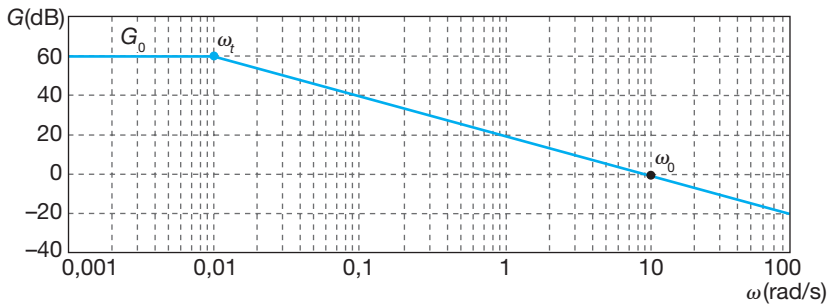



FIGURA **72**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# DOMANDE a risposta aperta

**1** **Indicare il tipo di segnale di prova utilizzato per studiare la risposta in frequenza di un sistema.**

**2** **Definire la corrispondenza tra le radici dei polinomi che caratterizzano l'espressione della f.d.t. di un sistema e i poli e gli zeri del medesimo.**

**3** **Commentare la seguente espressione della f.d.t.**

$$\log|G(j\omega)| = \log|G_0| + \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{z_1}\right)\right| + \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{z_2}\right)\right| +$$

$$+ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots + \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{z_m}\right)\right| - \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{p_1}\right)\right| +$$

$$- \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{p_2}\right)\right| - \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots - \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{p_n}\right)\right|$$

**mettendo in evidenza le proprietà del calcolo con i logaritmi che vengono applicate.**

**4** **Commentare la forma fattorizzata della f.d.t.**

$$G(j\omega) = k \cdot \frac{(j\omega - z_1)(j\omega - z_2)\ldots\ldots(j\omega - z_m)}{(j\omega - p_1)(j\omega - p_2)\ldots\ldots(j\omega - p_n)}$$

**mettendo in particolare evidenza le caratteristiche d'impiego.**

**5** **Spiegare il significato del termine banda passante mettendo in evidenza la relazione che sussiste tra ampiezza della banda passante e velocità di risposta di un sistema.**

**6** **Definire il significato del termine fedeltà di risposta e il conseguente significato di banda passante.**

**7** **Completare il sistema di coordinate rappresentato in** FIGURA **73** **inserendo i valori mancanti.**

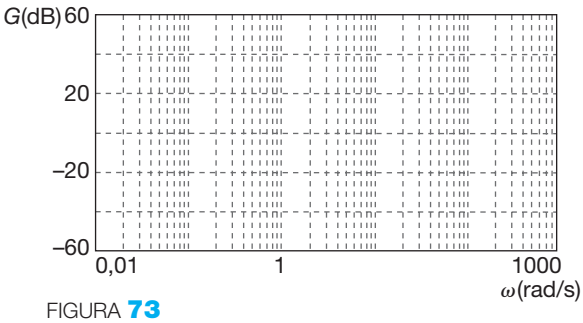



FIGURA **73**

**8** **Completare il sistema di coordinate rappresentato in** FIGURA **74** **inserendo i valori mancanti.**

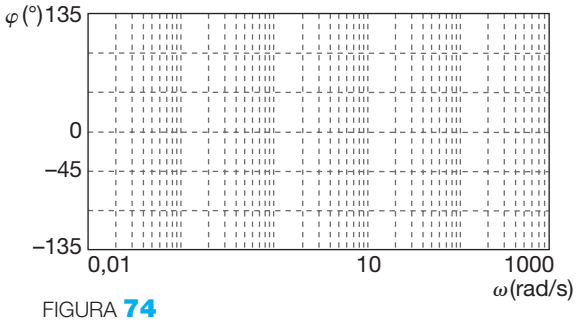



FIGURA **74**

**9** **Completare la** TABELLA **3** **esprimendo il valore in gradi della pendenza di una retta nei diagrammi di Bode.**

| $p$ | $p$(dB/decade) | $\varphi$(°) |
|---|---|---|
| 0 | 0 | |
| +1 | 20 | |
| –1 | –20 | |
| 2 | +40 | |
| –2 | –40 | |

TABELLA **3**

**10** **Completare la** TABELLA **4** **inserendo i valori mancanti.**

| $G$ | $G_{dB}$ | $G$ | $G_{dB}$ |
|---|---|---|---|
| $10^{-3}$ | | $\sqrt{2}$ | 3 |
| $10^{-2}$ | | 0,2 | |
| $10^{-1}$ | –20 | 2 | 6 |
| $10^{0}$ | 0 | 20 | |
| $10^{1}$ | | 0,5 | –6 |
| $10^{2}$ | | 5 | |
| $10^{3}$ | 60 | 50 | 34 |

TABELLA **4**

**11** **Evidenziare le differenze tra diagramma di Bode e diagramma di Nyquist ponendo in evidenza le grandezze che vengono coinvolte per la loro realizzazione.**

**12** **Completare la** FIGURA **75** **inserendo i valori mancanti di log $\omega$.**

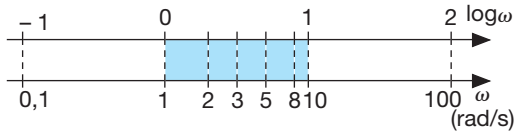



FIGURA **75**

**13** **Individuare le caratteristiche applicative della funzione elementare**

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + 2\xi j(\omega/\omega_n) - (\omega/\omega_n)^2}$$

**mettendo in evidenza la relazione che sussiste tra coefficiente di smorzamento e pulsazione naturale.**

**14** **Spiegare in modo sintetico come è possibile dedurre considerazioni sulla stabilità di un sistema di controllo ad anello chiuso dal tracciamento dei diagrammi di Bode.**

**15** **Spiegare in modo sintetico come è possibile dedurre considerazioni sulla stabilità di un sistema di controllo ad anello chiuso dal tracciamento dei diagrammi di Nyquist.**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**1** **Tra quelle elencate di seguito l'affermazione corretta è:**

A il diagramma delle fasi di un blocco con costante di tempo in ritardo è costante con fase nulla fino a una decade prima della pulsazione di taglio

B il diagramma delle ampiezze di un blocco con costante di tempo in ritardo assume una pendenza negativa pari a –45°/decade a partire da una decade prima della frequenza di taglio e fino a una decade dopo la frequenza di taglio

C il diagramma delle fasi di un blocco con costante di tempo in anticipo è costante con fase pari a –90° da una decade dopo la pulsazione di taglio in poi

D il diagramma delle fasi di un blocco con costante di tempo in ritardo è costante con fase nulla fino a una decade dopo la pulsazione di taglio

**2** **Quale delle seguenti formule risulta corretta:**

A $\omega_n = \dfrac{\tau_1}{\sqrt{\tau_1 \cdot \tau_2}}$

B $\xi = \dfrac{1}{\sqrt{\tau_2 / \tau_1}}$

C $|G(j\omega)|_{dB} = 20 + \log G(j\omega)$

D $\varphi = (\pi/4)\, p$

**3** **La funzione di trasferimento**

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

**è tipica:**

A di un blocco con uno zero

B di un blocco con un polo nell'origine

C di un blocco con un polo

D di un blocco con uno zero nell'origine

**4** **Tra quelle elencate di seguito l'affermazione corretta è:**

A pulsazione di taglio e costante di guadagno sono grandezze inversamente proporzionali

B pulsazione di taglio e costante di tempo sono grandezze direttamente proporzionali

C poli e zeri sono sempre il reciproco con il segno cambiato di una costante di tempo

D il diagramma delle ampiezze di un blocco con un polo ha un andamento costante al variare della pulsazione

**5** **Tra quelle elencate di seguito l'affermazione corretta è:**

A il diagramma delle fasi (in forma approssimata) di un blocco con un polo è costante con fase nulla fino a una decade prima della pulsazione di taglio

B il diagramma delle ampiezze di un blocco con un polo assume una pendenza pari a 45°/dec a partire da una decade prima della frequenza di taglio e fino a una decade dopo la frequenza di taglio

C il diagramma delle fasi (in forma approssimata) di un blocco con un polo assume una pendenza pari a 45°/decade a partire da una decade prima della frequenza di taglio e fino a una decade dopo la frequenza di taglio

D il diagramma delle ampiezze di un blocco con uno zero assume una pendenza pari a –45 dB/dec a partire da una decade prima della frequenza di taglio e fino a una decade dopo la frequenza di taglio

**6** **Il diagramma delle ampiezze riprodotto in** FIGURA **76** **è tipico di un sistema:**

A con due poli

B con due zeri

C zero-polo

D con tre poli

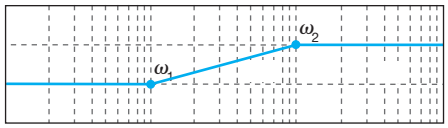



FIGURA **76**

**7** **Il diagramma delle ampiezze riprodotto in** FIGURA **77** **è tipico di un sistema:**

A con due poli

B polo-zero

C con tre poli

D con due zeri

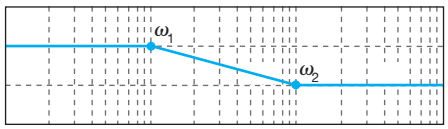



FIGURA **77**

**8** **Il diagramma delle ampiezze riprodotto in** FIGURA **78** **è tipico di un sistema:**

A con tre poli

B polo-zero-zero-polo

C polo-zero-zero-zero

D zero-zero-zero-polo

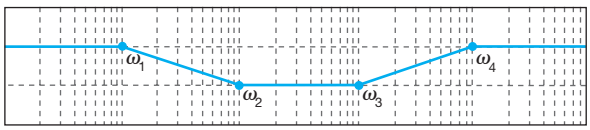



FIGURA **78**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# Esercitazioni applicate alla teoria dei sistemi

# 3

## 1 Concetti introduttivi

Scopo delle esercitazioni che seguono è di utilizzare il software disponibile per completare la trattazione dei seguenti argomenti:

- tracciamento di grafici come i diagrammi di Bode e di Nyquist;
- studio della stabilità dei sistemi;
- calcolo di trasformate e antitrasformate.

Lo studio della teoria dei sistemi per determinare la risposta nel dominio del tempo e la stabilità dei medesimi avveniva in passato senza l'ausilio del computer.

Il software attualmente disponibile sostituisce per esempio il tracciamento manuale di diagrammi e il calcolo di antitrasformate che sono talvolta operazioni alquanto laboriose.

Il software adatto per questi scopi può essere:

- *non dedicato* ma comunque utilizzabile se lo si predispone in modo opportuno;
- *dedicato* in modo più specifico a queste applicazioni perché opportunamente predisposto;
- creato *ad hoc* facendo uso di linguaggi evoluti.

Un primo esempio di *software non dedicato* è il foglio elettronico che, se programmato opportunamente, può essere predisposto per il tracciamento dei diagrammi di Bode e di Nyquist e questo è lo scopo delle esercitazioni che seguono effettuate con il programma Excel della Microsoft.

Un secondo esempio di software non dedicato in modo specifico per queste applicazioni è *Multisim* che consente il tracciamento dei diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi a partire dalla f.d.t. del sistema.

Un esempio di software dedicato per queste specifiche applicazioni è *Matlab* che consente, oltre a innumerevoli altre possibilità, il tracciamento di diagrammi di Bode e di Nyquist e il calcolo di antitrasformate.

Esistono anche altri programmi di più immediato utilizzo come per esempio *Program CC* che, almeno per quanto riguarda la teoria dei sistemi, svolgono funzioni analoghe a quelle di Matlab.

Per far fronte a esigenze particolari si evidenzia infine la possibilità di realizzare (utilizzando linguaggi evoluti come il *Pascal*, il *C* e il *Basic*) il software creato ad hoc per queste applicazioni.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 2 Applicazioni con Excel

L'ambiente di lavoro di Excel utilizzato nelle esercitazioni è quello della versione 2007.

Per la realizzazione dei diagrammi di Bode devono essere riportati sul foglio elettronico i seguenti dati relativi alla f.d.t. del sistema:

- pulsazioni sull'asse delle ascisse;
- ampiezze o fasi sull'asse delle ordinate.

Per la realizzazione dei diagrammi di Nyquist devono essere riportati sul foglio elettronico i seguenti dati relativi alla f.d.t. del sistema:

- parte reale in funzione della pulsazione sull'asse delle ascisse;
- parte immaginaria in funzione della pulsazione sull'asse delle ordinate.

Con i dati a disposizione sul foglio elettronico si crea il grafico utilizzando i comandi evidenziati in FIGURA **1**.

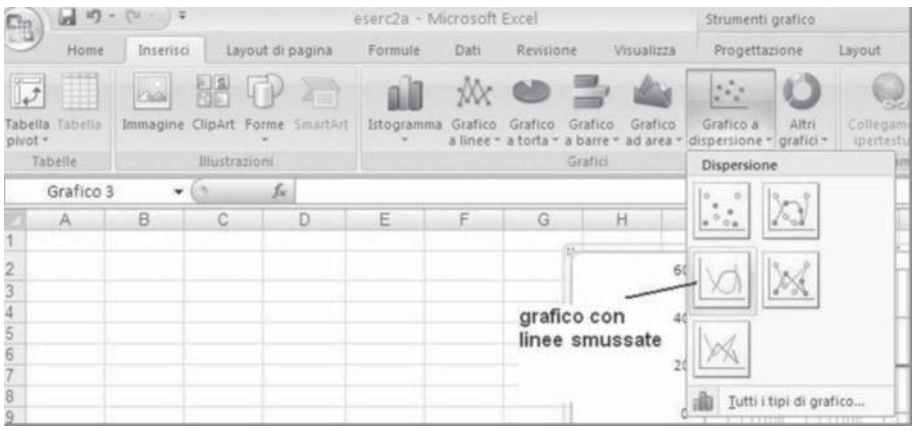



FIGURA **1**
Scelta del tipo di grafico.

I comandi da utilizzare per la realizzazione di queste applicazioni sono *Inserisci* (per la creazione dei grafici a partire dalle formule) e *Formule* (per l'inserimento dei dati).

Per applicazioni nell'ambito tecnico-scientifico come quelle in questione viene usato il *grafico a dispersione* o *grafico XY* che consente la realizzazione di grafici disposti su un piano cartesiano (per le applicazioni che seguono è meglio utilizzare il grafico a linee smussate).

Dopo aver scelto il tipo di grafico si ha accesso a *Strumenti grafici Progettazione* che mette a disposizione gli strumenti necessari per la progettazione del grafico stesso.

Tra le diverse caratteristiche del grafico è importante definire il *Formato degli assi* e il *Formato della griglia.*

In particolare da *Formato asse* si possono anche definire le scale logaritmiche utilizzate nei diagrammi di Bode per la scala delle ascisse.

Per accedere alla finestra di dialogo *Formato asse* si deve selezionare l'asse di cui si vogliono definire le caratteristiche come viene evidenziato nella FIGURA **2**.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

FIGURA **2**
Selezione dell'asse per la scelta del formato.

Per scegliere una scala logaritmica in base 10 come quella dell'asse orizzontale dei diagrammi di Bode si deve selezionare l'opzione evidenziata in FIGURA **3** che riproduce la finestra di *Formato asse*.

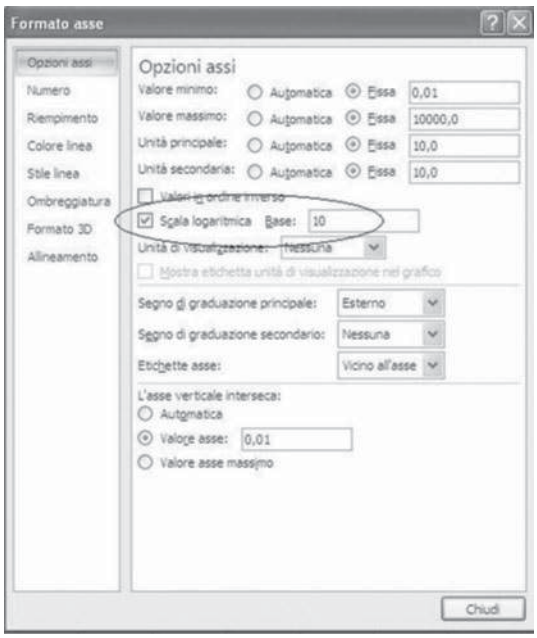



FIGURA **3**
Scelta della scala logaritmica.

Con le scelte dei valori di *Opzioni assi* indicate in figura si ottiene una scala logaritmica che parte da 0,01 e arriva a 10 000 con passo 10 sia per l'unità principale sia per l'unità secondaria.

## 2.1 Esercitazioni

Vengono di seguito proposte alcune esercitazioni di simulazione riguardanti il comportamento dei sistemi in generale e i sistemi di ordine zero, uno e due in particolare facendo uso del programma Excel.

Gli argomenti che sono oggetto delle esercitazioni sono i seguenti:

- esercitazione 1 – Fogli per diagrammi di Bode;
- esercitazione 2 – Diagrammi di Bode di un blocco proporzionale;



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- esercitazione 3 – Diagrammi di Bode di un blocco con un polo (curva asintotica);
- esercitazione 4 – Analisi della stabilità di un sistema retroazionato con il diagramma di Bode delle ampiezze;
- esercitazione 5 – Analisi della stabilità di un sistema retroazionato con il diagramma di Nyquist.

## Esercitazione 1 – Fogli per diagrammi di Bode

Scopo dell'esercitazione è di produrre dei fogli in carta semilogaritmica utili per il tracciamento manuale dei diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi e, contemporaneamente, di imparare a utilizzare le coordinate logaritmiche che verranno impiegate nelle esercitazioni successive per la realizzazione di grafici.

L'intervallo di pulsazioni, come evidenziato in FIGURA **4**, deve essere compreso tra 0,01 rad/s e 10 000 rad/s.

FIGURA **4**
Definizione dell'intervallo delle pulsazioni.

Per il diagramma delle ampiezze, come evidenziato in FIGURA **5**, si deve impostare una scala compresa tra –80 dB e 80 dB con passo 20 dB.

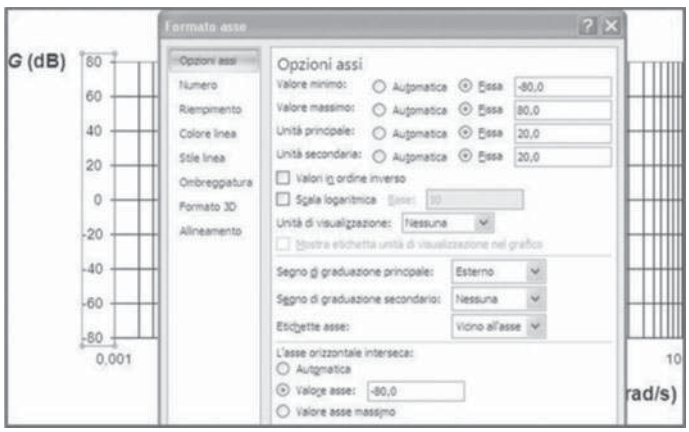



FIGURA **5**
Definizione della scala delle ampiezze.

Per il diagramma delle fasi, come evidenziato in FIGURA **6**, si deve impostare una scala compresa tra –180° e 180° con passo 45°.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

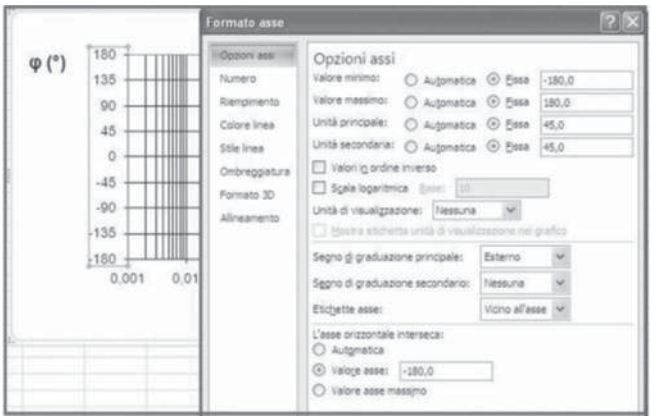



FIGURA **6**
Definizione della scala delle fasi.

Il procedimento è quello che viene normalmente adottato per l'inserzione di grafici; in questo caso però, non essendo richiesto il tracciamento di alcun grafico ma soltanto di produrre fogli provvisti di griglie orizzontali e verticali, non è necessario immettere alcun dato concreto sul foglio di lavoro.

Alla richiesta di selezionare i dati necessari a produrre il grafico si può infatti rispondere, come indicato in FIGURA **7**, evidenziando semplicemente delle caselle vuote.

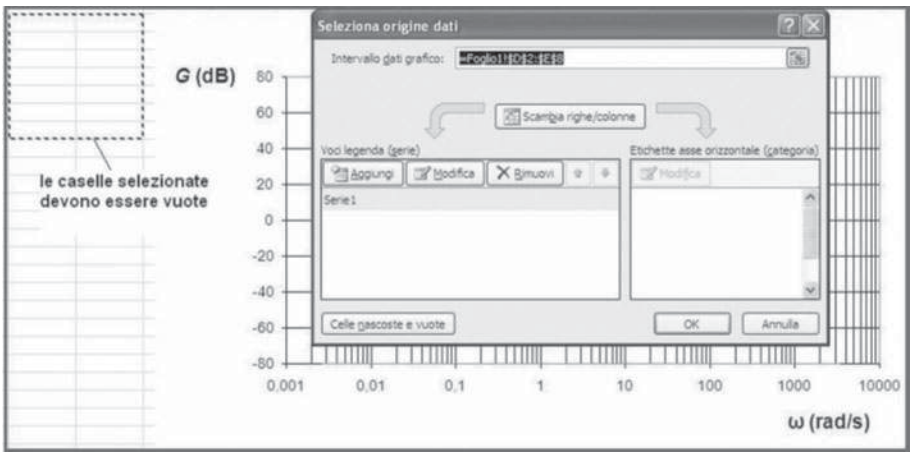



FIGURA **7**
Selezione dei dati.

Delle griglie e degli assi che compaiono sull'area del grafico è necessario poi definire il formato.

In FIGURA **8** si riporta l'aspetto che deve avere il diagramma delle ampiezze, in FIGURA **9** quello che deve avere il diagramma delle fasi.

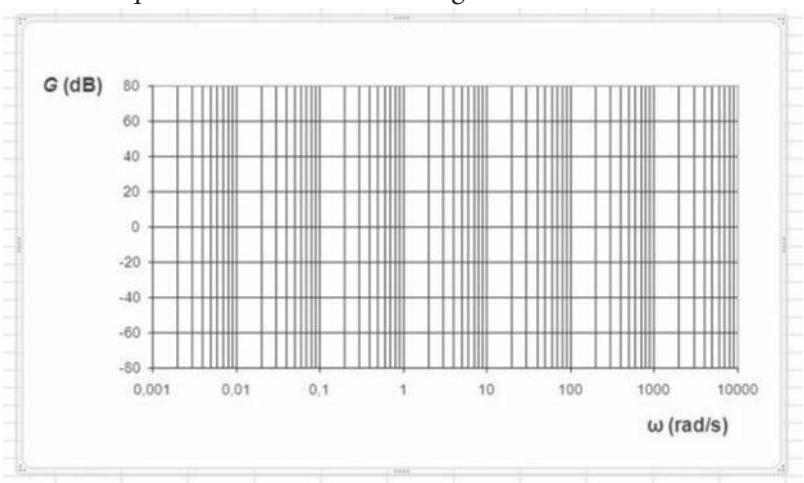



FIGURA **8**
Foglio per diagramma di Bode delle ampiezze.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

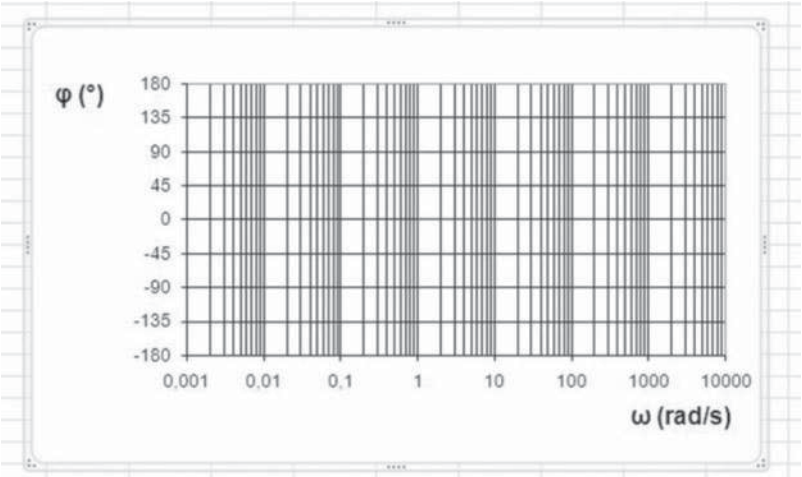



FIGURA **9**
Foglio per diagramma di Bode delle fasi.

## Esercitazione 2 – Diagrammi di Bode di un blocco proporzionale

Scopo di questa semplice esercitazione è di produrre i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un blocco proporzionale.

Il dato d'ingresso è la costante di proporzionalità del blocco.

Per l'asse delle ascisse si considera un intervallo di pulsazioni compreso per entrambi i grafici tra 0,01 rad/s e 10 000 rad/s.

Per l'asse delle ordinate si considera:

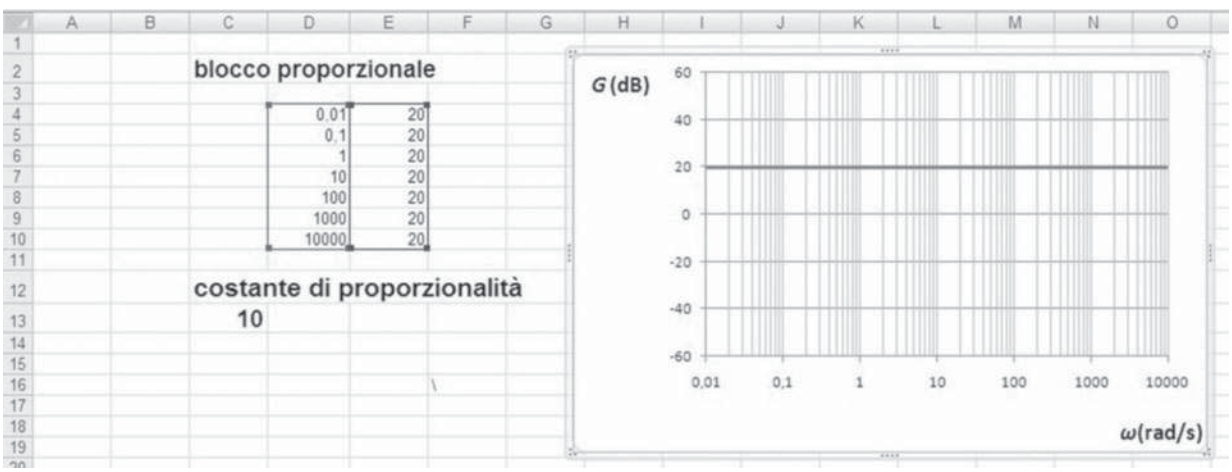
- una scala compresa tra –60 dB e 60 dB con passo 20 dB per il diagramma delle ampiezze;
- una scala compresa tra –180° e 180° con passo 45° per il diagramma delle fasi.

### Diagramma delle ampiezze

Considerando una costante di proporzionalità pari a 10 vengono riportati:

- in FIGURA **10** il diagramma delle ampiezze;
- in FIGURA **11** le formule necessarie per la produzione del grafico.

FIGURA **10**
Diagramma di Bode delle ampiezze.






Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | blocco proporzionale | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | 0,01 | =20*LOG(C$13) |
| 5 | | | | =D4*10 | =20*LOG(C$13) |
| 6 | | | | =D5*10 | =20*LOG(C$13) |
| 7 | | | | =D6*10 | =20*LOG(C$13) |
| 8 | | | | =D7*10 | =20*LOG(C$13) |
| 9 | | | | =D8*10 | =20*LOG(C$13) |
| 10 | | | | =D9*10 | =20*LOG(C$13) |
| 11 | | | | | |
| 12 | | | costante di proporzionalità | | |
| 13 | | | 10 | | |

FIGURA **11**
Formule necessarie per la produzione del grafico.

## Diagramma delle fasi

Considerando una costante di proporzionalità pari a 10 si riportano:

- in FIGURA **12** il diagramma delle fasi;
- in FIGURA **13** le formule necessarie per la produzione del grafico.

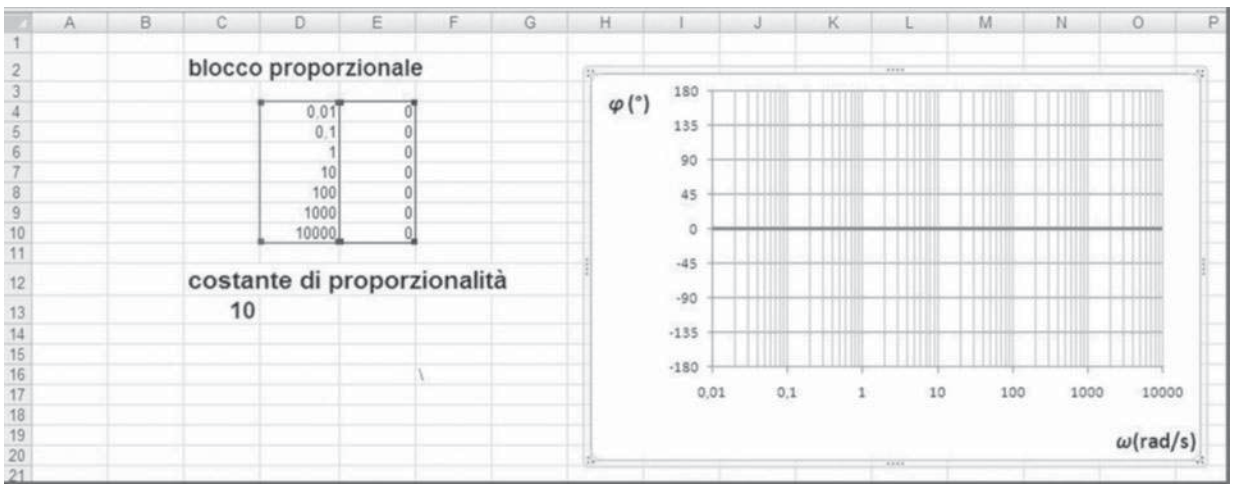



FIGURA **12**
Diagramma di Bode delle fasi.

| | A | B | C | D | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | blocco proporzionale | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | 0,01 | 0 |
| 5 | | | | =D4*10 | 0 |
| 6 | | | | =D5*10 | 0 |
| 7 | | | | =D6*10 | 0 |
| 8 | | | | =D7*10 | 0 |
| 9 | | | | =D8*10 | 0 |
| 10 | | | | =D9*10 | 0 |
| 11 | | | | | |
| 12 | | | costante di proporzionalità | | |
| 13 | | | 10 | | |

FIGURA **13**
Formule necessarie per la produzione del grafico.

## Esercitazione 3 – Diagrammi di Bode di un blocco con un polo (curva asintotica)

Scopo di questa semplice esercitazione è di produrre i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un blocco con un polo.

Si vogliono rappresentare le curve asintotiche.

I dati d'ingresso sono:

- la costante di proporzionalità del blocco;
- il valore del polo.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Per l'asse delle ascisse si considera un intervallo di pulsazioni compreso tra 0,01 rad/s e 10 000 rad/s.

Per l'asse delle ordinate si considera:

- una scala compresa tra –100 dB e 100 dB con passo 20 dB per le ampiezze;
- una scala compresa tra –135° e 45° con passo 45° per le fasi.

Vengono proposti due esempi con dati d'ingresso differenti.

## Diagramma delle ampiezze

In FIGURA **14** viene riportato il diagramma delle ampiezze nel caso di un polo alla pulsazione di taglio di 1 rad/s e di una costante di guadagno pari a 0 dB.

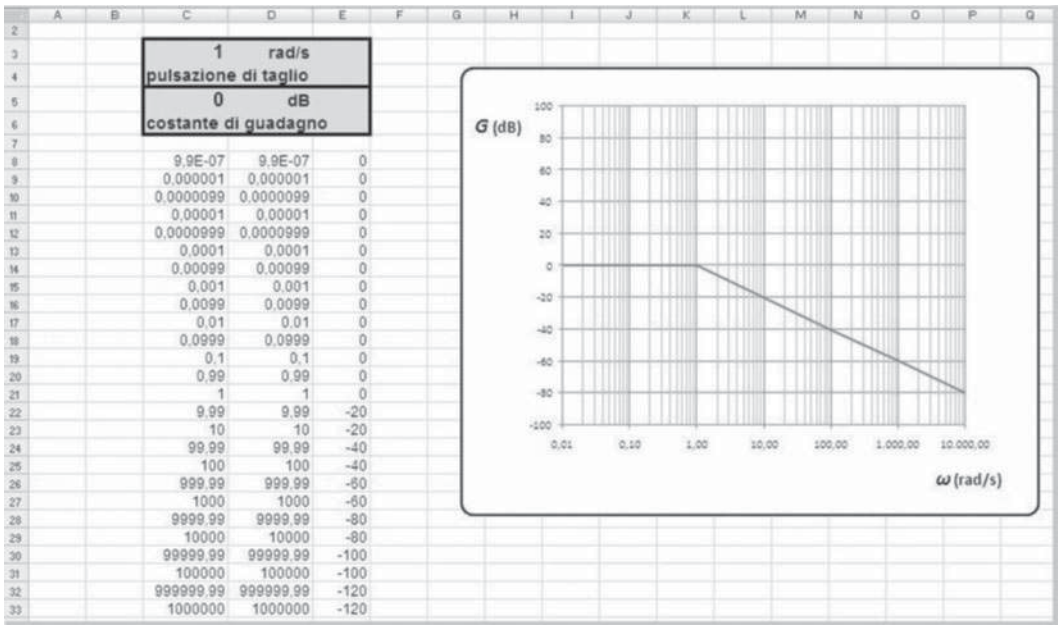
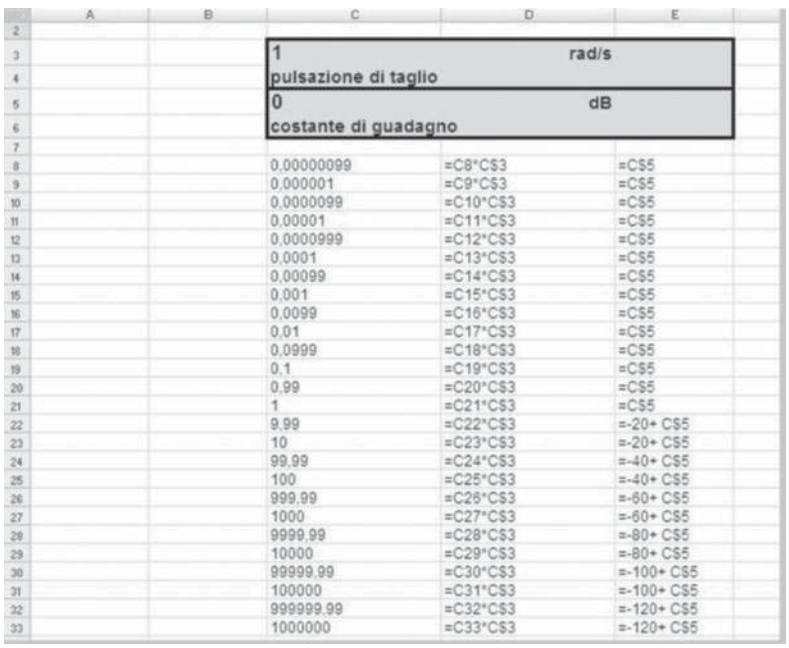



FIGURA **14**
Diagramma di Bode delle ampiezze con pulsazione di taglio di 1 rad/s e costante di guadagno 0 dB.

In FIGURA **15** vengono riprodotte le formule necessarie per la realizzazione del grafico.




| | | |
|---|---|---|
| 0,00000099 | =C8*C$3 | =C$5 |
| 0,000001 | =C9*C$3 | =C$5 |
| 0,0000099 | =C10*C$3 | =C$5 |
| 0,00001 | =C11*C$3 | =C$5 |
| 0,0000999 | =C12*C$3 | =C$5 |
| 0,0001 | =C13*C$3 | =C$5 |
| 0,00099 | =C14*C$3 | =C$5 |
| 0,001 | =C15*C$3 | =C$5 |
| 0,0099 | =C16*C$3 | =C$5 |
| 0,01 | =C17*C$3 | =C$5 |
| 0,0999 | =C18*C$3 | =C$5 |
| 0,1 | =C19*C$3 | =C$5 |
| 0,99 | =C20*C$3 | =C$5 |
| 1 | =C21*C$3 | =C$5 |
| 9,99 | =C22*C$3 | =-20+ C$5 |
| 10 | =C23*C$3 | =-20+ C$5 |
| 99,99 | =C24*C$3 | =-40+ C$5 |
| 100 | =C25*C$3 | =-40+ C$5 |
| 999,99 | =C26*C$3 | =-60+ C$5 |
| 1000 | =C27*C$3 | =-60+ C$5 |
| 9999,99 | =C28*C$3 | =-80+ C$5 |
| 10000 | =C29*C$3 | =-80+ C$5 |
| 99999,99 | =C30*C$3 | =-100+ C$5 |
| 100000 | =C31*C$3 | =-100+ C$5 |
| 999999,99 | =C32*C$3 | =-120+ C$5 |
| 1000000 | =C33*C$3 | =-120+ C$5 |

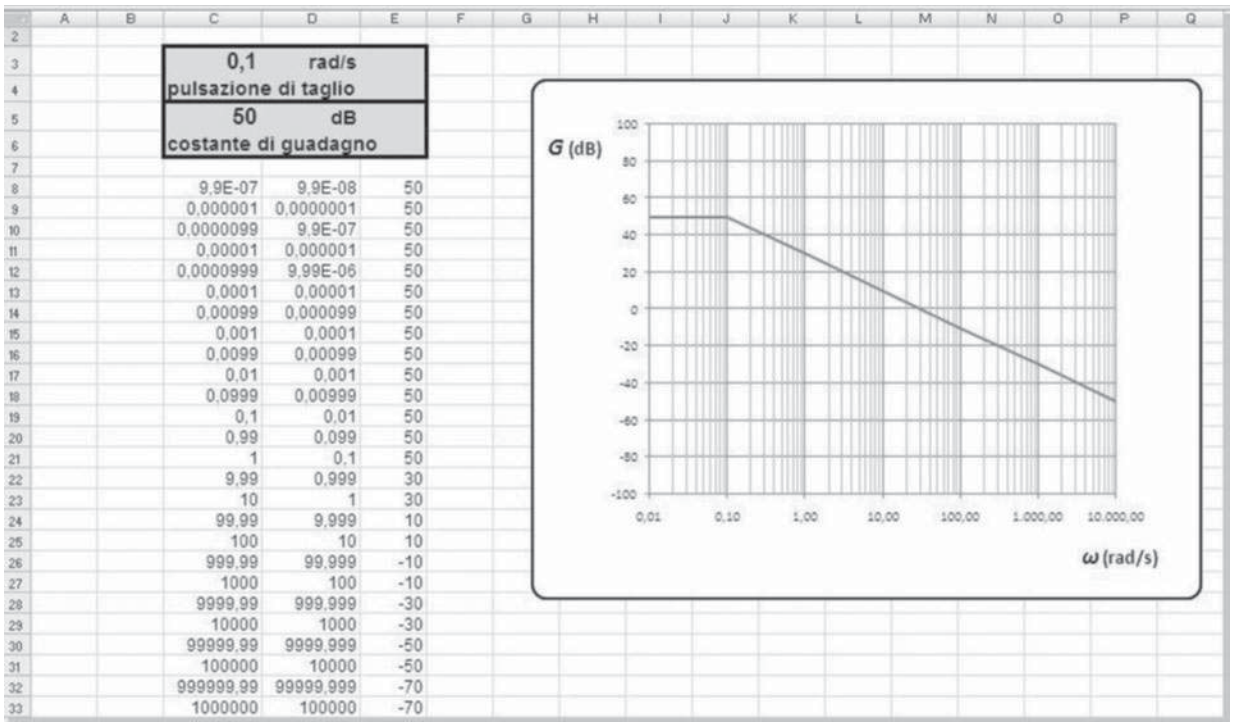
FIGURA **15**
Formule necessarie per la produzione del grafico.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **16** viene riportato il diagramma delle ampiezze nel caso di un polo alla pulsazione di taglio di 0,1 rad/s e di una costante di guadagno pari a 50 dB.

FIGURA **16**
Diagramma di Bode delle ampiezze con pulsazione di taglio di 0,1 rad/s e costante di guadagno 50 dB.



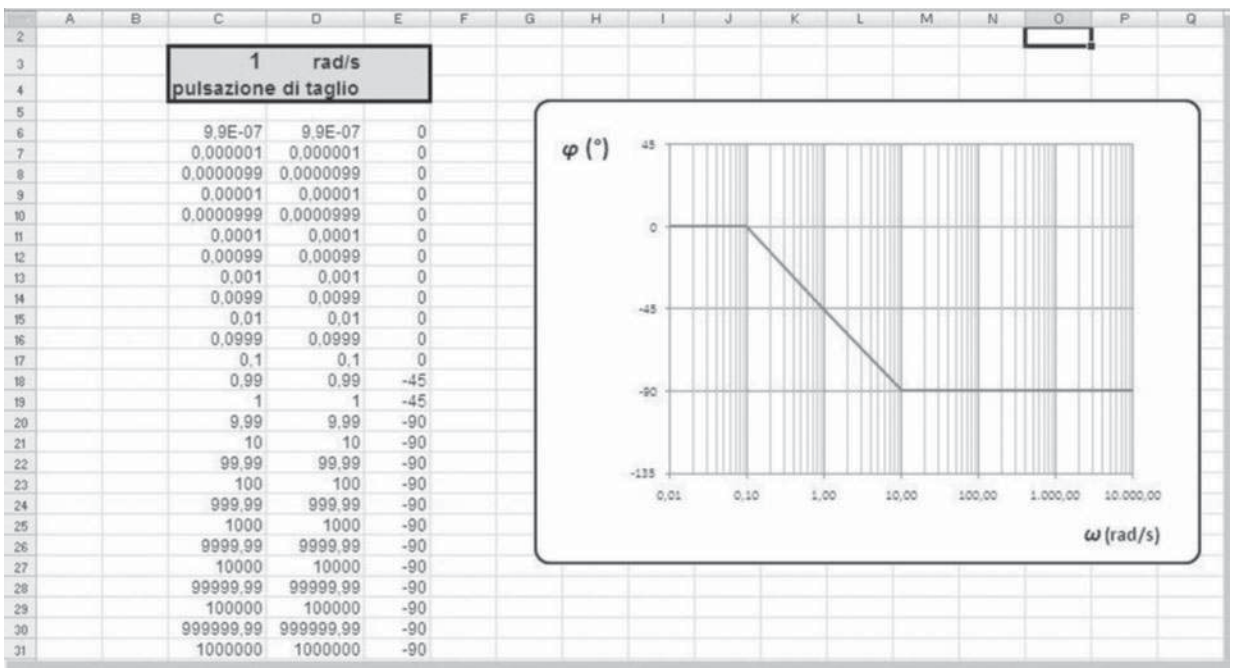
| 0,1 rad/s pulsazione di taglio | | 50 dB costante di guadagno |
|---|---|---|
| 9,9E-07 | 9,9E-08 | 50 |
| 0,000001 | 0,0000001 | 50 |
| 0,0000099 | 9,9E-07 | 50 |
| 0,00001 | 0,000001 | 50 |
| 0,0000999 | 9,99E-06 | 50 |
| 0,0001 | 0,00001 | 50 |
| 0,00099 | 0,000099 | 50 |
| 0,001 | 0,0001 | 50 |
| 0,0099 | 0,00099 | 50 |
| 0,01 | 0,001 | 50 |
| 0,0999 | 0,00999 | 50 |
| 0,1 | 0,01 | 50 |
| 0,99 | 0,099 | 50 |
| 1 | 0,1 | 50 |
| 9,99 | 0,999 | 30 |
| 10 | 1 | 30 |
| 99,99 | 9,999 | 10 |
| 100 | 10 | 10 |
| 999,99 | 99,999 | -10 |
| 1000 | 100 | -10 |
| 9999,99 | 999,999 | -30 |
| 10000 | 1000 | -30 |
| 99999,99 | 9999,999 | -50 |
| 100000 | 10000 | -50 |
| 999999,99 | 99999,999 | -70 |
| 1000000 | 100000 | -70 |



## Diagramma delle fasi

In FIGURA **17** viene riportato il diagramma delle fasi nel caso di un polo alla pulsazione di taglio di 1 rad/s.

FIGURA **17**
Diagramma di Bode delle fasi con pulsazione di taglio 1 rad/s.



| 1 rad/s pulsazione di taglio | | |
|---|---|---|
| 9,9E-07 | 9,9E-07 | 0 |
| 0,000001 | 0,000001 | 0 |
| 0,0000099 | 0,0000099 | 0 |
| 0,00001 | 0,00001 | 0 |
| 0,0000999 | 0,0000999 | 0 |
| 0,0001 | 0,0001 | 0 |
| 0,00099 | 0,00099 | 0 |
| 0,001 | 0,001 | 0 |
| 0,0099 | 0,0099 | 0 |
| 0,01 | 0,01 | 0 |
| 0,0999 | 0,0999 | 0 |
| 0,1 | 0,1 | 0 |
| 0,99 | 0,99 | -45 |
| 1 | 1 | -45 |
| 9,99 | 9,99 | -90 |
| 10 | 10 | -90 |
| 99,99 | 99,99 | -90 |
| 100 | 100 | -90 |
| 999,99 | 999,99 | -90 |
| 1000 | 1000 | -90 |
| 9999,99 | 9999,99 | -90 |
| 10000 | 10000 | -90 |
| 99999,99 | 99999,99 | -90 |
| 100000 | 100000 | -90 |
| 999999,99 | 999999,99 | -90 |
| 1000000 | 1000000 | -90 |





Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **18** vengono riprodotte le formule necessarie per la realizzazione del grafico.

O2

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | | | | | |
| 3 | | | 1 | rad/s | |
| 4 | | | pulsazione di taglio | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | 0,00000099 | =C6*C$3 | 0 |
| 7 | | | 0,000001 | =C7*C$3 | 0 |
| 8 | | | 0,0000099 | =C8*C$3 | 0 |
| 9 | | | 0,00001 | =C9*C$3 | 0 |
| 10 | | | 0,0000999 | =C10*C$3 | 0 |
| 11 | | | 0,0001 | =C11*C$3 | 0 |
| 12 | | | 0,00099 | =C12*C$3 | 0 |
| 13 | | | 0,001 | =C13*C$3 | 0 |
| 14 | | | 0,0099 | =C14*C$3 | 0 |
| 15 | | | 0,01 | =C15*C$3 | 0 |
| 16 | | | 0,0999 | =C16*C$3 | 0 |
| 17 | | | 0,1 | =C17*C$3 | 0 |
| 18 | | | 0,99 | =C18*C$3 | -45 |
| 19 | | | 1 | =C19*C$3 | -45 |
| 20 | | | 9,99 | =C20*C$3 | -90 |
| 21 | | | 10 | =C21*C$3 | -90 |
| 22 | | | 99,99 | =C22*C$3 | -90 |
| 23 | | | 100 | =C23*C$3 | -90 |
| 24 | | | 999,99 | =C24*C$3 | -90 |
| 25 | | | 1000 | =C25*C$3 | -90 |
| 26 | | | 9999,99 | =C26*C$3 | -90 |
| 27 | | | 10000 | =C27*C$3 | -90 |
| 28 | | | 99999,99 | =C28*C$3 | -90 |
| 29 | | | 100000 | =C29*C$3 | -90 |
| 30 | | | 999999,99 | =C30*C$3 | -90 |
| 31 | | | 1000000 | =C31*C$3 | -90 |

FIGURA **18**
Formule necessarie per la produzione del grafico.

In FIGURA **19** viene riportato il diagramma delle fasi nel caso di un polo alla pulsazione di taglio di 10 rad/s.

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | | | | | |
| 3 | | | 10 | rad/s | |
| 4 | | | pulsazione di taglio | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | 9,9E-07 | 0,0000099 | 0 |
| 7 | | | 0,000001 | 0,00001 | 0 |
| 8 | | | 0,0000099 | 0,000099 | 0 |
| 9 | | | 0,00001 | 0,0001 | 0 |
| 10 | | | 0,0000999 | 0,000999 | 0 |
| 11 | | | 0,0001 | 0,001 | 0 |
| 12 | | | 0,00099 | 0,0099 | 0 |
| 13 | | | 0,001 | 0,01 | 0 |
| 14 | | | 0,0099 | 0,099 | 0 |
| 15 | | | 0,01 | 0,1 | 0 |
| 16 | | | 0,0999 | 0,999 | 0 |
| 17 | | | 0,1 | 1 | 0 |
| 18 | | | 0,99 | 9,9 | -45 |
| 19 | | | 1 | 10 | -45 |
| 20 | | | 9,99 | 99,9 | -90 |
| 21 | | | 10 | 100 | -90 |
| 22 | | | 99,99 | 999,9 | -90 |
| 23 | | | 100 | 1000 | -90 |
| 24 | | | 999,99 | 9999,9 | -90 |
| 25 | | | 1000 | 10000 | -90 |
| 26 | | | 9999,99 | 99999,9 | -90 |
| 27 | | | 10000 | 100000 | -90 |
| 28 | | | 99999,99 | 999999,9 | -90 |
| 29 | | | 100000 | 1000000 | -90 |
| 30 | | | 999999,99 | 9999999,9 | -90 |
| 31 | | | 1000000 | 10000000 | -90 |

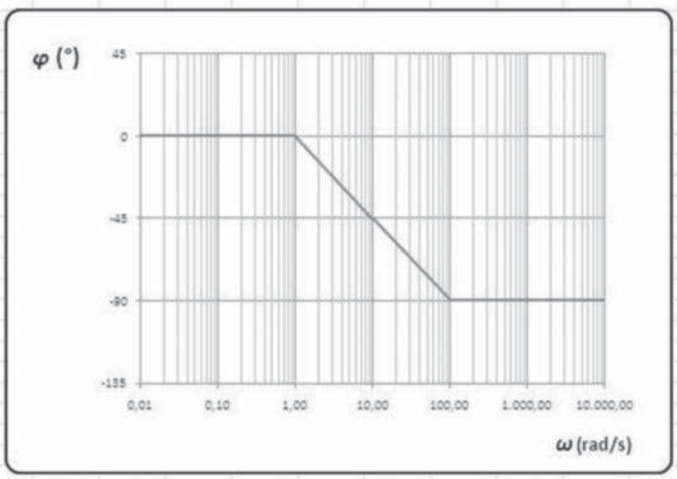



FIGURA **19**
Diagramma di Bode delle fasi con pulsazione di taglio 10 rad/s.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Esercitazione 4 – Analisi di stabilità di un sistema retroazionato con il diagramma di Bode delle ampiezze (curva reale)

Si vuole analizzare la stabilità di un sistema retroazionato di cui è nota la f.d.t. d'anello utilizzando il diagramma di Bode delle ampiezze imponendo come ingressi:

- un numero massimo di tre poli;
- un numero massimo di tre zeri;
- la costante di guadagno;
- il numero dei poli nulli.

Per la costruzione del diagramma vengono utilizzati essenzialmente i seguenti strumenti matematici:

- formula per il calcolo del modulo di un numero complesso;
- proprietà dei logaritmi.

Per ciascun valore di pulsazione viene calcolato il contributo di ciascun polo e di ciascuno zero; a essi vengono sommati i contributi della costante di guadagno e dei poli nulli.

Per il calcolo viene fatto riferimento alla relazione

$$\log|G(j\omega)| = \log G_0 + \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{z_1}\right)\right| +$$
$$+\log\left|\left(1-\frac{j\omega}{z_2}\right)\right| + \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{z_3}\right)\right| - \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{p_1}\right)\right| +$$
$$-\log\left|\left(1-\frac{j\omega}{p_2}\right)\right| - \log\left|\left(1-\frac{j\omega}{p_3}\right)\right| - pn\cdot\log\omega$$

in cui $pn$ è il numero dei poli nulli.

In FIGURA **20** vengono riportate le formule utilizzate sul foglio elettronico per calcolare il contributo di un polo relativamente alla prima decade di pulsazioni.

In particolare si ha che:

- nella colonna C vengono inseriti i valori di pulsazione;
- nella colonna D viene calcolata la quantità sotto radice;
- nella colonna E viene calcolata la radice;
- nella colonna F il risultato precedente viene trasformato in dB e questo è il contributo finale del polo.

FIGURA **20**
Calcolo del contributo di un polo.

| | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | polo 1 | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | 10 | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | 0,001 | =1+(C$4*C$4*C6*C6) | =RADQ(D6) | =20*LOG10(E6) |
| 7 | | | =C6+0,001 | =1+(C$4*C$4*C7*C7) | =RADQ(D7) | =20*LOG10(E7) |
| 8 | | | =C7+0,001 | =1+(C$4*C$4*C8*C8) | =RADQ(D8) | =20*LOG10(E8) |
| 9 | | | =C8+0,001 | =1+(C$4*C$4*C9*C9) | =RADQ(D9) | =20*LOG10(E9) |
| 10 | | | =C9+0,001 | =1+(C$4*C$4*C10*C10) | =RADQ(D10) | =20*LOG10(E10) |
| 11 | | | =C10+0,001 | =1+(C$4*C$4*C11*C11) | =RADQ(D11) | =20*LOG10(E11) |
| 12 | | | =C11+0,001 | =1+(C$4*C$4*C12*C12) | =RADQ(D12) | =20*LOG10(E12) |
| 13 | | | =C12+0,001 | =1+(C$4*C$4*C13*C13) | =RADQ(D13) | =20*LOG10(E13) |
| 14 | | | =C13+0,001 | =1+(C$4*C$4*C14*C14) | =RADQ(D14) | =20*LOG10(E14) |



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Formule analoghe vengono utilizzate per il calcolo del contributo degli altri poli e degli zeri.

In FIGURA **21** vengono mostrate le formule per il calcolo dei singoli contributi dovuti:

- ai poli (colonne F, J, N con contributo negativo);
- agli zeri (colonne R, V, Z con contributo positivo);
- alla costante di guadagno (colonna AA);
- ai poli nulli (colonna AB).

| | AA | AB | AC |
|---|---|---|---|
| 1 | | | |
| 2 | $G_0$ | poli nulli | $\lvert G(j\omega)\rvert$ |
| 3 | | | |
| 4 | =AE7 | =AE21 | |
| 5 | | | |
| 6 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C6) | =-F6-J6-N6+R6+V6+Z6+AA6-AB6 |
| 7 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C7) | =-F7-J7-N7+R7+V7+Z7+AA7-AB7 |
| 8 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C8) | =-F8-J8-N8+R8+V8+Z8+AA8-AB8 |
| 9 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C9) | =-F9-J9-N9+R9+V9+Z9+AA9-AB9 |
| 10 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C10) | =-F10-J10-N10+R10+V10+Z10+AA10-AB10 |
| 11 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C11) | =-F11-J11-N11+R11+V11+Z11+AA11-AB11 |
| 12 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C12) | =-F12-J12-N12+R12+V12+Z12+AA12-AB12 |
| 13 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C13) | =-F13-J13-N13+R13+V13+Z13+AA13-AB13 |
| 14 | =20*LOG10(AA$4) | =20*AB$4*LOG10(C14) | =-F14-J14-N14+R14+V14+Z14+AA14-AB14 |

FIGURA **21**
Calcolo finale del modulo.

In FIGURA **22** viene riportata la tabella nella quale devono essere inseriti i dati necessari per la costruzione del grafico con a fianco l'esempio relativo.

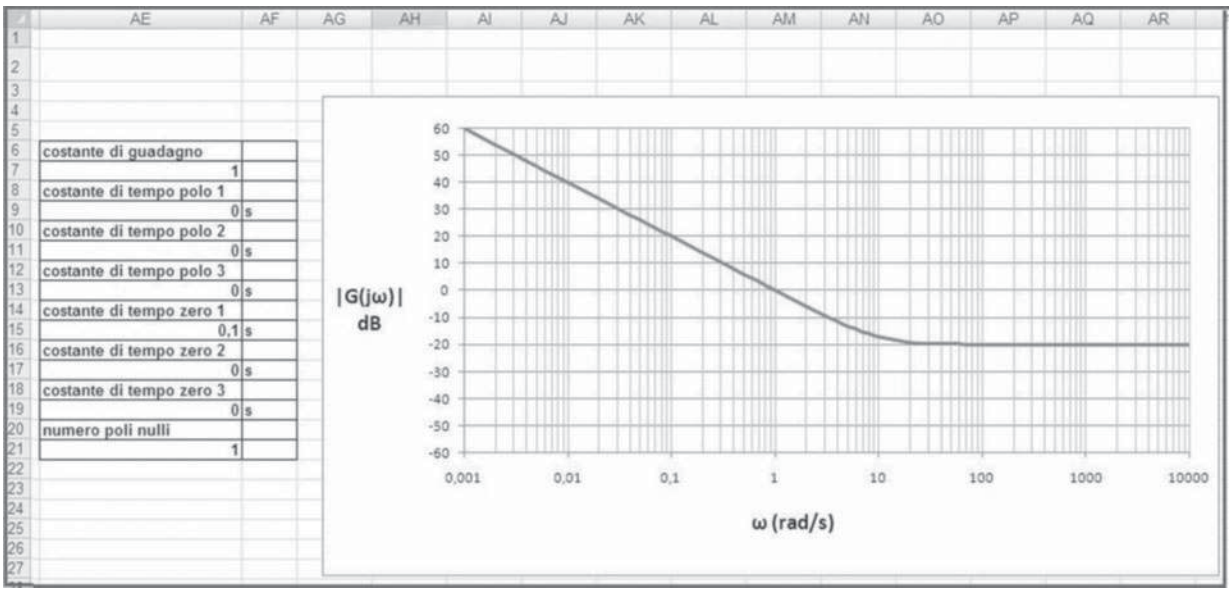



FIGURA **22**
Tabella per l'inserimento dei dati e grafico relativo.

Per evidenti motivi di spazio non è possibile mostrare le formule per tutti i poli e gli zeri e per tutte le decadi.

Per gli assi coordinati si scelgono le seguenti scale:

- per l'asse delle ascisse da 0,001 rad/s a 10 000 rad/s;
- per l'asse delle ordinate da –60 dB a +60 dB.

Vengono di seguito effettuate tre prove con lo scopo di analizzare la stabilità di tre sistemi retroazionati la cui f.d.t. d'anello è la seguente:


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

$$sistema\ 1_AB(j\omega) = \frac{1000}{(1+j\omega)\,(1+j\omega 0{,}1)\,(1+j\omega 0{,}001)}$$

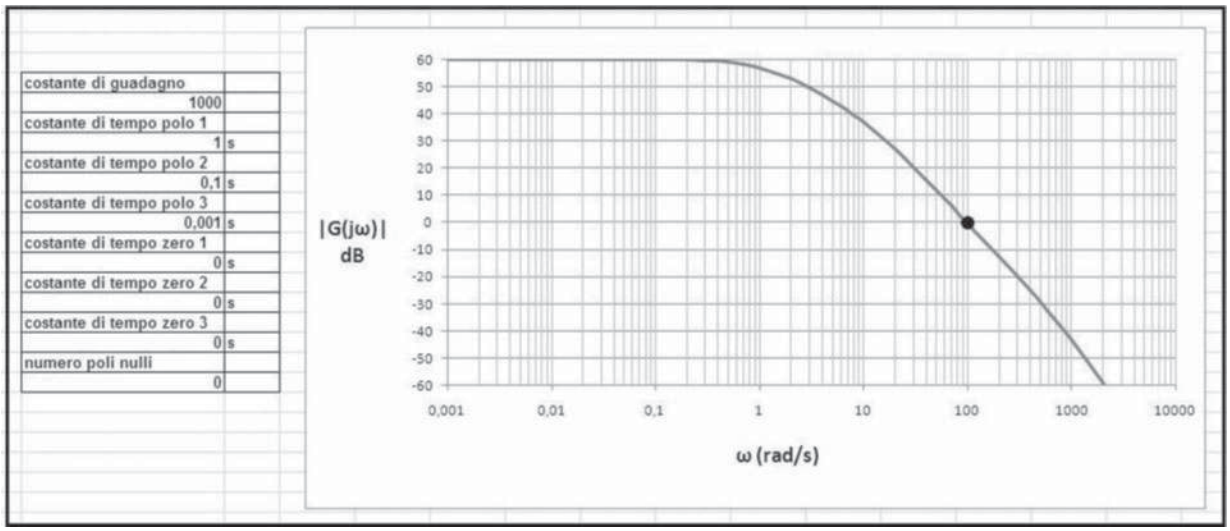
$$sistema\ 2_AB(j\omega) = \frac{10}{(1+j\omega)\,(1+j\omega 0{,}001)}$$

$$sistema\ 3_AB(j\omega) = \frac{(1+j\omega 100)}{s\,(1+j\omega)\,(1+j\omega 0{,}01)}$$

## Analisi del sistema 1

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **23**.

FIGURA **23**
Tabella dei dati e grafico corrispondente per il sistema 1.

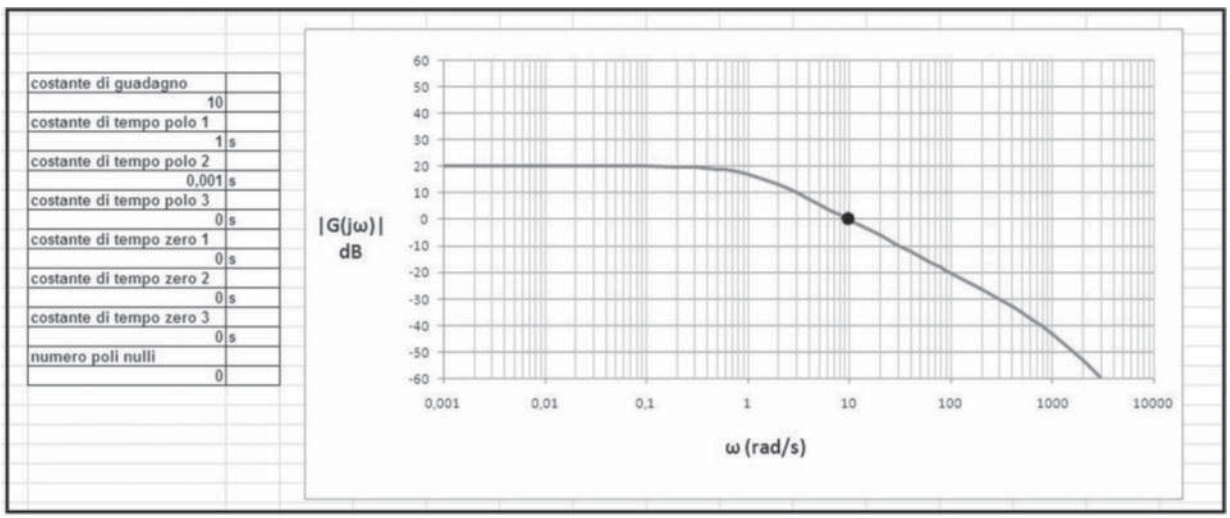



Il sistema è evidentemente instabile perché il punto di attraversamento a 0 dB avviene con prolungata pendenza –2.

## Analisi del sistema 2

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **24**.

FIGURA **24**
Tabella dei dati e grafico corrispondente per il sistema 2.




Il sistema è evidentemente stabile perché il punto di attraversamento a 0 dB avviene sicuramente con pendenza –1.

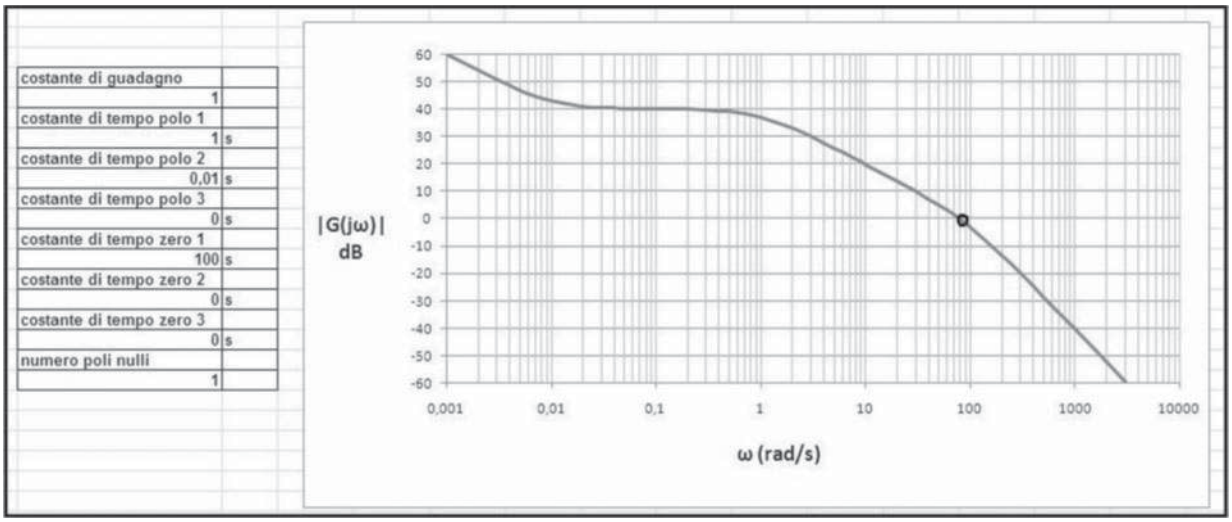


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

FIGURA **25**
Tabella dei dati e grafico corrispondente per il sistema 3.

### Analisi del sistema 3

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **25**.




Il punto di attraversamento a 0 dB avviene nell'intorno del punto in cui si ha cambiamento di pendenza da –1 a –2; l'analisi con il solo diagramma delle ampiezze non è pertanto sufficiente per definire la stabilità o meno del sistema.

## Esercitazione 5 – Analisi di stabilità di un sistema retroazionato con il diagramma di Nyquist

Si vuole analizzare la stabilità di un sistema retroazionato di cui è nota la f.d.t. d'anello utilizzando un diagramma polare (viste le caratteristiche di stabilità del sistema ad anello aperto) imponendo come ingressi:

- un numero massimo di tre poli;
- la costante di guadagno.

Per la costruzione del diagramma vengono utilizzati essenzialmente i seguenti strumenti matematici:

- formula per il calcolo della parte reale di un numero complesso;
- formula per il calcolo della parte immaginaria di un numero complesso.

Per ciascun valore di pulsazione viene calcolato il contributo in termini di parte reale e di parte immaginaria.

In FIGURA **26** vengono riportate le formule utilizzate sul foglio elettronico per calcolare la parte reale e la parte immaginaria facendo riferimento per questioni di spazio a un numero limitato di pulsazioni (le prime a partire da valori di pulsazione prossimi allo zero).

In particolare si ha che:

- nella colonna B vengono inseriti i valori di pulsazione;
- nella colonna C il loro quadrato;
- nella colonna D la formula parziale per il calcolo del denominatore;
- nella colonna E la formula per il calcolo della parte reale;
- nella colonna F la formula per il calcolo della parte immaginaria.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

| | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | $G_0$ | | $\tau_1$ (s) | $\tau_2$ (s) | $\tau_3$ (s) |
| 3 | | 10 | | 1 | 2 | 3 |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | ω | | | Re | Im |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | 1E-40 | =B7*B7 | =(1+(C7*$D$3*$D$3))*(1+(C7*$E$3*$E$3))*(1+(C7*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C7*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C7*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B7*$B$3)*((C7*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C7*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 8 | | =B7*1,2 | =B8*B8 | =(1+(C8*$D$3*$D$3))*(1+(C8*$E$3*$E$3))*(1+(C8*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C8*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C8*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B8*$B$3)*((C8*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C8*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 9 | | =B8*1,2 | =B9*B9 | =(1+(C9*$D$3*$D$3))*(1+(C9*$E$3*$E$3))*(1+(C9*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C9*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C9*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B9*$B$3)*((C9*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C9*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 10 | | =B9*1,2 | =B10*B10 | =(1+(C10*$D$3*$D$3))*(1+(C10*$E$3*$E$3))*(1+(C10*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C10*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C10*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B10*$B$3)*((C10*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C10*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 11 | | =B10*1,2 | =B11*B11 | =(1+(C11*$D$3*$D$3))*(1+(C11*$E$3*$E$3))*(1+(C11*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C11*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C11*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B11*$B$3)*((C11*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C11*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 12 | | =B11*1,2 | =B12*B12 | =(1+(C12*$D$3*$D$3))*(1+(C12*$E$3*$E$3))*(1+(C12*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C12*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C12*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B12*$B$3)*((C12*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C12*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 13 | | =B12*1,2 | =B13*B13 | =(1+(C13*$D$3*$D$3))*(1+(C13*$E$3*$E$3))*(1+(C13*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C13*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C13*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B13*$B$3)*((C13*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C13*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 14 | | =B13*1,2 | =B14*B14 | =(1+(C14*$D$3*$D$3))*(1+(C14*$E$3*$E$3))*(1+(C14*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C14*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C14*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B14*$B$3)*((C14*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C14*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 15 | | =B14*1,2 | =B15*B15 | =(1+(C15*$D$3*$D$3))*(1+(C15*$E$3*$E$3))*(1+(C15*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C15*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C15*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B15*$B$3)*((C15*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C15*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 16 | | =B15*1,2 | =B16*B16 | =(1+(C16*$D$3*$D$3))*(1+(C16*$E$3*$E$3))*(1+(C16*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C16*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C16*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B16*$B$3)*((C16*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C16*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 17 | | =B16*1,2 | =B17*B17 | =(1+(C17*$D$3*$D$3))*(1+(C17*$E$3*$E$3))*(1+(C17*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C17*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C17*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B17*$B$3)*((C17*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C17*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 18 | | =B17*1,2 | =B18*B18 | =(1+(C18*$D$3*$D$3))*(1+(C18*$E$3*$E$3))*(1+(C18*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C18*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C18*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B18*$B$3)*((C18*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C18*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 19 | | =B18*1,2 | =B19*B19 | =(1+(C19*$D$3*$D$3))*(1+(C19*$E$3*$E$3))*(1+(C19*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C19*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C19*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B19*$B$3)*((C19*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C19*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 20 | | =B19*1,2 | =B20*B20 | =(1+(C20*$D$3*$D$3))*(1+(C20*$E$3*$E$3))*(1+(C20*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C20*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C20*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B20*$B$3)*((C20*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C20*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 21 | | =B20*1,2 | =B21*B21 | =(1+(C21*$D$3*$D$3))*(1+(C21*$E$3*$E$3))*(1+(C21*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C21*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C21*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B21*$B$3)*((C21*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C21*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 22 | | =B21*1,2 | =B22*B22 | =(1+(C22*$D$3*$D$3))*(1+(C22*$E$3*$E$3))*(1+(C22*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C22*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C22*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B22*$B$3)*((C22*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C22*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 23 | | =B22*1,2 | =B23*B23 | =(1+(C23*$D$3*$D$3))*(1+(C23*$E$3*$E$3))*(1+(C23*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C23*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C23*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B23*$B$3)*((C23*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C23*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 24 | | =B23*1,2 | =B24*B24 | =(1+(C24*$D$3*$D$3))*(1+(C24*$E$3*$E$3))*(1+(C24*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C24*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C24*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B24*$B$3)*((C24*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C24*$D$3*$E$3*$F$3)) |
| 25 | | =B24*1,2 | =B25*B25 | =(1+(C25*$D$3*$D$3))*(1+(C25*$E$3*$E$3))*(1+(C25*$F$3*$F$3)) | =$B$3*(1-(C25*($D$3*$E$3+$D$3*$F$3+$E$3*$F$3)))/(1-(C25*$D$3*$E$3*$F$3)) | =((B25*$B$3)*((C25*$D$3*$E$3*$F$3)-($D$3+$E$3+$F$3)))/(1-(C25*$D$3*$E$3*$F$3)) |

FIGURA **26**
Tabella dei dati.

Vengono di seguito effettuate diverse prove che hanno lo scopo di analizzare la stabilità di tre sistemi retroazionati la cui f.d.t. d'anello è la seguente:

$$sistema\ 1_AB(j\omega) = \frac{10}{(1+j\omega)\,(1+j\omega_2)\,(1+j\omega_3)}$$

$$sistema\ 2_AB(j\omega) = \frac{8}{(1+j\omega)\,(1+j\omega_2)\,(1+j\omega_3)}$$

$$sistema\ 3_AB(j\omega) = \frac{12}{(1+j\omega)\,(1+j\omega_2)\,(1+j\omega_3)}$$

$$sistema\ 4_AB(j\omega) = \frac{12}{1+j\omega}$$

$$sistema\ 5_AB(j\omega) = \frac{12}{(1+j\omega)\,(1+j\omega_2)}$$

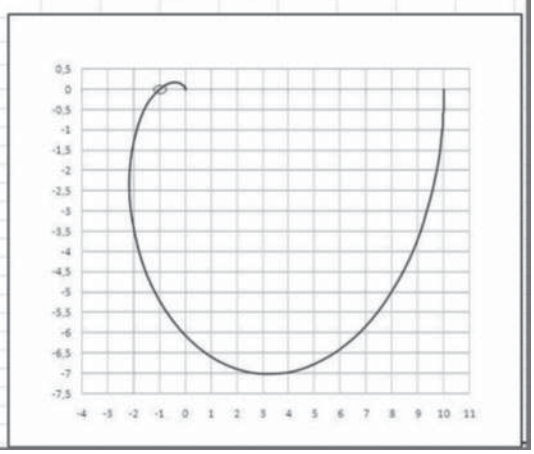
Con questi esempi si vuole in particolare evidenziare il fatto che la stabilità di un sistema varia al variare della costante di guadagno.

## Analisi del sistema 1

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **27**.

FIGURA **27**
Diagramma con costante di guadagno 10.

| | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | | $G_0$ | | $\tau_1$ (s) | $\tau_2$ (s) | $\tau_3$ (s) |
| 3 | | 10 | | 1 | 2 | 3 |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | ω | | | Re | Im |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -6E-39 |
| 8 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -7,2E-39 |
| 9 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -8,64E-39 |
| 10 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -1,0368E-38 |
| 11 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -1,24416E-38 |
| 12 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -1,49299E-38 |
| 13 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -1,79159E-38 |
| 14 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -2,14991E-38 |
| 15 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -2,57989E-38 |
| 16 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -3,09587E-38 |
| 17 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -3,71504E-38 |
| 18 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -4,45805E-38 |
| 19 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -5,34966E-38 |
| 20 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -6,41959E-38 |
| 21 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -7,70351E-38 |
| 22 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -9,24421E-38 |
| 23 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -1,10931E-37 |
| 24 | | 0 | 0 | 1 | 10 | -1,33117E-37 |




Il diagramma passa proprio per il punto critico e quindi si ha una condizione limite tra stabilità e instabilità.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Si riporta in FIGURA **28** il particolare del diagramma nell'intorno del punto critico.

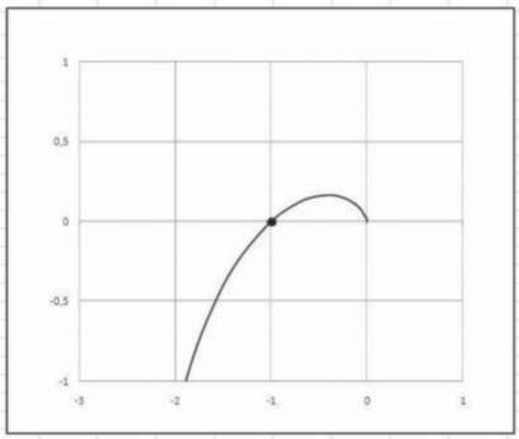



FIGURA **28**
Particolare del diagramma con costante di guadagno 10.

## Analisi del sistema 2

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **29**.

| $G_0$ | $\tau_1$ (s) | $\tau_2$ (s) | $\tau_3$ (s) |
|---|---|---|---|
| 8 | 1 | 2 | 3 |

| ω | | Re | Im |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 8 | -4,8E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -5,76E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -6,912E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -8,2944E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -9,95328E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -1,19439E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -1,43327E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -1,71993E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -2,06391E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -2,47669E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -2,97203E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -3,56644E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -4,27973E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -5,13567E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -6,16281E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -7,39537E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -8,87444E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 8 | -1,06493E-37 |

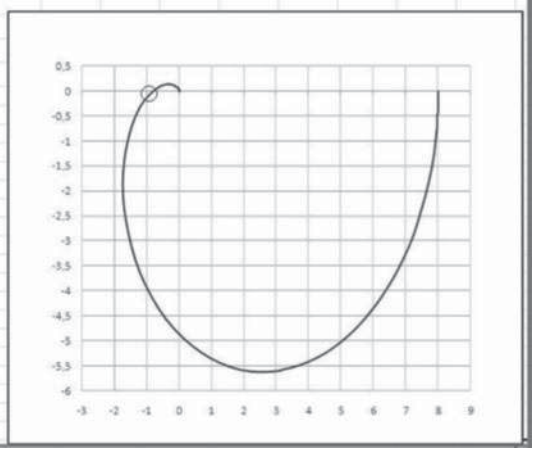



FIGURA **29**
Diagramma con costante di guadagno 8.

Il diagramma è esterno al punto critico e quindi si ha una condizione di stabilità; diminuendo il guadagno rispetto al primo caso il sistema ha raggiunto una condizione di stabilità.

Si riporta in FIGURA **30** il particolare del diagramma nell'intorno del punto critico.

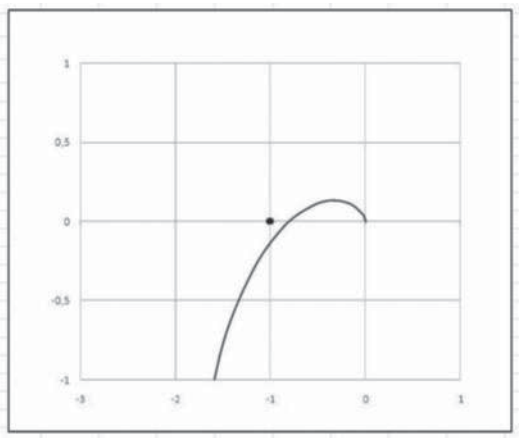



FIGURA **30**
Particolare del diagramma con costante di guadagno 8.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

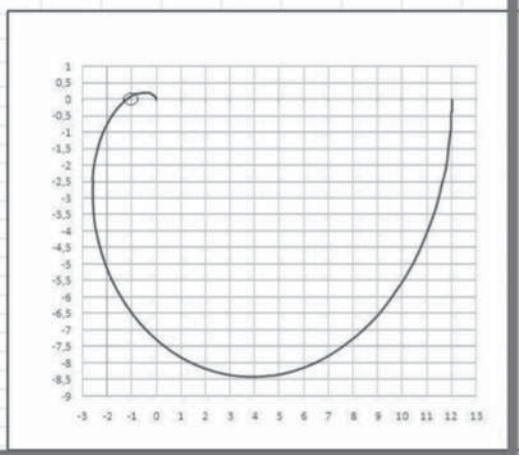
## Analisi del sistema 3

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **31**.

FIGURA **31**
Diagramma con costante di guadagno 12.

| $G_0$ | $\tau_1$ (s) | $\tau_2$ (s) | $\tau_3$ (s) |
|---|---|---|---|
| 12 | 1 | 2 | 3 |

| ω | | Re | Im |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 12 | -7,2E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -8,64E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,0368E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,24416E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,49299E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,79159E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,14991E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,57989E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -3,09587E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -3,71504E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -4,45805E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -5,34966E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -6,41959E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -7,70351E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -9,24421E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,10931E-37 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,33117E-37 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,5974E-37 |



Il diagramma circonda il punto critico e quindi si ha una condizione di instabilità; aumentando il guadagno rispetto al primo caso il sistema è diventato instabile.

Si riporta in FIGURA **32** il particolare del diagramma nell'intorno del punto critico.

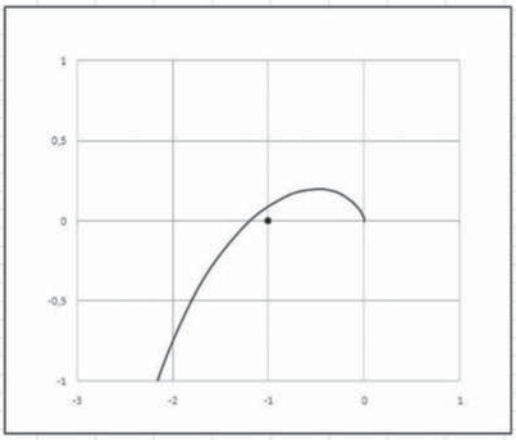


FIGURA **32**
Particolare del diagramma con costante di guadagno 12.

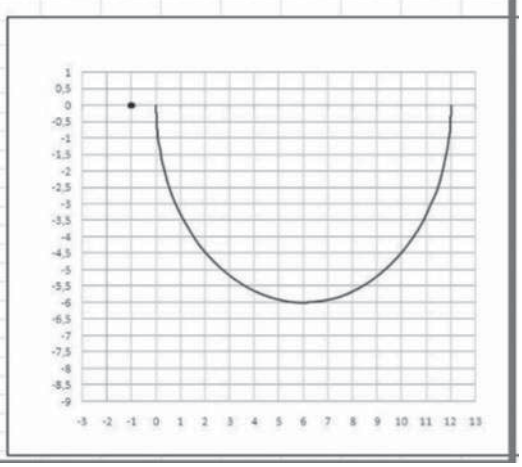
## Analisi del sistema 4

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **33**.

FIGURA **33**
Diagramma di un sistema con un polo.

| $G_0$ | $\tau_1$ (s) | $\tau_2$ (s) | $\tau_3$ (s) |
|---|---|---|---|
| 12 | 1 | 0 | 0 |

| ω | | Re | Im |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,2E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,44E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,728E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,0736E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,48832E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,98598E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -3,58318E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -4,29982E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -5,15978E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -6,19174E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -7,43008E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -8,9161E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,06993E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,28392E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,5407E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,84884E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,21861E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,66233E-38 |





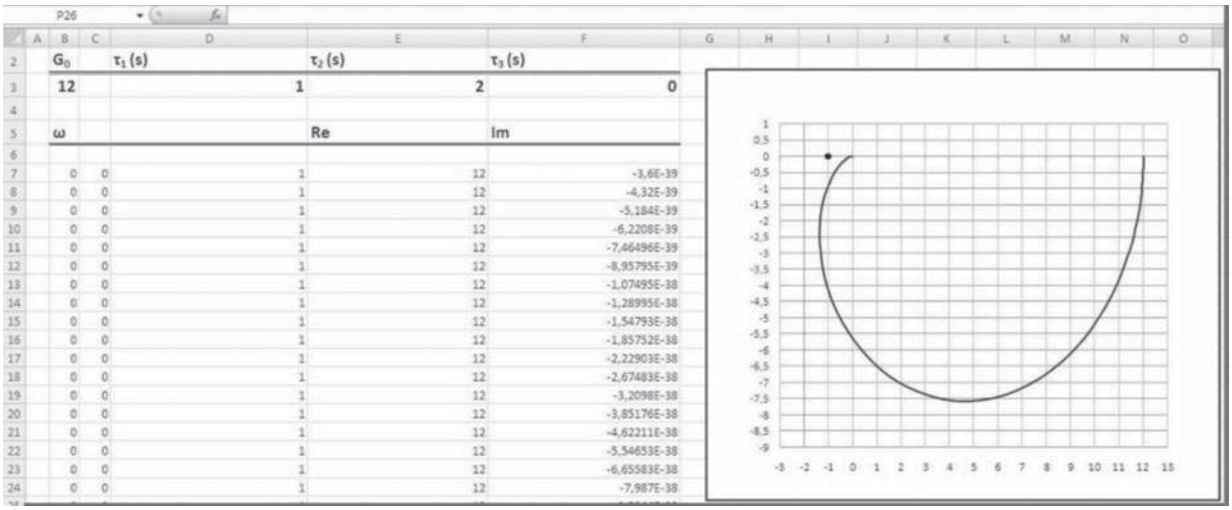
Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Come previsto il diagramma è esterno al punto critico e quindi il sistema è stabile.

### Analisi del sistema 5

Si riportano sul foglio elettronico i dati necessari a produrre il grafico che vengono visualizzati insieme al medesimo in FIGURA **34**.

FIGURA **34**
Diagramma di un sistema con due poli.



| $G_0$ | $\tau_1$ (s) | $\tau_2$ (s) | $\tau_3$ (s) |
|---|---|---|---|
| 12 | 1 | 2 | 0 |

| ω | | | Re | Im |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 12 | -3,6E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -4,32E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -5,184E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -6,2208E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -7,46496E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -8,95795E-39 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,07495E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,28995E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,54793E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -1,85752E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,22903E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -2,67483E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -3,2098E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -3,85176E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -4,62211E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -5,54653E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -6,65583E-38 |
| 0 | 0 | 1 | 12 | -7,987E-38 |

Come previsto il diagramma è esterno al punto critico e quindi il sistema è stabile.

## 3 Applicazioni con Multisim

Il programma di simulazione *Multisim* è uno strumento di *progettazione* che fornisce all'utente tutti i componenti e gli strumenti necessari per creare con il computer un progetto senza fare ricorso a componenti e strumenti reali.

Il programma offre una simulazione mista completa, analogica e digitale, e un'analisi grafica della forma d'onda, consentendo di progettare il circuito, quindi di analizzarlo utilizzando gli strumenti e le opzioni d'analisi fornite dal programma.

Allo stato attuale l'ultima versione del programma è *Multisim 11*.

Il programma viene utilizzato per tracciare i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi partendo dalla f.d.t. espressa sotto forma di rapporto di polinomi non scomposti.

I componenti e gli strumenti che si utilizzano per questa applicazione sono essenzialmente quattro e precisamente:

- il componente *AC_VOLTAGE* come generatore di tensione;
- il componente *Transfer Function Block* per definire le caratteristiche della f.d.t.;
- lo strumento *Bode Plotter* per la realizzazione dei grafici;
- il componente *GROUND* per fissare il punto a potenziale nullo.

Il circuito che deve essere utilizzato per questo scopo viene riportato in FIGURA **35**.

I componenti *AC_VOLTAGE* e *GROUND* vengono prelevati utilizzando il comando *Place* opzione *Component* e piazzati sul foglio di lavoro selezionandoli, come evidenziato nelle FIGURE **36** e **37**, dalla libreria *Sources*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

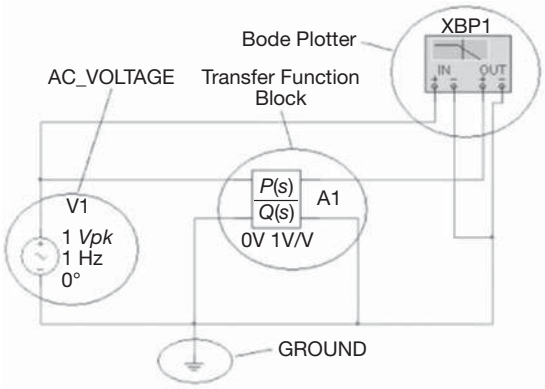
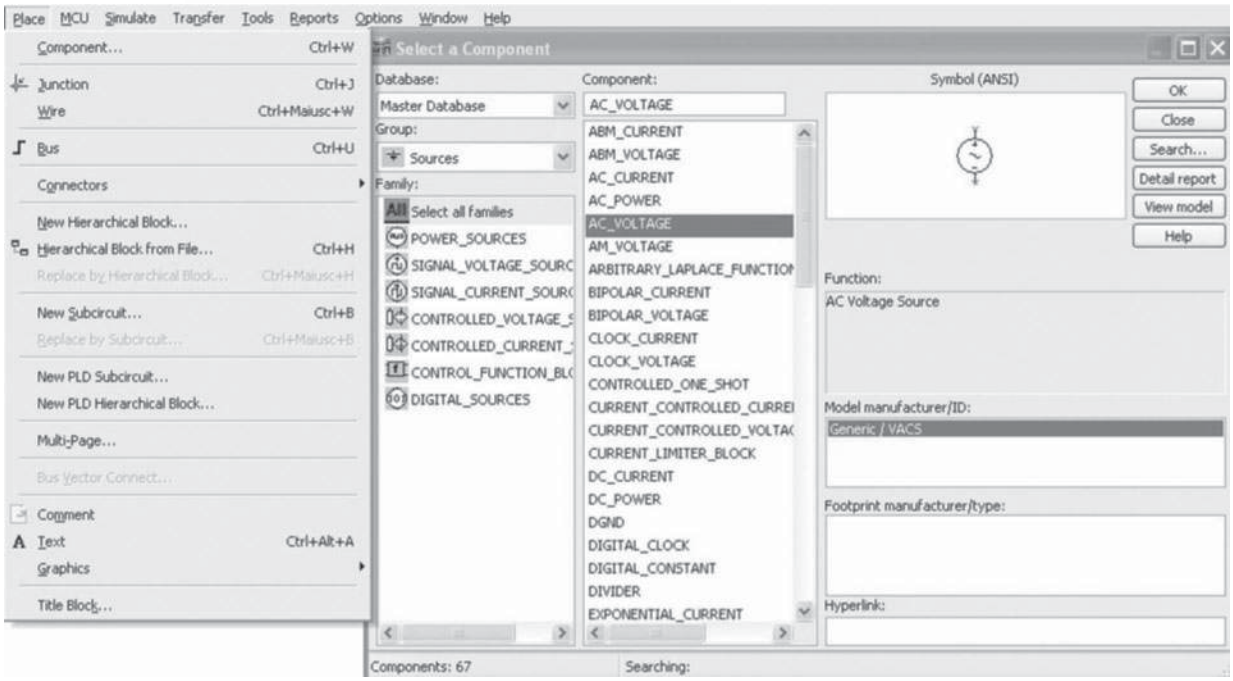



FIGURA **35** Circuito predisposto per tracciare i diagrammi di Bode.

FIGURA **36** Selezione del componente AC_VOLTAGE.



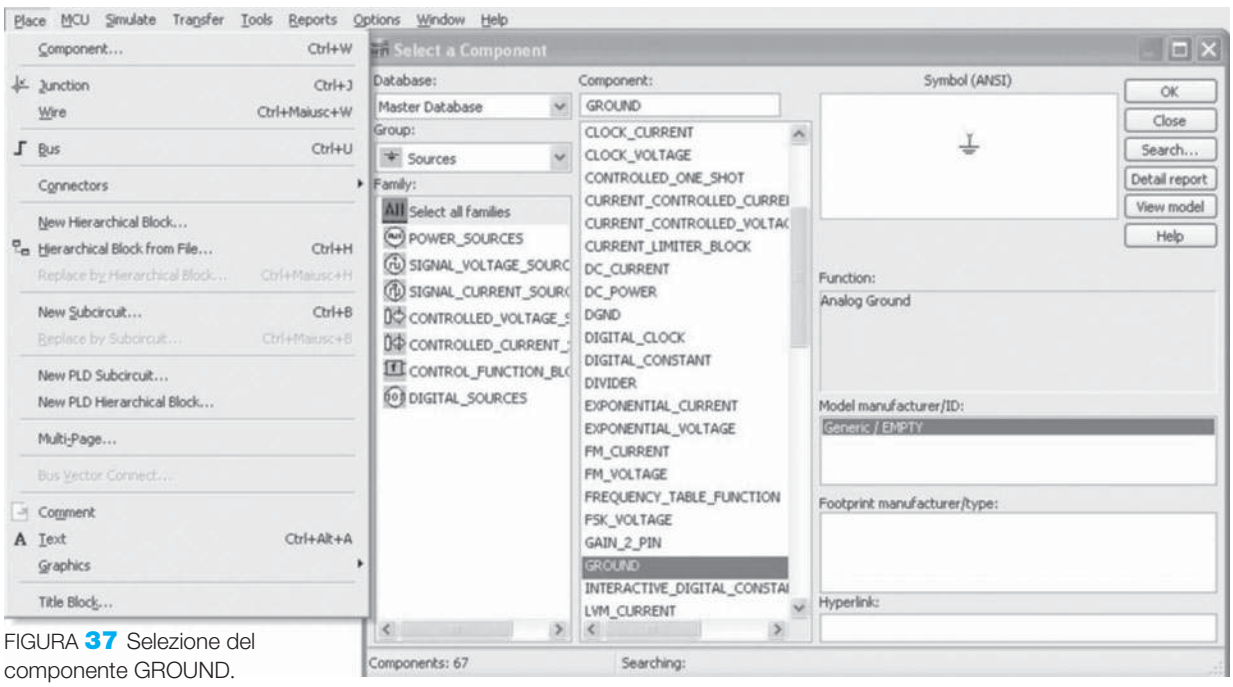



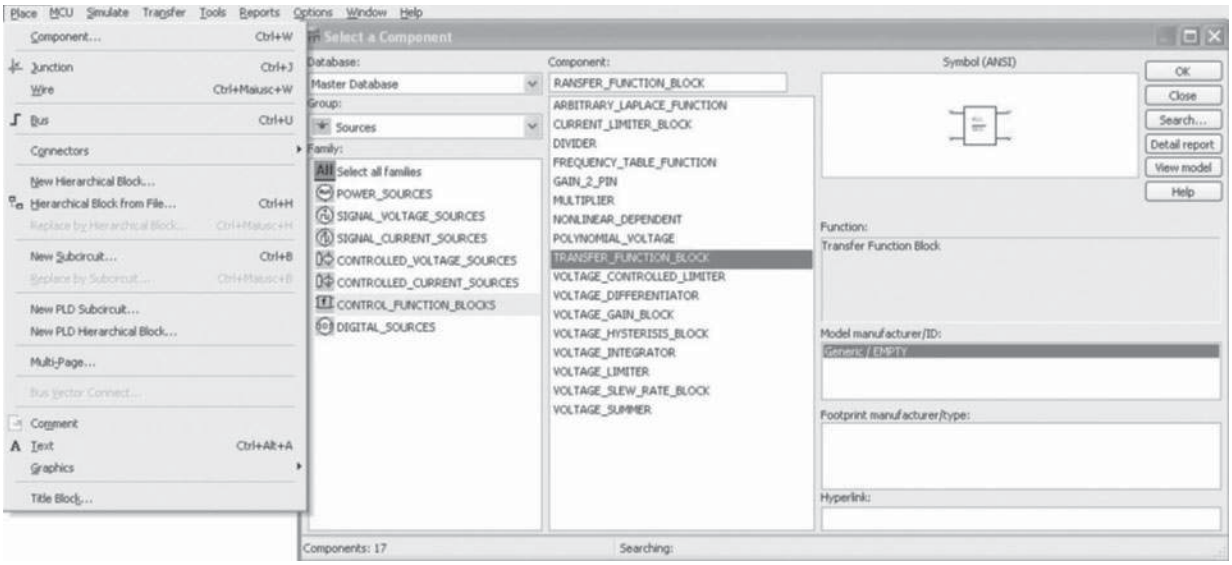

FIGURA **37** Selezione del componente GROUND.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il componente *Transfer Function Block* viene prelevato utilizzando il comando *Place* opzione *Component* e piazzato sul foglio di lavoro selezionandolo, come evidenziato nella FIGURA **38**, dalla libreria *Sources* tra quelli appartenenti alla famiglia *Control Function Blocks*.

FIGURA **38**
Selezione del componente Transfer Function Block.




Per definire le caratteristiche della f.d.t. si deve avere accesso alle proprietà del componente; dal menu che compare evidenziando il componente piazzato sul foglio di lavoro si seleziona *Properties* e poi, come evidenziato in FIGURA **39**, *Value* dalla finestra di dialogo.

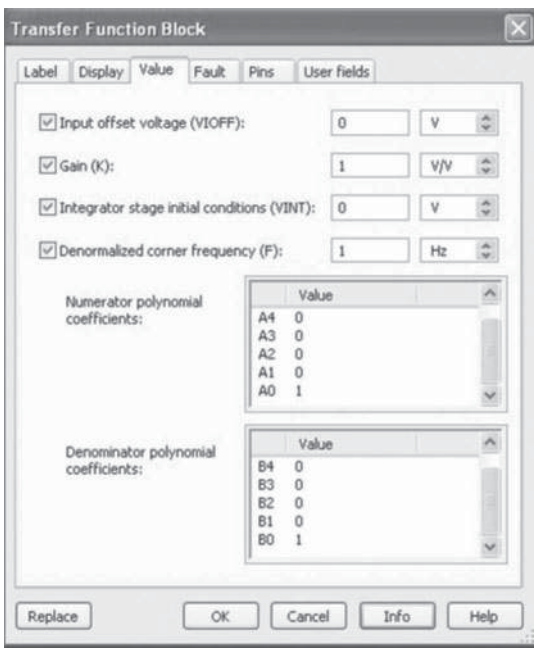



FIGURA **39**
Proprietà del componente Transfer Function Block.

La FIGURA **40**, tratta dal manuale, aiuta a capire il significato dei simboli adottati (nella figura compare il coefficiente $s$ ma è inteso che trattandosi di risposta nel dominio del tempo si deve porre $s = j\omega$).


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

$$T(s) = \frac{Y(s)}{(s)} = K * \frac{A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0}{B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0}$$

| Symbol | Parameter Name | Default | Unit |
|---|---|---|---|
| Vloff | Input voltage offset | 0 | V |
| K | Gain | 1 | V/V |
| VINT | Integrator stage initial conditions | 0 | V |
| F | Denormalized corner frequency | 1 | Hz |
| A3 | Numerator 3rd order coefficient | 0 | – |
| A2 | Numerator 2nd order coefficient | 0 | – |
| A1 | Numerator 1st order coefficient | 0 | – |
| A0 | Numerator constant | 1 | – |
| B3 | Denominator 3rd order coefficient | 0 | – |
| B2 | Denominator 2nd order coefficient | 0 | – |
| B1 | Denominator 1st order coefficient | 0 | – |
| B0 | Denominator constant | 1 | – |

FIGURA **40**
Significato dei simboli della f.d.t.

Per definire completamente la f.d.t. bisogna inserire i dati relativi:

- ai coefficienti del polinomio che si trova al numeratore;
- ai coefficienti del polinomio che si trova al denominatore;
- alla costante di proporzionalità (*gain*) che non è la costante di guadagno che si ottiene ponendo $s = 0$.

Il massimo grado che si può assegnare ai polinomi al numeratore e denominatore è il quinto.

Lo strumento *Bode Plotter* viene prelevato per posizionarlo sul foglio di lavoro utilizzando, come evidenziato in FIGURA **41**, il comando *Simulate* opzione *Instruments*.

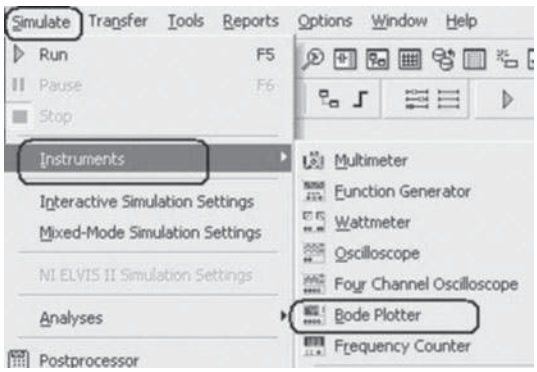



FIGURA **41**
Selezione dello strumento Bode Plotter.

Premendo per due volte il pulsante destro del mouse sullo strumento evidenziato il medesimo viene ingrandito e rappresentato come nella FIGURA **42** che ne evidenzia le proprietà.

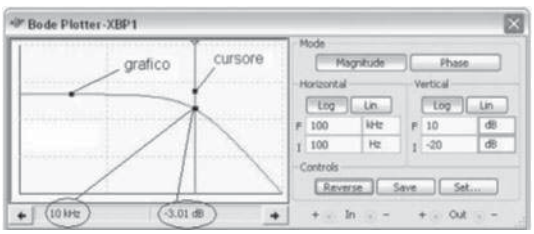



FIGURA **42**
Proprietà dello strumento Bode Plotter.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Sullo schermo dello strumento si possono visualizzare i diagrammi delle ampiezze (selezionando *Magnitude*) e delle fasi (selezionando *Phase*).

Gli assi possono essere predisposti per la visualizzazione in coordinate logaritmiche o lineari stabilendo preventivamente i due estremi superiore (*F*) e inferiore (*I*).

Sull'asse delle ascisse (*Horizontal*) si hanno i valori di frequenza espressi in Hz, sull'asse delle ordinate (*Vertical*) quelli delle ampiezze espressi in dB o i valori delle fasi espressi in gradi.

Con l'opzione *Reverse* è possibile visualizzare il grafico *nero su bianco* o *bianco su nero*.

Con l'opzione *Settings*, come evidenziato in FIGURA **43**, si imposta il numero dei punti che definiscono la risoluzione.

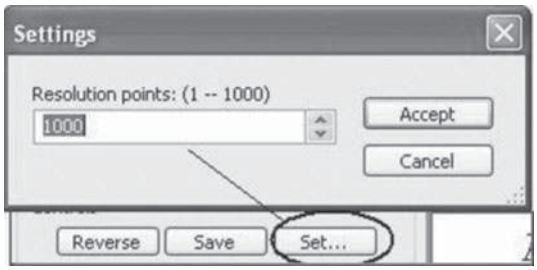



FIGURA **43**
Impostazione della risoluzione del Bode Plotter.

I valori che ampiezza o fase assumono in funzione della frequenza si leggono nella parte bassa dello strumento facendo scorrere sullo schermo l'apposito cursore che interseca il grafico (per esempio tramite il tasto freccia).

Per effettuare la simulazione si può procedere selezionando i comandi *Simulate* e *Run* o portando in posizione *I* l'interruttore predisposto per l'avvio della simulazione; per interromperla si riporta l'interruttore nella posizione di riposo *O*.

L'interruzione della simulazione determina la cancellazione di dati e tracce degli strumenti e il ripristino delle condizioni iniziali.

## 3.1 Esercitazioni

Vengono di seguito proposte alcune esercitazioni che riguardano il comportamento dei sistemi di ordine uno e due e dei sistemi retroazionati.

Gli argomenti che sono oggetto delle esercitazioni sono i seguenti:

- esercitazione 1 – Diagrammi di Bode di sistemi con un polo non nullo;
- esercitazione 2 – Diagrammi di Bode di sistemi con un polo nullo;
- esercitazione 3 – Diagrammi di Bode di sistemi con due poli reali distinti;
- esercitazione 4 – Diagrammi di Bode di sistemi con due poli reali coincidenti;
- esercitazione 5 – Diagrammi di Bode di sistemi con due poli complessi coniugati;
- esercitazione 6 – Analisi della stabilità di un sistema retroazionato.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Esercitazione 1 – Diagrammi di Bode di sistemi con un polo non nullo

Si vogliono tracciare i diagrammi di Bode del sistema che ha la seguente f.d.t.:

$$G(s) = \frac{10}{s+1}$$

In FIGURA **44** viene riportata la finestra di dialogo che consente l'inserimento dei parametri della f.d.t. del sistema.

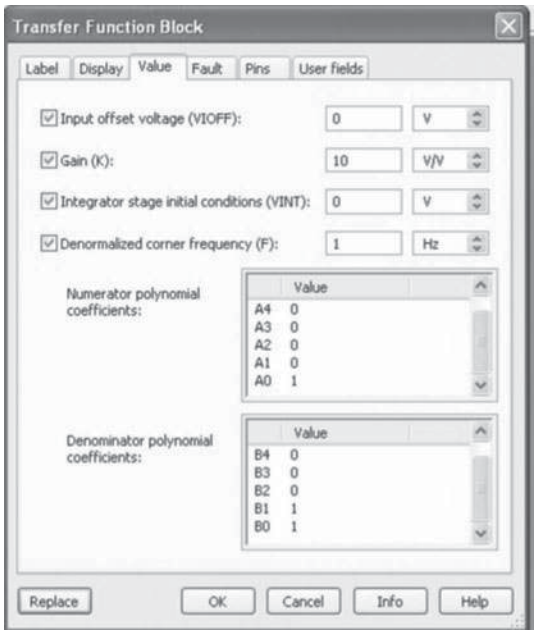



FIGURA **44**
Definizione delle proprietà della f.d.t.

In FIGURA **45** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio.

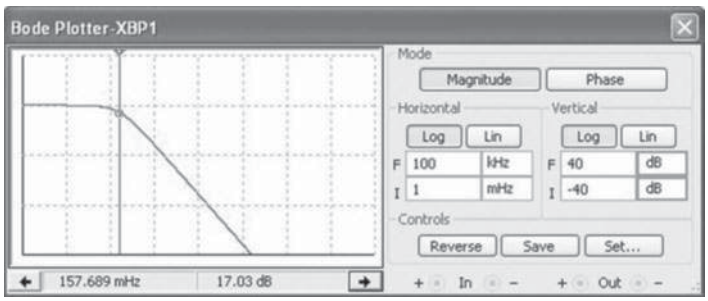



FIGURA **45**
Diagramma delle ampiezze.

In FIGURA **46** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio.

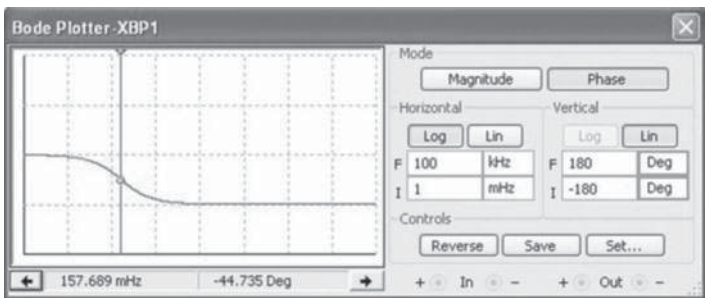



FIGURA **46**
Diagramma delle fasi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Esercitazione 2 – Diagrammi di Bode di sistemi con un polo nullo

Si vogliono tracciare i diagrammi di Bode del sistema che ha la seguente f.d.t.:

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

In FIGURA **47** viene riportata la finestra di dialogo che consente l'inserimento dei parametri della f.d.t. del sistema.

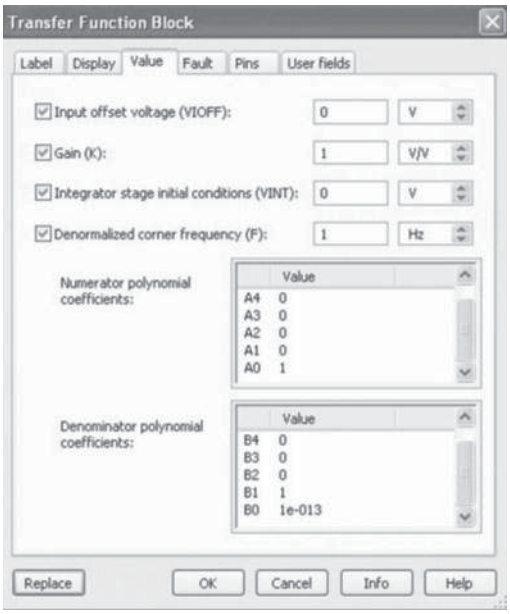



FIGURA **47**
Definizione delle proprietà della f.d.t.

Si evidenzia il fatto che per ottenere un polo nullo è stato assegnato al coefficiente B0 un valore estremamente piccolo (esponenziale –13) in quanto il programma non accetta valori nulli se i coefficienti dei termini di ordine superiore sono diversi da zero.

In FIGURA **48** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio.

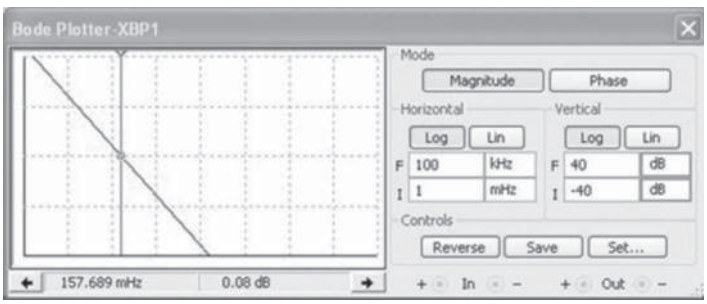



FIGURA **48**
Diagramma delle ampiezze.

In FIGURA **49** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio.

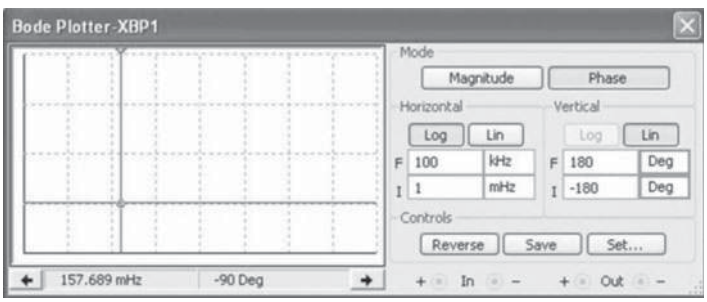



FIGURA **49**
Diagramma delle fasi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Esercitazione 3 – Diagrammi di Bode di sistemi con due poli reali distinti

Si vogliono tracciare i diagrammi di Bode del sistema che ha la seguente f.d.t.:

$$G(s) = \frac{10}{s^2 + 101s + 100}$$

In FIGURA **50** viene riportata la finestra di dialogo che consente l'inserimento dei parametri della f.d.t. del sistema.

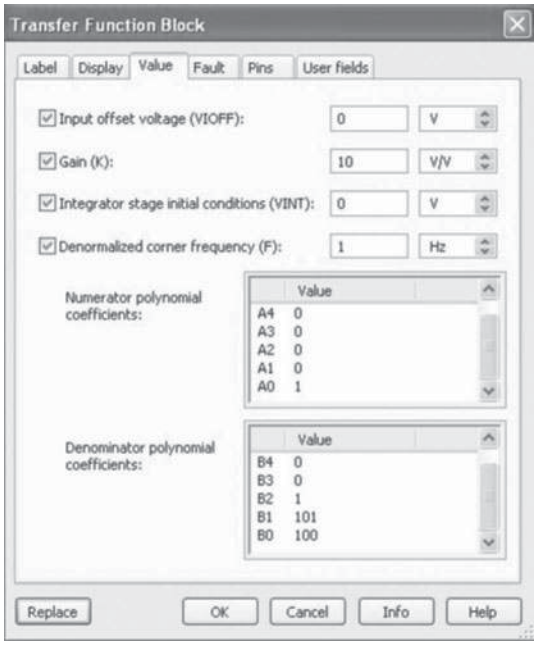



FIGURA **50**
Definizione delle proprietà della f.d.t.

In FIGURA **51** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio per il primo polo.

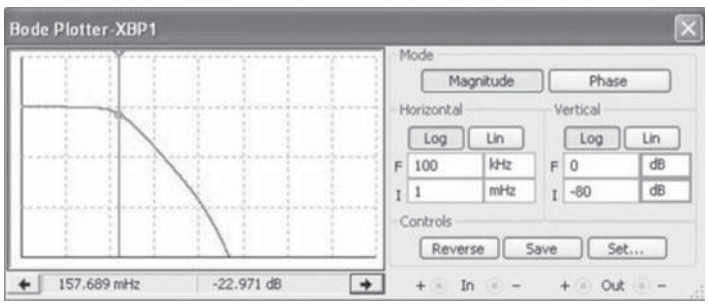



FIGURA **51**
Diagramma delle ampiezze (primo polo).

In FIGURA **52** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio per il secondo polo.

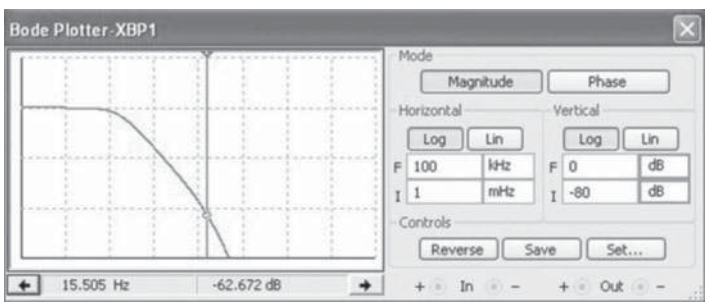



FIGURA **52**
Diagramma delle ampiezze (secondo polo).



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **53** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio per il primo polo.

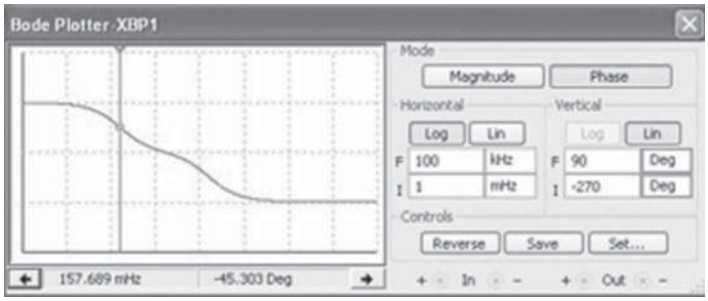



FIGURA **53**
Diagramma delle fasi (primo polo).

In FIGURA **54** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio per il secondo polo.

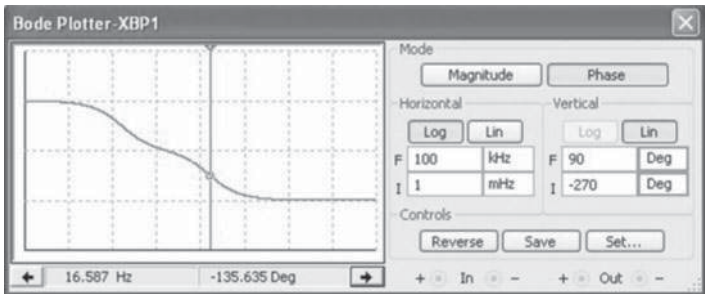



FIGURA **54**
Diagramma delle fasi (secondo polo).

## Esercitazione 4 – Diagrammi di Bode di sistemi con due poli reali coincidenti

Si vogliono tracciare i diagrammi di Bode del sistema che ha la seguente f.d.t.:

$$G(s) = \frac{10\,000}{s^2 + 200s + 10\,000}$$

In FIGURA **55** viene riportata la finestra di dialogo che consente l'inserimento dei parametri della f.d.t. del sistema.

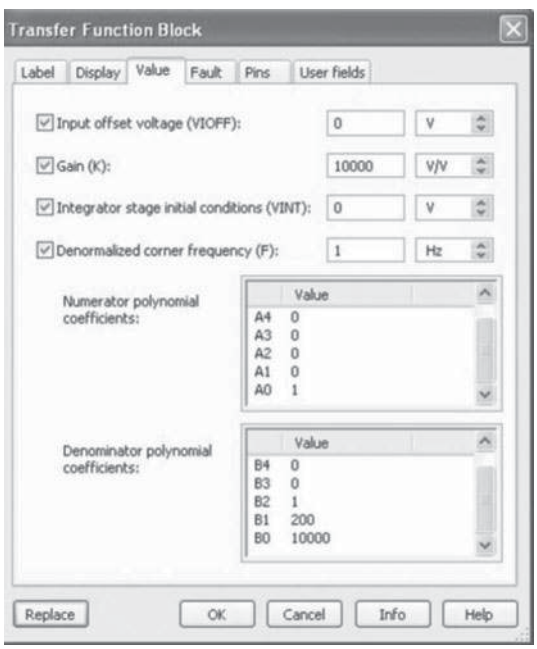



FIGURA **55**
Definizione delle proprietà della f.d.t.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **56** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio.

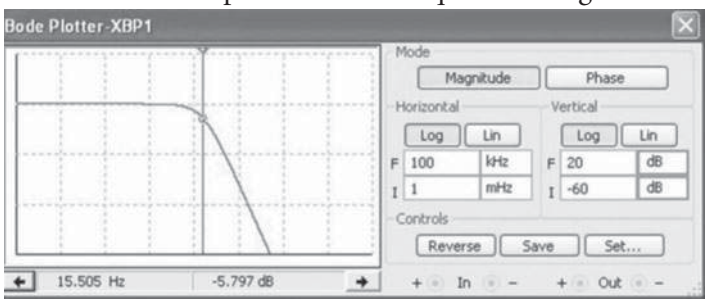



FIGURA **56**
Diagramma delle ampiezze.

In FIGURA **57** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di taglio.

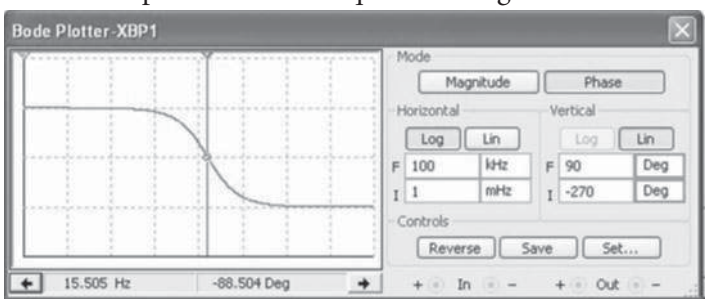



FIGURA **57**
Diagramma delle fasi.

## Esercitazione 5 – Diagrammi di Bode di sistemi con due poli complessi coniugati

Si vogliono tracciare i diagrammi di Bode di due sistemi che hanno le seguenti f.d.t.:

$$sistema\ 1_AB(s) = \frac{1}{s^2 + 0{,}1s + 1}$$

$$sistema\ 2_AB(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}$$

### Analisi del sistema 1

In FIGURA **58** viene riportata la finestra di dialogo che consente l'inserimento dei parametri della f.d.t. del sistema.

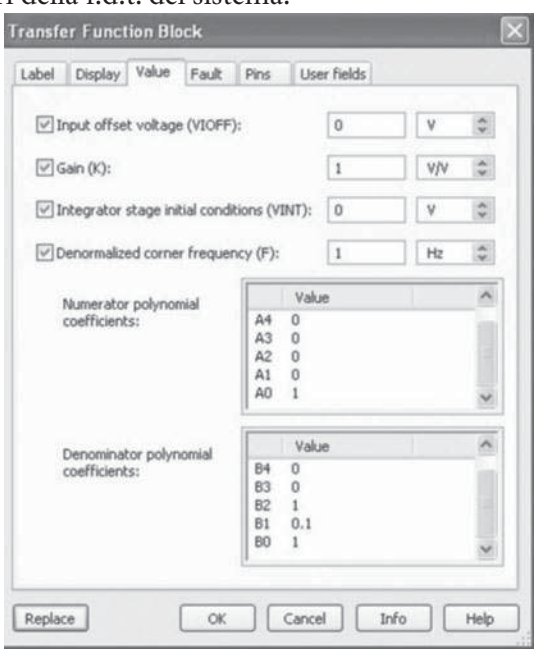



FIGURA **58**
Definizione delle proprietà della f.d.t. (caso 1).



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **59** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di risonanza.

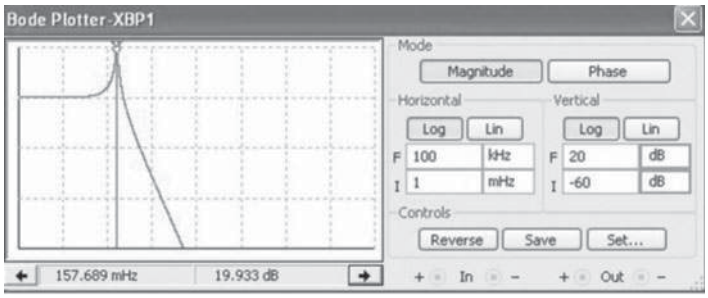



FIGURA **59**
Diagramma delle ampiezze (caso 1).

È evidente come in questo caso il sistema presenti un coefficiente di smorzamento piuttosto basso in quanto il picco di risonanza è piuttosto accentuato.

In FIGURA **60** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di risonanza.

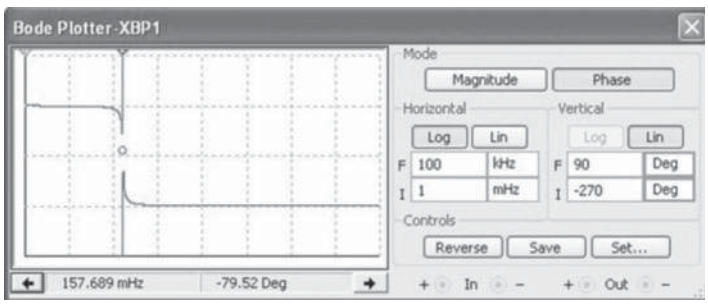



FIGURA **60**
Diagramma delle fasi (caso 1).

## Analisi del sistema 2

In FIGURA **61** viene riportata la finestra di dialogo che consente l'inserimento dei parametri della f.d.t. del sistema.

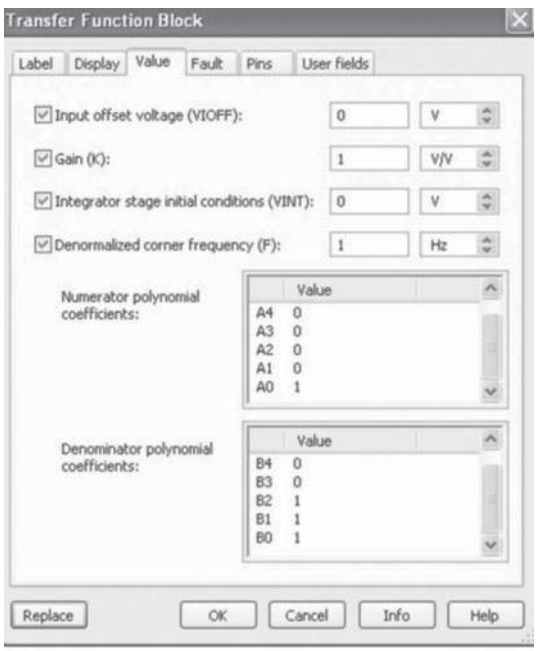



FIGURA **61**
Definizione delle proprietà della f.d.t. (caso 2).



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **62** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di risonanza.

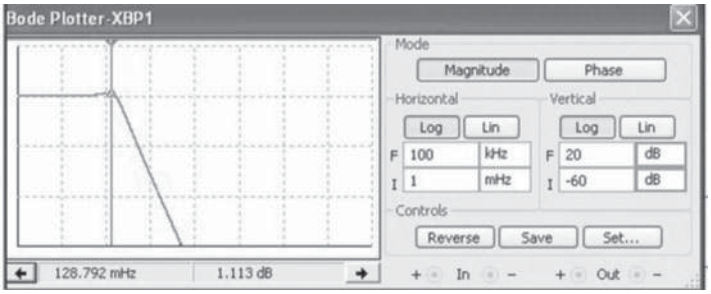



FIGURA **62**
Diagramma delle ampiezze (caso 2).

È evidente come in questo caso il sistema presenti un coefficiente di smorzamento piuttosto elevato in quanto il picco di risonanza è piuttosto ridotto.

In FIGURA **63** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene evidenziato il valore corrispondente alla frequenza di risonanza.

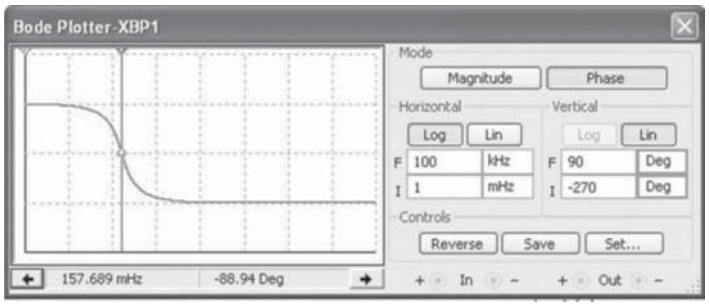



FIGURA **63**
Diagramma delle fasi (caso 2).

## Esercitazione 6 – Analisi della stabilità di un sistema retroazionato

Si vuole procedere a una prova di simulazione con lo scopo di analizzare la stabilità del sistema retroazionato la cui f.d.t. d'anello è la seguente:

$$AB(s) = \frac{100s + 1}{0{,}01s^3 + 1{,}01s^2 + s}$$

In FIGURA **64** viene riportata la finestra di dialogo che consente l'inserimento dei parametri della f.d.t. del sistema.

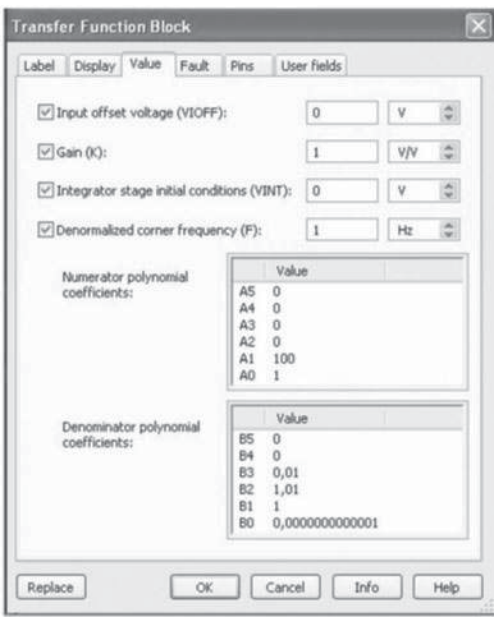



FIGURA **64**
Definizione delle proprietà della f.d.t.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **65** viene riportato il diagramma delle ampiezze sul quale viene letto il valore corrispondente al punto di attraversamento a 0 dB.

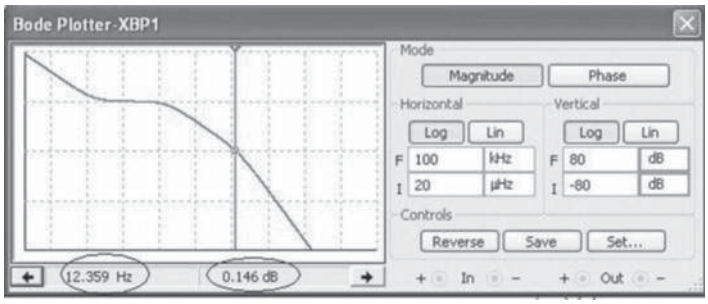



FIGURA **65**
Diagramma delle ampiezze.

Si rileva che il punto di attraversamento a 0 dB avviene alla frequenza di circa 12 Hz.

In FIGURA **66** viene riportato il diagramma delle fasi sul quale viene letto il valore della fase relativa alla frequenza letta in corrispondenza del punto di attraversamento a 0 dB.

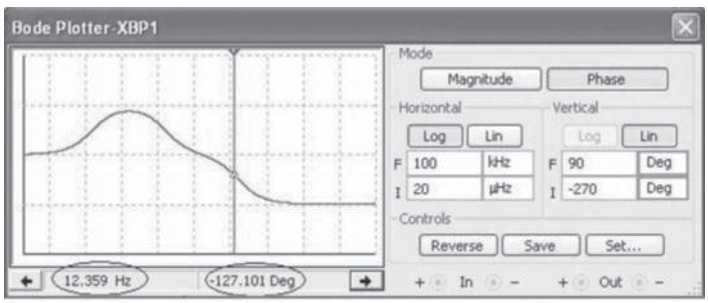



FIGURA **66**
Diagramma delle fasi.

Si rileva che in corrispondenza del punto di attraversamento a 0 dB si ha un angolo di fase di –127°; il margine di fase è quindi di circa 53° e si può ritenere pertanto sufficiente per una buona stabilità del sistema.

## 4 Applicazioni con Matlab

Il programma *MATLAB* viene distribuito dalla *MATH WORKS*.

È stato ideato dai ricercatori dell'università di New Mexico e di Standford.

Talvolta di non semplice uso e interpretazione viene utilizzato a livello mondiale come strumento fondamentale per la simulazione e l'analisi dei sistemi a qualunque livello.

La *versione Education* è di più semplice impiego.

Dopo aver lanciato il programma compare il prompt *EDU>>*, si digita l'operazione che si intende eseguire e si preme il tasto *INVIO*.

Questa modalità di funzionamento è semplice ma non consente la memorizzazione della sequenza di operazioni digitate.

Se si desidera memorizzare il lavoro è necessario scrivere le operazioni in un file di testo utilizzando per esempio l'editor interno a Matlab (si richiama selezionando *New M-file* dal menu *File*) e memorizzarlo con l'estensione *.m*.

Con il programma si hanno a disposizione le possibilità operative offerte dal *Control System Toolbox* che è l'insieme di funzioni e comandi specia-


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

lizzati per l'analisi dei sistemi di controllo a catena aperta e chiusa tempo continuo e tempo discreto.

In particolare con *Control System Toolbox* si possono elaborare le seguenti applicazioni:

- *calcolo della trasformata di Laplace*;
- *calcolo dell'antitrasformata di Laplace*;
- *calcolo degli zeri e dei poli di una f.d.t.*;
- *rappresentazione grafica della risposta al gradino di un sistema a retroazione unitaria*;
- *rappresentazione grafica dei diagrammi di Bode e di Nyquist.*

## 4.1 Esercitazioni

Una sequenza di semplici applicazioni nella sintassi di Matlab viene proposta per chiarire l'argomento.

### Trasformata di Laplace

In FIGURA **67** viene riportato il listato del programma relativo a un esempio di calcolo di una trasformata, in FIGURA **68** il risultato prodotto.

FIGURA **67** Programma per il calcolo della trasformata di Laplace.

```
disp('Calcolo della trasformata di Laplace della funzione f')
syms a b t s;                    % Si definiscono le variabili per la trasformazione
f = a*exp(-b*t)+ 12              % f è la funzione che si desidera trasformare
F = laplace (f)                  % F è la trasformata di Laplace della f
pretty(F)                        % Visualizza in formato tipicamente matematico
```

```
Calcolo della trasformata di Laplace della funzione f
f =
a*exp(-b*t)+ 12
F =
a/(s+b)+12/s
  a       12
----- + ----
 s+b      s
```

FIGURA **68** Risultato prodotto.

### Antitrasformata di Laplace

In FIGURA **69** viene riportato il listato del programma relativo a un esempio di calcolo di una trasformata, in FIGURA **70** il risultato prodotto.

FIGURA **69** Programma per il calcolo dell'antitrasformata di Laplace.

```
Disp                             ('Calcolo dell'antitrasformata di Laplace della funzione F')
syms a,s,t;                      % Si definiscono le variabili per la trasformazione
F = a/(s^2+a^2)-6/(s+2)          % F è la funzione che si desidera antitrasformare
f = ilaplace (F)                 % f è la trasformata di Laplace della F
pretty(f)                        % Visualizza in formato tipicamente matematico
```



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

```
Calcolo dell'antitrasformata di Laplace della funzione F
F =
a/(s^2+a^2)-6/(s+2)
f =
sin(a*t)-6*exp(-2*t)
sin(at) - 6*exp(-2t)
```

FIGURA **70**
Risultato prodotto.

## Zeri e poli di una f.d.t.

Per individuare zeri e poli di una f.d.t. è necessario fornire al programma i valori dei coefficienti dei polinomi che si trovano al numeratore e denominatore della f.d.t. stessa.

Se per esempio la f.d.t. di cui si vogliono calcolare zeri e poli assume la forma

$$G(s) = \frac{s+2}{s^2+5s+6}$$

l'istruzione corrispondente necessaria per il calcolo e i risultati prodotti vengono riportati in FIGURA **71**.

```
[z,p] = tf2zp([1,2],1,5,6)
z =
-2
p =
-3
-2
```

FIGURA **71**
Istruzione per il calcolo di zeri e poli di una f.d.t. e risultati prodotti.

## Risposta al gradino di un sistema a retroazione unitaria

Per rappresentare graficamente la risposta al gradino di un sistema a retroazione unitaria è necessario fornire al programma i valori dei coefficienti dei polinomi che si trovano al numeratore e al denominatore della f.d.t. stessa.

Se per esempio la f.d.t. di cui si vogliono calcolare zeri e poli assume la forma

$$G(s) = \frac{s+4}{s^2+5s+6}$$

il programma che consente la visualizzazione del grafico è quello riportato in FIGURA **72**.

```
t = [0: 0.1: 20]; n = [1, 4]; d = [1, 5, 6];
[num, den] = cloop (n, d);
[y, x, t] = step (num, den, t);
plot (t, y)
xlabel (' tempo in s')
ylabel (' U(t)')
title (' Risposta nel dominio del tempo ')
```

FIGURA **72**
Programma per la visualizzazione della risposta al gradino di un sistema a retroazione unitaria.

## Diagrammi di Bode e di Nyquist

Per rappresentare graficamente i diagrammi di Bode e di Nyquist di un


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

sistema è necessario fornire al programma i valori dei poli, degli zeri e del coefficiente di proporzionalità.

Se per esempio si vogliono rappresentare i diagrammi di Bode e di Nyquist del sistema con f.d.t.

$$G(s) = \frac{20}{(s+2)(s+3)(s+4)}$$

si deve utilizzare il programma riportato in FIGURA **73**.

```
f = zpk( [ ], [-2, -3, -4], 20);
bode (f)
nyquist (f)
```

FIGURA **73**
Programma per la visualizzazione dei diagrammi di Bode e di Nyquist di un sistema.

# 5 Applicazioni con linguaggi evoluti

Vengono di seguito proposte alcune esercitazioni svolte utilizzando un linguaggio di programmazione evoluto; si sceglie, date le caratteristiche di maggior semplicità, il linguaggio *Just Basic*.

## 5.1 Esercitazioni con Just Basic 1.01

Le esercitazioni riguardano la risposta in frequenza dei sistemi.

Gli argomenti che sono oggetto delle esercitazioni sono i seguenti:

- esercitazione 1 – Modulo e fase di un blocco con un polo
- esercitazione 2 – Modulo e fase di un blocco con uno zero
- esercitazione 3 – Modulo e fase di un sistema con uno zero e un polo.

### Esercitazione 1 – Modulo e fase di un blocco con un polo

Si vuole produrre il listato di un programma che calcola il modulo e la fase di un blocco con un polo.

In FIGURA **74** viene riportato lo schema a blocchi che evidenzia gli ingressi e le uscite del programma.

FIGURA **74**
Schema a blocchi con ingressi e uscite del programma.

Gli ingressi sono la pulsazione di taglio *pt* corrispondente al polo, la costante di guadagno *g0* e la pulsazione *p* alla quale si vogliono calcolare il modulo *md* e la fase *fi* corrispondenti alla pulsazione *p*.

Le uscite sono proprio il modulo *md* e la fase *fi* corrispondenti alla pulsazione *p*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il listato del programma viene riprodotto in FIGURA **75**.

```
print "   "
print "  BLOCCO CON UN POLO"
print "   "
print "  pulsazione di taglio, espressa in rad/s"
input pt
tao=1/pt
print "   "
print "  costante di guadagno, adimensionale"
input g0
print "   "
print "  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s"
input p
print "   "
print "  vale"
print "   "
den=1+(p*p*tao*tao)
md=g0*(1/sqr(den))
print ,md
print "   "
print "  fase corrispondente, espressa in gradi"
print "   "
print "  vale"
print "   "
fi=-57.3*atn(p*tao)
print ,fi
```

FIGURA **75**
Listato del programma.

Le formule utilizzate nel programma sono quelle riguardanti il calcolo del modulo e della fase relative alla f.d.t.

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

di un blocco con un polo moltiplicata per la costante di guadagno $G_0$.

Il programma viene testato prendendo come riferimento la pulsazione di taglio di 1 rad/s e una costante di guadagno unitaria; nelle tre prove effettuate sono stati calcolati il modulo e la fase della f.d.t. per valori di pulsazione pari rispettivamente a:

- 1 rad/s (prima prova);
- 0.001 rad/s (seconda prova);
- 1000 rad/s (terza prova).

I risultati ottenuti concordano con le aspettative.

In FIGURA **76** vengono proposti i risultati della prima prova, in FIGURA **77** i risultati della seconda, in FIGURA **78** i risultati della terza.

```
 BLOCCO CON UN POLO

 pulsazione di taglio, espressa in rad/s
?1

 costante di guadagno, adimensionale
?1

 modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?1

 vale

            0.70710678

 fase corrispondente, espressa in gradi

 vale

            -45.0033148
```

FIGURA **76**
Risultati della prima prova.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\es1.bas complete.
File  Edit

  BLOCCO CON UN POLO

  pulsazione di taglio, espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?0.001

  vale

              0.9999995

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              -0.57299981e-1
```

FIGURA **77**
Risultati della seconda prova.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\es1.bas complete.
File  Edit

  BLOCCO CON UN POLO

  pulsazione di taglio, espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?1000

  vale

              0.9999995e-3

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              -89.9493295
```

FIGURA **78**
Risultati della terza prova.

## Esercitazione 2 – Modulo e fase di un blocco con uno zero

Si vuole produrre il listato di un programma che calcola il modulo e la fase di un blocco con uno zero.

In FIGURA **79** viene riportato lo schema a blocchi che evidenzia gli ingressi e le uscite del programma.

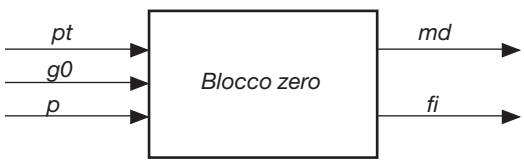



FIGURA **79**
Schema a blocchi con ingressi e uscite del programma.

Gli ingressi sono la pulsazione di taglio *pt* corrispondente allo zero, la costante di guadagno *g0* e la pulsazione *p* alla quale si vogliono calcolare il modulo *md* e la fase *fi* corrispondenti alla pulsazione *p*.

Le uscite sono proprio il modulo *md* e la fase *fi* corrispondenti alla pulsazione *p*.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il listato del programma viene riprodotto in FIGURA **80**.

```
print "   "
print "  BLOCCO CON UNO ZERO"
print "   "
print "  pulsazione di taglio, espressa in rad/s"
input pt
tao=1/pt
print "   "
print "  costante di guadagno, adimensionale"
input g0
print "   "
print "  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s"
input p
print "   "
print "  vale"
print "   "
num=1+(p*p*tao*tao)
md=g0*sqr(num)
print ,md
print "   "
print "  fase corrispondente, espressa in gradi"
print "   "
print "  vale"
print "   "
fi=57.3*atn(p*tao)
print ,fi
```

FIGURA **80**
Listato del programma.

Le formule utilizzate nel programma sono quelle riguardanti il calcolo del modulo e della fase relative alla f.d.t.

$$G(j\omega) = 1 + j\omega\tau$$

di un blocco con uno zero moltiplicata per la costante di guadagno $G_0$.

Il programma viene testato prendendo come riferimento la pulsazione di taglio di 1 rad/s e una costante di guadagno unitaria; nelle tre prove effettuate sono stati calcolati il modulo e la fase della f.d.t. per valori di pulsazione pari rispettivamente a:

- 1 rad/s (prima prova);
- 0.001 rad/s (seconda prova);
- 1000 rad/s (terza prova).

I risultati ottenuti concordano con le aspettative.

In FIGURA **81** vengono proposti i risultati della prima prova, in FIGURA **82** i risultati della seconda, in FIGURA **83** i risultati della terza.

```
 BLOCCO CON UNO ZERO

 pulsazione di taglio, espressa in rad/s
?1

 costante di guadagno, adimensionale
?1

 modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?1

 vale

            1.41421356

 fase corrispondente, espressa in gradi

 vale

            45.0033148
```

FIGURA **81**
Risultati della prima prova.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\es2.bas complete.
File  Edit

  BLOCCO CON UNO ZERO

  pulsazione di taglio, espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?0.001

  vale

              1.0000005

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              0.57299981e-1
```

FIGURA **82**
Risultati della seconda prova.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\es2.bas complete.
File  Edit

  BLOCCO CON UNO ZERO

  pulsazione di taglio, espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?1000

  vale

              1000.0005

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              89.9493295
```

FIGURA **83**
Risultati della terza prova.

## Esercitazione 3 – Modulo e fase di un sistema con uno zero e un polo

Si vuole produrre il listato di un programma che calcola il modulo e la fase di un blocco con uno zero e un polo.

In FIGURA **84** viene riportato lo schema a blocchi che evidenzia gli ingressi e le uscite del programma.

FIGURA **84**
Schema a blocchi con ingressi e uscite del programma.

Gli ingressi sono le pulsazioni di taglio corrispondenti allo zero *ptz* e al polo *ptp*, la costante di guadagno *g0* e la pulsazione *p* alla quale si vogliono calcolare il modulo *md* e la fase *fi* corrispondenti alla pulsazione *p*.

Le uscite sono proprio il modulo *md* e la fase *fi* corrispondenti alla pulsazione *p*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il listato del programma viene riprodotto in FIGURA **85**.

```
print "   "
print "  BLOCCO CON UNO ZERO E UN POLO"
print "   "
print "  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s"
input ptz
taoz=1/ptz
print "   "
print "  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s"
input ptp
taop=1/ptp
print "   "
print "  costante di guadagno, adimensionale"
input g0
print "   "
print "  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s"
input p
print "   "
print "  vale"
print "   "
re=1+(p*p*taop*taoz)
im=p*(taoz-taop)
num=sqr(re*re+im*im)
den=1+(p*p*taop*taop)
md=g0*(num/den)
print ,md
print "   "
print "  fase corrispondente, espressa in gradi"
print "   "
print "  vale"
print "   "
fi=57.3*atn(im/re)
print ,fi
```

FIGURA **85**
Listato del programma.

Le formule utilizzate nel programma sono quelle riguardanti il calcolo del modulo e della fase relative alla f.d.t.

$$G(j\omega) = \frac{1 + j\omega\tau_z}{1 + j\omega\tau_p}$$

di un blocco con uno zero e un polo moltiplicata per la costante di guadagno $G_0$.

Il programma viene testato effettuando due serie di prove a costante di guadagno unitaria prendendo rispettivamente come riferimento le seguenti pulsazioni di taglio:

- 1 rad/s per lo zero e 100 rad/s per il polo (prima serie);
- 1 rad/s per il polo e 100 rad/s per lo zero (seconda serie).

Per entrambe le serie sono stati calcolati il modulo e la fase della f.d.t. per valori di pulsazione pari rispettivamente a:

- 0,1 rad/s (prima prova);
- 1 rad/s (seconda prova);
- 10 rad/s (terza prova);
- 100 rad/s (quarta prova);
- 1000 rad/s (quinta prova).

I risultati ottenuti concordano con le aspettative.

### Risultati della prima serie di prove

I risultati della prima serie vengono proposti:

- in FIGURA **86** per la prima prova;
- in FIGURA **87** per la seconda prova,
- in FIGURA **88** per la terza prova;


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?1

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?100

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?0.1

  vale

              1.00498706

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              5.65371381
```

FIGURA **86**
Risultati della prima prova/serie 1.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?1

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?100

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?1

  vale

              1.41414286

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              44.4303339
```

FIGURA **87**
Risultati della seconda prova/serie 1.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?1

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?100

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?10

  vale

              10.0

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              78.5846019
```

FIGURA **88**
Risultati della terza prova/serie 1.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- in FIGURA **89** per la quarta prova;
- in FIGURA **90** per la quinta prova.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File  Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?1

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?100

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?100

  vale

              70.7142136

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              44.4303339
```

FIGURA **89**
Risultati della quarta prova/serie 1.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File  Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?1

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?100

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?1000

  vale

              99.5037688

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              5.65371381
```

FIGURA **90**
Risultati della quinta prova/serie 1.

## Risultati della seconda serie di prove

I risultati della seconda serie vengono proposti:

- in FIGURA **91** per la prima prova;

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File  Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?100

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?0.1

  vale

              0.99503769

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              -5.65371381
```

FIGURA **91**
Risultati della prima prova/serie 2.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- in FIGURA **92** per la seconda prova,
- in FIGURA **93** per la terza prova;
- in FIGURA **94** per la quarta prova;

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File  Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?100

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?1

  vale

              0.70714214

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              -44.4303339
```

FIGURA **92**
Risultati della seconda prova/serie 2.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File  Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?100

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?10

  vale

              0.1

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              -78.5846019
```

FIGURA **93**
Risultati della terza prova/serie 2.

```
Execution of: C:\Users\paolo\Desktop\eserc3.bas complete.
File  Edit

  pulsazione di taglio (zero), espressa in rad/s
?100

  pulsazione di taglio (polo), espressa in rad/s
?1

  costante di guadagno, adimensionale
?1

  modulo corrispondente alla pulsazione, espressa in rad/s
?100

  vale

              0.14141429e-1

  fase corrispondente, espressa in gradi

  vale

              -44.4303339
```

FIGURA **94**
Risultati della quarta prova/serie 2.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- in FIGURA **95** per la quinta prova.

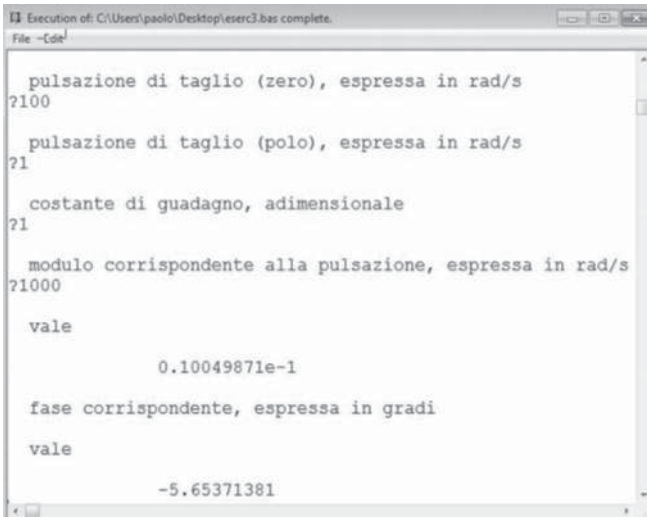



FIGURA **95**
Risultati della quinta prova/serie 2.

**1** **Utilizzare il foglio elettronico per tracciare i diagrammi di Bode delle ampiezze e delle fasi di un blocco proporzionale considerando:**

- **come dato d'ingresso la costante di proporzionalità del blocco;**
- **per l'asse delle ascisse un intervallo di pulsazioni compreso per entrambi i grafici tra 1 rad/s e 1000 krad/s;**
- **per l'asse delle ordinate si considera una scala compresa tra –40 dB e 40 dB con passo 10 dB per il diagramma delle ampiezze e una scala compresa tra –45° e 45° con passo 5° per il diagramma delle fasi.**

**2** **Utilizzare il foglio elettronico per tracciare i diagrammi di Bode (curve asintotiche) delle ampiezze e delle fasi di un blocco con un polo che ha come f.d.t. la seguente espressione:**

$$G(j\omega) = \frac{25}{(1 + j\omega 20)}$$

**3** **Utilizzare il foglio elettronico per tracciare i diagrammi di Bode (curve asintotiche) delle ampiezze e delle fasi di un blocco con uno zero considerando:**

- **come ingressi la costante di proporzionalità del blocco e il valore del polo;**
- **per l'asse delle ascisse un intervallo di pulsazioni compreso tra 0,01 rad/s e 10 000 rad/s;**
- **per l'asse delle ordinate una scala compresa tra –100 dB e 100 dB con passo 20 dB per le ampiezze e una scala compresa tra 135° e –45° con passo 45° per le fasi.**

**4** **Per il sistema avente come f.d.t. l'espressione**

$$G(s) = \frac{20}{(s+2)(s+3)(s+4)}$$

**realizzare, utilizzando il foglio elettronico, i diagrammi di Bode del modulo e della fase.**

**5** **Utilizzando il programma *Multisim* realizzare i diagrammi di Bode del modulo e della fase per il sistema che ha come f.d.t. l'espressione**

$$G(s) = \frac{20}{(s+2)(s+3)(s+4)}$$

**6** **Utilizzando il programma *Multisim* realizzare i diagrammi di Bode del modulo e della fase per il sistema che ha come f.d.t. l'espressione**

$$G(s) = \frac{20\,(s+1)(s+4)}{(s+2)(s+3)}$$

**7** **Eseguire una prova di simulazione con il programma *Multisim* che ha lo scopo di analizzare la stabilità del sistema retroazionato la cui f.d.t. d'anello è la seguente:**

$$AB(j\omega) = \frac{50\,(j\omega 100)}{s(1 + j\omega)(1 + j\omega 0{,}001)}$$

**8** **Eseguire una prova di simulazione con il programma *Multisim* che ha lo scopo di analizzare la stabilità del sistema retroazionato la cui f.d.t. d'anello è la seguente:**

$$AB(j\omega) = \frac{50}{(1 + j\omega)(1 + j\omega 0{,}001)(1 + j\omega 100)}$$

**9** **Utilizzando il *linguaggio Just Basic* realizzare un programma che calcola il modulo e la fase di un sistema con due poli di cui uno nullo al variare della pulsazione; si considerino come ingressi del sistema la pulsazione corrispondente al polo e la costante di guadagno del blocco.**

**10** **Utilizzando il *linguaggio Just Basic* realizzare un programma che calcola il modulo e la fase di un sistema con due poli al variare della pulsazione; si considerino come ingressi del sistema le pulsazioni corrispondenti ai due poli e la costante di guadagno del blocco.**

**11** **Per il sistema retroazionato avente come f.d.t. d'anello l'espressione**

$$G(s) = \frac{100}{(s+2)(s+3)(s+4)}$$

**realizzare, utilizzando il foglio elettronico, i diagrammi di Nyquist del modulo e della fase e studiarne la stabilità.**

**12** **Per il sistema retroazionato avente come f.d.t. d'anello l'espressione**

$$G(s) = \frac{10}{(s+2)(s+3)}$$

**realizzare, utilizzando il foglio elettronico, i diagrammi di Nyquist del modulo e della fase e studiarne la stabilità.**

**13** **Per il sistema retroazionato avente come f.d.t. d'anello l'espressione**

$$G(s) = \frac{1}{(s+2)}$$

**realizzare, utilizzando il foglio elettronico, i diagrammi di Nyquist del modulo e della fase e studiarne la stabilità.**

**14** **Per il sistema retroazionato avente come f.d.t. d'anello l'espressione**

$$G(s) = \frac{200}{(s+2)}$$

**realizzare, utilizzando il foglio elettronico, i diagrammi di Nyquist del modulo e della fase e studiarne la stabilità.**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 4 Automazione industriale

## 1 Concetti introduttivi

Viene di seguito chiarito il significato di termini e concetti relativi all'argomento in questione:

- *automazione*;
- *automatico*;
- *sistema automatico*;
- *automazione industriale*;
- *automatismi industriali*;
- *grado di automazione*;
- *azionamenti industriali*.

### 1.1 Automazione

▶ Il termine **automazione** è stato introdotto inizialmente negli Stati Uniti (deriva da *Automation*) con lo scopo di caratterizzare tutte quelle tecnologie utilizzate per la costruzione di macchine che, per lo svolgimento di un determinato compito, non necessitano o necessitano in minima parte dell'intervento umano.

Per raggiungere lo scopo di ridurre l'intervento umano una macchina deve essere dotata di un *sistema di controllo* che la metta nelle condizioni di governarsi da sola ovvero di funzionare senza l'aiuto di interventi esterni.

Il termine è proprio di molteplici settori che hanno finalità differenti.

L'automazione è presente per esempio:

- nell'industria;
- negli uffici (*office automation*);
- nelle abitazioni (*building automation*);
- in ambito militare;
- nel settore sanitario.

### 1.2 Automatico

Il termine *automatico* viene utilizzato come aggettivo.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

▶ A prescindere dal settore al quale è riferito, il termine **automatico** identifica la proprietà di una qualsiasi macchina o apparecchiatura di:

– *raggiungere autonomamente gli obiettivi assegnati*;
– *prendere delle decisioni*;
– *agire conseguentemente alle decisioni prese.*

## 1.3 Sistema automatico

▶ Si definisce **sistema automatico** un sistema realizzato utilizzando macchine e apparecchiature che hanno caratteristiche identificabili con quelle che si esprimono con l'aggettivo *automatico*.

In relazione al significato assunto dal termine si comprende come un *sistema automatico* possa essere scomposto in *sottosistemi*, ciascuno dei quali con un compito ben definito e precisamente:

- un *sistema delle decisioni o sistema di comando*;
- un *sistema di attuazione delle decisioni* o *sistema di potenza*;
- un *sistema sensoriale* che rileva costantemente gli effetti delle decisioni e che è parte integrante del sistema di comando.

## 1.4 Automazione industriale

Di particolare interesse è il significato che viene dato al termine *automazione* nel settore industriale.

▶ Il termine **automazione industriale** deriva dal vocabolo *automazione* applicato all'industria e identifica tutte quelle tecnologie che impiegano i *sistemi di controllo* per gestire il funzionamento dei **processi produttivi** intesi come processi che rendono disponibile un *prodotto finito* sotto forma di *bene* o di *servizio* partendo dalla *materia prima*.

Le teorie e le tecniche operative proprie dell'automazione industriale si prefiggono lo scopo di sostituire l'attività umana con sistemi di produzione variamente complessi, composti prevalentemente da macchine, dispositivi meccanici e apparecchi elettrici.

Un impianto che ha queste caratteristiche è tipicamente adatto per l'esecuzione di operazioni ripetitive o complesse ma anche quando si richieda sicurezza o certezza dell'azione o semplicemente una maggiore comodità.

Con l'automazione industriale si è anche modificata la cultura che deve possedere chi progetta impianti ma in generale anche di tutti coloro che, per differenti motivi, sono a contato con essi.

Si evidenzia in particolare il fatto che prima dell'avvento dell'elettronica industriale a chi progettava o lavorava su *impianti per l'automazione industriale* veniva richiesta una cultura essenzialmente meccanica.

Le nuove esigenze hanno richiesto competenze a carattere fortemente interdisciplinare e di conseguenza conoscenze non certo superficiali di elettrotecnica, elettronica, pneumatica, oleodinamica e informatica.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 1.5 Automatismi industriali

Dal concetto di *automazione industriale* discende quello di *automatismi industriali*.

▶ Il termine **automatismi industriali** identifica quei dispositivi che consentono a macchine e apparecchiature che fanno parte di un impianto di funzionare automaticamente.

Essi sono realizzati con lo scopo di risolvere problemi di natura tecnica, economica e umana.

Da un automatismo ben progettato derivano sensibili vantaggi per i seguenti principali motivi:

- si semplifica il lavoro dell'uomo che, liberato dalla presenza costante sulla macchina, può dedicarsi ad altre attività;
- le fasi complicate, pericolose o indesiderabili delle lavorazioni vengono eseguite dalle macchine;
- vengono facilitati i cambiamenti di produzione relativamente a quantità e tipologia;
- si ha un miglioramento della qualità dei prodotti;
- si ha un accrescimento della produzione;
- si ha un aumento della sicurezza del personale;
- impianti e macchine sono più controllati e più protetti.

## 1.6 Grado di automazione

L'impiego di macchine e apparecchiature che sostituiscono l'uomo nell'ambito di un *sistema automatico* può avvenire con scopi e modalità tra loro differenti.

▶ Il **grado di automazione** di un sistema definisce il *livello d'intervento* di macchine e apparecchiature in un sistema automatico.

Si definiscono tre livelli d'intervento:

- *il livello di sorveglianza* (gli organi di controllo acquisiscono le informazioni, le analizzano e producono registrazioni e segnalazioni);
- *il livello di guida operatore* (si hanno elaborazioni più complesse delle informazioni acquisite che offrono ai gestori del processo elementi che consentono interventi di regolazione);
- *il livello di comando* (l'automatizzazione di determinate funzioni come l'acquisizione di dati, il loro trattamento e il conseguente intervento sul processo è completa).

Come si può osservare l'uomo viene gradualmente escluso dalla gestione del processo e nell'ultimo caso può intervenire manualmente solo a causa di anomalie o interruzioni.

Conseguente al *grado di automazione* è la **tipologia di automazione** che interviene su macchine e processi nel settore industriale; si definiscono in particolare:


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- *l'automazione elementare* (realizzata su macchine semplici o su parti di una macchina complessa, può interessare per esempio funzioni di sicurezza o di sorveglianza dei tempi morti o di posizionamento dei pezzi);
- *l'automazione intermedia* (realizzata su macchine più complesse o su un insieme di macchine semplici, può interessare per esempio i comandi legati al funzionamento delle macchine);
- *l'automazione integrata* (che riguarda un intero reparto o l'intera fabbrica e implica la connessione tra comandi, dati di lavorazione e dati gestionali).

### 1.7 Azionamenti industriali

▶ Con il termine **azionamenti industriali** si intende:

– quel complesso di organi che hanno il compito di eseguire le azioni richieste in campo industriale;
– le modalità di funzionamento dei medesimi.

Esempi di azioni richieste in ambito industriale sono:

- spostamenti;
- sollevamenti;
- rotazioni;
- pressioni;
- trazioni.

Si pensi per esempio alle seguenti applicazioni:

- l'azione di uno *stantuffo* comandato da un fluido surriscaldato come nelle vecchie macchine a vapore;
- la forza esercitata da un motore elettrico di un impianto di sollevamento come una gru.

## 2 Impianti per l'automazione industriale

Negli **impianti per l'automazione industriale** le diverse parti del sistema si possono distinguere in relazione alle funzioni che compiono; si hanno così:

- *impianti di comando*;
- *impianti di segnalazione*;
- *impianti di potenza*.

Termini analoghi vengono definiti per gli schemi che rappresentano tali parti; si hanno così:

- *schemi di comando*;
- *schemi di segnalazione*;
- *schemi di potenza*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 2.1 Impianti di comando

▶ L'**impianto di comando** è quella parte del sistema che ha il compito di produrre i segnali utili al funzionamento delle sue diverse parti in armonia con il loro criterio di utilizzo.

Gli *impianti di comando*, se di tipo elettrico, sono in genere composti da dispositivi funzionanti a bassa tensione, sia per ragioni di sicurezza sia di economia.

Come esempio vengono riportati in FIGURA **1** gli schemi di comando relativi ai seguenti impianti:

- per l'avviamento di motori;
- per l'azionamento di elettrovalvole.

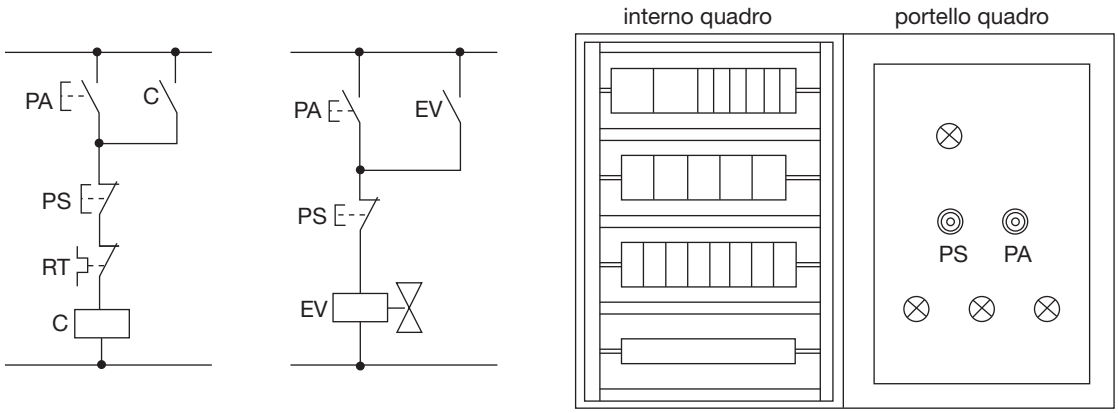



FIGURA **1**
Esempio di schema di comando.

In entrambi i casi si ha che:

- premendo il pulsante PA (*pulsante di avviamento*) le bobine del contattore C e dell'elettrovalvola EV si eccitano e l'impianto è in funzione;
- premendo il pulsante PS (*pulsante di stop*) le bobine si diseccitano e l'impianto è fermo.

## 2.2 Impianti di segnalazione

▶ L'**impianto di segnalazione** è destinato a rappresentare, per mezzo di indicatori luminosi o acustici, la situazione del sistema controllato.

Gli *impianti di segnalazione* sono in genere formati da componenti elettrici o elettronici a bassa tensione; la segnalazione può essere affidata a lampade (per pannelli di controllo di media grandezza) o a *LED* (per quadri indicatori più ridotti).

Come esempio viene riportato in FIGURA **2** lo schema di segnalazione tipico degli impianti per la movimentazione di organi meccanici.

La funzione svolta dai dispositivi di segnalazione è la seguente:

- quando è accesa la lampada L1 (verde) il motore è fermo e l'impianto è pronto a partire;
- quando è accesa la lampada L2 (gialla) il motore è in movimento (segnalando una eventuale condizione di pericolo per l'incolumità delle persone);
- quando è accesa la lampada L3 (rossa) l'impianto è fermo a causa di un guasto al motore.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

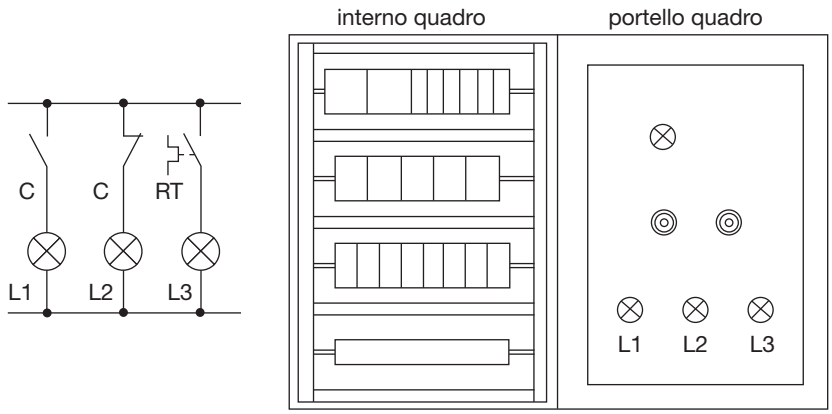



FIGURA **2**
Esempio di schema di segnalazione.

## 2.3 Impianti di potenza

▶ L'**impianto di potenza** costituisce la parte *attuativa* del sistema, quella cioè dedicata a svolgere il lavoro meccanico vero e proprio, quale lo spostamento di pezzi o la rotazione di un asse.

L'*impianto di potenza* viene realizzato con l'utilizzo di motori elettrici o di attuatori come i *pistoni pneumatici*.

Tali componenti danno luogo agli *azionamenti* desiderati che possono risultare del seguente tipo:

- *elettromeccanico*;
- *idropneumatico*.

Un esempio di schema di potenza viene riportato in FIGURA **3**.

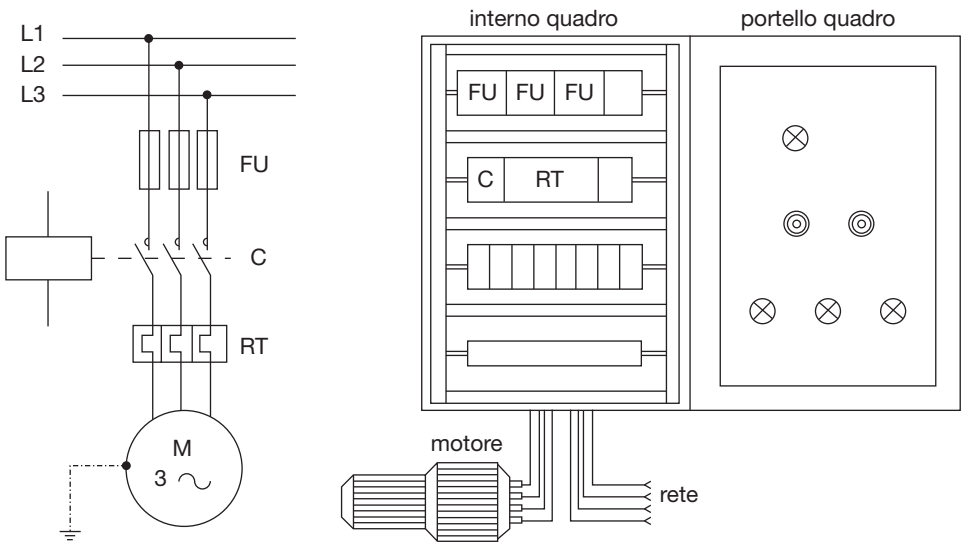



FIGURA **3**
Esempio di schema di potenza.

Lo schema è tipico dell'alimentazione dei motori asincroni che prelevano dalla rete trifase la tensione necessaria per il loro funzionamento; la linea viene alimentata in trifase a 400 V; il motore viene protetto contro il corto circuito per mezzo dei fusibili FU, dal sovraccarico utilizzando il relè termico RT; il contattore C è il dispositivo di manovra che chiude il circuito quando è attiva la sua bobina che si trova nel circuito di comando alimentato a bassa tensione.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 3 Logiche di comando

Il criterio con cui viene realizzato l'*impianto di comando* rappresenta la **logica di comando**; si hanno così logiche differenti denominate:

- *elettromeccanica*;
- *elettronica*;
- *programmabile*;
- *informatica*;
- *pneumatica*.

## 3.1 Logica elettromeccanica

▶ Con il termine **logica elettromeccanica** o **logica cablata** viene intesa una logica di comando di un impianto realizzata utilizzando dispositivi elettromeccanici quali sono per esempio pulsanti, contatti e relè.

Con essa si intende la tradizionale modalità operativa che prevede il collegamento, ossia il *cablaggio*, dei diversi elementi che compongono l'impianto, come gli interruttori, i relè e i più vari tipi di utilizzatori, per mezzo di tratti di filo conduttore.

Tale metodo è senz'altro ancora valido ed efficace per circuiti di piccole dimensioni.

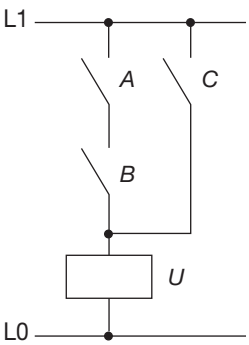
Per impianti di tipo industriale, o in tutti i casi in cui vi è un alto numero di componenti, oppure dove sia indispensabile procedere a frequenti modifiche dei circuiti, la tecnica è stata tuttavia soppiantata dall'uso di dispositivi elettronici.

La FIGURA **4** illustra un semplice esempio di comando in logica elettromeccanica, con due contatti normalmente aperti in serie fra loro e in parallelo a un terzo contatto anch'esso normalmente aperto; un utilizzatore viene abilitato o meno al suo funzionamento in relazione alla posizione assunta dai contatti.

Affinché l'utilizzatore *U* sia attivo è necessario che siano chiusi contemporaneamente i contatti *A* e *B* o che, alternativamente, sia chiuso il contatto *C*; a maggior ragione l'utilizzatore è attivo quando si verificano contemporaneamente entrambe le condizioni.

I contatti possono corrispondere fisicamente a dei semplici interruttori; l'utilizzatore può essere un dispositivo di segnalazione luminoso o acustico.

FIGURA **4**
Comando in logica elettromeccanica.




## 3.2 Logica elettronica

▶ La **logica elettronica** prevede per il circuito di comando l'adozione di *componenti elettronici* capaci di realizzare una logica di comando equivalente a quelle usate per i circuiti di comando cablati.

Questo è possibile in quanto a una determinata configurazione di contatti (azionati da interruttori o da relè) è possibile associare una combinazione equivalente di porte logiche di tipo elettronico.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Risultano le seguenti equivalenze:

- ai contatti in serie corrisponde una porta logica AND;
- ai contatti in parallelo corrisponde una porta logica OR.

In FIGURA **5** viene illustrato un esempio di comando in logica elettronica.

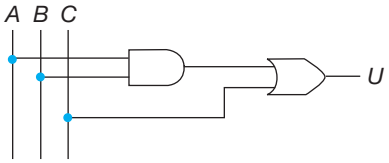



FIGURA **5**
Comando in logica elettronica.

L'attivazione o meno dell'utilizzatore *U* abilitato dall'uscita della rete logica (eventualmente tramite un'interfaccia di potenza) dipende dal livello logico dei segnali *A*, *B* e *C* che vengono inviati in ingresso alla rete stessa.

La realizzazione pratica della logica di comando può essere effettuata in due modi:

- tramite montaggio su scheda degli elementi necessari;
- con l'utilizzo di *memorie programmabili* come per esempio le *EPROM*.

Data la possibilità di cancellare il contenuto delle memorie e di riprogrammarle, il secondo metodo presenta il vantaggio di una maggiore modularità dei componenti e di una certa flessibilità nel caso di modifiche da apportare al circuito.

L'azione finale sull'utilizzatore (*impianto di potenza*) non viene in genere effettuata tramite dispositivi elettronici a causa di incompatibilità di tensioni e di potenze.

Come negli impianti cablati, tale funzione viene esercitata da un relè pilotato a sua volta da un transistor usato come interruttore.

La logica di tipo *elettronico* viene preferita a quella di tipo *elettromeccanico* quando:

- si desidera una certa velocità di risposta;
- esistono problemi di ingombro;
- vi sono inconvenienti dovuti a vibrazioni.

## 3.3 Logica programmabile

▶ La **logica programmabile** consiste nell'utilizzo di dispositivi elettronici di tipo programmabile il cui modo di operare è modificabile tramite un programma esterno.

Si realizza così mediante l'applicazione di un particolare *software* una funzione precedentemente affidata a una struttura *hardware*.

La *logica programmabile* trova la sua espressione nell'utilizzo di un dispositivo elettronico di tipo digitale finalizzato alla realizzazione di circuiti di comando, il **controllore a logica programmabile** (*PLC*).

Un esempio di modo di operare del *PLC* viene proposto in FIGURA **6**.

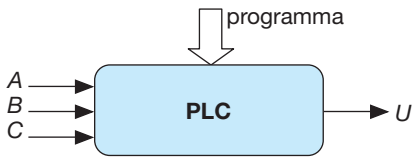



FIGURA **6**
Comando in logica programmabile.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Al controllore vengono inviati i segnali imposti dagli ingressi *A*, *B* e *C*; il programma elabora i dati in relazione a quello che è predisposto dal programmatore e produce un segnale d'uscita *U* che attiva la periferica a esso collegata eventualmente tramite un'interfaccia di potenza.

I segnali d'ingresso possono essere digitali o analogici.

Esempi di segnali digitali possono essere quelli derivanti dall'azionamento di pulsanti (è il caso dell'avviamento di un motore) o interruttori; il segnale in uscita, se digitale, può azionare la bobina di un contattore preposto all'azionamento di un motore.

L'omogeneità dei segnali impiegati nelle reti elettriche con quelli necessari al funzionamento del *PLC* semplifica notevolmente i problemi di interfacciamento.

Per gli ingressi, dotati generalmente di una propria alimentazione, è sufficiente collegare gli elementi (pulsanti, contatti, sensori) ai morsetti assegnati, mentre per le uscite occorre verificare che la corrente e la tensione dei relativi utilizzatori siano idonee in relazione a quelle previste per il *PLC* in questione.

Nei confronti della *logica elettromeccanica* si evidenziano i seguenti vantaggi derivanti dall'utilizzo della logica programmabile:

- *flessibilità d'impiego* (che si rende necessaria quando è previsto il bisogno di modificare il funzionamento dell'impianto);
- *affidabilità*;
- *ingombro minimo* (le schede che formano la *struttura hardware* del controllore sono formate da elementi compatti e di piccole dimensioni);
- *costo ridotto di acquisto e di gestione*;
- *interfacciabilità con altri dispositivi*;
- *immunità ai disturbi elettrici*;
- *robustezza meccanica*.

## 3.4 Logica informatica

▶ Con il termine **logica informatica** si vuole rendere conto di quelle applicazioni che prevedono come dispositivo di comando un *elaboratore elettronico* capace di dialogare con l'esterno per mezzo di appositi elementi di interfacciamento.

La realizzazione della struttura logica che sostituisce le reti elettriche di comando è affidata ad appositi *software* che adempiono così a una funzione simile a quella esercitata dai programmi che gestiscono il controllore programmabile.

Tale scelta non è particolarmente diffusa per la minore affidabilità e robustezza degli elaboratori nei riguardi dei controllori programmabili.

L'uso di una struttura informatica è tuttavia indicata per situazioni complesse in cui l'elaboratore centralizza le informazioni ricevute da diversi punti dell'impianto o della rete telematica di collegamento e invia gli appositi segnali agli organi di comando, in genere tramite


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

gli stessi *PLC* che diventano in questo caso elementi di interfaccia tra computer e utilizzatori.

L'azionamento finale delle macchine e degli utilizzatori non è quindi in questo caso affidato agli elaboratori ma rimane compito dei controllori programmabili.

Un esempio di modo di operare in logica informatica viene proposto in FIGURA **7**.

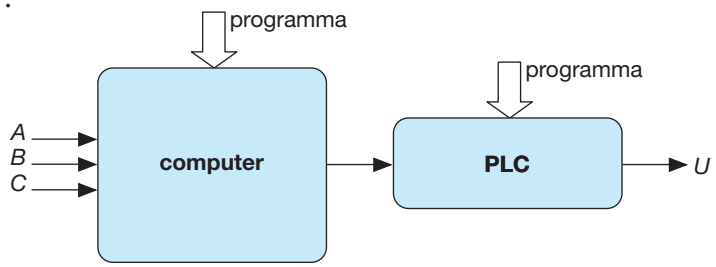



FIGURA **7**
Comando in logica informatica.

In questo caso è il computer a elaborare i dati (che riceve attraverso gli ingressi *A*, *B* e *C*); il PLC agisce sull'utilizzatore collegato all'uscita *U* in base ai risultati prodotti dal computer.

## 3.5 Logica pneumatica

▶ Il termine **logica pneumatica** viene riservato a quelle logiche di comando destinate a pilotare utilizzatori di tipo *pneumatico* ossia funzionanti ad aria compressa come i *pistoni* e i *cilindri pneumatici*.

Questa prevede l'uso di particolari dispositivi quali sono le **valvole di tipo logico** che consentono di ottenere le funzioni tipiche dell'algebra booleana; esse sono rispettivamente denominate:

- *valvola selettrice*, che esegue l'operatore logico OR;
- *valvola a due pressioni*, che esegue l'operatore logico AND;
- *valvola di stop* che esegue l'operatore logico NOT.

L'uso combinato di questi elementi rende possibile la realizzazione di una logica di comando formata completamente da elementi pneumatici.

Un esempio di logica di comando viene riportato in FIGURA **8**.

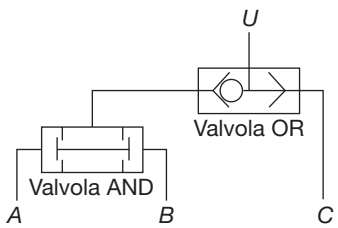



FIGURA **8**
Comando in logica pneumatica.

Con *A*, *B* e *C* vengono indicati gli ingressi dei getti di aria, con *U* l'utilizzatore abilitato dall'uscita della valvola selettrice.

La scelta della logica pneumatica è particolarmente vantaggiosa quando, per ragioni di sicurezza legate per esempio ad ambienti con pericolo di esplosione, sia necessario evitare l'uso di dispositivi elettrici suscettibili di provocare pericolose scintille.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 4 Azionamenti elettromeccanici

Gli **azionamenti elettromeccanici** utilizzati negli *impianti per l'automazione industriale* sono essenzialmente di due tipi:

- *azionamenti rotativi*;
- *azionamenti lineari*.

## 4.1 Azionamenti rotativi

▶ Gli **azionamenti rotativi** vengono utilizzati quando sono richiesti spostamenti angolari.

Per realizzarli vengono usati essenzialmente motori di tipo elettrico:

- *tradizionali*;
- *a commutazione elettronica*.

### Motori tradizionali

I *motori tradizionali* si utilizzano quando l'azionamento richiede un discreto utilizzo di potenza; si nominano in particolare:

- *motori asincroni trifase*;
- *motori a corrente continua*.

Essi hanno il pregio di un'estrema versatilità di funzionamento e di una relativa facilità di controllo.

### Motori a commutazione elettronica

I *motori a commutazione elettronica* si utilizzano invece nei casi in cui si rivela decisivo impostare con precisione la velocità e la posizione raggiunta; si nominano in particolare:

- *motori a riluttanza variabile*;
- *motori brushless*;
- *motori passo-passo*.

Il circuito di comando permette di ottenere pilotaggi molto precisi, particolarmente utili per l'azionamento di alcuni tipi di macchine utensili.

## 4.2 Azionamenti lineari

▶ Gli **azionamenti lineari** vengono utilizzati quando sono richiesti spostamenti lineari.

Essi consistono essenzialmente in bracci meccanici azionati con modalità differenti.

Per realizzarli vengono impiegate due tipologie di dispositivi che sono:

- i *solenoidi*;
- i *motori elettrici*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Solenoidi

I *solenoidi* vengono utilizzati per ottenere spostamenti lineari poiché il funzionamento di questo dispositivo si basa sullo sfruttamento delle azioni dinamiche esercitate dal campo magnetico creato da un avvolgimento percorso da corrente.

Una parte meccanica mobile, che può consistere nello stesso nucleo cilindrico del magnete, viene spostata linearmente grazie alle azioni di repulsione magnetica.

Sebbene l'automatismo sia di facile realizzazione e impiego, il suo utilizzo è limitato dalla scarsa potenza in gioco e dalla difficoltà di realizzare un efficace controllo sullo spostamento effettuato.

### Motori elettrici

I *motori elettrici* vengono utilizzati per ottenere spostamenti lineari facendo uso di appositi *meccanismi di conversione* del moto rotatorio.

Il *motore elettrico* può appartenere, a seconda delle esigenze, a una delle seguenti categorie:

- *a collettore* a corrente continua che permette una grande elasticità con carichi variabili;
- *monofase* o *trifase a induzione* quando è necessaria una coppia elevata a regimi stabili;
- *a magneti permanenti* in corrente continua con regolazione a coppia costante;
- *passo-passo* quando si richiede un'estrema precisione di posizionamento.

La conversione del moto rotatorio viene attuata utilizzando due dispositivi opportunamente collegati al motore:

- il *variatore di velocità*;
- il *gruppo vite-madrevite*.

Il **variatore di velocità**, utilizzato per fornire una continua gamma di variazioni, può essere:

- a ingranaggi, a rapporti fissi o variabili;
- elettronico.

Il **gruppo vite-madrevite** può essere:

- a *filetto trapezio* per carichi elevati e basse velocità;
- a *ricircolazione di sfere* per posizionamenti precisi ad alte velocità con bassi consumi;
- dotato di *rulli*.

## 4.3 Attuatori elettromeccanici

▶ Il complesso formato da un motore, da un variatore di velocità e da un gruppo vite-madrevite costituisce un **attuatore elettromeccanico**.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Lo schema tipico di un attuatore elettromeccanico viene riportato in FIGURA **9**.

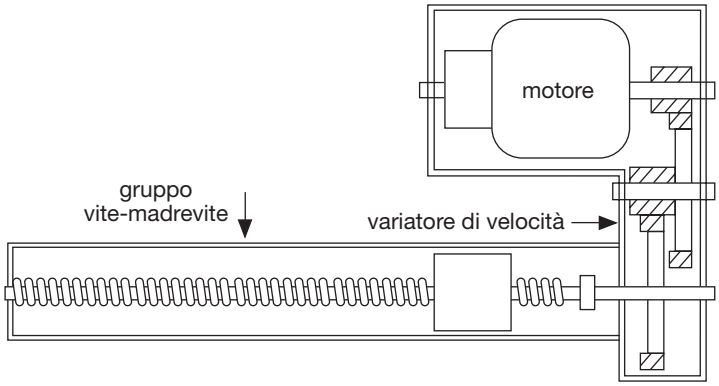



FIGURA **9**
Schema tipico di un attuatore elettromeccanico.

Con riferimento alla tipologia costruttiva si hanno:

- *attuatori elettromeccanici industriali*;
- *attuatori elettromeccanici universali*.

### Attuatori elettromeccanici industriali

Gli *attuatori elettromeccanici industriali* vengono normalmente impiegati per potenze medio-alte (da 10 kN fino a 100 kN di spinta) e a basse velocità; corredati di dispositivi di regolazione e di controllo, utilizzano motori a corrente alternata a induzione.

Le prestazioni sono elevate e i costi conseguenti.

### Attuatori elettromeccanici universali

Gli *attuatori elettromeccanici universali* vengono adottati per potenze medio-basse (fino a 5000 N di spinta); robusti e compatti, utilizzano motori a collettore.

La costruzione, anche se semplificata al massimo, garantisce una discreta affidabilità; il prezzo contenuto li rende direttamente competitivi con gli *attuatori pneumatici*.

## 5 Azionamenti idropneumatici

▶ Col termine **azionamenti idropneumatici** si vuole intendere l'insieme degli azionamenti esercitati da un *fluido* che può essere, a seconda dei casi, l'aria compressa o un particolare liquido, in genere olio.

Si distinguono di conseguenza:

- *azionamenti pneumatici*;
- *azionamenti oleoidraulici*.

Gli impianti di cui gli azionamenti fanno parte sono rispettivamente denominati:

- *impianti pneumatici*;
- *impianti oleoidraulici*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Le discipline che studiano azionamenti e impianti vengono rispettivamente denominate:

- *pneumatica*;
- *oleoidraulica*.

Per gli scopi che si prefiggono le due discipline sono per molti aspetti simili.

## 5.1 Azionamenti pneumatici

▶ Gli **azionamenti pneumatici** costituiscono un'applicazione della meccanica dei fluidi in cui viene impiegata *aria compressa* come elemento intermedio nella trasmissione di energia meccanica.

Un **impianto pneumatico** è costituito essenzialmente dai seguenti elementi:

- *centrale di compressione*;
- *rete di distribuzione*;
- *utilizzatori*.

Le trasformazioni energetiche che avvengono nell'impianto sono evidenziate in FIGURA **10**.

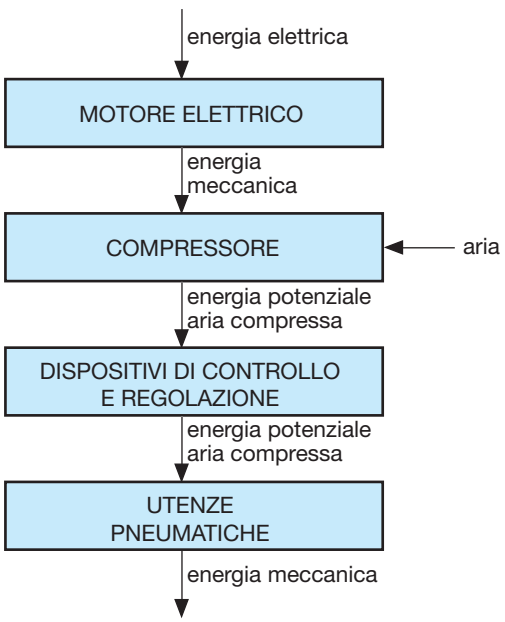



FIGURA **10** Trasformazioni energetiche in un impianto pneumatico.

L'aria compressa viene prodotta nelle **centrali di compressione** mediante l'uso di un *compressore*.

Il compressore è una *macchina operatrice* che, azionata da un motore elettrico, innalza la pressione dell'aria prelevata dall'ambiente circostante ai valori richiesti dalle utenze.

I compressori possono essere:

- *volumetrici*, quando l'aria viene compressa riducendone il volume;
- *dinamici* (*turbocompressori*), quando l'energia cinetica dell'aria posta prima in movimento viene ritrasformata poi in pressione.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Altri elementi essenziali della centrale sono:

- un gruppo di filtraggio che elimina le impurità presenti nell'aria prelevata dall'ambiente esterno;
- un *refrigeratore* che raffredda l'aria in uscita dal compressore;
- un *serbatoio* che assicura alla rete una portata d'aria e una pressione quasi costanti;
- un *essiccatore* che riduce l'umidità contenuta nell'aria per evitare la formazione di condensa nella rete di distribuzione.

L'aria compressa che viene prodotta nella centrale alimenta gli utilizzatori e successivamente scaricata nell'ambiente senza essere recuperata; si ha quindi un *ciclo aperto*.

Un impianto pneumatico e le apparecchiature a esso connesse funzionano in modo corretto solo se l'aria compressa prodotta soddisfa a determinati requisiti di qualità relativi a:

- portata;
- pressione;
- contenuto d'acqua;
- contenuto d'olio;
- contenuto d'impurità.

La **rete di distribuzione** trasferisce il fluido (*aria compressa*) dalla sorgente di alimentazione alle utenze con funzione di controllo e regolazione; essa è costituita da un insieme di *tubazioni* (con funzione di trasporto) e di valvole (con funzione di controllo).

Esistono diverse tipologie di valvole che hanno nell'impianto compiti differenti; si possono classificare come:

- *valvole distributrici*;
- *valvole di controllo della portata*;
- *valvole di controllo della pressione*;
- *valvole speciali*.

Le valvole distributrici servono per aprire, indirizzare o chiudere il flusso dell'aria compressa.

Gli **utilizzatori** sono i cilindri e i motori che trasformano in energia meccanica l'energia potenziale posseduta dall'aria compressa.

L'uso dell'energia che deriva dall'impiego di impianti pneumatici comporta:

- un notevole investimento iniziale;
- una certa complicazione nella posa della rete di distribuzione e di controllo;
- la necessità di un'alimentazione dedicata allo scopo, effettuata da un compressore.

Occorre poi tenere conto di due ulteriori fattori che sono:

- la rumorosità del motore e degli scarichi;
- la necessità di manutenzione.

Un impianto di tipo pneumatico si rivela economico solo per reti molto estese e con un alto numero di utenze.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 5.2 Azionamenti oleoidraulici

▶ Gli **azionamenti oleoidraulici** costituiscono un'applicazione della meccanica dei fluidi in cui viene impiegato l'*olio* come elemento intermedio nella trasmissione di energia meccanica.

Un **impianto oleoidraulico** è costituito essenzialmente dai seguenti elementi:

- *motore primo*;
- *pompa oleodinamica*;
- *dispositivi di controllo e regolazione*;
- *utenze oleoidrauliche*.

Le trasformazioni energetiche che avvengono nell'impianto sono evidenziate in FIGURA **10**.

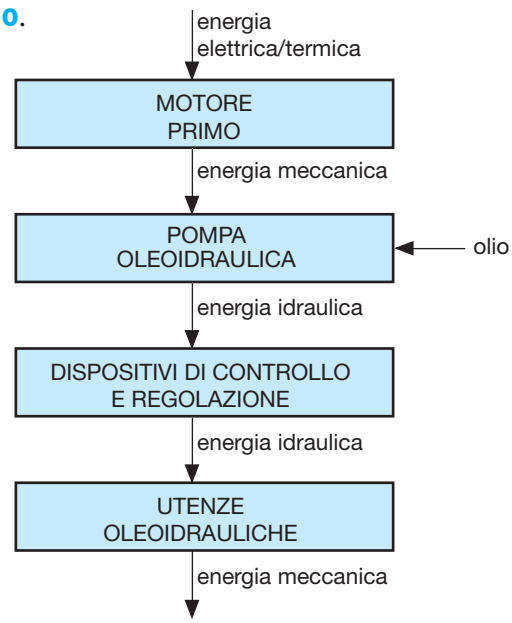



FIGURA **11** Trasformazioni energetiche in un impianto oleoidraulico.

Nella impianti oleoidraulici il fluido utilizzato per la trasmissione dell'energia meccanica è l'*olio minerale* derivato dalla *raffinazione* del *petrolio greggio*; le caratteristiche dell'olio vengono migliorate utilizzando degli appositi *additivi*.

Motivi dell'impiego diffuso dell'olio minerale sono i seguenti:

- il suo *potere lubrificante e anticorrosivo*;
- l'elevata *temperatura di ebollizione*.

Importante caratteristica dell'olio è la *viscosità* che misura la resistenza opposta dalle particelle di fluido al loro movimento reciproco.

In un impianto oleoidraulico il liquido, oltre a trasmettere l'energia erogata dalla pompa all'utenza sotto forma di forza e di velocità, deve anche:

- lubrificare le parti in movimento dei componenti;
- proteggerli contro la corrosione;
- trasportare fuori dal sistema il calore e le particelle contaminanti derivanti dall'usura.

Le perdite di fluido, che nel caso dell'aria sono evidentemente innocue e rinnovabili, nel caso di un impianto oleoidraulico rappresentano un ulteriore svantaggio sia pratico sia economico.

Si noti inoltre che, mentre lo scarico dell'aria può avvenire senza pro-



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

blemi nell'ambiente circostante, nel caso di un impianto oleoidraulico è indispensabile la presenza di un tubo di ritorno che riporti il fluido nel suo apposito serbatoio.

In un impianto oleoidraulico l'energia meccanica fornita da un motore primo (a combustione interna o elettrico) viene convertita in energia idraulica per mezzo di una *pompa* che preleva l'olio da un serbatoio e lo comprime fino alla pressione imposta dal circuito di utilizzazione.

La pompa assume in pratica la funzione che il compressore ha negli impianti pneumatici.

Le pompe impiegate in questi impianti sono *pompe volumetriche* e in particolare:

- *pompe a ingranaggi*;
- *pompe a palette*;
- *pompe a pistoni*.

Le *pompe volumetriche* utilizzate lavorano a elevate pressioni e con piccoli volumi e perciò sono di piccole dimensioni.

Sono adatte per l'impiego di fluidi con viscosità elevata che non consentirebbero l'utilizzo di *pompe centrifughe*.

L'*energia idraulica*, opportunamente veicolata dalle tubazioni del circuito, viene di seguito:

- controllata mediante *valvole di comando e di regolazione* che consentono la messa a punto della portata e della pressione dell'olio;
- riconvertita in energia meccanica disponibile per l'utilizzazione tramite attuatori (*cilindri* oppure *motori idraulici*).

I componenti utilizzati per il comando e la regolazione hanno le stesse funzioni di quelle utilizzate in pneumatica.

Si evidenzia il fatto che lo sviluppo dell'elettronica ha consentito il passaggio da *movimentazioni on-off* a *movimentazioni proporzionali al segnale di comando*.

Particolarmente importanti sono le *valvole proporzionali* che consentono di comandare sia la direzione del moto sia la velocità in quanto la portata in uscita risulta proporzionale al segnale elettrico in ingresso.

In un impianto oleoidraulico si possono sviluppare pressioni di lavoro fino a 400 bar, valori molto maggiori che in un impianto pneumatico dove arrivano a 10 bar.

La realizzazione di impianti oleoidraulici è giustificata quando:

- si evidenzia la necessità di ottenere forze di spinta elevate;
- è necessaria una regolazione continua di posizione e velocità.

## 6 Componenti per azionamenti pneumatici

Come componenti caratteristici di un *azionamento pneumatico* si distinguono:

- *attuatori*;
- *valvole*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 6.1 Attuatori

Quando è richiesto il suo utilizzo l'aria compressa viene trasportata, attraverso un sistema di tubazioni, a opportuni *attuatori*.

▶ Gli **attuatori pneumatici** sono dispositivi che trasformano l'energia potenziale di tipo pneumatico accumulata dall'aria compressa in energia meccanica.

Questi possono essere classificati come segue:

- *cilindri*, se dotati di moto lineare;
- *motori*, se dotati di moto rotatorio.

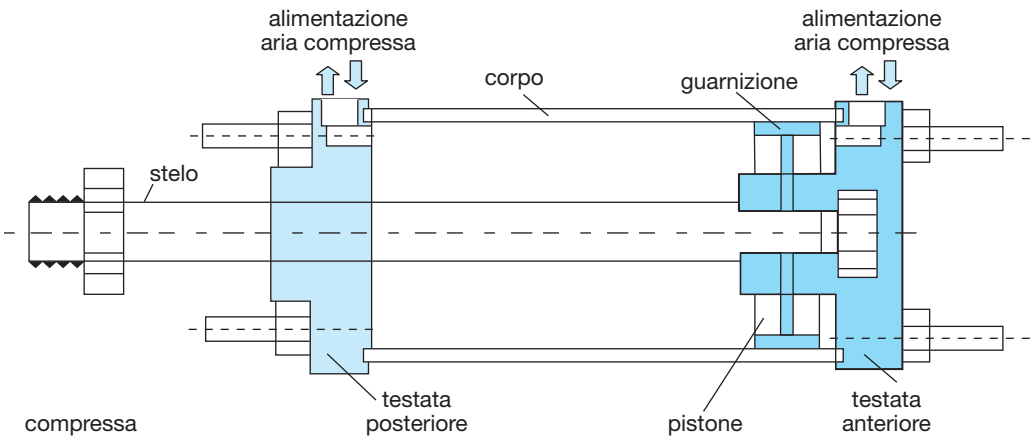
### Cilindri

I *cilindri* sono *attuatori pneumatici lineari* utilizzati nell'industria per ottenere movimenti lineari a basso costo.

Le parti principali di un cilindro, come illustrato in FIGURA **12**, vengono denominate:

- *corpo*, costituito da un tubo metallico lavorato internamente;
- *pistone*, costituito da un disco metallico dotato di guarnizioni;
- *stelo*, costituito da un'asta metallica collegata al pistone;
- *guarnizione*, che ha il compito di garantire la tenuta dell'aria;
- *testate*, che chiudono anteriormente o posteriormente il cilindro;
- *ingresso/uscita aria*, collegate alle relative tubazioni esterne.

FIGURA **12**
Elementi costitutivi di un cilindro.




Il cilindro si può trovare:

- in *condizione di riposo* quando non subisce la spinta dell'aria compressa;
- in *condizione di lavoro* quando subisce la spinta dell'aria compressa.

Nel primo caso lo stelo al quale il pistone trasmette la forza si trova all'interno del corpo del cilindro (*posizione tutto dentro*), nel secondo caso lo stelo esce dal cilindro fino a terminare la sua *corsa* (*posizione tutto fuori o posizione di fine corsa*).

▶ Con il termine **corsa** si intende la misura che corrisponde al massimo spostamento lineare dello stelo del pistone.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **13** viene riportata la struttura di un cilindro mettendo in evidenza le due condizioni di riposo e di lavoro e il concetto di corsa.

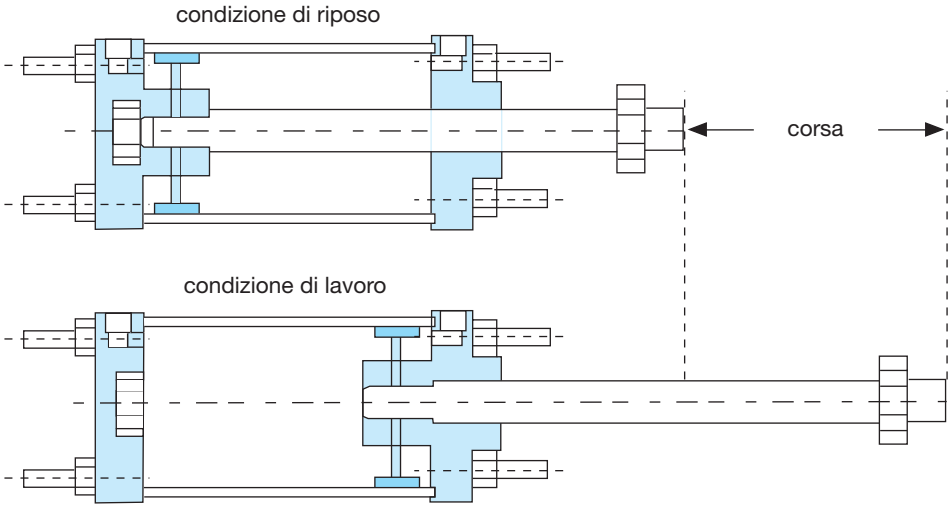



FIGURA **13**
Significato di corsa del pistone.

Di conseguenza con corsa di *andata* (*corsa positiva*) si intende il passaggio del pistone dalla condizione di riposo a quella di lavoro, con *corsa di ritorno* (*corsa negativa*) il passaggio opposto.

I principali tipi di *cilindri pneumatici* appartengono alle seguenti categorie:

- *cilindri a semplice effetto*;
- *cilindri a doppio effetto*.

▶ Il **cilindro a semplice effetto** viene così denominato perché la fase attiva del movimento del pistone viene svolta solo in un senso, mentre la corsa di ritorno avviene mediante una molla.

Tale soluzione permette il consumo dell'aria solo nella fase di andata garantendo una posizione prestabilita del pistone in caso di assenza di alimentazione.

Un cilindro di questo tipo, illustrato in FIGURA **14** insieme al suo simbolo unificato, si rivela utile nelle applicazioni in cui sia richiesta un'azione solo in un senso come in alcune applicazioni tipiche quali per esempio la compressione, la timbratura o lo spostamento di pezzi.

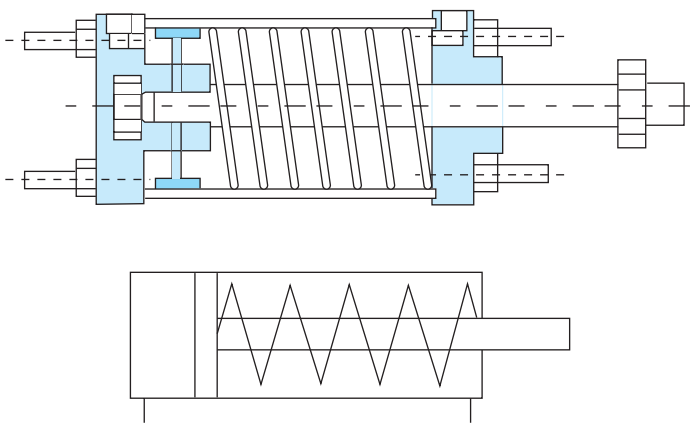


FIGURA **14**
Struttura e simbolo di un cilindro a semplice effetto.

In FIGURA **15** viene riportata la struttura di un cilindro a semplice effetto a riposo e in condizioni di lavoro.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

FIGURA **15**
Cilindro a semplice effetto a riposo e in condizioni di lavoro.

▶ Il **cilindro a doppio effetto** viene così denominato perché la forza esercitata dall'aria compressa sul pistone agisce sia nella corsa di andata sia in quella di ritorno.

Lo smorzamento, che si rende necessario quando sono in gioco carichi elevati o grandi velocità, viene realizzato dall'azione elastica effettuata dalla sacca d'aria che si forma alla fine della corsa.

La struttura di un cilindro di questo tipo, insieme al suo simbolo unificato, viene illustrata in FIGURA **16**.

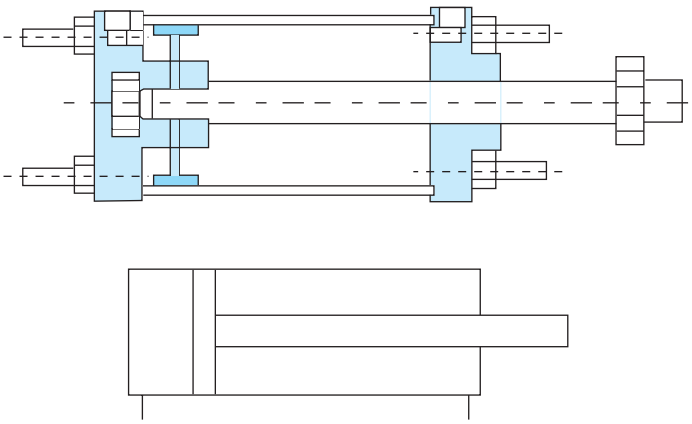


FIGURA **16**
Struttura e simbolo di un cilindro a doppio effetto.

In FIGURA **17** viene riportata la struttura di un cilindro a doppio effetto a riposo e in condizioni di lavoro.

FIGURA **17**
Cilindro a doppio effetto a riposo e in condizioni di lavoro.

## Motori pneumatici

I *motori pneumatici* devono il loro moto all'azione di un getto di aria compressa.

Essi possono essere di due tipologie:

- *rotativi*;
- *dinamici*.

I *motori pneumatici rotativi*, in relazione alla loro tecnologia costruttiva, possono essere:

- a *stantuffi* (radiali o ad anello);
- a *palette*;
- a *ingranaggi*.

I *motori pneumatici dinamici* sono essenzialmente le *turbine*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **18** viene riportata la struttura dei principali motori pneumatici.

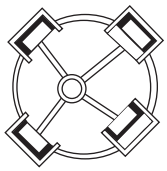
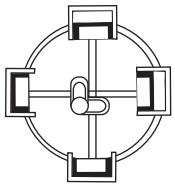
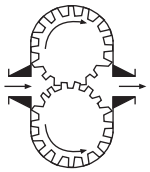
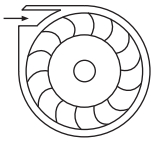
| Motori volumetrici | | | | Motori dinamici |
|---|---|---|---|---|
| a stantuffi | | a palette | a ingranaggi | turbine |
| radiali | assiali | | | |
|  |  | |  |  |

FIGURA **18**
Struttura dei motori pneumatici.

I **motori a stantuffi** sono caratterizzati dalla presenza di *stantuffi* collegati tra loro da un cinematismo che trasforma il *movimento alternativo* degli stantuffi nel *movimento rotatorio* desiderato.

Gli stantuffi possono avere disposizione radiale o assiale; nel primo caso si ottiene il movimento rotatorio collegando gli stantuffi a un *albero a gomiti* tramite bielle; nel secondo caso invece la trasformazione avviene utilizzando un *piatto inclinato*.

In entrambi i casi la distribuzione dell'aria compressa viene affidata a una valvola a cassetto rotante coassiale con l'albero motore.

I **motori a palette** sono caratterizzati dalla presenza di *palette* sulle quali agisce l'aria compressa generando una forza che mette in rotazione il motore.

Poiché motore e corpo non sono tra loro coassiali tra le palette si formano delle camere entro le quali l'aria, espandendosi, genera una coppia motrice.

I **motori a ingranaggi** sono caratterizzati dalla presenza di due ruote di cui una collegata all'albero motore mentre l'altra gira per trascinamento; l'aria compressa viene inviata su entrambi i fianchi nella zona di contatto tra i denti.

## 6.2 Valvole

▶ Le **valvole pneumatiche** sono dispositivi che esercitano un'azione di controllo sull'impianto comandato ad aria compressa.

Vengono classificate in relazione a:

- funzione svolta;
- posizione assunta;
- tipo di azionamento.

In relazione alla **funzione svolta** si hanno:

- *valvole di distribuzione*;
- *valvole di intercettazione*;
- *valvole di regolazione*;
- *valvole di tipo logico*.

In relazione alla **posizione assunta** si hanno:

- *valvole monostabili*;
- *valvole bistabili*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In relazione al **tipo di azionamento** si hanno:

- *valvole ad azionamento manuale*;
- *valvole ad azionamento meccanico*;
- *valvole ad azionamento pneumatico*;
- *valvole ad azionamento elettrico (elettrovalvole)*.

## Valvole di distribuzione

▶ Le **valvole di distribuzione** adempiono alla funzione essenziale di modificare la direzione del flusso d'aria che alimenta gli utilizzatori.

Esse sono costituite da un insieme di celle che possono comunicare tra loro o con l'esterno.

Il tipo di valvola è definito:

- dal *numero di vie*;
- dal *numero di posizioni*.

Le **vie** sono i fori d'apertura (*bocche*) dei canali che l'aria attraversa all'interno della valvola per andare dalla distribuzione all'attuatore o dall'attuatore allo scarico.

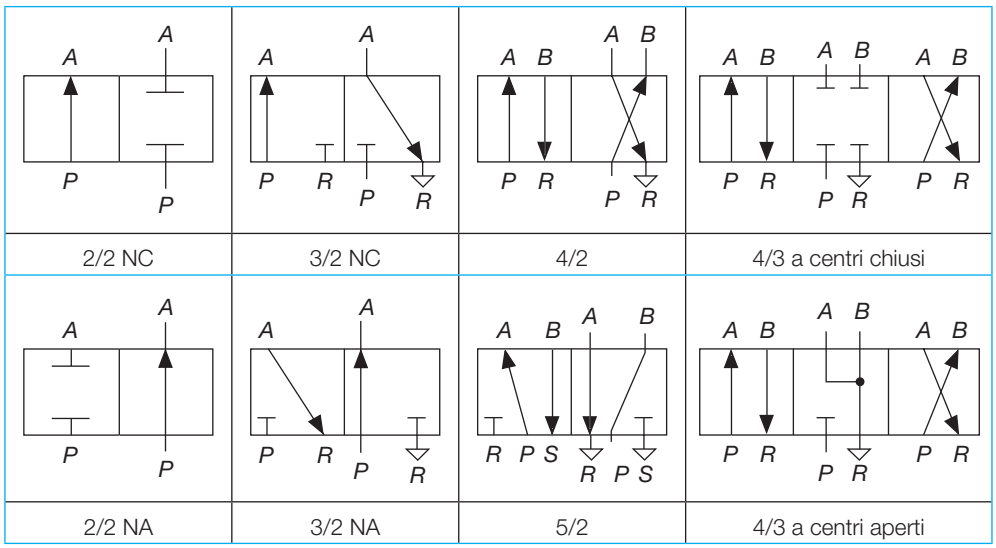
Ciascuna **posizione** attua un collegamento diverso tra le vie della valvola.

Per esempio una valvola distributrice *2/2* è caratterizzata da *due vie* e *due posizioni*.

Il primo numero indica le vie di comunicazione con l'esterno, il secondo le posizioni che può assumere l'organo mobile.

In FIGURA **19** sono rappresentati i simboli unificati relativi ad alcune soluzioni costruttive e la loro denominazione.

FIGURA **19**
Simboli unificati delle valvole di distribuzione.




Le valvole 2/2, 3/2, 4/2 e 5/2 sono quelle più comunemente utilizzate, le valvole 4/3 sono invece destinate a impieghi speciali.

Per una corretta interpretazione dei simboli si evidenzia che:

- i quadrati rappresentano le celle di cui è costituita la valvola;
- all'interno dei quadrati vengono rappresentati i collegamenti tra le diverse vie;


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- le frecce indicano la direzione del flusso d'aria;
- un trattino disposto orizzontalmente rappresenta l'interruzione di un condotto;
- il triangolino indica lo scarico;
- nelle valvole a due posizioni il quadrato di destra rappresenta la posizione di riposo;
- nelle valvole a tre posizioni la posizione di riposo è individuata dal quadrato posto al centro.

L'identificazione delle vie di comunicazione con l'esterno può avvenire con lettere o con numeri.

Se vengono utilizzate le lettere si hanno le seguenti corrispondenze:

- *A* e *B* indicano gli *utilizzi*;
- *R* ed *S* indicano gli *scarichi*;
- *P* indica l'*ingresso* o la *sorgente* dell'aria compressa.

Se vengono utilizzati i numeri si hanno le seguenti corrispondenze:

- 2 e 4 indicano gli *utilizzi*;
- 3 e 5 indicano gli *scarichi*;
- 1 indica l'*ingresso* o la *sorgente* dell'aria compressa.

Nella figura compaiono anche dei termini che identificano la tipologia di valvola in relazione alla posizione assunta a riposo; risulta in particolare che:

- il termine **valvola NA** identifica *valvole normalmente aperte* (in posizione di riposo, lasciando il condotto di alimentazione aperto, è consentito il passaggio dell'aria dalla sorgente all'utilizzatore);
- il termine **valvola NC** identifica *valvole normalmente chiuse* (in posizione di riposo la valvola collega l'alimentazione al condotto chiuso);
- i termini **valvola a centri aperti** e **valvola a centri chiusi** definiscono la tipologia della posizione di riposo delle valvole a tre posizioni.

**ESEMPIO 1**

Si rappresenti l'azionamento di un cilindro a semplice effetto tramite una valvola 3/2.

## Soluzione

L'azionamento presenta le seguenti caratteristiche:

– in condizioni di riposo l'alimentazione è chiusa e l'utilizzo in scarico;

– in condizioni di lavoro l'alimentazione comunica con l'utilizzo e lo scarico è chiuso.

In FIGURA **20** viene rappresentato lo schema dell'azionamento.

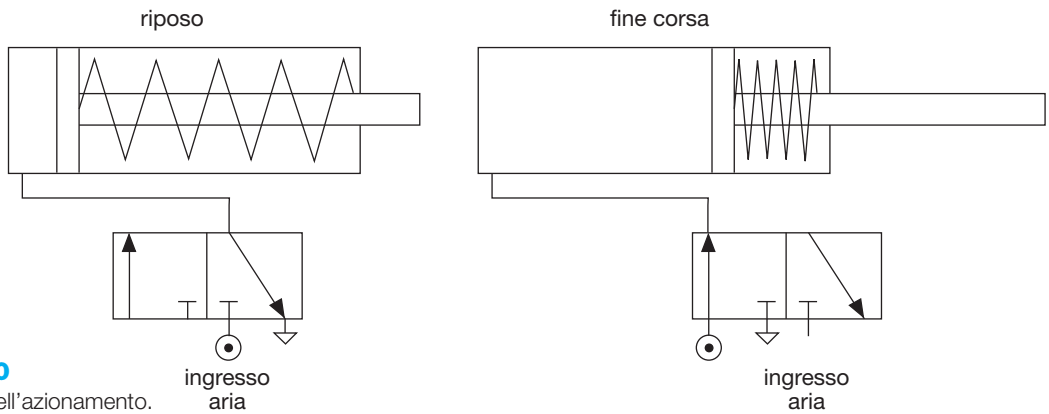



FIGURA **20**
Schema dell'azionamento.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 2

Si rappresenti l'azionamento di un cilindro a doppio effetto tramite una valvola 4/2.

## Soluzione

L'azionamento presenta le seguenti caratteristiche:

- l'alimentazione e lo scarico devono essere collegati alternativamente ai due utilizzi corrispondenti;
- per far uscire il pistone l'alimentazione deve essere collegata all'utilizzo lato pistone, lo scarico all'utilizzo lato stelo;
- per far rientrare il pistone l'alimentazione deve essere collegata all'utilizzo lato stelo, lo scarico all'utilizzo lato pistone.

In FIGURA **21** viene rappresentato lo schema dell'azionamento.

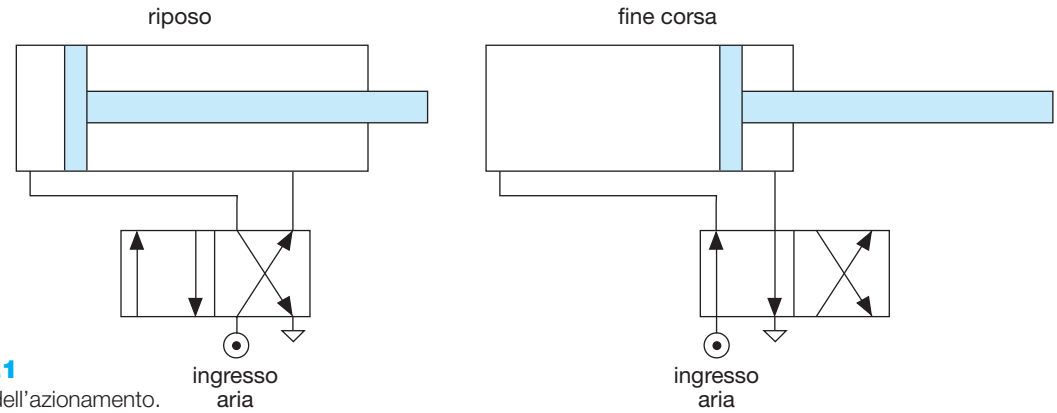



FIGURA **21**
Schema dell'azionamento.

ESEMPIO 3

Si rappresenti l'azionamento di un cilindro a doppio effetto tramite una valvola 5/2.

## Soluzione

L'azionamento presenta le seguenti caratteristiche:

- l'alimentazione deve essere collegata alternativamente ai due utilizzi corrispondenti;
- lo scarico deve essere collegato al proprio utilizzo dedicato mentre l'altro è chiuso;
- per far uscire il pistone l'alimentazione deve essere collegata all'utilizzo lato pistone, lo scarico all'utilizzo lato stelo;
- per far rientrare il pistone l'alimentazione deve essere collegata all'utilizzo lato stelo, lo scarico all'utilizzo lato pistone.

In FIGURA **22** viene rappresentato lo schema dell'azionamento.

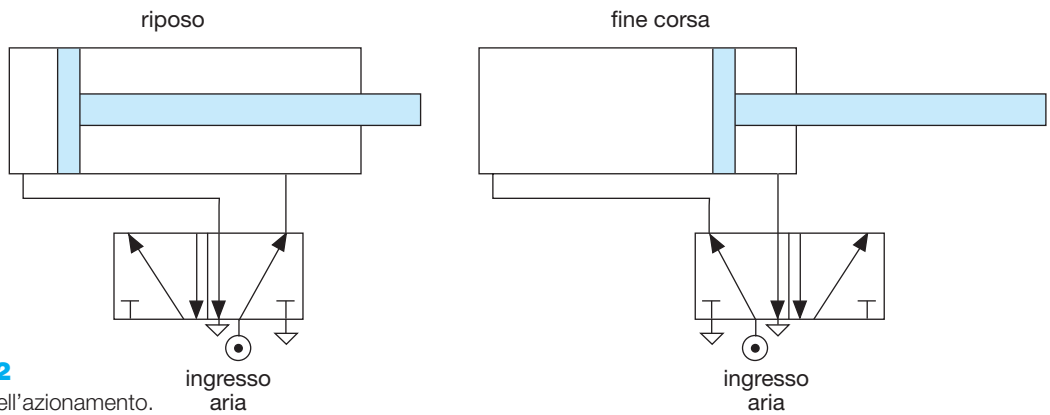



FIGURA **22**
Schema dell'azionamento.

## Valvole di intercettazione

▶ Le **valvole di intercettazione** hanno lo scopo di *bloccare* o di *modificare* il percorso dell'aria compressa.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Si osservino in proposito le valvole riprodotte in FIGURA **23** che consentono rispettivamente di:

- interrompere il flusso d'aria (*valvola di blocco*);
- permetterne il passaggio in una sola direzione (*valvola unidirezionale*).

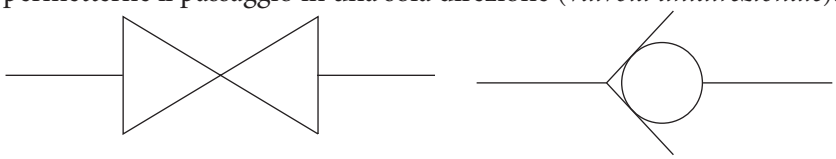



FIGURA **23**
Valvole di intercettazione.

## Valvole di regolazione

▶ Le **valvole di regolazione** hanno la funzione di modificare le caratteristiche fisiche dell'aria compressa.

Appartiene a questo tipo la *valvola regolatrice di flusso* che può essere *unidirezionale* o bidirezionale.

La *valvola unidirezionale*, largamente impiegata nei circuiti di automazione, permette la regolazione della portata del fluido solo in una direzione; essa è costituita da una valvola bidirezionale avente in parallelo (*by-pass*) una valvola di non ritorno.

La *valvola bidirezionale* permette la regolazione della portata del fluido in entrambe le direzioni.

In FIGURA **24** vengono riprodotti i simboli delle valvole di regolazione e il montaggio di due di esse su un cilindro.

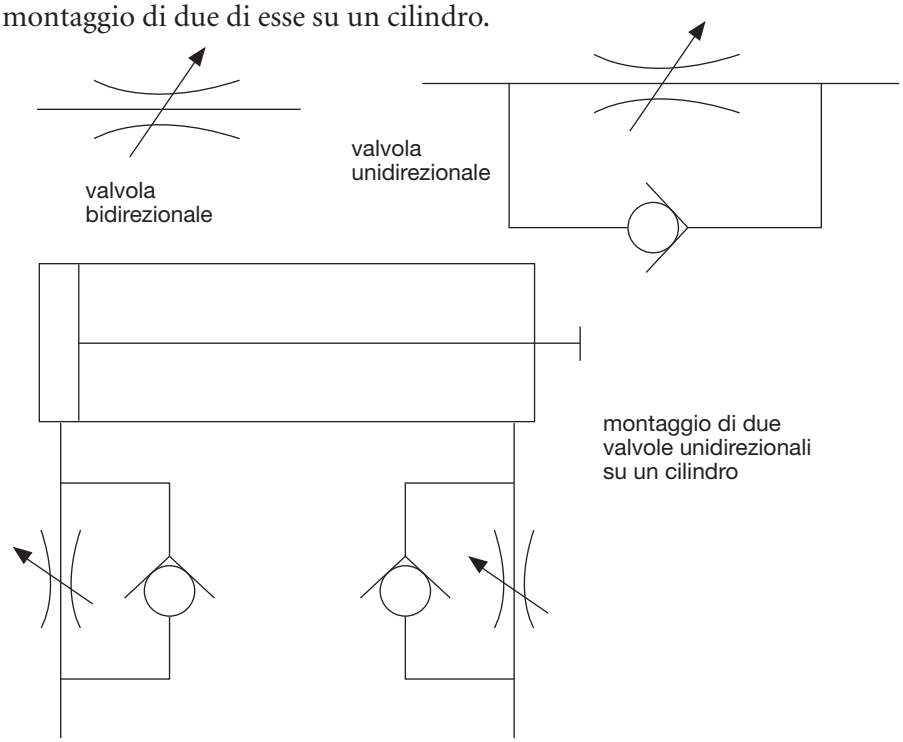



FIGURA **24**
Valvole di regolazione.

## Valvole di tipo logico

▶ Le **valvole di tipo logico**, azionate anch'esse da getti di aria compressa, adempiono tipicamente a funzioni identificabili con quelle svolte dalle porte logiche.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Esempi di valvole di tipo logico sono:

- la *valvola selettrice*;
- la *valvola a due pressioni*;
- la *valvola di stop*.

La loro rappresentazione grafica viene riportata in FIGURA **25**.

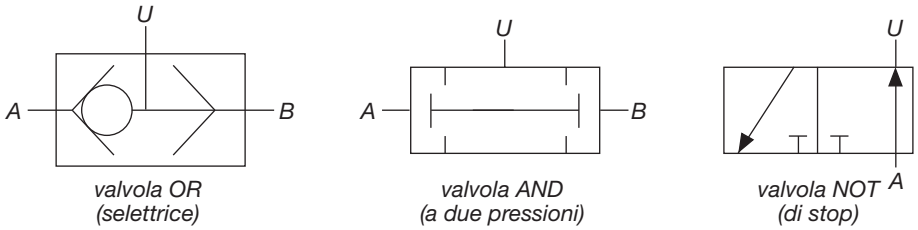



FIGURA **25**
Rappresentazione grafica delle valvole di tipo logico.

▶ La **valvola selettrice**, dotata di due ingressi e una uscita, consente di selezionare l'una o l'altra di due sorgenti di alimentazione svolgendo la funzione tipica di una porta OR.

Se si immette aria soltanto dall'ingresso *A*, la sfera rappresentata dal circolino si sposta, chiude l'ingresso *B* e consente la comunicazione tra *A* e l'uscita *U*.

Se invece si immette aria solo da *B*, la sfera si sposta, chiude l'ingresso *A* e consente la comunicazione tra *B* e l'uscita *U*.

Se due getti di aria dotati della stessa pressione vengono convogliati sia in *A* sia in *B*, la sfera si sposta nella posizione determinata dal primo segnale mettendolo in comunicazione con l'uscita *X*.

Si è così realizzata la funzione logica OR in cui l'uscita è garantita dalla presenza di almeno uno dei segnali di ingresso.

▶ La **valvola a due pressioni**, dotata di due ingressi e una uscita, permette l'azionamento di un componente pneumatico soltanto quando si ha la presenza contemporanea dei segnali *A* e *B* svolgendo la funzione tipica di una porta AND.

Immettendo aria soltanto in *A* o solo in *B* l'elemento mobile si sposta bloccando il percorso di uscita.

Se l'aria è invece presente sia in *A* sia in *B* l'elemento mobile si posiziona in modo da permettere il passaggio dell'aria verso l'uscita.

Si è così realizzata la funzione logica AND in cui l'uscita è determinata solo dalla presenza contemporanea degli ingressi.

▶ La **valvola di stop** realizza la funzione logica NOT in quanto a un mancato azionamento di essa corrisponde il passaggio di aria mentre all'azionamento segue l'interruzione del flusso.

L'entrata dell'aria viene rappresentata graficamente con un circolino, le frecce sono le direzioni dei getti mentre il simbolo a forma di T rappresenta il blocco del flusso.

Alla pressione del pulsante di sinistra le celle si spostano e il getto d'aria viene a bloccarsi, mentre l'aria ancora presente nel circuito viene scaricata come indicato dalla freccia inclinata.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Valvole monostabili e bistabili

▶ Le valvole monostabili e bistabili si differenziano tra loro in relazione al numero di posizioni di equilibrio (una o due) che possono assumere a seguito di un'azione di comando.

La caratteristica delle **valvole monostabili** è che, una volta venuta a cessare l'azione che ne ha provocato lo spostamento, le loro celle tornano nella posizione iniziale sotto l'effetto di una molla interna.

La caratteristica delle **valvole bistabili** è che, una volta raggiunta una certa posizione, la mantengono fino a un nuovo azionamento.

Tali valvole, dal punto di vista logico, hanno quindi la funzione di *mantenere in memoria* l'ultima operazione effettuata.

## Valvole ad azionamento manuale

▶ Le **valvole ad azionamento manuale** sono caratterizzate dalla presenza di dispositivi che possono essere azionati direttamente da un operatore utilizzando la mano o il piede.

Esempi di tali dispositivi sono:

- il *pulsante* (nelle sue diverse forme costruttive denominate rispettivamente *pulsante a palmo*, *pulsante push-pull*, *pulsante protetto*, *pulsante di emergenza*);
- la *leva* (con diverse forme costruttive come per esempio quelle *con selettore a chiave*, con *leva rotante* caratterizzata da due posizioni stabili e *a levetta manuale* che richiede un minimo sforzo di azionamento);
- il pedale (*protetto con cappellotto* per evitare che la messa in funzione avvenga involontariamente o *non protetto* se la valvola rimane azionata solo se il pedale viene mantenuto in pressione).

I simboli grafici che si devono utilizzare per rappresentare valvole con azionamento a pulsante e a pedale vengono riportati in FIGURA **26**.

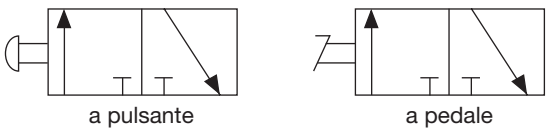



FIGURA **26**
Simboli grafici di valvole con azionamento a pulsante e a pedale.

Il tipo di azionamento viene rappresentato disposto orizzontalmente su un lato del quadrato.

## Valvole ad azionamento meccanico

▶ Le **valvole ad azionamento meccanico** vengono movimentate da organi appartenenti a impianti meccanici.

Tali azionamenti vengono denominati:

- *a camme*;
- *a rullo*;
- *a rullo snodato*;
- *a tasto meccanico*;
- *a molla*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Valvole ad azionamento pneumatico

▶ Le **valvole ad azionamento pneumatico** sono in grado di convogliare un getto di aria compressa il cui spostamento è anch'esso effettuato dalla spinta di aria compressa proveniente da una seconda valvola.

Ne esistono di due tipologie che differiscono in relazione alle modalità con cui avviene la commutazione della valvola ovvero:

- tramite *alimentazione di pressione*;
- tramite *scarico di pressione*.

I primi vengono definiti *azionamenti positivi* (utilizzabili sia con valvole monostabili sia con valvole bistabili), i secondi *azionamenti negativi* (utilizzabili solo con valvole monostabili).

## Elettrovalvole

▶ Le **elettrovalvole** sono valvole in cui il comando è di tipo elettrico essendo l'azionamento provocato dalla corrente che attraversa una bobina.

Il funzionamento è quindi quello tipico di un elettromagnete.

Le elettrovalvole possono essere:

- *monostabili* (caratterizzate dalla presenza di una bobina per l'espulsione e di una molla per il rientro);
- *bistabili* (caratterizzate dalla presenza di due bobine rispettivamente per l'espulsione e per il rientro).

La simbologia delle elettrovalvole viene riportata in FIGURA **27**.

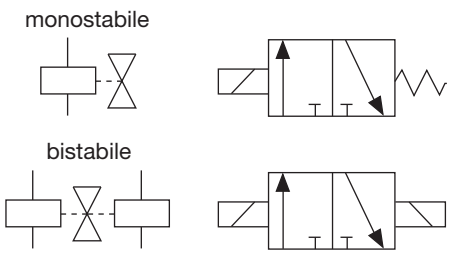



FIGURA **27** Simbologia delle elettrovalvole.

Nella figura vengono anche evidenziati i simboli grafici tipici dell'azionamento tramite bobina e dell'azionamento tramite molla.

L'uso delle *elettrovalvole* si rende necessario quando:

- si vuole realizzare un controllo di tipo elettrico-elettronico;
- i segnali di comando devono percorrere lunghe distanze.

Un impianto di tipo elettropneumatico consente inoltre di ottenere elevate velocità di lavoro grazie ai più veloci tempi di risposta.

Nel considerare le interazioni fra il circuito elettrico e quello pneumatico occorre fare attenzione a una differenza di terminologia:

- un *interruttore* è un elemento di comando che nella posizione di *chiuso* permette il passaggio di corrente elettrica;
- una *valvola pneumatica* che si trovi *chiusa* impedisce il passaggio del flusso di aria che è sottoposto al suo controllo.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 7 Circuiti per azionamenti pneumatici

In relazione al tipo di funzionamento i **circuiti pneumatici** sono classificabili nel modo seguente:

- *manuali*, quando il loro funzionamento dipende dalla volontà dell'operatore;
- *semiautomatici* (o a *ciclo singolo*), quando dopo ogni ciclo è necessario un intervento manuale;
- *automatici* (o a *ciclo continuo*), se dopo l'avvio i cicli si ripetono spontaneamente.

## 7.1 Comandi sequenziali e a eventi

I comandi per i *cicli automatici* e per i *cicli semiautomatici* possono essere:

- *comandi sequenziali*;
- *comandi a eventi*.

I **comandi sequenziali** producono cicli che si sviluppano in funzione del tempo.

I cicli di questo tipo lavorano ad anello aperto, struttura che non consente l'eventuale correzione di errori sulle uscite.

I **comandi a eventi** intervengono sul ciclo in seguito alla verifica di determinate condizioni, per esempio l'ultimazione della corsa di un cilindro o la presenza di un oggetto.

I cicli di questo tipo lavorano ad *anello chiuso* in quanto si ha un trasferimento continuo di informazioni tra organi di comando e attuatori che consente l'eventuale correzione di errori sulle uscite.

## 7.2 Segnali

Nel comando di dispositivi pneumatici è possibile incontrare due tipi di segnali:

- *segnali digitali*;
- *segnali analogici*.

I **segnali digitali** vengono utilizzati nella maggior parte delle applicazioni.

Il funzionamento dei componenti viene definito mediante segnali discreti quali per esempio:

- la presenza o meno di una determinata pressione;
- lo stato di riposo o di azionamento di un sensore;
- la posizione dentro-fuori di un cilindro.

In tali casi la logica di funzionamento può essere agevolmente descritta mediante l'*algebra di Boole*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

I **segnali analogici** vengono utilizzati quando è necessario regolare con continuità tutte le posizioni della corsa dei pistoni.

Si ricorre in questi casi all'uso di *valvole di tipo proporzionale*, capaci cioè di controllare in modo continuo la pressione e la portata.

Il funzionamento di questi componenti è basato sulla regolazione ad *anello chiuso*.

## 7.3 Configurazioni

In relazione alla tipologia di comandi e di segnali gli schemi per azionamenti pneumatici assumono le seguenti possibili configurazioni che vengono illustrate in FIGURA **28**:

- *interamente pneumatica*;
- *elettropneumatica a logica cablata*;
- *elettropneumatica a logica programmabile*.

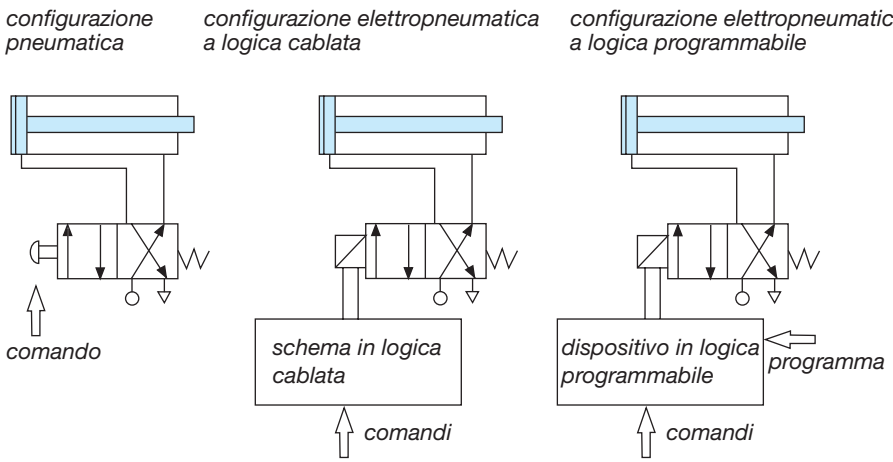



FIGURA **28** Configurazione di schemi per azionamenti pneumatici.

La **configurazione interamente pneumatica** prevede che comandi e segnali siano esclusivamente pneumatici.

La scelta di una *configurazione interamente pneumatica* offre i seguenti vantaggi:

- poter utilizzare una sola fonte di energia sia per i segnali sia per l'attuazione;
- notevole semplicità di cablaggio e buona affidabilità.

La scelta è particolarmente opportuna quando occorre operare in ambienti con rischio di esplosioni.

La configurazione presenta tuttavia lunghi tempi di risposta a causa del tempo di propagazione della pressione nei tubi.

La **configurazione elettropneumatica a logica cablata** prevede l'impiego di fili elettrici per i comandi ai distributori e dai sensori.

La tecnica si rivela utile quando si hanno tubazioni di lunghezza maggiore di dieci metri o, in generale, quando è necessario ottenere dei tempi di commutazione ridotti.

La **configurazione elettropneumatica a logica programmabile** prevede sempre l'impiego di segnali elettrici.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

L'impiego di dispositivi a logica programmabile al posto del cablaggio consente in particolare di poter modificare con estrema rapidità l'impianto a seconda delle necessità imposte dalla produzione.

## 7.4 Comando diretto e indiretto

I comandi di un circuito pneumatico possono essere dei seguenti tipi:

- *comando diretto*, quando la valvola ha il duplice compito di potenza e di comando;
- *comando indiretto*, quando le funzioni di comando e potenza vengono espletate da diversi componenti.

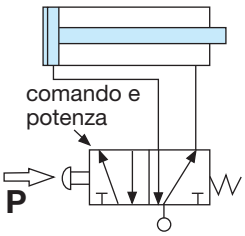



FIGURA **29**
Circuito pneumatico con comando diretto.

Un esempio di **circuito pneumatico con comando diretto** viene riportato in FIGURA **29**.

La figura illustra la condizione di riposo in cui la valvola non è azionata e il cilindro è completamente rientrato; la molla mantiene l'organo mobile della valvola sulla posizione corrispondente al quadrato di destra da dove partono i collegamenti al cilindro.

Azionando la valvola tramite il pulsante P si ottiene la sua commutazione; l'organo mobile, spostandosi nella posizione corrispondente di sinistra, manda la camera positiva in pressione e quella negativa in scarico.

Il cilindro compie la corsa positiva e rimane nella posizione raggiunta fino a quando resta azionato il pulsante; rilasciando il pulsante, la molla sposta l'organo mobile sulla posizione corrispondente alla casella di destra e il cilindro compie la corsa negativa.

Un esempio di **circuito pneumatico con comando indiretto** viene riportato in FIGURA **30**.

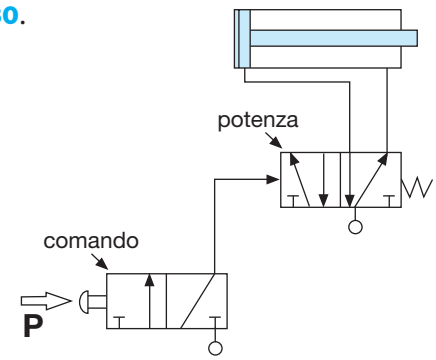



FIGURA **30**
Circuito pneumatico con comando indiretto.

Azionando il pulsante P il dispositivo di azionamento pneumatico commuta la valvola di potenza e il cilindro compie la corsa positiva; rilasciando il pulsante prevale l'azione delle molle e il sistema torna nella condizione iniziale.

## 7.5 Regole di tracciamento

Gli schemi dei circuiti pneumatici vengono tracciati osservando le seguenti regole principali:

- *negli schemi esclusivamente pneumatici i componenti vengono collocati su vari livelli* (sul livello più alto si dispongono i cilindri, a quello inferiore


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

le rispettive valvole di potenza, più in basso le valvole di comando e di elaborazione di segnali);

- *negli schemi elettropneumatici il circuito si scinde in due parti separate* (una di tipo esclusivamente pneumatico con i cilindri e le relative valvole di potenza, l'altra di tipo esclusivamente elettrico che esercita la funzione di comando con l'elettrovalvola che trasforma il segnale elettrico nel corrispondente segnale pneumatico);
- *ogni valvola deve essere collegata con la fonte d'aria compressa* (e ciò può avvenire sia in modo diretto sia attraverso un'altra valvola);
- *gli schemi si rappresentano nelle condizioni di partenza in presenza di pressione* (ogni componente deve essere mostrato con i collegamenti nella posizione che precede la funzione che dovrà svolgere);
- *i circuiti elettrici di comando seguono le regole di tracciamento degli schemi funzionali* (la successione dei circuiti e il movimento iniziale dei contatti procedono da sinistra verso destra).

## 7.6 Diagramma delle fasi

▶ La rappresentazione grafica della successione dei movimenti dello stelo di un cilindro viene indicata comunemente con il termine **diagramma delle fasi**.

Si faccia riferimento a un cilindro attuatore denominato A.

Con riferimento alla posizione dello stelo del cilindro si ha che:

- quando lo stelo è interamente fuoriuscito dal cilindro si dice che ha effettuato la *corsa positiva A+*;
- quando lo stelo è completamente rientrato si dice che ha effettuato la *corsa negativa A–*.

Le scritture *A+/A–* e *A–/A+* mettono in evidenza la posizione iniziale del cilindro e rappresentano in forma letterale il *ciclo del cilindro* caratterizzato in questo caso da due fasi con un movimento per ciascuna fase.

Il diagramma delle fasi per il ciclo *A+/A–* assume la forma mostrata in FIGURA **31**.

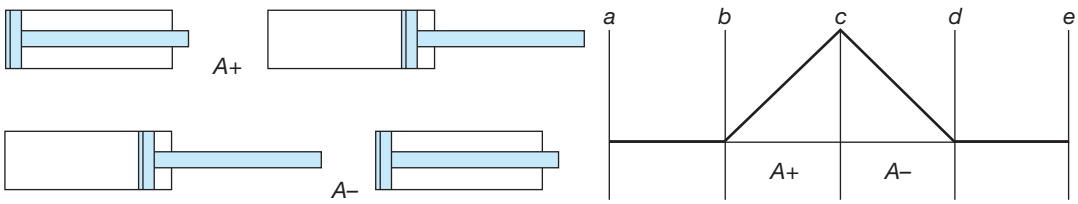



FIGURA **31** Diagramma delle fasi per due cilindri.

Osservando il diagramma si può notare quanto segue:

- il tratto *ab* rappresenta il cilindro nelle condizioni iniziali, ossia fermo;
- il tratto *bc* rappresenta la prima fase, ossia la corsa positiva A+;
- il tratto *cd* rappresenta la seconda fase, e cioè la corsa negativa A–;
- il tratto *de* rappresenta nuovamente il cilindro nelle condizioni iniziali.

Le considerazioni possono essere estese al caso di più cilindri.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 4

Si rappresenti il diagramma delle fasi corrispondente alla forma letterale

*A+/B+/A–B–*

## Soluzione

La forma letterale esprime il fatto che i cilindri *A* e *B* hanno compiuto il ciclo (corsa positiva e corsa negativa) in tre fasi:

- *fase 1* nella quale il cilindro *A* esegue la corsa positiva mentre il cilindro *B* è fermo;
- *fase 2* nella quale il cilindro *A* è fermo mentre il cilindro *B* esegue la corsa positiva;
- *fase 3* nella quale entrambi i cilindri eseguono la corsa negativa.

Il corrispondente diagramma delle fasi viene riportato in FIGURA **32**.

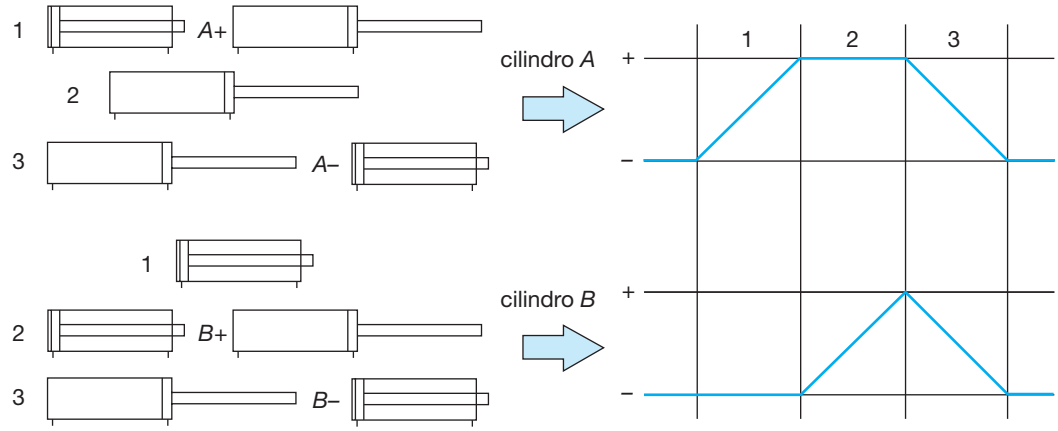



FIGURA **32**
Diagramma della sequenza.

ESEMPIO 5

Si rappresenti il diagramma delle fasi del ciclo

*A+/B+/A–/B–*.

## Soluzione

Si suppone che la corsa *A+* (fase 1) venga avviata dall'operatore attraverso la pressione di un pulsante.

Raggiunta la posizione *tutto fuori* del cilindro *A* ha inizio la corsa positiva del cilindro *B* (fase 2); al suo completamento inizia la corsa negativa del cilindro *A* (fase 3); raggiunta la posizione *tutto dentro* del cilindro *A* inizia la corsa negativa del cilindro *B* (fase 4); la sequenza termina una volta raggiunta la posizione tutto dentro del cilindro *B*.

Il corrispondente diagramma delle fasi viene proposto in FIGURA **33**.

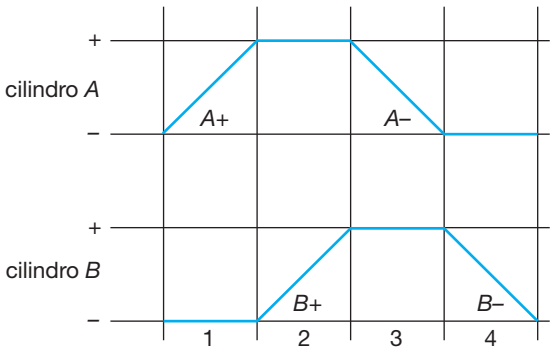



FIGURA **33**
Diagramma delle fasi della sequenza.

# 8 Impianti in logica elettromeccanica

▶ Un sistema di comando viene definito in **logica elettromeccanica** o in **logica cablata** quando è composto da componenti discreti ciascuno con il compito di svolgere una determinata funzione logica.

I componenti sono collegati tra loro da fili da cui il nome di logica cablata per l'evidente necessità di un *cablaggio*.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Una modifica della funzionalità del circuito ne richiede una del cablaggio.

Tra i componenti elettromeccanici utilizzati per la realizzazione di questi impianti si distinguono:

- *pulsanti e interruttori*;
- *dispositivi di segnalazione*;
- *relè ausiliari*;
- *elettrovalvole*;
- *relè temporizzatori*;
- *contattori*;
- *sensori*.

## 8.1 Pulsanti e interruttori

▶ I **pulsanti** e gli **interruttori** sono *dispositivi di comando ad azionamento manuale* che movimentano dei contatti elettrici che possono essere:
– *normalmente aperti* (*in chiusura*);
– *normalmente chiusi* (*in apertura*).

Il **pulsante** è un dispositivo di tipo *monostabile* in quanto ha una sola posizione di riposo.

La sua pressione modifica la posizione dei contatti a esso associati (che possono essere più di uno); i contatti chiusi si aprono, quelli aperti si chiudono.

Quando il pulsante viene rilasciato i contatti tornano immediatamente nella posizione di riposo.

Quando l'utente preme il pulsante apre o chiude un circuito collegato a un utilizzatore.

Tipico è l'esempio del comando di una lampada; premendo il pulsante la lampada si accende, rilasciandolo si spegne.

L'**interruttore** è un dispositivo di tipo *bistabile* perché ha due posizioni di riposo.

Esso non ritorna nella posizione di partenza quando viene rilasciato a seguito di un azionamento; per farlo tornare nella posizione di partenza si rende necessaria una ulteriore manovra.

Anche l'interruttore apre o chiude un circuito collegato a un utilizzatore.

Tipico è l'esempio del comando di una lampada; premendo il pulsante la lampada si accende, rilasciandolo rimane accesa; occorre una seconda manovra per far spegnere la lampada.

## 8.2 Dispositivi di segnalazione

I dispositivi di segnalazione possono essere luminosi o acustici e vengono utilizzati per rendere conto dello stato in cui si trova l'impianto.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Possono segnalare situazioni di normale funzionamento di un impianto o situazioni di pericolo.

Si citano come esempi tipici le seguenti tipologie di segnalazione:

- *impianto a riposo pronto per essere messo in funzione*;
- *movimento di un organo meccanico*;
- *guasto a un'apparecchiatura.*

## 8.3 Relè ausiliari

▶ Il **relè ausiliario** è un *dispositivo di comando ad azionamento elettrico* che modifica lo stato dei suoi contatti attraverso una bobina opportunamente alimentata.

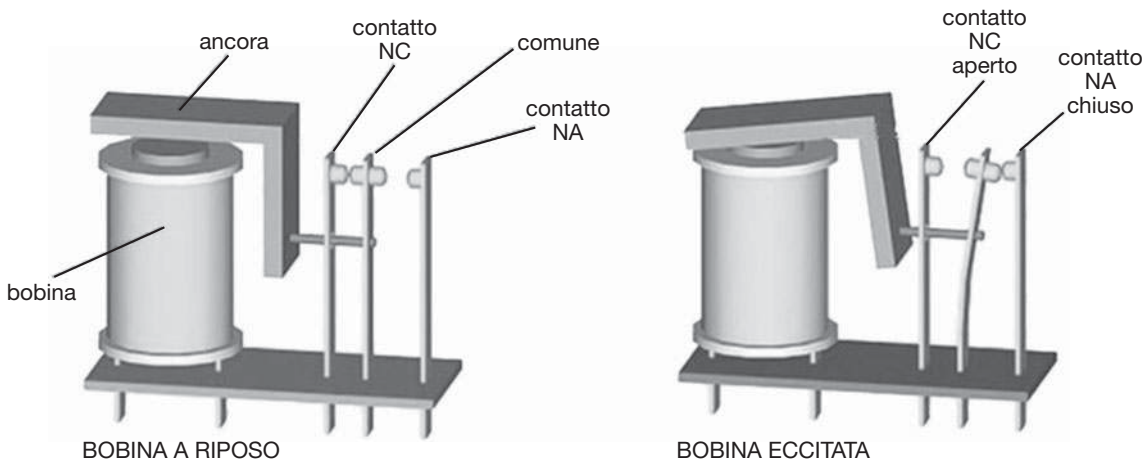
Esso è infatti costituito da:

- una *bobina* (*elettromagnete*);
- l'ancora;
- una serie di contatti che possono essere normalmente aperti o normalmente chiusi.

I contatti cambiano posizione (gli aperti si chiudono, i chiusi si aprono) quando la bobina è percorsa da corrente.

In FIGURA **34** viene riportata una rappresentazione schematica della struttura di una bobina che evidenzia anche il suo principio di funzionamento.

FIGURA **34** Rappresentazione della struttura di un relè.




In termini tecnici quando la bobina è percorsa da corrente si dice *eccitata* ed *eccitazione* è il procedimento che porta la bobina in quello stato.

Se la bobina non è percorsa da corrente si dice che *non è eccitata* o *a riposo*; il procedimento che, interrompendo il passaggio di corrente, riporta la bobina a riposo si dice *diseccitazione*.

L'eccitazione della bobina può avvenire per effetto dell'azionamento di un interruttore o di un pulsante.

Il funzionamento degli utilizzatori finali (lampade, motori, valvole pneu-


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

matiche) dipende dalla posizione assunta dai contatti dei relè che vengono predisposti per tale scopo.

Esistono diverse tipologie di relè ma nel settore industriale il più utilizzato è il *relè monostabile*; caratteristica di questo dispositivo è che, quando viene a mancare l'alimentazione, i contatti ritornano nella posizione iniziale.

**ESEMPIO 6**

Si stabiliscano le modalità di funzionamento dell'impianto proposto in FIGURA **35**.

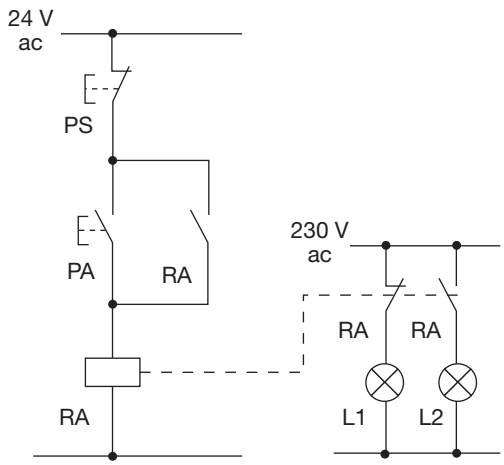



FIGURA **35**
Schema dell'impianto.

### Soluzione

Si tratta di un esempio di azionamento di lampade tramite relè ausiliario.

Il funzionamento dell'impianto è il seguente:

- le lampade L1 ed L2 si accendono e si spengono in relazione allo stato in cui si trova la bobina (se è eccitata la lampada L1 è spenta e la L2 è accesa, se non è eccitata la lampada L1 è accesa e la L2 è spenta);
- la bobina è eccitata quando viene premuto il pulsante PA (*pulsante di avviamento*);
- con il rilascio del pulsante la corrente continua a fluire nella bobina in quanto il contatto del relè che si trova in parallelo al pulsante stesso (denominato *contatto di autoritenuta*) rimane chiuso assicurando l'alimentazione alla bobina stessa;
- per diseccitare la bobina si deve premere il pulsante PS (*pulsante di stop*).

In questo caso si è scelto di alimentare il circuito della bobina a una tensione diversa da quella in cui si trovano gli utilizzatori.

## 8.4 Elettrovalvole

▶ Le **elettrovalvole** sono componenti caratterizzati dalla presenza di bobine la cui eccitazione attiva direttamente gli elementi mobili delle valvole da esso comandate aprendo o chiudendo i condotti dell'aria.

Il principio di funzionamento è quello tipico di un elettromagnete.

Si distinguono:

- *valvole monostabili* (con una sola bobina);
- *valvole bistabili* (con due bobine denominate *lato+* e *lato–*).

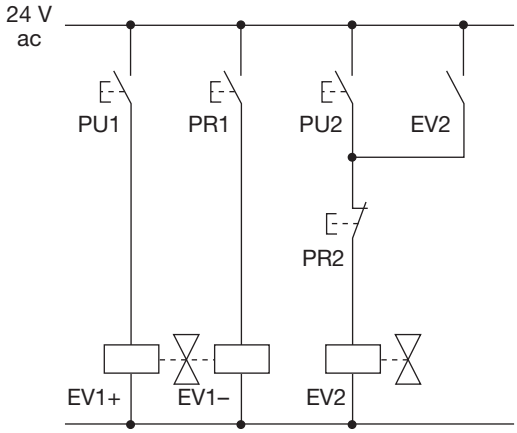
Il funzionamento delle valvole monostabili è analogo a quello del relè ausiliario ed è pertanto necessario l'impiego del contatto di autoritenuta.

Nelle elettrovalvole bistabili l'eccitazione della bobina lato+ determina l'uscita del pistone, l'eccitazione della bobina lato– ne determina il rientro.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 7

Si stabiliscano le modalità di funzionamento dell'impianto proposto in FIGURA **36**.




### Soluzione

Si tratta di un esempio di azionamento di elettrovalvole.

Il funzionamento dell'impianto è il seguente:

- le bobine dell'elettrovalvola bistabile EV1+ ed EV1– vengono comandate dai pulsanti PU1 (che provoca l'uscita del pistone) e PR1 (che ne provoca il rientro);
- la bobina dell'elettrovalvola monostabile EV2 viene comandata dai pulsanti PU2 e PR2.

FIGURA **36**
Schema dell'impianto.

## 8.5 Relè temporizzatori

▶ Il **relè temporizzatore** è un componente elettromeccanico che comanda dei *contatti tempo dipendenti* attraverso una bobina.

Come il relè è provvisto di una bobina e di contatti la cui posizione dipende dallo stato della bobina.

Le modalità con le quali i contatti possono essere tempo dipendenti variano in relazione alla tecnologia costruttiva del relè.

### Relè ritardati all'eccitazione

Nei relè ritardati all'eccitazione i contatti commutano dopo che è trascorso un tempo prefissato dal momento in cui viene eccitata la bobina.

Il *tempo di ritardo* viene prefissato agendo sul regolatore di cui il dispositivo è provvisto.

ESEMPIO 8

Si stabiliscano le modalità di funzionamento dell'impianto proposto in FIGURA **37**.

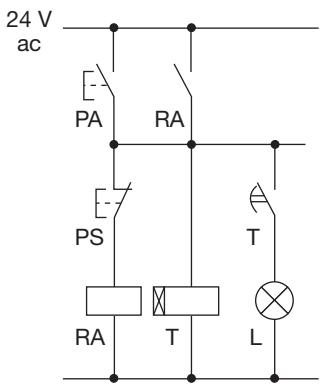



FIGURA **37**
Schema dell'impianto.

### Soluzione

Si tratta di un esempio di impiego del relè temporizzatore.

Il funzionamento dell'impianto è il seguente:

- l'eccitazione della bobina del relè temporizzatore avviene premendo il pulsante PA che eccita anche la bobina relè ausiliario RA;
- la lampada L si accende e si spegne in relazione allo stato in cui si trova il contatto ritardato normalmente aperto del temporizzatore;
- con la pressione di PA la lampada rimane spenta perché il contatto del temporizzatore posto in serie si mantiene aperto;
- al termine del tempo prefissato attraverso il temporizzatore la lampada si accende perché il contatto del temporizzatore si chiude;
- per procedere allo spegnimento della lampada occorre diseccitare entrambe le bobine premendo il pulsante PS.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 8.6 Contattori

▶ Il **contattore** è un dispositivo meccanico di manovra di tipo monostabile ad azionamento non manuale caratterizzato dalla presenza di una bobina la cui eccitazione comanda due distinte tipologie di contatti denominati rispettivamente *contatti principali* o *contatti di potenza* (quelli collegati all'utilizzatore) e *contatti ausiliari*.

In FIGURA **38** viene riportata una rappresentazione schematica della struttura di un contattore che evidenzia anche il suo principio di funzionamento simile a quello del relè ausiliario.

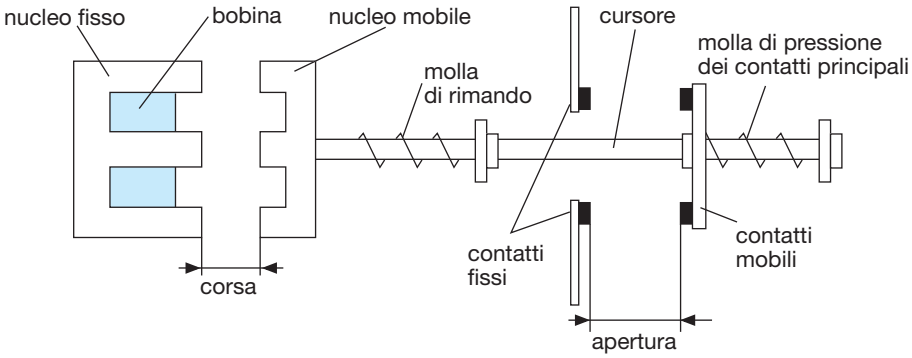



FIGURA **38** Rappresentazione della struttura di un contattore.

Quando il nucleo mobile viene attratto dal nucleo fisso per effetto dell'eccitazione della bobina i contatti mobili vanno a toccare i contatti fissi realizzando la chiusura del circuito.

Quando la bobina si eccita si ha che:

- i contatti di potenza si chiudono (perché in genere sono normalmente aperti);
- i contatti ausiliari modificano la loro posizione.

**ESEMPIO 9**

Si stabiliscano le modalità di funzionamento dell'impianto proposto in FIGURA **39**.

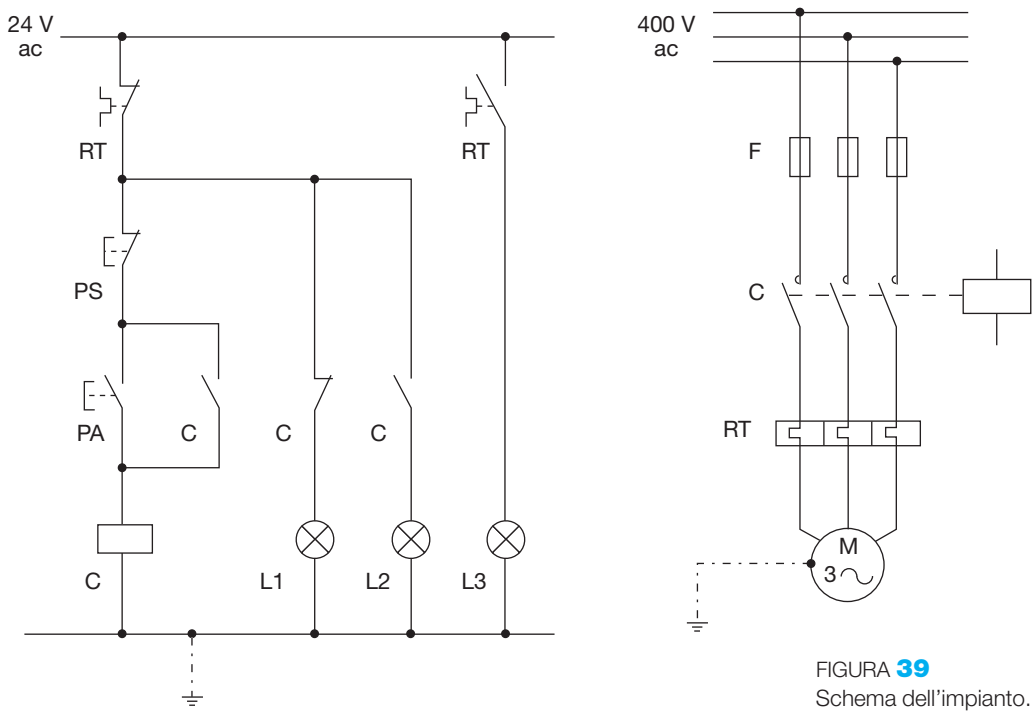



FIGURA **39** Schema dell'impianto. ▶



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 9

## Soluzione

Si tratta di un esempio di impiego del contattore.

Il funzionamento dell'impianto (che è il tipico schema per l'avviamento di motori) è il seguente:

- l'eccitazione della bobina del contattore C avviene premendo il pulsante PA (*pulsante di avvio*);
- contemporaneamente i contatti di potenza, collegati al motore alimentato attraverso una linea trifase a 400 V, si chiudono e fanno partire il motore;
- anche i contatti ausiliari, che si trovano nel circuito alimentato a tensione ridotta, cambiano la loro posizione;
- la diseccitazione della bobina, che avviene premendo il pulsante PS, riporta i contatti di potenza e ausiliari nella loro posizione di riposo;
- come conseguenza di quest'ultima operazione si ferma anche il motore.

Sulla linea trifase sono disposti ulteriori componenti quali il *relè termico* RT e i *fusibili* F.

### Relè termico

Il *relè termico*, che si trova collegato in serie tra contattore e motore, è un dispositivo provvisto di *lamine bimetalliche* che, come conseguenza di un aumento della temperatura, si deformano.

Il riscaldamento delle lamine avviene per effetto di *avvolgimenti riscaldanti* che rilevano la corrente che attraversa il carico.

Attraverso un *cinematismo* avviene lo *sgancio del relè* tramite la *leva di sgancio*; la posizione dei contatti ausiliari cambia a seguito dello sgancio e precisamente:

- il contatto chiuso che si trova in serie alla bobina del contattore si apre e il motore si ferma istantaneamente;
- il contatto aperto che si trova in serie alla lampada di segnalazione si chiude facendo accendere la lampada stessa e segnalando una condizione di *guasto per sovraccarico termico del motore*.

La posizione assunta dai contatti a seguito di un guasto rimane tale fino a quando l'operatore non interviene agendo sul *tasto di reset* di cui è dotato il componente e che riporta i contatti nella posizione di riposo.

Il relè termico deve essere tarato preventivamente per una determinata corrente nominale attraverso una vite di regolazione.

In FIGURA **40** viene riportata una rappresentazione schematica della struttura di un relè termico che evidenzia anche il suo principio di funzionamento.

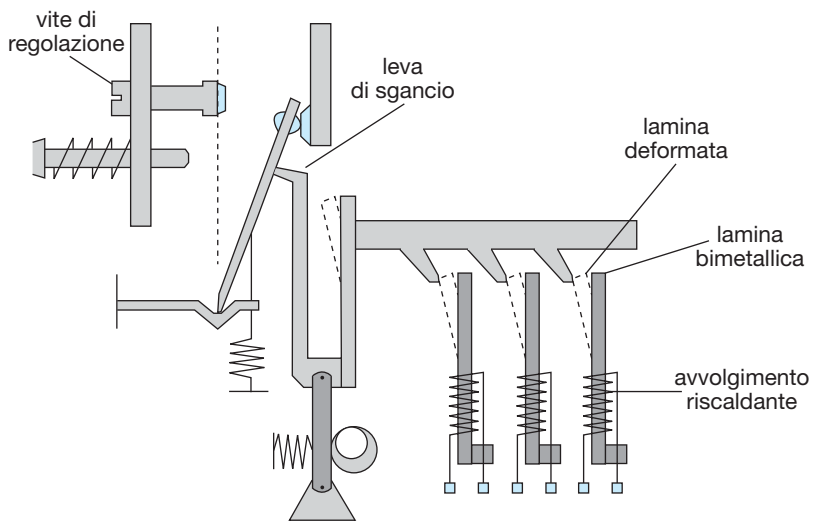



FIGURA **40** Rappresentazione della struttura di un relè termico.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Fusibili

I fusibili si trovano in serie al motore a inizio linea e intervengono aprendo la linea trifase quando si verificano dei cortocircuiti.

A ogni guasto segue la distruzione del fusibile che deve essere reintegrato.

In FIGURA **41** viene riportata una rappresentazione schematica della struttura di un fusibile che evidenzia anche il suo principio di funzionamento.

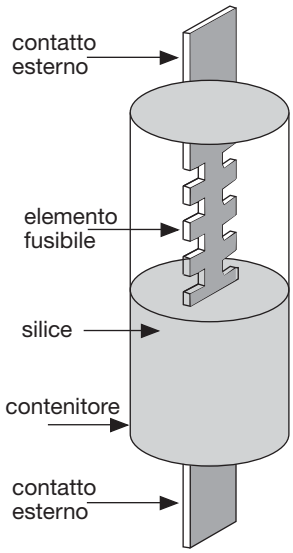



FIGURA **41** Rappresentazione della struttura di un fusibile.

## 8.7 Sensori

Il concetto di sensore come elemento caratterizzante di un sistema di controllo è di carattere generale; nel contesto dell'argomento assume un significato specifico.

▶ I **sensori** hanno il compito di segnalare la presenza o l'assenza di corpi oppure rilevare la posizione di elementi mobili come per esempio la posizione di *fine corsa* dei cilindri automatici.

Le informazioni ricevute dai sensori vengono trasmesse alla parte logica che genera i comandi necessari ad azionare gli organi attuatori.

Per quanto riguarda il loro principio di funzionamento i *sensori* possono essere classificati nel modo seguente:

- *sensori pneumatici*;
- *sensori magnetici*;
- *sensori ottici*;
- *sensori elettromeccanici*.

Per una rappresentazione grafica dei diversi tipi di sensore si osservi la FIGURA **42**.

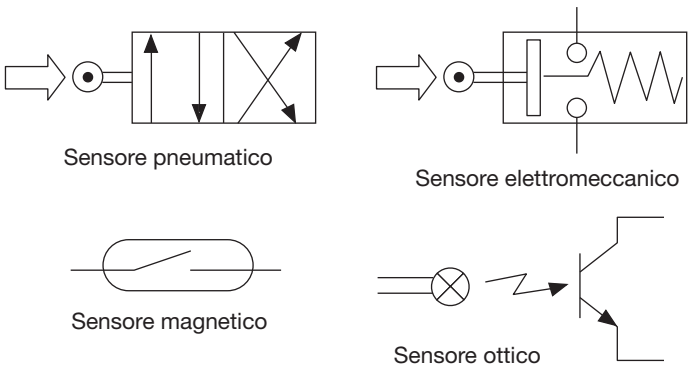



FIGURA **42** Rappresentazioni grafiche dei sensori.

I **sensori pneumatici** sono costituiti da valvole di distribuzione azionate da una levetta comandata a sua volta dall'estremità dello stelo del cilindro appositamente sagomata; essi hanno il compito di indirizzare il flusso d'aria in relazione alla logica di funzionamento dell'impianto.

Vengono in genere usati quando l'impianto è gestito da una logica esclusivamente pneumatica senza l'intervento di elettrovalvole e si rivelano particolarmente utili quando per ragioni di sicurezza deve essere evitata la presenza di fenomeni elettrici nell'ambiente interessato.

I **sensori magnetici** fondano il loro principio di funzionamento sui fe-


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

nomeni magnetici dovuti alla presenza o al passaggio di elementi costruiti con materiale ferromagnetico.

Per esempio la presenza di un anello magnetico montato sul pistone esercita la sua influenza anche attraverso le pareti dello stesso, normalmente in materiale diamagnetico (per esempio alluminio), eccitando così il contatto di un **relè reed**.

Un *relè reed* è interruttore a lamina normalmente aperto e racchiuso in un'ampolla di vetro riempito di gas inerte che si chiude in presenza di un campo magnetico.

Questo, a sua volta, invia il segnale opportuno alla logica di comando.

I **sensori ottici** sono costituiti essenzialmente da una *cellula fotoelettrica* sollecitata da una sorgente luminosa.

La presenza o l'assenza del segnale, a causa per esempio del passaggio di un oggetto davanti alla sorgente, determina il funzionamento del dispositivo che funziona così da interruttore.

I **sensori elettromeccanici** consistono essenzialmente in contatti elettrici azionati dal passaggio dello stelo del cilindro.

Questi sensori, denominati anche **finecorsa**, sono presenti:

- negli azionamenti esclusivamente elettrici per segnalare per esempio la corsa di un cancello o di un impianto di sollevamento;
- negli azionamenti elettropneumatici nell'ambito dei quali azionano a loro volta, a seconda della logica di comando, le elettrovalvole a cui sono collegati.

**ESEMPIO 10**

Si stabiliscano le modalità di funzionamento dell'impianto proposto in FIGURA **43**.

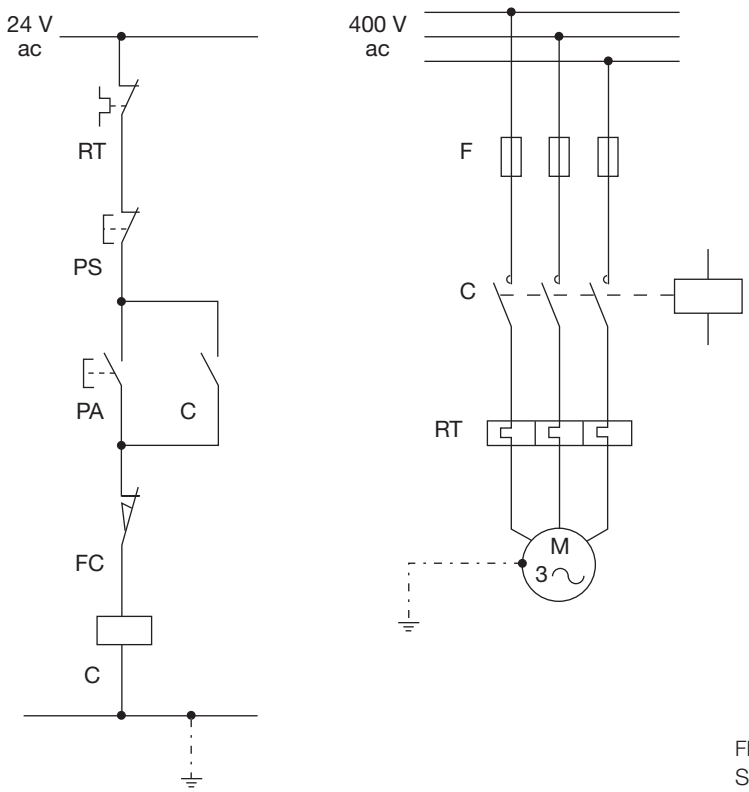



FIGURA **43**
Schema dell'impianto.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 10

## Soluzione

Si tratta di un esempio di impiego di un finecorsa in un azionamento elettrico.

Il funzionamento dell'impianto (che è il tipico schema per l'avviamento di motori) è il seguente:

- l'eccitazione della bobina del contattore C avviene premendo il pulsante PA (*pulsante di avvio*);
- contemporaneamente i contatti di potenza, collegati al motore alimentato attraverso una linea trifase a 400 V, si chiudono e fanno partire il motore;
- la diseccitazione della bobina avviene premendo il pulsante PS o, alternativamente, quando il contatto del finecorsa normalmente chiuso si apre o ancora quando si apre il contatto del relè termico RT a causa di un guasto per sovraccarico (i contatti di potenza in tutti e tre i casi ritornano nella loro posizione di riposo);
- come conseguenza di quest'ultima operazione si ferma anche il motore.

ESEMPIO 11

Si stabiliscano le modalità di funzionamento dell'impianto proposto in FIGURA **44**.

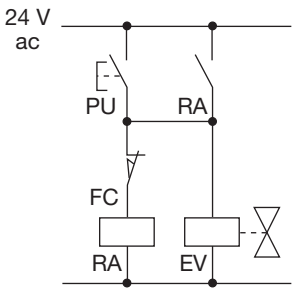



FIGURA **44**
Schema dell'impianto.

## Soluzione

Si tratta di un esempio di impiego di un finecorsa in un azionamento elettropneumatico.

Il funzionamento dell'impianto è il seguente:

- la bobina del relè ausiliario RA si eccita premendo il pulsante PU;
- la chiusura del contatto di autoritenuta ha come conseguenza l'eccitazione della bobina dell'elettrovalvola monostabile EV e l'uscita del pistone;
- l'apertura del finecorsa FC al termine della corsa del pistone porta alla diseccitazione delle bobine del relè ausiliario e dell'elettrovalvola monostabile e il conseguente ritorno del pistone.

ESEMPIO 12

Si realizzi lo schema di comando in logica elettromeccanica relativo all'azionamento di un cilindro che effettua la corsa *A+/A–* mediante una valvola bistabile.

Si utilizzino allo scopo:

- un pulsante che avvia la corsa positiva del pistone;
- due finecorsa che segnalano le posizioni estreme *tutto dentro* e *tutto fuori*.

## Soluzione

Lo schema che risponde alle specifiche assegnate viene riportato in FIGURA **45**.

Considerando inizialmente chiuso il contatto del finecorsa FC1, il funzionamento del circuito è il seguente:

- premendo il pulsante PU l'elettrovalvola EV+ si eccita e inizia di conseguenza la corsa positiva del pistone;
- quando il cilindro completa la corsa positiva si ha la chiusura del contatto del finecorsa FC2;
- la chiusura del contatto porta all'eccitazione dell'elettrovalvola EV– e al conseguente inizio della corsa negativa che si arresta con il raggiungimento della posizione *tutto dentro* e la chiusura del contatto del finecorsa FC1.

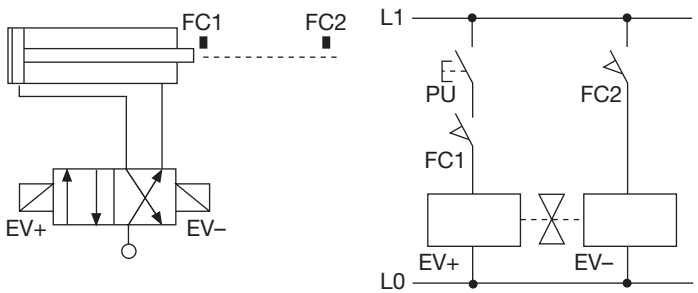



FIGURA **45**
Schema in logica elettromeccanica.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# DOMANDE a risposta aperta

**1** **Definire i concetti di automazione e automazione industriale.**

**2** **Definire il concetto di azionamento industriale.**

**3** **Completare la** FIGURA **46** **riportando nei riquadri i nomi dei principali elementi costitutivi del cilindro.**

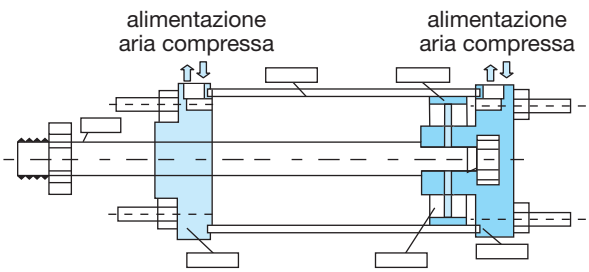



FIGURA **46**

**4** **Evidenziare le differenze di funzionamento tra un cilindro a semplice effetto e uno a doppio effetto.**

**5** **Classificare le valvole in relazione alla funzione da loro svolta.**

**6** **Definire la struttura delle valvole di distribuzione.**

**7** **Definire il concetto di sensore.**

**8** **Esporre sinteticamente le caratteristiche di un sensore pneumatico.**

**9** **Spiegare il funzionamento di un sensore ottico.**

**10** **Prendendo come riferimento lo schema riportato in** FIGURA **47** **descrivere il funzionamento di un finecorsa.**

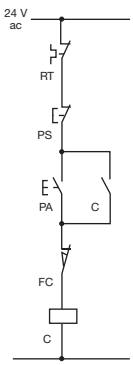



FIGURA **47**

**11** **Prendendo come riferimento lo schema riportato in** FIGURA **48** **descrivere il funzionamento di un relè termico.**

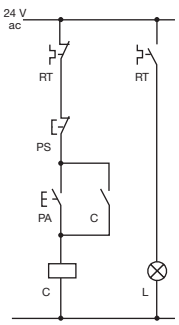



FIGURA **48**

**12** **Prendendo come riferimento lo schema riportato in** FIGURA **49** **descrivere il funzionamento di una elettrovalvola bistabile.**

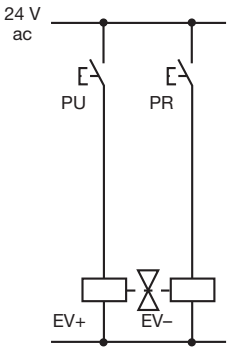



FIGURA **49**

**13** **Rappresentare graficamente in logica elettromeccanica, in logica elettronica e in logica pneumatica l'espressione logica**

$$U = (A + B)\,(C + D)$$

**14** **Analizzare e comparare le caratteristiche dei cilindri a semplice effetto e a doppio effetto.**

**15** **Analizzare e comparare le caratteristiche dei relè ausiliari e dei contattori.**

**16** **Definire le caratteristiche delle valvole ad azionamento elettrico evidenziando le differenze di funzionamento tra elettrovalvole monostabili e bistabili.**

**17** **Dopo aver stabilito quale delle due valvole rappresentate in** FIGURA **50** **è una valvola selettrice, definirne sinteticamente le caratteristiche.**

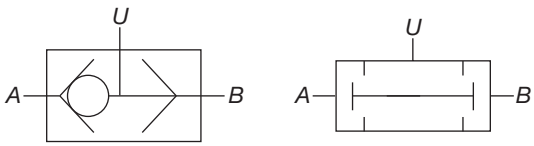



FIGURA **50**

**18** **Dopo aver individuato il tipo di attuatore rappresentato in** FIGURA **51** **definirne sinteticamente le caratteristiche.**

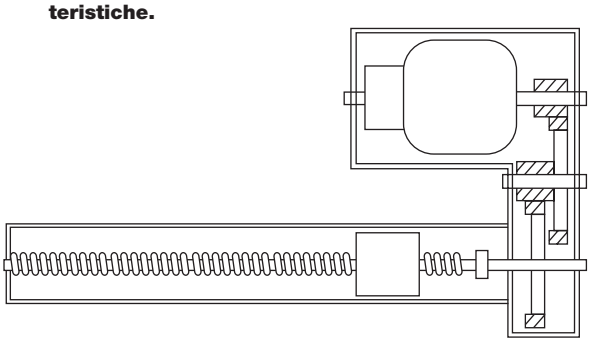


FIGURA **51**

**19** **Mettere a confronto le diverse tipologie di azionamento delle valvole.**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**20** **Definire la tipologia delle valvole rappresentate in** FIGURA **52**.

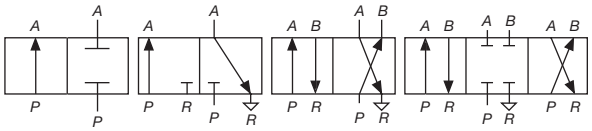



FIGURA **52**

**21** **Realizzare lo schema in logica elettromeccanica corrispondente al diagramma delle fasi riportato in** FIGURA **53**.

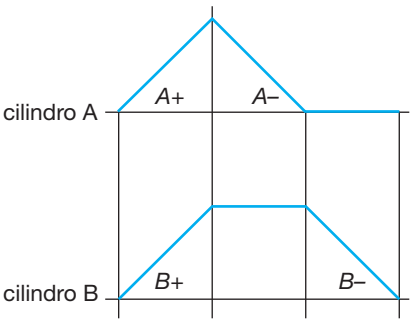



FIGURA **53**

**22** **Descrivere i componenti del circuito riprodotto in** FIGURA **54** **e analizzarne di seguito il funzionamento.**

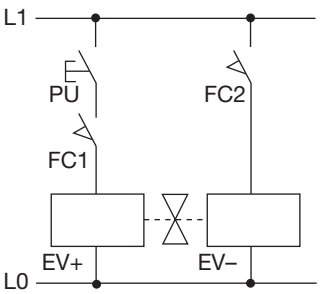



FIGURA **54**

**23** **Confrontare i valori tipici di pressione che si possono ottenere con impianti pneumatici e con impianti oleoidraulici.**

**24** **Completare gli schemi a blocchi degli impianti pneumatici e oleodinamici riportati in** FIGURA **55** **inserendo gli elementi mancanti.**

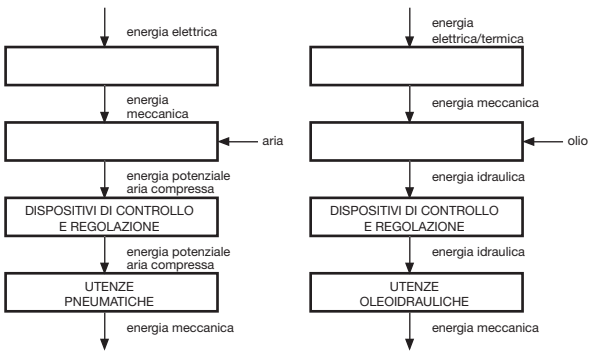



FIGURA **55**

## DOMANDE a risposta multipla

**1** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **56** **rappresenta un sensore:**

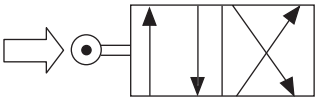


FIGURA **56**

A pneumatico
B magnetico
C ottico
D elettromeccanico

**2** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **57** **rappresenta un sensore:**

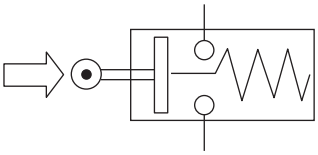


FIGURA **57**

A pneumatico
B magnetico
C ottico
D elettromeccanico

**3** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **58** **rappresenta un sensore:**

FIGURA **58**

A pneumatico
B magnetico
C ottico
D elettromeccanico

**4** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **59** **rappresenta un sensore:**

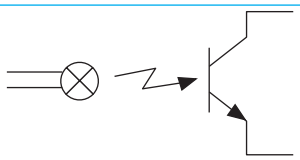


FIGURA **59**

A pneumatico
B magnetico
C ottico
D elettromeccanico

**5** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **60** **rappresenta una valvola:**

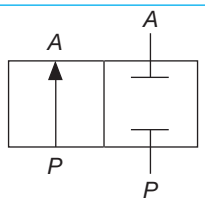



FIGURA **60**

A 2/2
B 3/2
C 5/2
D 4/3



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**6** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **61** **rappresenta una valvola:**

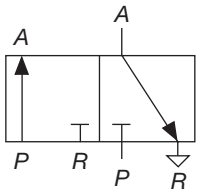



FIGURA **61**

A 2/2
B 3/2
C 5/2
D 4/3

**7** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **62** **rappresenta una valvola:**

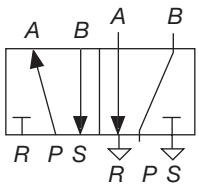



FIGURA **62**

A 2/2
B 3/2
C 5/2
D 4/3

**8** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **63** **rappresenta una valvola:**

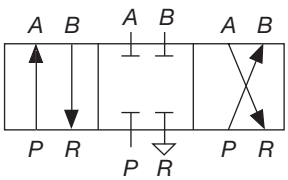



FIGURA **63**

A 2/2
B 3/2
C 5/2
D 4/3

**9** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **64** **rappresenta:**

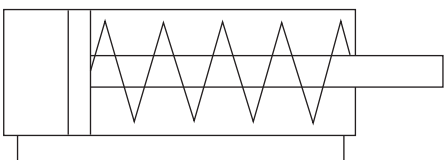


FIGURA **64**

A un cilindro a doppio effetto
B una valvola a due vie e due posizioni
C una valvola a tre vie e due posizioni
D un cilindro a semplice effetto

**10** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **65** **rappresenta:**

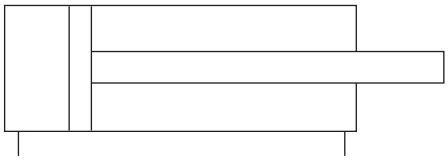


FIGURA **65**

A un cilindro a doppio effetto
B una valvola a due vie e due posizioni
C una valvola a tre vie e due posizioni
D un cilindro a semplice effetto

**11** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **66** **rappresenta una valvola:**

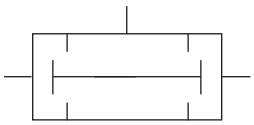


FIGURA **66**

A AND
B NAND
C OR
D NOT

**12** **Il simbolo riprodotto in** FIGURA **67** **rappresenta una valvola:**

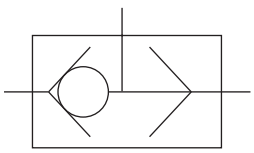


FIGURA **67**

A AND
B NAND
C OR
D NOT

**13** **Una valvola selettrice è una porta:**

A AND
B NAND
C OR
D NOT



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# Controllori a logica programmabile

# 5

## 1 Concetti introduttivi

L'elemento più tipico per realizzare il comando e il controllo di apparecchiature elettriche, in particolar modo nel campo industriale, è il dispositivo digitale noto come **controllore logico programmabile** o sinteticamente **PLC**.

È un apparecchio simile a un computer che può comunicare facilmente con l'ambiente esterno senza ricorrere a particolari tecniche di interfacciamento.

Prima dell'avvento del PLC che risale agli anni '70 i sistemi di controllo di *processi e movimentazioni industriali* venivano realizzati in logica cablata; si trattava di *sistemi scarsamente flessibili* in quanto qualsiasi modifica della sequenza logica ne richiedeva una della parte materiale del sistema (*hardware*).

Con l'avvento del PLC i sistemi sono diventati *flessibili* in quanto una variazione della sequenza logica non altera la parte materiale del sistema (*hardware*) ma implica una più semplice modifica della programmazione (*software*).

Con la logica cablata ingressi e uscite sono collegati tramite fili, con la logica programmata tramite software.

I componenti tipici della logica cablata non sono scomparsi ma sono stati adattati alle nuove tecnologie.

### 1.1 Funzioni principali del PLC

Le principali funzioni che devono essere svolte da un *dispositivo di comando e controllo* realizzato con tecnologie elettroniche digitali come il PLC sono le seguenti:

- *simulazione*;
- *realizzazione*;
- *visualizzazione*;
- *comando*;
- *controllo*.

#### Simulazione

Nella progettazione di un impianto è spesso utile potersi rendere conto del suo funzionamento prima ancora di doverlo effettivamente realizzare,



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

mediante un'opportuna *simulazione*; ciò è tanto più importante quanto più è complessa e costosa l'apparecchiatura in questione.

Ciò è possibile realizzando:

- un *modello* del circuito che può di volta in volta essere una sua *riproduzione in scala*;
- la costruzione di un impianto anche del tutto diverso da quello originale ma a esso *analogo* almeno per qualche aspetto;
- lo *studio teorico* basato sulle sue equazioni di funzionamento.

Un *controllore programmabile* realizza per certi versi tutte e tre le funzioni descritte.

Consente infatti di simulare il funzionamento del circuito ricorrendo a una rete logica del tutto analoga a quella da studiare che rappresenta inoltre la riproduzione fedele delle espressioni algebriche che la governano.

### Realizzazione

La rete ricostruita all'interno del PLC a partire da quella data non ha un significato solo virtuale, ma è in grado di adempiere effettivamente ai compiti richiesti mediante la realizzazione dei circuiti necessari alla funzione di comando.

A ogni pressione dei pulsanti di comando gli utilizzatori collegati, in obbedienza alla logica di funzionamento, vengono attivati mediante la connessione elettrica alle rispettive alimentazioni, permettendo così di utilizzare l'apparecchiatura per i compiti elettrici ai quali è destinata.

### Visualizzazione

Il PLC consente in genere di visualizzare la configurazione della rete realizzata; le caratteristiche di tale prestazione variano a seconda del tipo di macchina usata.

Quando il software usato lo permette è possibile osservare il circuito sul monitor di un computer o su un visore a cristalli liquidi.

È inoltre possibile stampare su carta la struttura della rete, le espressioni algebriche che la realizzano o altre informazioni utili, come la lista degli elementi e le loro caratteristiche, permettendo così all'operatore di verificare la correttezza della realizzazione e di intervenire per eventuali modifiche.

### Comando

Il PLC è particolarmente idoneo a effettuare le funzioni di *comando* necessarie al funzionamento degli elementi detti di *potenza*, realizzando al suo interno la rete logica necessaria a tale scopo.

È così possibile, mediante un'apparecchiatura compatta e di modeste dimensioni, l'azionamento di macchine elettriche di grossa potenza come i motori di un impianto industriale.

Tali caratteristiche non escludono tuttavia la possibilità di impiegare, quali circuiti di comando, reti elettriche o elettroniche *dedicate*, ossia realizzate per rispondere alle particolari necessità di un dato impianto; viene però meno in questo caso l'importante caratteristica della *flessibilità*, che permette a un solo dispositivo di adattarsi alle diverse esigenze che si presentano di volta in volta.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Controllo

I sistemi, di qualunque tipo essi siano, non sempre hanno un funzionamento perfettamente rispondente alle aspettative; nei casi di rilevante importanza è quindi necessario prevedere un controllo delle grandezze caratteristiche per poter intervenire nei casi in cui queste si discostino dai valori corretti realizzando il criterio della *retroazione*.

Nel PLC questo è possibile registrando le grandezze mediante *sensori* e *trasduttori* e riportando i valori elettrici corrispondenti all'ingresso dell'apparecchiatura; sarà compito di quest'ultima, mediante la sua logica di funzionamento, provvedere ad azionare i dispositivi capaci di riportare le grandezze interessate ai valori richiesti.

# 2 Classificazione dei PLC

In relazione a quanto è reperibile in commercio si definiscono due tipologie di PLC rispettivamente denominate:

- *PLC compatti*;
- *PLC modulari*.

Sono due soluzioni nate per diverse fasce di mercato, sia dal punto di vista economico sia da quello delle potenzialità.

Al momento della scelta è importante definire il modello più idoneo all'impianto o macchina per sfruttarne appieno le potenzialità.

## 2.1 PLC compatti

Il *PLC compatto* è stato sviluppato per far fronte a impianti che richiedono la gestione di pochi segnali con una spesa contenuta.

All'interno della gamma di questi PLC si possono trovare:

- *modelli fissi*;
- *modelli espandibili*.

I *modelli fissi* presentano le seguenti caratteristiche:

- possono gestire mediamente circa 40 ingressi/uscite digitali;
- hanno un prezzo molto contenuto;
- l'ingombro è ridottissimo (tipicamente con innesto su guida DIN);
- non hanno alcuna possibilità di espansione.

I *modelli espandibili* invece, pur mantenendo le stesse caratteristiche di quelli fissi (e spesso anche l'estetica è identica) possiedono un connettore per agganciare dei moduli aggiuntivi dotati di ingressi e uscite supplementari.

Per piccole macchine o impianti limitati convengono sicuramente i modelli compatti che vantano anche un buon *rapporto costo per ingresso/uscita*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 2.2 PLC modulari

I *PLC modulari* sono adatti per impianti o macchine complesse, possono gestire oltre 1024 ingressi/uscite, hanno grande flessibilità e un'ampia gamma di moduli.

Un PLC modulare si compone partendo da un telaio vuoto (*rack*) dotato di opportune sedi (*slot*) nel quale è possibile inserire:

- un alimentatore;
- la CPU;
- tutti i *moduli* necessari per svolgere le funzioni che vengono richieste al PLC.

Ogni *modulo* è dotato di *morsettiere* o *connettori* per consentire l'allacciamento agli altri elementi esterni.

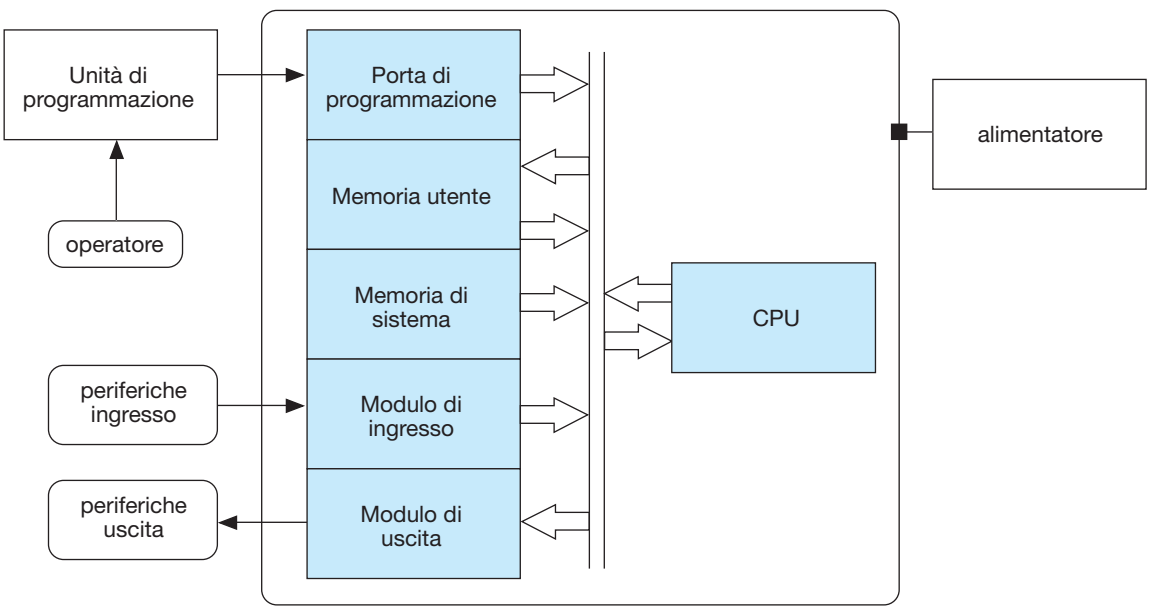
L'*organizzazione modulare* consente una grande flessibilità di adattamento della configurazione e facilita le operazioni di diagnostica e di manutenzione.

# 3 Architettura dei PLC

Come evidenziato nello schema a blocchi funzionale riportato in FIGURA **1** i principali elementi che caratterizzano il sistema dal punto di vista funzionale sono i seguenti:

- l'*unità centrale di processo* o *CPU*;
- la *memoria utente*;
- la *memoria di sistema*;
- il *modulo di ingresso*;
- il *modulo di uscita*.

FIGURA **1**
Schema a blocchi funzionale del PLC.





Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Agli elementi fondamentali citati si aggiunge:

- una *unità di programmazione*, separata dal controllore o integrata con esso, che consente di scrivere il programma e di inviarlo alla CPU;
- un *alimentatore* che provvede a trasformare la tensione alternata monofase di rete a 230 V (quando previsto) nella tensione continua richiesta per il funzionamento dai componenti elettronici interni.

## 3.1 Struttura a bus

La trasmissione e lo scambio di segnali avviene all'interno del PLC attraverso un sistema di collegamenti a bus come quelli utilizzati per i computer.

I diversi blocchi funzionali interni al PLC sono collegati in parallelo tramite i *bus* che costituiscono il canale di collegamento che attua le connessioni tra di essi.

Uno scambio tra due blocchi, per esempio tra memoria e unità di I/O (unità di ingresso/uscita), avviene in due fasi; il dato viene trasferito:

- nella prima fase dalla memoria alla CPU;
- nella seconda fase dalla CPU all'unità di I/O.

Con l'impiego della struttura a *bus* anziché collegare fra loro i diversi blocchi si utilizza un'unica connessione a cui essi accedono a due a due in tempi diversi.

Si ha quindi un duplice vantaggio:

- una semplificazione nei collegamenti;
- una struttura espandibile (se si vuole infatti aggiungere un'ulteriore unità è sufficiente collegarla al bus tramite il cosiddetto *pettine di espansione*).

In relazione al tipo di segnale trasportato si distinguono tre tipologie di bus rispettivamente denominate:

- **bus indirizzi**, riservato agli indirizzi di memorie e periferiche;
- **bus dati**, riservato ai dati che vengono scambiati all'interno del PLC e con le periferiche;
- **bus controlli**, riservato ai segnali di comando e controllo dello svolgimento delle funzioni all'interno del PLC.

Il numero di linee che formano il bus indirizzi è legato al numero massimo disponibile di locazioni di memoria e periferiche; un bus indirizzi a 16 bit ne può individuare fino a 65 536.

Il numero di linee che formano il bus dati rende conto del numero di bit che possono essere trattati contemporaneamente (per esempio 8, 16, 32).

# 4 Unità centrale di processo

▶ L'*unità centrale di processo* (*CPU*) è la parte più importante del PLC, è l'unità che governa l'intero sistema.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Nella CPU risiedono i circuiti che gestiscono tutte le attività del PLC.

Il **microprocessore**, simile a quelli utilizzati nei computer ma di uso più specializzato, è l'elemento fondamentale della CPU che svolge le operazioni di calcolo e controllo.

## 4.1 Funzionamento

I compiti che vengono assolti dalla CPU differiscono in relazione alla *fase operativa* in cui la CPU stessa lavora e in particolare:

- *all'avviamento*;
- *durante l'esecuzione del programma.*

### Avviamento

Tra i numerosi compiti della CPU si evidenziano in particolare quelli che essa svolge al momento dell'accensione:

- esegue un *autotest* che controlla le principali condizioni di funzionamento, rivelando per esempio un guasto della batteria o una caduta di tensione;
- controlla e assicura costantemente la trasmissione interna dei dati e la loro correttezza (in caso di errore la trasmissione viene automaticamente ripetuta);
- attiva un segnale di allarme o disinserisce completamente l'apparecchio quando si verificano condizioni di esercizio potenzialmente dannose per il sistema.

### Esecuzione del programma

Nella fase di esecuzione del programma la CPU si occupa delle seguenti attività fondamentali:

- *scansione del programma*;
- *lettura degli ingressi*;
- *pilotaggio delle uscite.*

Le operazioni descritte sono strettamente collegate tra loro.

La sequenza di esecuzione varia in relazione alla tipologia di scansione adottata per il PLC.

▶ Più precisamente con il termine **scansione** si intende l'intervallo di tempo necessario per eseguire un ciclo del programma.

Alternativamente si può definire il **tempo di ciclo** come il tempo necessario alla CPU per eseguire le operazioni contenute nel programma.

Le **tipologie di scansione** più frequenti vengono definite:

- *scansione sincrona di ingressi e uscite*;
- *scansione asincrona di ingressi e uscite.*

La prima tipologia è tipica dei PLC di basso livello, la seconda viene adottata nei PLC di medio e alto livello.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **2** viene schematizzata la sequenza delle operazioni che vengono svolte nel caso di **scansione sincrona degli ingressi e delle uscite**.

La sequenza operativa prevista è la seguente:

- il PLC legge lo stato degli ingressi contemporaneamente all'inizio del ciclo;
- conserva in memoria i valori acquisiti in quell'istante per tutta la durata del ciclo;
- i risultati prodotti dall'elaborazione sequenziale del programma vengono conservati in memoria per essere poi utilizzati per l'attivazione delle uscite.

FIGURA **2**
Scansione sincrona degli ingressi e delle uscite.

In FIGURA **3** viene schematizzata la sequenza delle operazioni che vengono svolte nel caso di **scansione asincrona degli ingressi e delle uscite**.

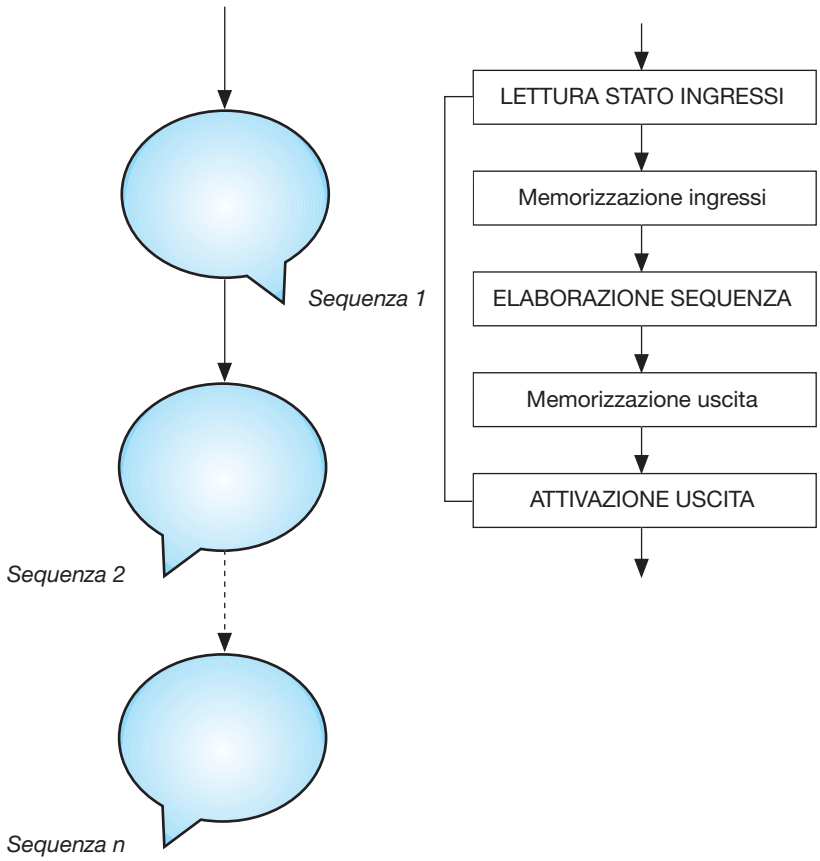



FIGURA **3**
Schematizzazione della scansione asincrona degli ingressi e delle uscite.

La sequenza operativa prevista è la seguente:

- il PLC elabora una dopo l'altra delle sequenze di istruzioni;
- legge lo stato degli ingressi che compaiono in quella sequenza;
- li memorizza;
- li utilizza durante la fase di elaborazione della sequenza per definire il valore dell'uscita;
- memorizza tale valore e attiva l'uscita stessa;
- passa alla sequenza successiva.

Il procedimento si ripete fino all'ultima sequenza.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 4.2 Prestazioni

Le principali caratteristiche che rendono conto delle prestazioni offerte da una CPU sono:

- numero di ingressi e uscite a disposizione;
- velocità di scansione per 1000 istruzioni;
- numero e tipologia delle istruzioni eseguibili;
- massima dimensione del programma;
- tipologia dei moduli aggiuntivi che si possono collegare;
- possibilità di interfacciamento con computer e altri PLC.

I tempi di elaborazione delle istruzioni e quindi dei programmi da parte della CPU differiscono in relazione alla tipologia del PLC.

Per esempio alcuni PLC tra i più economici richiedono tempi di elaborazione dell'ordine di 10-70 ms per una scansione di 1 kB di istruzioni.

I PLC più potenti possono elaborare 1 kB di istruzioni in un ms.

Nella TABELLA **1** vengono messe a confronto alcune caratteristiche tipiche dei PC e dei PLC.

| Caratteristica | PC | PLC |
|---|---|---|
| Velocità spostamento dati | > 500 000 kB/s | < 10 kB/s |
| Dimensione programmi | > 10 000 kB | < 10 kB |
| Operazioni binarie tipiche | spostamento di 32 bit | operazioni su 1 bit singolo |
| Frequenza microprocessore | > 1 GHz | < 100 MHz |
| Funzionamento tipico | 8 ore al giorno | 24 ore su 24 |
| Immunità a disturbi elettrici | scarsa | elevata |
| Condizioni ambientali | interno climatizzato | da 0 a 55 °C |
| Programmazione | compilata | diretta |

TABELLA **1** Confronto tra caratteristiche dei PC e dei PLC.

## 4.3 Caratteristiche del microprocessore

Ogni costruttore di PLC sceglie il microprocessore più adatto alle prestazioni che vuole fornire al suo sistema in particolar modo in termini di potenza (numero di bit trattati in parallelo) e velocità di esecuzione delle operazioni elementari.

Si hanno in particolare:

- PLC dotati di microprocessori reperibili normalmente sul mercato (*multipurpose*);
- PLC dotati di microprocessori progettati esclusivamente per queste applicazioni (*custom*).

La differenza tra le due soluzioni non è rilevante agli effetti del funzionamento del sistema.

La prima soluzione è meno costosa.

Con la seconda soluzione si hanno vantaggi notevoli in fase di programmazione con istruzioni ottimizzate che fanno risparmiare tempo al programmatore e risorse di memoria al PLC.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 5 Memorie

Le memorie del controllore programmabile sono dello stesso tipo di quelle usate per i computer e cioè:

- *memorie di sola lettura (ROM)*;
- *memorie di lettura e scrittura (RAM)*;
- *memorie programmabili cancellabili (EPROM)*;
- *memorie elettricamente alterabili (EAROM, EEPROM)*.

La *memoria ROM* costituisce la **memoria di sistema** che immagazzina le impostazioni e le istruzioni di base necessarie per l'avvio del lavoro delle apparecchiature programmabili.

Le memorie *EPROM* vengono universalmente impiegate al posto delle *ROM* per contenere il software di funzionamento dei PLC.

La *memoria RAM* costituisce la **memoria utente** che immagazzina i programmi e i dati necessari per l'elaborazione.

Le memorie *EAROM* ed *EEPROM* vengono affiancate alle *RAM* con lo scopo di disporre di una zona di memoria (a volte fisicamente costituita da una *cartuccia asportabile*), ove memorizzare il programma utente.

# 6 Periferiche

I moduli d'ingresso e d'uscita mettono in comunicazione il PLC con l'ambiente che lo circonda e in particolare con il sistema che si vuole controllare.

Il loro compito è duplice:

- acquisire e adattare i segnali provenienti dalle *periferiche d'ingresso*;
- comandare tramite opportuni segnali le *periferiche d'uscita*.

Il primo compito viene assolto dai moduli d'ingresso, il secondo da quelli d'uscita.

In relazione alla tipologia di segnale che viene coinvolto si hanno moduli digitali e moduli analogici.

Con riferimento a un PLC compatto, in FIGURA **4** viene rappresentato un esempio di disposizione di ingressi e uscite che coinvolgono segnali digitali.

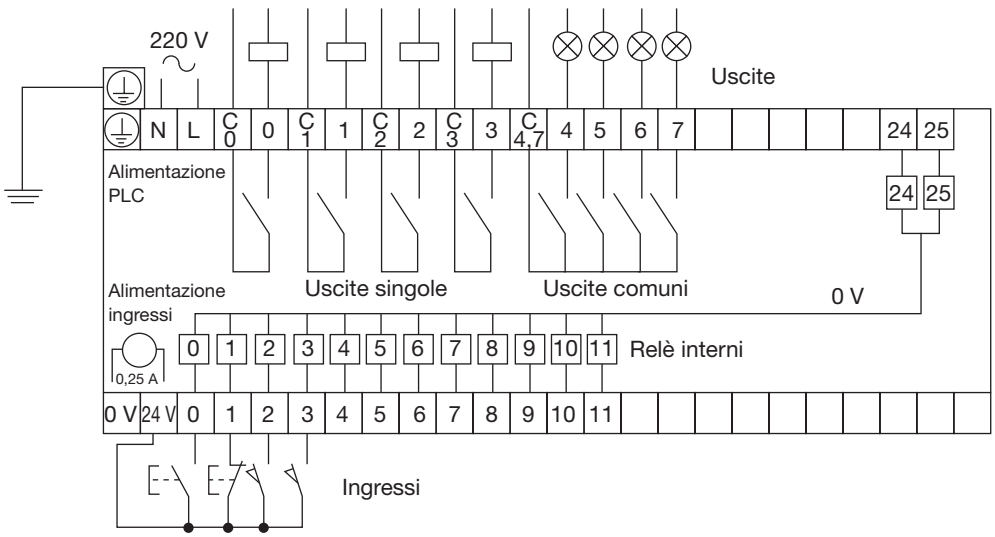



FIGURA **4**
Esempio di disposizione di ingressi e uscite di un PLC.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In questo caso gli ingressi acquisiscono i segnali provenienti da pulsanti e contatti di finecorsa; le uscite forniscono i segnali di comando per dispositivi di segnalazione luminosa e bobine di contattori.

Si osservi in particolare che:

- gli ingressi sono collegati a relè posti all'interno del PLC (relè interni);
- le uscite sono collegate a contatti NO sempre posti all'interno del PLC.

Sia i segnali d'ingresso sia quelli d'uscita sono evidentemente segnali digitali.

## 7 Alimentazione

Al momento dell'acquisto di un PLC, sia per i compatti sia per i modulari, occorre scegliere il tipo di alimentazione tra quelli a disposizione.

Normalmente si può scegliere tra queste due possibilità:

- alimentazione in continua a 24 V;
- alimentazione in alternata a 230V-50/60 Hz.

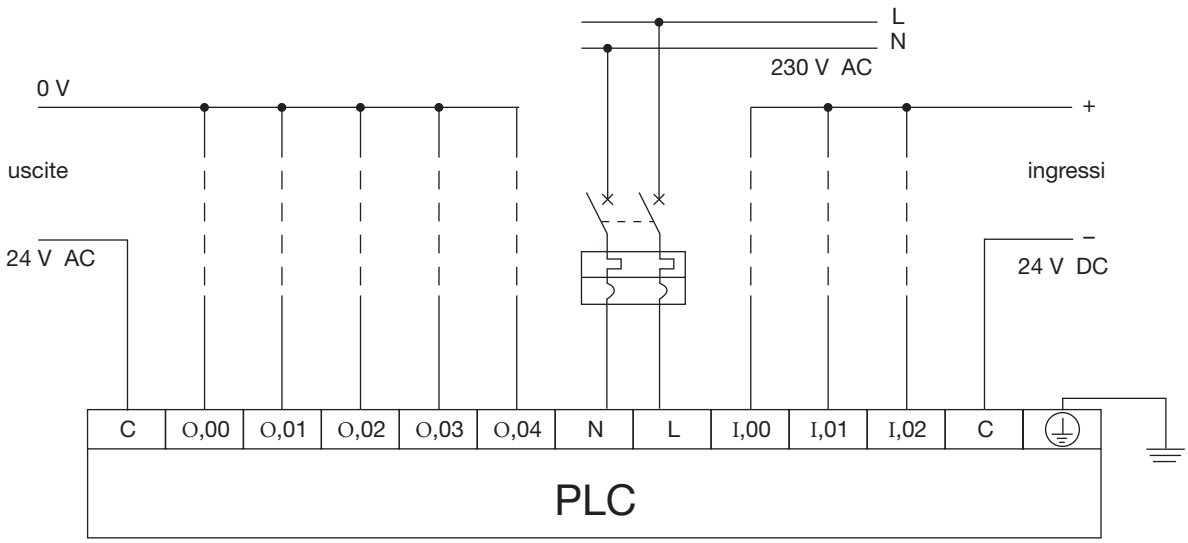
I modelli a 24 V occupano meno spazio e sono meno costosi ma necessitano di un alimentatore stabilizzato.

I modelli a 230 V, di dimensioni maggiori, permettono all'utente di prelevare anche un'alimentazione continua a 24 V-200/300 mA da utilizzare per gli ingressi.

Il PLC viene alimentato in alternata monofase attraverso un interruttore con protezione magnetotermica.

Un esempio di schema di alimentazione viene riportato in FIGURA **5**.

FIGURA **5**
Esempio di alimentazione di un PLC.




Per l'**alimentazione degli ingressi e delle uscite** sono possibili soluzioni differenti.

Nell'esempio l'alimentazione è esterna; per gli ingressi avviene in continua a tensione ridotta, per le uscite in alternata sempre a tensione ridotta.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 8 Terminale di programmazione

II programma viene generalmente digitato mediante una tastiera e, prima di essere inviato in memoria, visualizzato su un *display*; ogni istruzione può eventualmente essere ricercata, corretta, cancellata o inserita con facilità.

Le operazioni citate possono essere effettuate attraverso un **terminale di programmazione**, denominato anche *console*, dotato di una propria memoria (*buffer*).

Il terminale consente l'inserimento, nella memoria del controllore, della sequenza di istruzioni che fanno parte del programma.

I codici usati per la programmazione vengono trasformati in *istruzioni-macchina* direttamente comprensibili ed eseguibili dal controllore.

Mentre negli elaboratori il microprocessore traduce le istruzioni e poi le esegue, nel PLC queste due funzioni sono generalmente separate; si hanno così:

- il microprocessore di compilazione (dentro alla console);
- il microprocessore di esecuzione (dentro al PLC).

La console può essere integrata nel PLC o separata da esso.

Nel primo caso l'utilizzatore è costretto ad acquistare tante console quanti sono i controllori che deve installare.

Nel secondo caso questa necessità viene meno ma la console risulta spesso più costosa.

Le console più evolute sono in grado di svolgere le seguenti principali funzioni:

- *stesura del programma*;
- *verifica di correttezza del programma*;
- *caricamento dei dati*;
- *controllo di esecuzione del programma*;
- *salvataggio e caricamento dei programmi.*

La **stesura del programma** consiste nel passaggio dal linguaggio tipico del PLC al linguaggio macchina; ciò avviene attraverso le seguenti fasi:

- introduzione del programma mediante tastiera;
- visualizzazione delle singole istruzioni;
- modifica o spostamento delle istruzioni già inserite;
- rivelazione degli errori di sintassi con segnalazione all'operatore.

La **verifica di correttezza del programma** consiste nell'assegnare uno stato a ciascuno degli ingressi indipendentemente dalla reale situazione fisica in cui si trovano e nel visualizzare le uscite corrispondenti per mezzo di LED.

La fase di verifica è molto importante ai fini pratici in quanto rende possibile il controllo del funzionamento dell'impianto evitando così i danni che si avrebbero sull'impianto stesso a seguito di eventuali errori di programmazione.

La funzione di **caricamento dati** permette di inserire o modificare degli operandi nel programma eventualmente anche nel corso della sua esecuzione.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il **controllo di esecuzione del programma** permette di visualizzare, istruzione per istruzione, il contenuto dei registri interni della CPU e di locazioni di memoria selezionate, con modalità simili a quelle dell'operazione di *debug* tipica dei computer; si può comandare l'esecuzione passo per passo o l'arresto in corrispondenza di determinate istruzioni o valori di ingressi o uscite.

Il **salvataggio e il caricamento dei programmi** può essere effettuato tramite supporti magnetici o supporti elettronici programmabili.

Mediante un programmatore *EPROM* si possono incidere su memorie non volatili i programmi che devono risiedere permanentemente nel PLC anche in caso di interruzione dell'alimentazione.

Questa funzione permette di archiviare i programmi sviluppati in vista di un utilizzo successivo o di inserire in memoria programmi scritti in precedenza o provenienti da altre fonti.

# 9 Acquisizione di ingressi

I segnali che provengono dalle periferiche d'ingresso possono essere:

- digitali;
- analogici.

## 9.1 Ingressi digitali

Gli *ingressi digitali* acquisiscono i segnali provenienti da dispositivi a scatto come pulsanti, interruttori, sensori di finecorsa; la loro posizione determina, come evidenziato dal particolare del PLC riportato in FIGURA **6**, lo stato dei relè interni ai quali sono collegati.

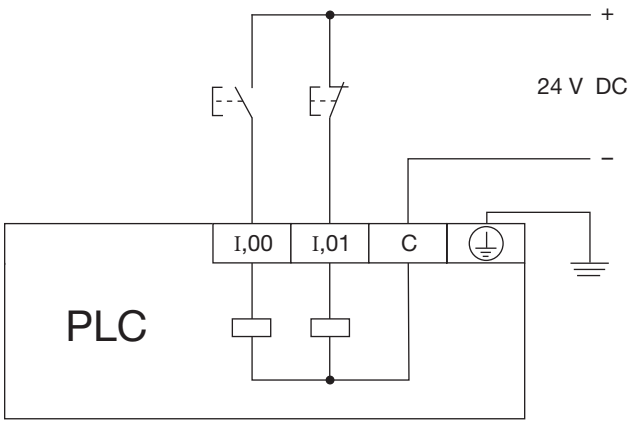



FIGURA **6**
Esempio di periferiche d'ingresso di un PLC.

Nel caso proposto in figura risulta che:

- l'ingresso contrassegnato con I,00 acquisisce lo stato del pulsante NO;
- premendo il pulsante NO si eccita il relè interno corrispondente;
- l'ingresso contrassegnato con I,01 acquisisce lo stato del pulsante NC;
- premendo il pulsante NC si diseccita il relè interno corrispondente.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Ingressi ad alta velocità

Gli ingressi digitali non possono acquisire segnali che variano troppo velocemente nel tempo; generalmente affinché un ingresso venga letto dal programma deve permanere almeno 0,5 s.

Vi sono alcuni modelli di PLC provvisti di *ingressi per segnali digitali ad alta velocità* utilizzati per acquisire segnali provenienti da encoder o altri dispositivi simili che emettono impulsi ad alta velocità.

### Interfacciamento

Per assicurare la massima immunità ai disturbi i moduli sono dotati di *circuiti optoelettronici* che realizzano una *separazione galvanica* fra il segnale in campo (quello che proviene dalle periferiche) e il medesimo segnale all'interno del PLC.

Del circuito elettronico fa parte l'*optoisolatore* che trasferisce il segnale tramite emissione luminosa e non attraverso un collegamento elettrico.

In FIGURA **7** viene riportato un esempio di collegamento.

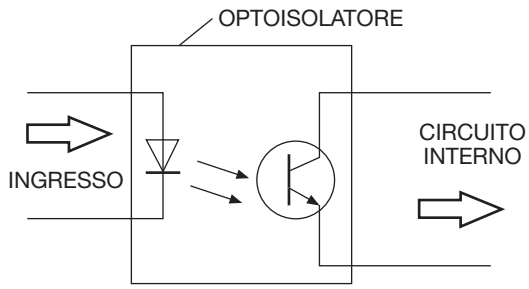



FIGURA **7**
Collegamento tramite optoisolatore.

I dispositivi a scatto non producono sempre un segnale perfettamente identificabile; affinché non si verifichino errori nel riconoscimento dei segnali stessi i PLC sono provvisti di appositi circuiti che provvedono a:

- *filtrare* i segnali di ingresso rispetto ai disturbi a essi sovrapposti;
- *eliminare* i segnali spuri dovuti al rimbalzo dei contatti dei dispositivi;
- *squadrare* il segnale quando non sia perfettamente digitale.

## 9.2 Ingressi analogici

Gli *ingressi analogici* acquisiscono i segnali provenienti da tutti quei dispositivi (come per esempio sensori di livello, di pressione, di temperatura) caratterizzati da valori continui delle variabili (*grandezze analogiche*) e li convertono in valori discreti (*grandezze digitali*).

I moduli d'ingresso analogici opportunamente predisposti sono in grado di acquisire sia segnali in tensione (per esempio compresi nell'intervallo 0÷10V) sia segnali in corrente (per esempio nell'intervallo 0÷20 mA).

Per acquisire segnali non normalizzati provenienti da dispositivi come termocoppie o termoresistenze è necessario usare moduli speciali o, qualora non fossero reperibili, provvedere ad acquistare la termocoppia o la termoresistenza completi di un ulteriore dispositivo che fornisca un segnale normalizzato.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Conversione A/D

Per potere essere trattata in modo opportuno dal PLC la grandezza analogica deve essere trasformata in grandezza digitale utilizzando un dispositivo opportunamente predisposto denominato **convertitore A/D** (*convertitore analogico/digitale*).

La **precisione** con cui viene convertita una grandezza analogica è tanto più elevata quanto maggiore è il numero di bit che esprime tale grandezza o, in altri termini, quanto maggiore è il numero di suddivisioni effettuate sulla grandezza stessa.

Con considerazioni analoghe viene definita la **risoluzione** intendendo con tale termine la minima variazione del segnale analogico avvertita dal convertitore.

In FIGURA **8** viene riprodotta una rappresentazione schematica di un convertitore A/D a 8 bit.

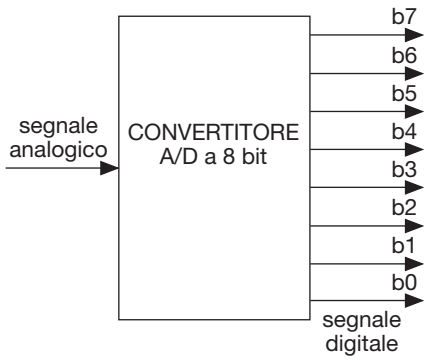



FIGURA **8**
Convertitore A/D a 8 bit.

Le combinazioni possibili per il segnale digitale sono:

- 256 combinazioni se il convertitore è a 8 bit;
- 1024 combinazioni se il convertitore è a 10 bit;
- 4096 combinazioni se il convertitore è a 16 bit.

In FIGURA **9** viene riportato un esempio di rappresentazione a gradini della grandezza convertita facendo riferimento, per motivi di spazio, a una conversione a 3 bit.

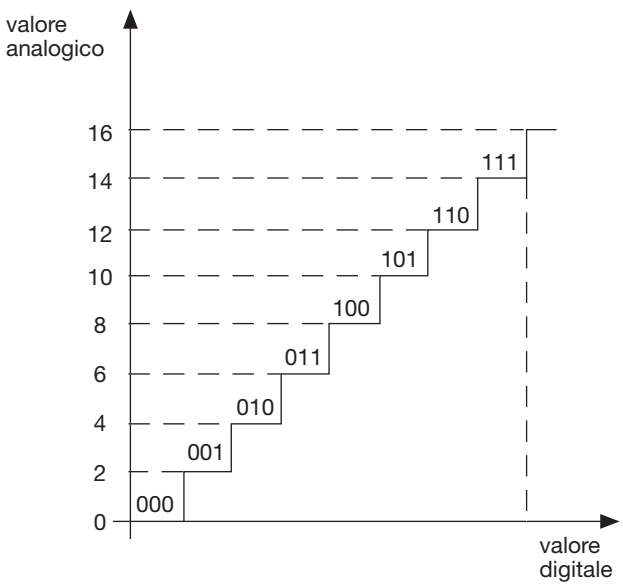



FIGURA **9**
Rappresentazione a gradini della grandezza convertita.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Se la grandezza analogica è per esempio una tensione variabile tra 0 e 16 V la risoluzione sarà di 2 V.

Nel caso di ingressi analogici multipli prima del convertitore deve essere inserito un multiplexer che rende possibile l'acquisizione di un segnale per volta a scapito di un aumento del tempo di acquisizione dati.

Un esempio di impiego della tecnica del multiplexer viene proposto in FIGURA **10**.

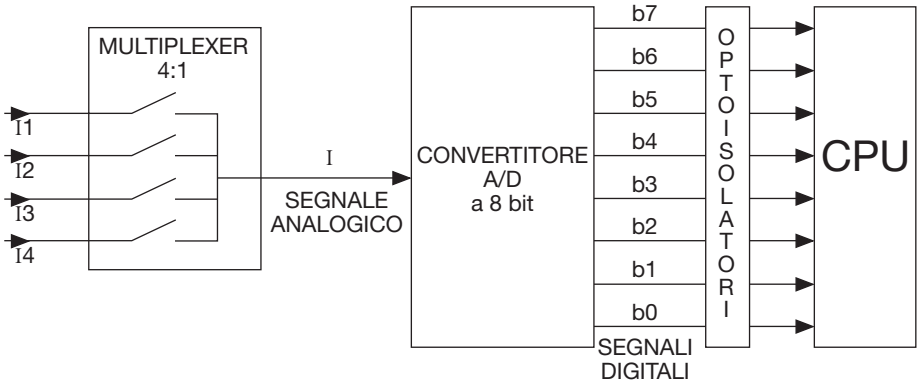



FIGURA **10**
Tecnica del multiplexer per gli ingressi analogici.

Il multiplexer rappresentato in figura rende possibile la commutazione di quattro segnali d'ingresso; tra convertitore a 8 bit e CPU viene interposto un optoisolatore.

# 10 Comando di uscite

I segnali che comandano le periferiche d'uscita possono essere:

- digitali;
- analogici.

## 10.1 Uscite digitali

Le *uscite digitali* consentono di agire su carichi pilotabili tramite segnali digitali come bobine di contattori o lampade di segnalazione.

Come viene evidenziato in FIGURA **11**, le uscite possono essere rappresentate da un insieme di contatti ai quali vanno collegati gli utilizzatori.

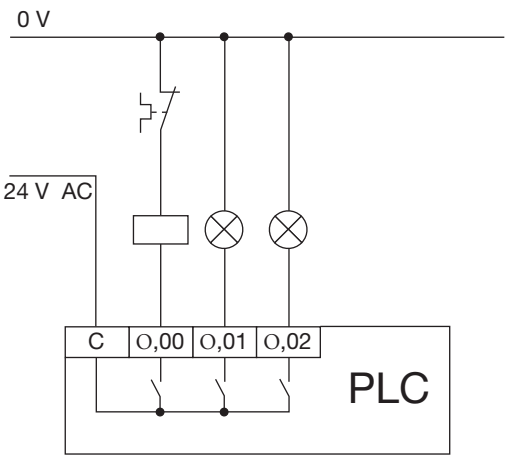



FIGURA **11**
Esempio di periferiche d'uscita di un PLC.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Nel caso proposto in figura risulta che:

- la bobina del contattore si eccita se il contatto interno corrispondente all'uscita contrassegnata con O,00 si chiude;
- le lampade di segnalazione si accendono quando i contatti interni corrispondenti alle uscite contrassegnate con O,01 e O,02 si chiudono.

Il dispositivo di comando del modulo d'uscita può essere elettronico (*transistor*, *triac*, *tiristori*) o elettromeccanico (*relè interni*).

La scelta dipende dalle caratteristiche elettriche del circuito da comandare, per esempio in corrente continua o alternata, dal valore della corrente o dal numero di manovre al minuto.

Nei dispositivi di tipo elettronico, tipicamente usati per realizzare i *circuiti di comando*, i livelli di tensione sono in genere molto bassi (dell'ordine di pochi volt) e quindi inadatti a controllare bobine capaci di azionare contatti di potenza.

Mediante alcuni accorgimenti circuitali è tuttavia possibile aumentare l'intensità delle correnti di pilotaggio; una ulteriore limitazione per l'interfacciamento deriva dal fatto che i normali dispositivi elettronici sono alimentati in corrente continua.

Occorre inoltre tenere presente la necessità di isolare elettricamente i delicati circuiti interni di un PLC o di una scheda elettronica di comando dalle influenze esterne, quali corti circuiti, forze elettromotrici indotte, archi elettrici e disturbi vari.

Di seguito sono descritti i metodi di interfacciamento normalmente adottati; essi sono:

- *comando diretto*;
- *pilotaggio con transistor*;
- *pilotaggio Darlington*;
- *pilotaggio con transistor e relè*;
- *isolamento ottico*.

### Comando diretto

Si può adottare il *comando diretto* quando la tensione di uscita di una rete logica è compatibile con quella del carico; il metodo consiste nella semplice connessione dei conduttori di uscita al carico, a volte con l'interposizione di una resistenza per abbassare i valori di corrente.

### Pilotaggio con transistor

Polarizzando un *transistor* in modo opportuno è possibile far lavorare il transistor stesso nelle zone di interdizione e di saturazione; il transistor diventa in queste condizioni un interruttore utilizzabile quindi come interfaccia per il comando delle uscite.

### Pilotaggio Darlington

Quando la corrente di uscita di un transistor non è sufficiente ad alimentare il carico è possibile ricorrere a una **connessione Darlington**.

Si tratta in pratica di un collegamento serie tra due transistor ottenuto collegando l'emettitore del primo con la base del secondo; la cor-


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

rente di collettore di quest'ultimo transistor risulta così notevolmente aumentata.

In FIGURA **12** viene riportato lo schema della connessione Darlington.

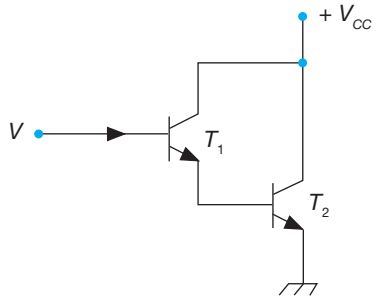



FIGURA **12**
Schema della connessione Darlington.

## Pilotaggio con transistor e relè

Si realizza inserendo il transistor sul circuito di comando e in particolare sul collettore del transistor, il contatto del relè sul circuito di potenza.

L'uso del relè in un circuito di interfacciamento assolve alle seguenti funzioni:

- *separare elettricamente* il circuito su cui è collocato il transistor da quello di uscita al quale per esempio viene collegato un carico induttivo;
- *amplificare le correnti* che il transistor non potrebbe sopportare;
- *pilotare una corrente alternata* con la corrente continua assorbita dal transistor.

È opportuno mettere in evidenza che un carico induttivo pone problemi negli istanti di interruzione della corrente quando per la legge dell'induzione elettromagnetica la corrente stessa tende a proseguire il proprio passaggio.

In questi casi è opportuno ricorrere a un diodo polarizzato inversamente e collegato in parallelo alla bobina.

La corrente reattiva prodotta dalla f.e.m. indotta viene così assorbita dal diodo senza ulteriori conseguenze per il resto del circuito.

In FIGURA **13** viene riportato lo schema di pilotaggio con transistor e relè.

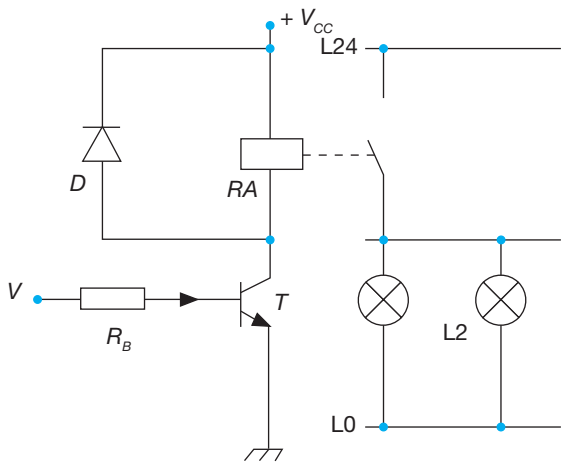



FIGURA **13**
Schema di pilotaggio con transistor e relè.

## Isolamento ottico

La realizzazione di un isolamento elettrico tra circuito di comando e circuito di potenza può essere affidata anche a un **optoisolatore**, dispositivo costituito da un LED associato a un *fototransistor* il cui funzionamento è stimolato dalla luce ricevuta sulla sua superficie.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 10.2 Uscite analogiche

Le *uscite analogiche* agiscono su carichi pilotabili tramite segnali analogici; si cita come esempio il controllo della velocità di un motore o della portata di una condotta.

Ogni uscita è la rappresentazione analogica del valore numerico codificato su una serie di bit forniti dal programma del PLC.

I dispositivi di interfacciamento svolgono, in senso inverso, le stesse funzioni tipiche dei dispositivi utilizzati per l'acquisizione di segnali analogici.

Il **convertitore D/A** (*convertitore digitale-analogico*) opera nel modo seguente:

- acquisisce le grandezze sotto forma digitale elaborate dal PLC in relazione alle specifiche del programma;
- le trasforma nel valore analogico corrispondente;
- le trasmette alla periferica adatta a ricevere il segnale analogico (in tensione o in corrente).

# 11 Sicurezza

Un impianto realizzato utilizzando un PLC deve garantire condizioni di sicurezza che, ai sensi della norma EN 60204-1, deve essere gestita obbligatoriamente da logiche cablate.

Questo è previsto anche dalla *norma CEI 44-5* che affida la sicurezza dell'impianto esclusivamente a componenti elettromeccanici (per esempio quando si stabilisce di ricorrere a un *arresto di categoria 0* che prevede l'interruzione immediata del circuito di potenza agli attuatori).

Le caratteristiche di sicurezza devono essere garantite applicando i seguenti criteri fondamentali di:

- *autocontrollo* (verifica automatica del funzionamento degli elementi dell'impianto);
- *ridondanza* (raddoppio dei singoli elementi dell'impianto);
- *sicurezza positiva* (messa in sicurezza dell'impianto a seguito di interventi di circuiti di protezione in caso di guasto).

Un PLC pertanto non può sostituire completamente un circuito di comando ma soltanto quelle parti che riguardano l'elaborazione dei dati.

Compito del programmatore è di produrre un software che renda l'impianto sicuro e lo metta contemporaneamente al riparo da responsabilità in caso di guasto della macchina.

## 11.1 Considerazioni pratiche

Le considerazioni che seguono riguardano l'impiego dei pulsanti di comando e il collegamento dei dispositivi preposti alla sicurezza.

I criteri generali relativi all'uso dei contatti dei pulsanti sono i seguenti:

- per i pulsanti di avvio impianto si utilizza il contatto NA;
- per i pulsanti di arresto si utilizza il contatto NC;
- per i finecorsa di arresto si utilizza il contatto NC.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Per quanto riguarda i dispositivi preposti alla sicurezza dell'impianto si riassumono alcuni degli accorgimenti che si devono attuare:

- *interblocchi* che rendano impossibile il comando simultaneo da parte di più pulsanti che hanno funzioni diverse o addirittura opposte;
- *interblocchi* che impediscano l'azione di comandi manuali mentre una macchina sta funzionando seguendo un ciclo automatico;
- *interblocchi* che impediscano al software stesso di attivare sequenze di lavorazione tra loro incompatibili;
- *ridondanza degli ingressi* realizzata collegando al PLC entrambi i contatti di ogni componente (sia il contatto NA sia il contatto NC) in modo tale che il PLC possa individuare un guasto in caso di cavo interrotto (entrambi i contatti aperti) o in cortocircuito (entrambi i contatti chiusi).

Per i componenti preposti alla sicurezza (per esempio relè termici o pulsanti per l'arresto di emergenza) il collegamento al PLC è opzionale.

Quando un dispositivo viene utilizzato con funzioni di sicurezza per portare il segnale al PLC si utilizza il contatto NO in quanto il contatto NC viene cablato con il circuito di sicurezza.

Si conclude l'argomento considerando tre esempi.

Come primo esempio si cita il caso dell'inversione di marcia di un motore; per aumentare la sicurezza, oltre all'interblocco realizzato tramite cablaggio, è opportuno realizzare l'interblocco anche tramite software.

Un secondo esempio è quello di una macchina che per l'avviamento necessita della pressione di due pulsanti distanti tra loro in modo da costringere l'operatore ad avviarli con entrambe le mani.

Per evitare comportamenti non corretti da parte dell'operatore (che per esempio può tenere premuto artificiosamente un pulsante ponendo un peso sopra di esso) è sufficiente che, tramite software, si imponga che la macchina si possa avviare solo se i due pulsanti vengono premuti in un determinato istante ed entro un tempo massimo assegnato.

Un terzo esempio infine riguarda il cablaggio del relè termico nello schema per l'avviamento con inversione di marcia di un motore riportato in FIGURA **14**.

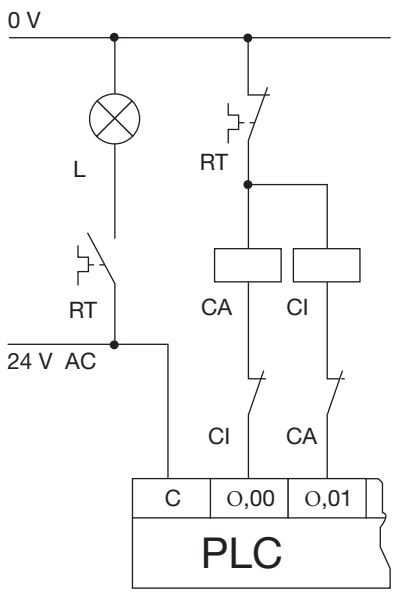



FIGURA **14**
Cablaggio del relè termico e dei contatti di interblocco.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il contatto chiuso del relè termico non si trasforma in elemento software ma viene disposto ancora come elemento hardware a monte della bobina (o, in condizioni particolari, anche a valle).

Anche il contatto aperto del relè termico che comanda la lampada di segnalazione dell'arresto per sovraccarico viene disposto esternamente.

Nello schema si evidenzia anche la presenza dei contatti di interblocco che diventano software ma rimangono anche elementi hardware posti in serie al contatto chiuso del relè termico.

## 12 Normativa

Anche l'impiego del PLC è soggetto a normativa da parte degli enti e comitati tecnici nazionali e internazionali che si occupano della standardizzazione nei diversi settori della tecnologia.

Si distinguono in particolare enti normatori:

- internazionali (ISO e IEC);
- europei (CEN e CENELEC);
- italiani (UNI e CEI).

Le norme ISO, CEN e UNI sono di orientamento generale; le norme IEC, CENELEC e CEI sono specifiche per i settori elettrico ed elettronico.

Le norme generali che coinvolgono la progettazione e la programmazione di un PLC vengono riportate nella TABELLA **2**, quelle specifiche per il PLC nella TABELLA **3**.

TABELLA **2**
Norme generali per la progettazione e la programmazione.

| | IEC | Cenelec | CEI |
|---|---|---|---|
| Impianti elettrici utilizzatori | 364-1 | HD 384 | 64-8 |
| Equipaggiamento elettrico di macchine | 204-1 | EN 60204-1 | 44-5 |

TABELLA **3**
Norme specifiche per il PLC.

| | IEC | Cenelec | CEI |
|---|---|---|---|
| Informazioni generali | 1131-1 | EN 61131-1 | 65-23 |
| Linguaggi di programmazione | 1131-3 | EN 61131-3 | 65-40 |

## 13 Sistemi di comunicazione

L'uso dei dispositivi di comando di tipo elettronico digitale si è talmente consolidato e diffuso a livello industriale da richiedere un'apposita rete di collegamenti fra i vari livelli in cui si può suddividere il loro impiego.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Come avviene di solito nel campo informatico, le strutture in gioco sono sia di tipo *hardware* sia di tipo *software*.

In un **sistema di comunicazione** si distinguono pertanto:

- l'*architettura di comunicazione*;
- i *bus industriali*;
- i *protocolli di comunicazione*.

## 13.1 Architettura di comunicazione

L'*International Standard Organisation* (**ISO**) ha proposto un modello di riferimento di **architettura di comunicazione integrata** denominato *Open Systems Interconnect* (**OSI**) che, suddiviso in sette funzioni essenziali, consente l'interconnessione di sistemi aperti offrendo all'utente la possibilità di operare in ambienti differenti.

Ha avuto così origine lo standard *ISO-OSI*.

Nell'organizzazione aziendale sia industriale sia terziaria si è reso necessario strutturare i sistemi di produzione, di controllo e di gestione per dare luogo a un'*architettura di comunicazione integrata* di tipo *CIM* (*Computer Integrated Manufacturing*).

Si osservi in proposito la FIGURA **15**, che illustra una struttura di automazione industriale e le sigle caratteristiche che la descrivono.

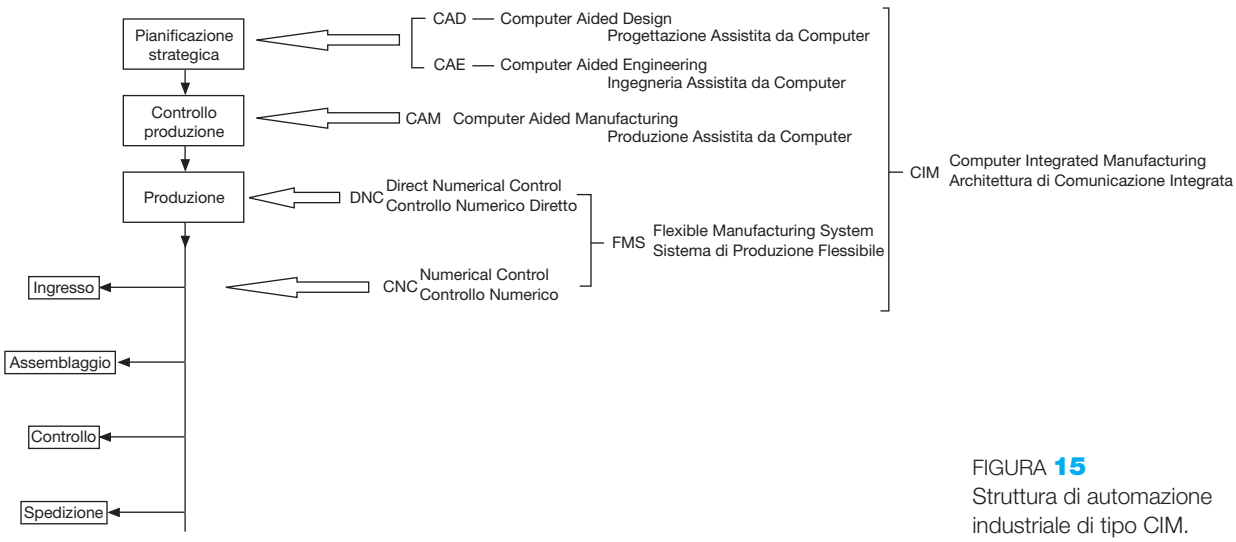



FIGURA **15**
Struttura di automazione industriale di tipo CIM.

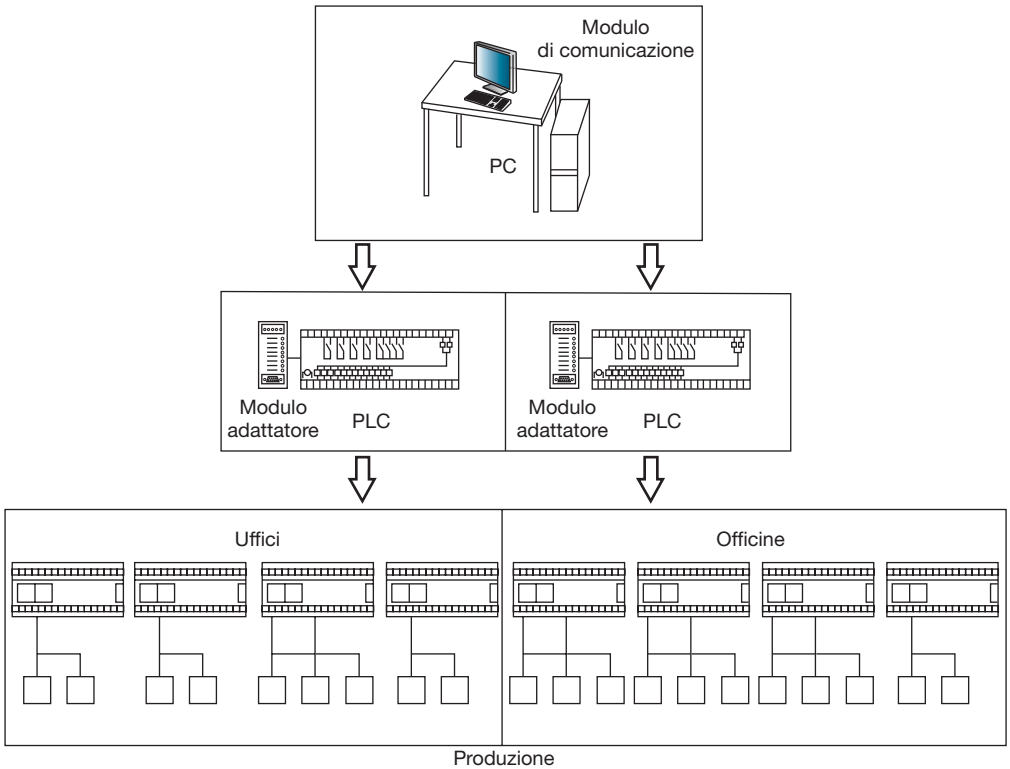
Le macchine, i processi e i vari sistemi sono controllati e comandati direttamente da automatismi che dialogano tra di loro e con il livello superiore mediante moduli di trasmissione con fibra ottica che connettono i *rack* d'estensione equipaggiati con moduli di ricetrasmissione.

La FIGURA **16** illustra schematicamente una struttura gerarchica di comando e di controllo realizzata mediante controllori programmabili.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

FIGURA **16**
Struttura gerarchica di comando e controllo.




## 13.2 Bus industriali

I collegamenti definiti come *bus industriali* consistono in un insieme di mezzi di comunicazione standardizzati atti a convogliare i segnali che uniscono i diversi componenti del sistema fra di loro e con i livelli superiori, come le reti.

Le ditte che costruiscono PLC utilizzano bus con caratteristiche differenti.

Un esempio di collegamento tra *PLC master* e *PLC slave* viene riportato in FIGURA **17**.

Il funzionamento del sistema è il seguente:

- il PLC indicato come *master* gestisce i modi e i tempi della comunicazione tra i PLC indicati come *slave*;
- i PLC indicati come *slave* rappresentano le funzioni di *client* (elemento che assume l'iniziativa della comunicazione) e di *server* (elemento al quale viene inoltrata la richiesta di comunicazione).

## 13.3 Protocolli di comunicazione

I *protocolli di comunicazione* sono strumenti *software* utili a far comunicare fra loro le diverse stazioni, svolgendo una funzione analoga a quella che all'interno di un sistema a microprocessore consente di mettere in comunicazione le varie parti che lo compongono.

In ambito industriale il protocollo maggiormente usato viene denominato *RS485* che garantisce una buona immunità ai disturbi con un'estensione che raggiunge i 1200 m.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

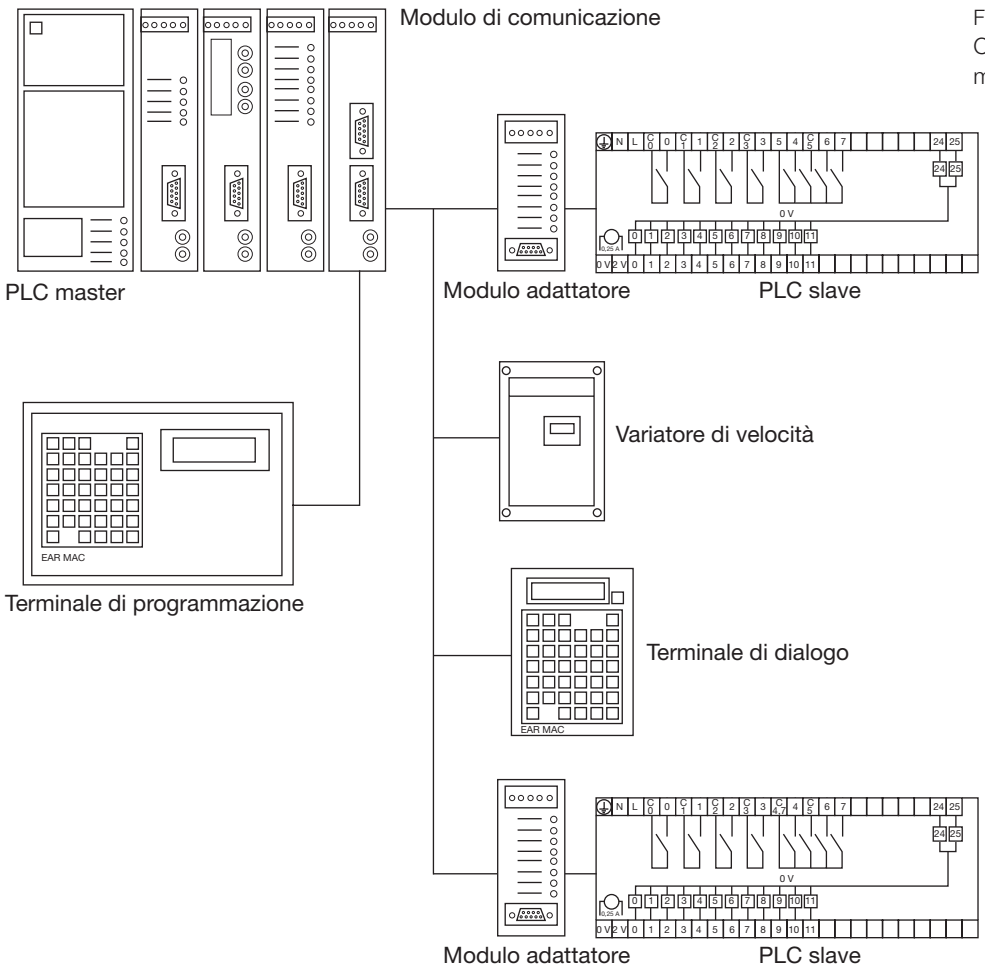



FIGURA **17**
Collegamento tra PLC master e PLC slave.

Il protocollo consente di interconnettere fino a 32 dispositivi a una velocità di 19 200 bps.

# 14 Linguaggi di programmazione

Il termine *linguaggio* assume, nel campo della logica programmabile, un significato vicino a quello in uso nella programmazione dei computer.

▶ Il *linguaggio di programmazione* viene quindi definito come una serie di strumenti logici che consentono all'utente di stendere il *programma* e al microprocessore di interpretarne le istruzioni per attivare l'esecuzione dei comandi.

Il *software* necessario al funzionamento del *PLC* può essere:

- *residente*, ossia già introdotto stabilmente in esso;
- immesso tramite tastiera o altri mezzi.

Il PLC può essere programmato per svolgere sequenze di operazioni più o meno complesse in relazione all'insieme delle istruzioni elementari da esso eseguibili (operazioni logiche, conteggi, comparazioni, temporizzazioni).


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Ciascun linguaggio di programmazione è dotato di un proprio *set di istruzioni* e a questo deve fare riferimento l'utente per stendere il programma adatto a risolvere un determinato problema.

Disponendo di linguaggi di programmazione con set di istruzioni differenti la soluzione del medesimo problema dipenderà dalle possibilità offerte dai diversi linguaggi.

Anche per chi ha acquisito le tecniche fondamentali di programmazione non è possibile passare da un linguaggio di programmazione di un PLC a un altro in maniera immediata e automatica.

## 14.1 Tipologie di linguaggio

Le diverse tipologie vengono indicate con termini differenti in relazione alla lingua adottata per definirle che solitamente è l'inglese o il tedesco.

Nell'ambito della *logica programmabile* sono previsti:

- *linguaggi grafici*;
- *linguaggi testuali*.

Vengono definiti **linguaggi grafici**:

- il *linguaggio a contatti* o *linguaggio ladder* (sinteticamente *LD* o *KOP*);
- il *linguaggio a blocchi funzionali* (sinteticamente *FBD* o *FBS* o *FUP*);
- il *linguaggio Grafcet* o *schema funzionale in sequenza* (sinteticamente *SFC*).

La tendenza prevalente è di utilizzare il metodo di *programmazione a contatti* a causa della sua immediatezza grafica (i simboli grafici principali sono semplicemente dei contatti) e a questo viene fatto riferimento nel seguito.

Il *linguaggio a blocchi funzionali* utilizza blocchi funzionali al posto dei contatti.

Un esempio di programmazione tramite linguaggio a blocchi funzionali viene riportato in FIGURA **18**.

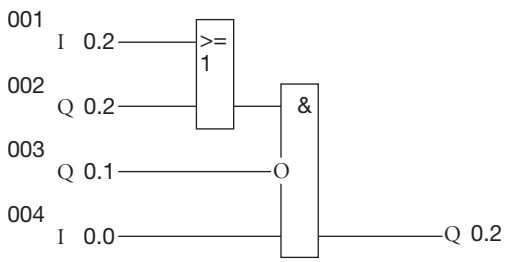



FIGURA **18**
Esempio di programmazione tramite linguaggio a blocchi funzionali.

Il linguaggio Grafcet utilizza blocchi che identificano le diverse fasi del funzionamento del sistema; a ciascuna fase corrisponde il compimento di una determinata azione ovvero lo stato di lavorazione di una macchina; il modo di procedere è simile a quello dei diagrammi di flusso.

Vengono definiti **linguaggi testuali**:

- il *linguaggio booleano* o *lista di istruzioni* (sinteticamente *IL* o *AWL*);
- il *linguaggio ad alto livello* o testo strutturato (sinteticamente *HLL* o *ST*),

come per esempio il linguaggio Basic.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Un esempio di programmazione tramite lista istruzioni viene riportato in FIGURA **19**.

```
000   L I0.1
001   O Q0.1
002   ANQ 0.2
003   A I0.0
004   = Q0.1
005   L I0.2
006   O Q0.2
007   AN Q0.1
008   A I0.0
009   = Q0.2
```

FIGURA **19**
Esempio di programmazione tramite lista istruzioni.

Essendo completamente privo di grafica il linguaggio risulta non immediatamente comprensibile e anche la ricerca di errori nella programmazione è più complessa.

Tra i linguaggi ad alto livello si citano il Basic, il Pascal e il C++.

# 15 Linguaggio a contatti

▶ Il **linguaggio a contatti**, simile agli schemi elettrici realizzati con la convenzione *ANSI*, viene chiamato anche *Ladder Diagram (LD)* per la *struttura a scala* che assume la sua rappresentazione grafica o schema *KOP* in base a un'ulteriore terminologia derivata dalla lingua tedesca.

Il suo uso è definito dalla **Norma DIN 19239** e la rappresentazione grafica impiega la lista di caratteri **ISO/IEC 646**.

L'utilizzo diffuso di questo linguaggio è dovuto al fatto che, almeno nei casi più semplici, è facile passare dallo schema funzionale in logica elettromeccanica allo schema ladder.

## 15.1 Elementi grafici

La struttura principale del linguaggio, come viene evidenziato in FIGURA **20**, è composta da:

- due linee di alimentazione verticali (di destra e di sinistra) denominate *montanti*;
- collegamenti orizzontali tra i montanti denominati pioli.

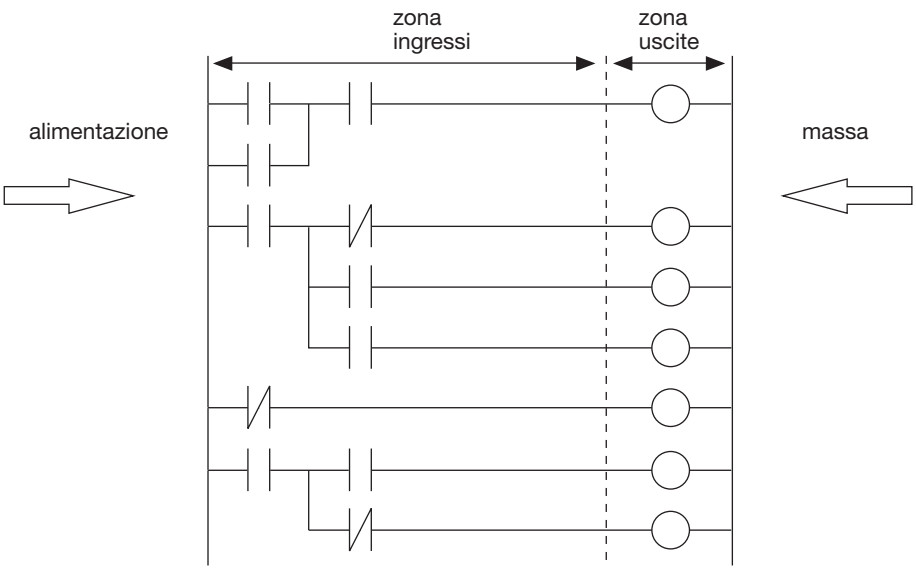



FIGURA **20**
Struttura principale del linguaggio.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

La linea verticale sinistra è l'alimentazione, quella destra la *massa comune*.

Sui collegamenti orizzontali vengono disposti i simboli grafici propri del linguaggio corrispondenti alle istruzioni logiche.

Lo schema viene tracciato procedendo da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso.

Nello schema si distinguono:

- a sinistra una *zona ingressi* (sulla quale vengono effettuati i test da parte del microprocessore);
- a destra una *zona uscite* (il cui stato è determinato dai test effettuati sulla zona ingressi).

Le istruzioni logiche di base si limitano a pochi simboli grafici che vengono denominati:

- *contatto in chiusura* (normalmente aperto o NO);
- *contatto in apertura* (normalmente chiuso o NC);
- *uscita* (interna o esterna).

Il collegamento tra i diversi rami viene consentito da:

- *apertura di rami in parallelo*;
- *chiusura di rami in parallelo*.

I simboli grafici citati vengono riprodotti in FIGURA **21**.

| | |
|---|---|
| | contatto aperto |
| | contatto chiuso |
| | uscita |
| | apertura di un ramo in parallelo |
| | chiusura di un ramo in parallelo |

FIGURA **21**
Principali simboli grafici adottati negli schemi ladder.

I contatti NO ed NC sono rappresentati graficamente come nella logica elettromeccanica; il loro funzionamento è il seguente:

- i contatti NO si chiudono quando la bobina del relè interno corrispondente è eccitata;
- i contatti NC si aprono quando la bobina del relè interno corrispondente è eccitata.

I contatti possono corrispondere a *ingressi reali* (come pulsanti o finecorsa) o *uscite utilizzate come ingressi*.

Le uscite vengono rappresentate graficamente con un cerchio (o eventualmente con delle parentesi); fisicamente possono corrispondere a *componenti reali* (bobine di contattori, lampade di segnalazione, elettrovalvole) o a *bit interni* (che simulano il comportamento di relè ausiliari o temporizzatori).


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Altri simboli grafici di forma generalmente rettangolare simulano il comportamento di dispositivi che eseguono operazioni più complesse come quelle di temporizzazione e conteggio.

## 15.2 Regole di tracciamento

Per operare in modo corretto devono essere seguite alcune *regole di tracciamento degli schemi*; si enunciano le principali:

- alla linea verticale sinistra vengono collegati tutti gli elementi di ingresso, a quella destra tutti gli elementi di uscita;
- fra l'elemento d'uscita e la linea verticale di sinistra deve essere interposto almeno un elemento d'ingresso;
- gli ingressi possono essere collegati in serie e in parallelo, le uscite soltanto in parallelo;
- nessun ingresso può essere interposto tra l'uscita e la linea verticale di destra;
- tutte le uscite possono essere utilizzate come ingressi e quindi sottoposte a test.

## 15.3 Applicazioni

Tenendo presente che notazioni e simboli utilizzati possono variare in relazione alla ditta costruttrice del PLC, alcuni esempi applicativi con i corrispondenti schemi in logica elettromeccanica vengono proposti in FIGURA **22**.

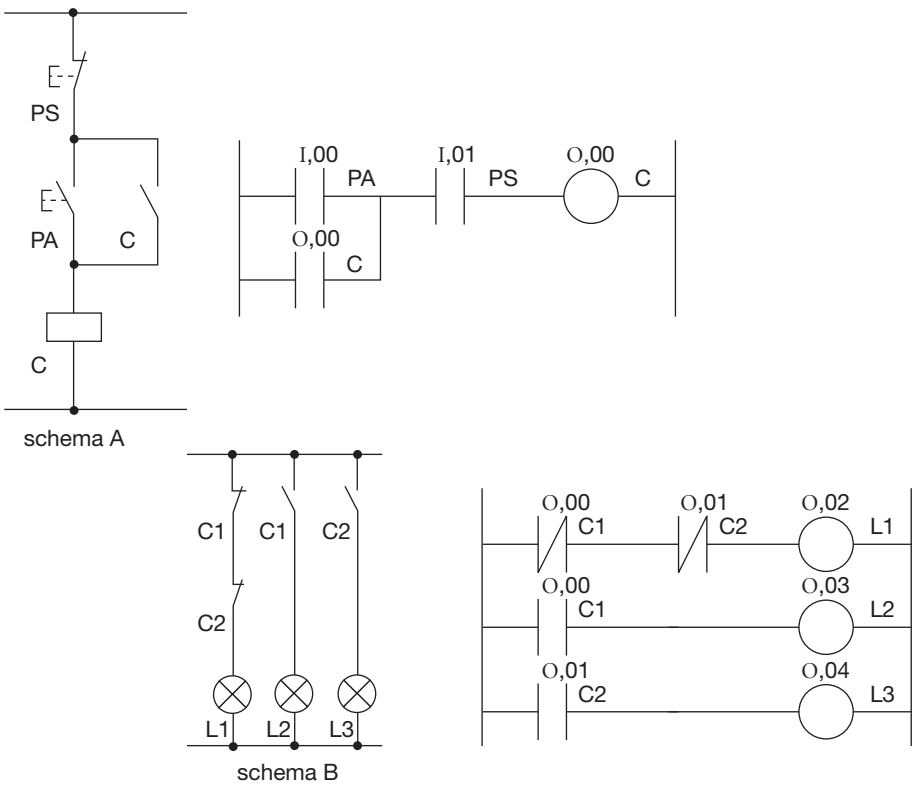



FIGURA **22**
Esempi applicativi di schemi ladder.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

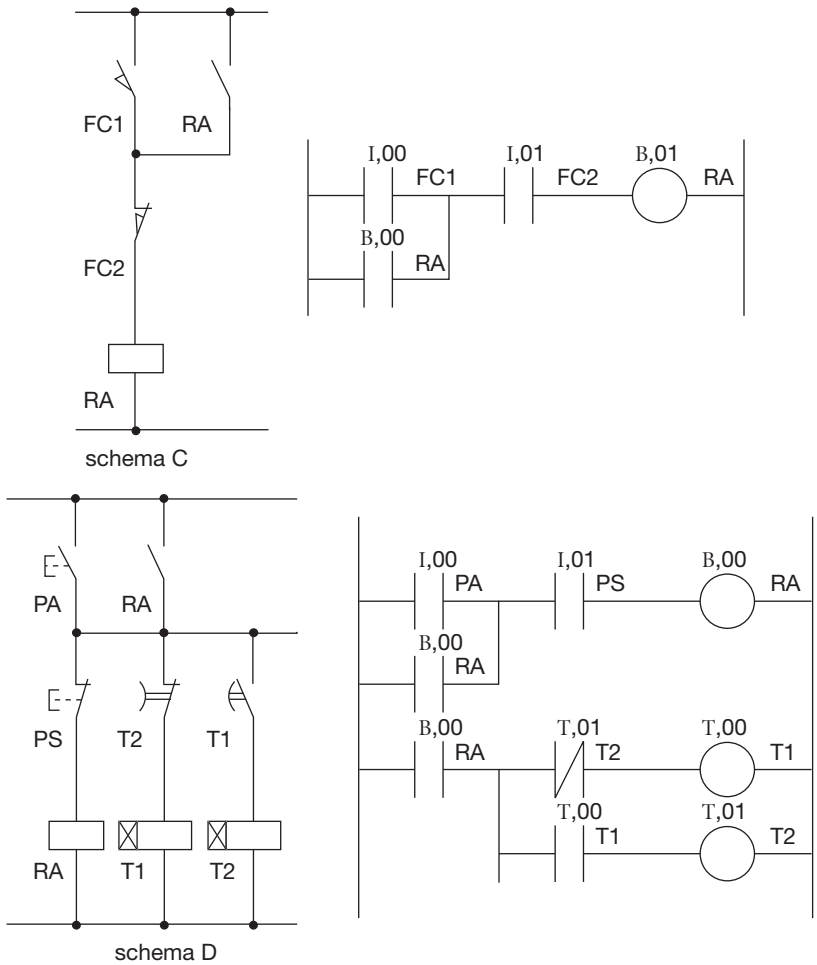



FIGURA **22**
Esempi applicativi di schemi ladder.

## Schema A

Nello *schema A* gli ingressi sono costituiti da due pulsanti NO ed NC che funzionano rispettivamente da pulsante di avvio PA e di stop PS, l'unica uscita è la bobina del contattore C.

L'uscita O,00 corrispondente alla bobina si attiva quando si forma un percorso conduttivo che, partendo dalla riga verticale sinistra, giunge all'uscita stessa.

Questo non avviene quando il pulsante di avvio è a riposo; il contatto I,00 rimane infatti aperto perché la bobina del corrispondente relè interno non è attiva; anche il contatto in parallelo dipendente da O,00 (l'uscita viene utilizzata come ingresso) rimane aperto in quanto l'uscita non è attiva.

Il percorso conduttivo si forma invece premendo il pulsante di avvio; contemporaneamente, con l'attivazione dell'uscita, si chiude anche il contatto in parallelo da essa dipendente.

Rilasciando il pulsante il contatto corrispondente si riapre ma l'uscita rimane alimentata per la presenza del contatto in parallelo che, rimanendo chiuso, mantiene il percorso conduttivo assolvendo quindi la *funzione di autoritenuta* (mantenimento dell'alimentazione).

Il percorso conduttivo si forma perché al pulsante di stop viene fatto corrispondere un contatto normalmente aperto; in assenza di azionamento del pulsante infatti il relè interno corrispondente risulta attivo e il contatto


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

aperto si chiude; facendogli corrispondere un contatto normalmente chiuso si verificherebbe a riposo l'apertura del contatto interno corrispondente e la conseguente interruzione del percorso conduttivo.

La pressione del pulsante di stop determina la disattivazione del relè interno, l'apertura del contatto corrispondente e l'interruzione del percorso conduttivo; l'uscita si disattiva e il contatto in parallelo si riapre.

### Schema B

Nello *schema B* le variabili di uscita sono le lampade di segnalazione L1, L2 ed L3.

I contatti della zona test non sono associati a variabili d'ingresso fisicamente definibili ma allo stato delle uscite O,00 e O,01 (in questo caso bobine di contattori) utilizzate come ingressi.

La lampada L1 si accende quando entrambe le uscite non sono attive, la lampada L2 quando è attiva l'uscita O,00, la lampada L3 quando è attiva l'uscita O,01.

### Schema C

Nello *schema C* gli ingressi sono costituiti dai contatti I,00 e I,01 relativi ai finecorsa FC1 ed FC2.

L'uscita B,00 non comanda un componente reale perché il relè ausiliario si trasforma in un elemento software (bit interno), fatto che contribuisce a ridurre la complessità del cablaggio.

Contemporaneamente, con l'attivazione dell'uscita, si chiude anche il contatto in parallelo da essa dipendente che funziona da contatto di autoritenuta.

L'uscita si attiva quando il contatto del finecorsa FC1 si chiude (si attiva infatti il relè interno); proprio per la presenza del contatto di autoritenuta si mantiene l'attivazione dell'uscita anche se il contatto di finecorsa si riapre successivamente.

L'uscita si disattiva quando il contatto del finecorsa FC2 si apre (si attiva infatti il relè interno); per un corretto funzionamento dell'automatismo l'elemento hardware che pilota l'ingresso I,00 deve essere il contatto aperto del finecorsa; in caso contrario (se si cablasse il contatto chiuso) il relè interno sarebbe attivo già in fase di riposo; la conseguente apertura del contatto software impedirebbe l'attivazione dell'uscita.

### Schema D

Nello *schema D* gli ingressi sono costituiti dai pulsanti di avviamento PA e di stop PS.

Le uscite non sono componenti reali perché il relè ausiliario RA si trasforma nel bit interno B,00 mentre le bobine dei due temporizzatori T1 e T2 si trasformano nei due elementi software T,00 e T,01.

Le tre uscite vengono anche utilizzate come ingressi; il contatto dipendente da B,00 viene posto in parallelo al pulsante di avvio con funzione di autoritenuta; i contatti dipendenti da T,00 e T,01 vengono posti in serie alle uscite stesse in modo tale da realizzare un ciclo a due tempi.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 16 Applicazioni di azionamenti elettromeccanici

Vengono di seguito proposte alcune applicazioni con il PLC relative ai seguenti azionamenti elettromeccanici:

- *comando di un impianto per semaforo*;
- *avviamento di un motore asincrono trifase*;
- *inversione di marcia di un motore asincrono trifase*;
- *funzionamento ciclico di un motore asincrono trifase*.

Per ciascun impianto vengono riportati:

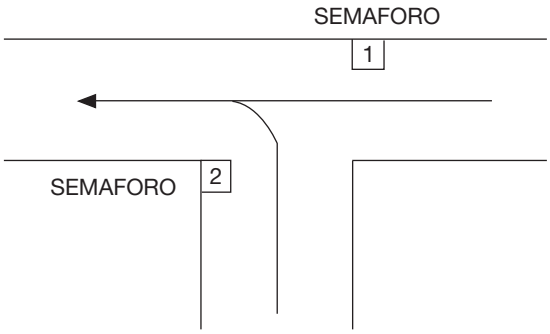
- lo schema funzionale in logica cablata;
- il programma in linguaggio ladder;
- il cablaggio con il PLC.

Nella stesura dello schema in linguaggio ladder e nel cablaggio non si fa esplicito riferimento a uno specifico PLC commerciale.

**ESEMPIO 1**

Si vuole realizzare uno schema di comando in logica cablata e in logica programmabile per un impianto semaforico che regola il flusso dei veicoli che si dirigono da una strada secondaria a senso unico verso una strada principale anch'essa a senso unico.

In FIGURA **23** viene riportata la rappresentazione topografica dell'incrocio insieme alla descrizione della sequenza di funzionamento.




sequenza ciclica

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | rosso | rosso | verde | giallo |
| 2 | verde | giallo | rosso | rosso |
| | T1 | T2 | T3 | T4 |

FIGURA **23**
Rappresentazione topografica dell'impianto e sequenza di funzionamento.

## Soluzione

### Schema funzionale in logica cablata

In FIGURA **24** viene rappresentato lo schema in logica elettromeccanica necessario per ricavare lo schema in linguaggio ladder.

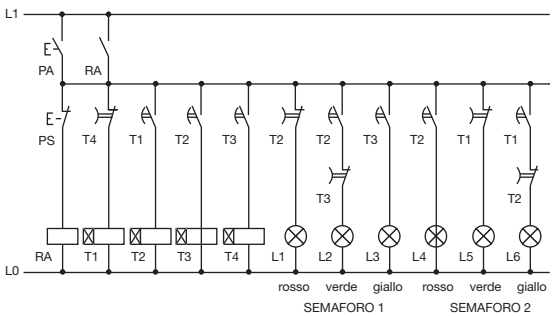



FIGURA **24**
Schema in logica elettromeccanica.

Il ciclo di funzionamento viene avviato premendo il pulsante PA; la bobina del relè ausiliario RA si eccita di conseguenza.

La chiusura del contatto di autoritenuta determina l'avvio del sistema di conteggio; i tempi di funzionamento sono quattro da cui deriva la presenza di quattro temporizzatori.

Il funzionamento dei temporizzatori è il seguente:

- il contatto aperto del primo temporizzatore T1 aziona il conteggio del secondo T2;
- il contatto aperto del secondo aziona il conteggio del terzo T3;
- il contatto aperto del terzo aziona il conteggio del quarto T4;
- il quarto temporizzatore disattiva (tramite il suo contatto chiuso) il primo temporizzatore.

Prosegue in questo modo il ciclo che viene interrotto ▶


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 1

premendo il pulsante PS che, aprendo il circuito, diseccita la bobina del relè ausiliario.

Le lampade dei semafori sono sei, tre per ogni via; le lampade rosse sono L1 ed L4, le verdi L2 ed L5, le gialle L3 ed L6.

La loro accensione viene regolata dal movimento in successione dei corrispondenti contatti dei temporizzatori che modificano il loro stato in relazione alla sequenza ciclica riportata.

Con la pressione del pulsante di avvio per esempio si accendono per due periodi la lampada rossa del primo semaforo (si osservi in proposito il contatto NC di T2 in serie) e per un periodo la lampada verde del secondo semaforo (si osservi in proposito il contatto NC di T1 in serie); i due contatti si aprono al termine del conteggio e le lampade si spengono; con considerazioni simili viene dedotto il funzionamento delle altre lampade.

### Programma in linguaggio ladder

Nella stesura del programma si devono tenere presenti le seguenti considerazioni:

- gli ingressi sono i pulsanti di avvio e di stop;
- le uscite sono le lampade dei semafori;
- al pulsante di stop corrisponde un contatto normalmente aperto.

Stabilendo di assegnare genericamente la sigla I agli ingressi del PLC e la sigla O alle uscite, le corrispondenze fra le variabili vengono riportate nella FIGURA **25** insieme allo schema ladder; ai temporizzatori viene assegnata la sigla T, al bit interno la sigla B.

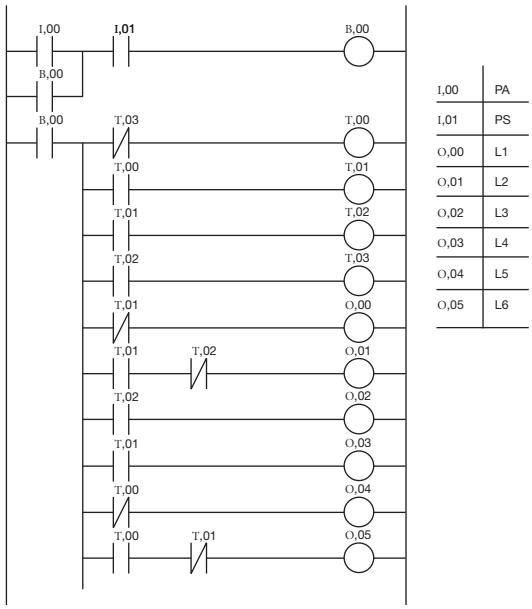



FIGURA **25**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

### Cablaggio con il PLC

Facendo riferimento agli ingressi e alle uscite definite in precedenza, lo schema di cablaggio viene riportato in FIGURA **26**.

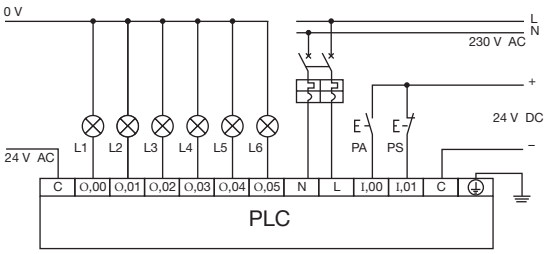



FIGURA **26**
Schema di cablaggio.

ESEMPIO 2

Si vuole realizzare uno schema di comando in logica cablata e in logica programmabile per l'avviamento di un motore asincrono trifase.

Viene previsto un comando esclusivamente manuale del motore tramite pulsante di avvio e pulsante di stop.

### Schema funzionale in logica cablata

In FIGURA **27** viene rappresentato lo schema in logica elettromeccanica necessario per ricavare lo schema in linguaggio ladder.

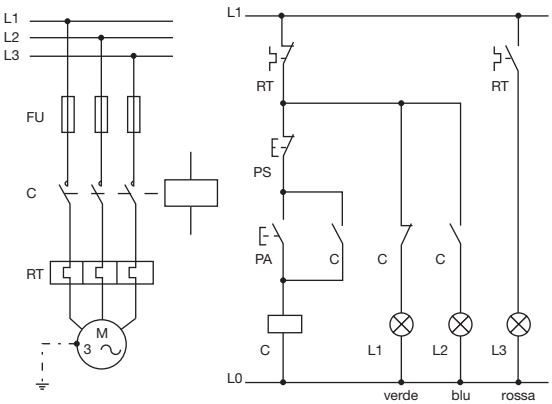



FIGURA **27**
Schema in logica elettromeccanica.

Si evidenziano la parte di potenza (con la linea trifase a 400 V e il conduttore di protezione collegato al



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 2

motore) e i circuiti di comando e segnalazione (con la linea monofase a 24 V).

Il motore viene alimentato dalla linea trifase; la protezione dal corto circuito viene affidata ai fusibili FU, la protezione dal sovraccarico al relè termico RT.

Il motore si mette in movimento premendo il pulsante PA; la bobina del contattore C di conseguenza si eccita provocando la chiusura dei contatti di potenza posti sulla linea che alimenta il motore; la continuità dell'eccitazione della bobina viene garantita dalla chiusura del contatto di autoritenuta del contattore (posto in parallelo al pulsante stesso); il motore si ferma premendo il pulsante PS che, aprendo il circuito, diseccita la bobina.

Anche l'apertura del contatto chiuso del relè termico a causa di un guasto determina la diseccitazione della bobina e l'arresto del movimento del motore.

I dispositivi di segnalazione sono tre:

- la lampada verde L1 indica che l'impianto è pronto per l'avviamento;
- la lampada blu L2 indica che il motore è in movimento;
- la lampada rossa L3 indica l'arresto dell'impianto in caso di guasto.

L'accensione delle lampade verde e blu viene regolata rispettivamente dai contatti chiuso e aperto del contattore, quella della lampada rossa dal contatto aperto del relè termico.

### Programma in linguaggio ladder

Nella stesura del programma si devono tenere presenti le seguenti considerazioni:

- gli ingressi sono i pulsanti di avvio e di stop;
- le uscite sono la bobina del contattore e le lampade di segnalazione verde e blu;
- al pulsante di stop corrisponde un contatto NO.

Stabilendo di assegnare genericamente la sigla I agli ingressi del PLC e la sigla O alle uscite, le corrispondenze fra le variabili vengono riportate nella FIGURA **28** insieme allo schema ladder.

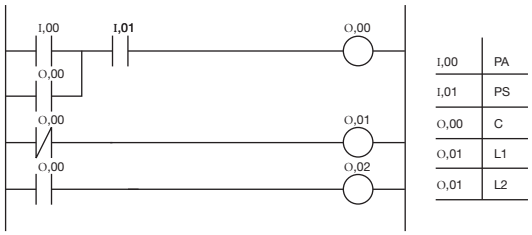



FIGURA **28**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

### Cablaggio con il PLC

Facendo riferimento agli ingressi e alle uscite definite in precedenza, lo schema di cablaggio viene riportato in FIGURA **29**.

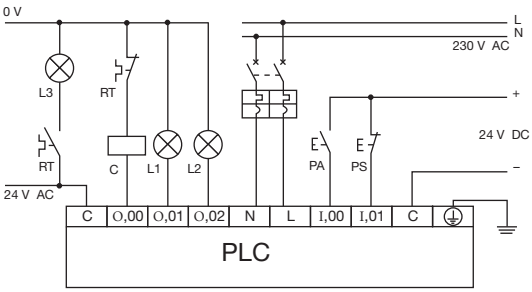



FIGURA **29**
Schema di cablaggio.

ESEMPIO 3

Si vuole realizzare uno schema di comando in logica cablata e in logica programmabile per l'avviamento di un motore asincrono trifase con la possibilità di invertire il senso di rotazione dell'albero del motore tramite *inversione lenta*.

L'inversione del senso di rotazione viene definita *lenta* in quanto il passaggio dal verso orario a quello antiorario e viceversa avviene attraverso la posizione di stop.

Si prevede un comando esclusivamente manuale tramite pulsanti di avvio e pulsante di stop.

Per l'avvio sono previsti due pulsanti rispettivamente per l'avvio in senso orario (si usa anche il termine *marcia avanti*) e per l'avvio in senso antiorario (si usa anche il termine *marcia indietro*).

## Soluzione

### Schema funzionale in logica cablata

In FIGURA **30** viene rappresentato lo schema in logica elettromeccanica necessario per ricavare lo schema in linguaggio ladder.

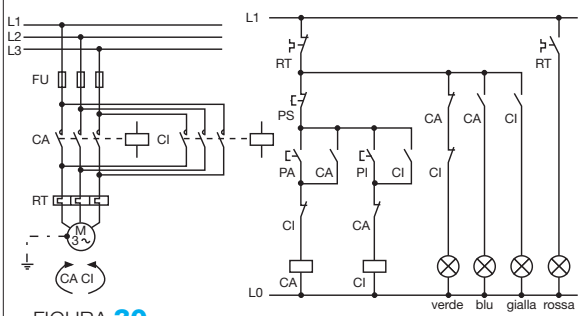



FIGURA **30**
Schema in logica elettromeccanica.

Si evidenziano la parte di potenza (con la linea trifase a 400 V e il conduttore di protezione collegato al motore) e i circuiti di comando e segnalazione (con la linea monofase a 24 V).



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 3

Il motore viene protetto contro il corto circuito dai fusibili FU, contro il sovraccarico dal relè termico RT.

L'inversione del senso di rotazione si effettua scambiando tra loro due fili della linea di alimentazione (nel caso della figura il primo con il terzo).

Il contattore CA (posto sulla linea principale) viene utilizzato per la marcia avanti, il contattore CI (posto sulla linea derivata) per la marcia indietro.

Il motore si mette in movimento premendo il pulsante PA (avanti) o il pulsante PI (indietro); le bobine dei contattori CA e CI si eccitano di conseguenza provocando la chiusura dei corrispondenti contatti di potenza posti sulla linea che alimenta il motore; la continuità dell'eccitazione della bobina viene garantita dalla chiusura dei corrispondenti contatti di autoritenuta (posti in parallelo ai pulsanti); il motore si ferma premendo il pulsante PS che, aprendo il circuito, diseccita la bobina che in quel momento è eccitata.

Due *contatti di interblocco elettrico* (posti in serie a ciascuna bobina) impediscono l'eccitazione contemporanea delle bobine stesse, situazione non desiderata.

Anche l'apertura del contatto chiuso del relè termico a causa di un guasto determina la diseccitazione della bobina e l'arresto del movimento del motore.

I dispositivi di segnalazione sono quattro:

- la lampada verde L1 indica che l'impianto è pronto per l'avviamento;
- la lampda blu L2 indica che il motore si muove con senso di rotazione orario;
- la lampada gialla L3 indica che il motore si muove con senso di rotazione antiorario;
- la lampada L4 indica un arresto in caso di guasto per sovraccarico termico.

L'accensione della lampada verde viene regolata dalla serie dei contatti chiusi dei contattori CA e CI, della blu dal contatto aperto del contattore CA, della gialla dal contatto aperto del contattore CI, della rossa dal contatto aperto del relè termico.

### Programma in linguaggio ladder

Nella stesura del programma si devono tenere presenti le seguenti considerazioni:

- gli ingressi sono i pulsanti di avvio (a marcia avanti e marcia indietro) e di stop;
- le uscite sono le bobine dei contattori e le lampade di segnalazione verde, blu e gialla;
- al pulsante di stop corrisponde un contatto NO.

Stabilendo di assegnare genericamente la sigla I agli ingressi del PLC e la sigla O alle uscite, le corrispondenze fra le variabili vengono riportate nella FIGURA **31** insieme allo schema ladder.

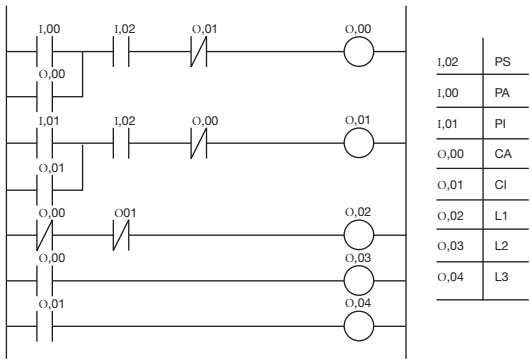



FIGURA **31**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

### Cablaggio con il PLC

Facendo riferimento agli ingressi e alle uscite definite in precedenza, lo schema di cablaggio viene riportato in FIGURA **32**.

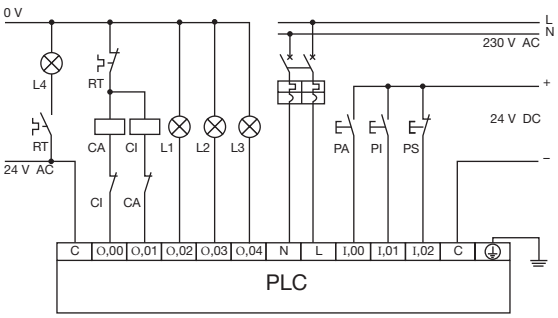



FIGURA **32**
Schema di cablaggio.

ESEMPIO 4

Si vuole realizzare uno schema di comando in logica cablata e in logica programmabile per l'avviamento di un motore asincrono trifase.

Viene previsto un comando esclusivamente manuale del motore tramite pulsante di avvio e pulsante di stop.

Il motore deve funzionare a intermittenza alternando periodi di lavoro a periodi di pausa.

## Soluzione

### Schema funzionale in logica cablata

In FIGURA **33** viene rappresentato lo schema in logica

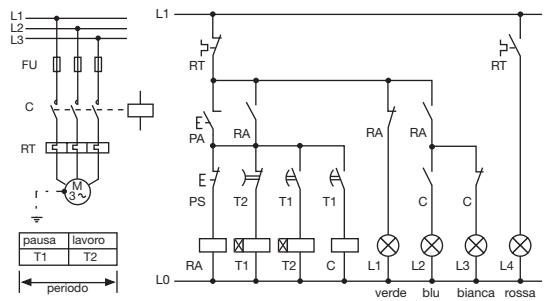



FIGURA **33**
Schema in logica elettromeccanica.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

elettromeccanica necessario per ricavare lo schema in linguaggio ladder con l'indicazione della sequenza di funzionamento.

Si evidenziano la parte di potenza (con la linea trifase a 400 V e il conduttore di protezione collegato al motore) e i circuiti di comando e segnalazione (con la linea monofase a 24 V).

Il motore viene protetto contro il corto circuito dai fusibili FU, contro il sovraccarico dal relè termico RT.

Il ciclo di funzionamento viene avviato premendo il pulsante PA; la bobina del relè ausiliario RA si eccita di conseguenza.

La chiusura del contatto di autoritenuta determina l'avvio del sistema di conteggio; i tempi di funzionamento sono due da cui deriva la presenza di due temporizzatori.

I temporizzatori vengono collegati in modo tale che:

- il contatto aperto del primo T1 aziona il conteggio del secondo T2;
- il secondo temporizzatore disattiva (tramite il suo contatto chiuso) il primo temporizzatore.

Si attiva in questo modo un ciclo che prevede una fase di pausa seguita da una di lavoro.

La bobina del contattore C si attiva infatti al termine della prima fase di conteggio con la chiusura del contatto aperto di T1.

Il ciclo viene interrotto premendo il pulsante PS che, aprendo il circuito, diseccita la bobina del relè ausiliario.

Anche l'apertura del contatto chiuso del relè termico a causa di un guasto determina la diseccitazione della bobina e l'arresto del movimento del motore.

I dispositivi di segnalazione sono quattro:

- la lampada verde L1 indica che l'impianto è pronto per l'avviamento;
- la lampada blu L2 indica che il motore è in movimento;
- la lampada bianca L3 indica che il motore è in pausa;
- la lampada rossa L4 indica un arresto dell'impianto in caso di guasto per sovraccarico termico.

L'accensione della lampada verde viene regolata dal contatto chiuso del relè ausiliario, della blu dai contatti aperti del relè ausiliario e del contattore, della bianca dal contatto aperto del relè ausiliario e dal contatto chiuso del contattore, della rossa dal contatto aperto del relè termico.

## Programma in linguaggio ladder

Nella stesura del programma si devono tenere presenti le seguenti considerazioni:

- gli ingressi sono i pulsanti di avvio e di stop;
- le uscite sono la bobina del contattore e le lampade di segnalazione verde, blu e bianca;
- al pulsante di stop corrisponde un contatto NO.

Si stabilisce di assegnare genericamente:

- la sigla I agli ingressi;
- la sigla O alle uscite;
- la sigla T ai temporizzatori;
- la sigla B al bit interno.

Le corrispondenze fra le variabili vengono riportate nella FIGURA **34** insieme allo schema ladder.

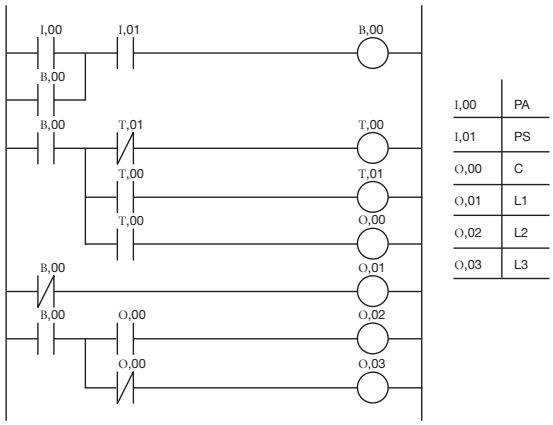



FIGURA **34**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

## Cablaggio con il PLC

Facendo riferimento agli ingressi e alle uscite definite in precedenza, lo schema di cablaggio viene riportato in FIGURA **35**.

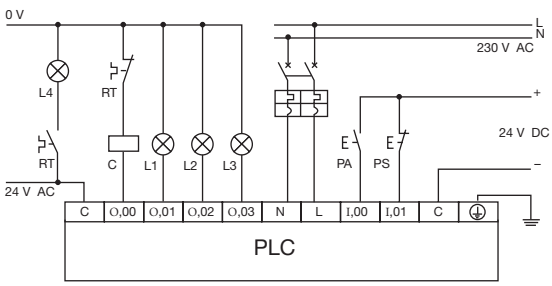



FIGURA **35**
Schema di cablaggio.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 17 Applicazioni di azionamenti pneumatici

Vengono di seguito proposte alcune applicazioni relative ai seguenti azionamenti pneumatici:

- *sollevamento e spostamento di un oggetto*;
- *marcatura ed espulsione di un oggetto*;
- *spostamento e marcatura di un oggetto*.

Per ciascun impianto vengono riportati:

- lo schema funzionale in logica cablata;
- il programma in linguaggio ladder;
- il cablaggio con il PLC.

Nella stesura dello schema ladder e nel cablaggio non si fa esplicito riferimento a uno specifico PLC commerciale.

**ESEMPIO 5**

Si vuole realizzare un impianto elettropneumatico che consenta:

– il sollevamento di un oggetto mediante l'azionamento di un cilindro verticale;
– il suo successivo spostamento laterale mediante l'azionamento di un cilindro orizzontale.

I movimenti richiesti vengono schematizzati in FIGURA **36**.

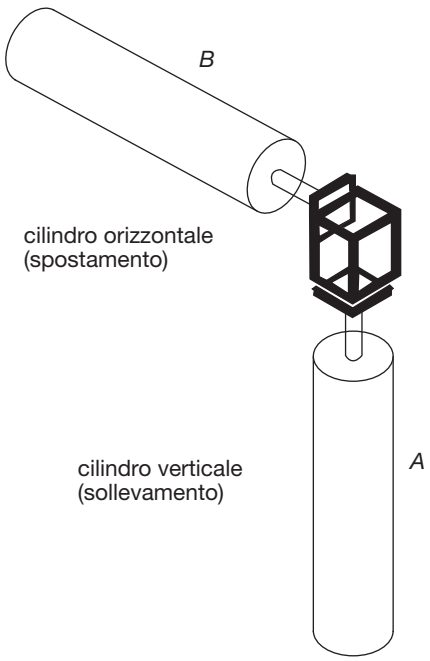



FIGURA **36**
Sollevamento e spostamento di un oggetto.

Si prevedono le seguenti modalità di funzionamento:

– *ciclo singolo e valvola bistabile*;
– *ciclo continuo e valvola bistabile*;
– *ciclo singolo e valvola monostabile*;
– *ciclo continuo e valvola monostabile*.

## Soluzione

Per il funzionamento dell'impianto è necessario azionare nell'ordine:

– il cilindro A per il sollevamento;
– il cilindro B per lo spostamento;
– il cilindro A per il rientro;
– il cilindro B per il rientro.

Per la sequenza risulta quindi l'espressione:

$$A+/B+\ /A-\ /B-$$

Si ipotizza l'impiego di finecorsa per segnalare le posizioni estreme della corsa dei cilindri.

Si precisa che:

– FC1 ed FC2 individuano rispettivamente le posizioni tutto dentro e tutto fuori del cilindro A;
– FC3 ed FC4 le corrispondenti posizioni del cilindro B.

Si tenga infine presente che:

– il *ciclo singolo*, avviato dalla pressione del pulsante di avvio, si interrompe automaticamente una volta concluso il ciclo;
– il *ciclo continuo*, avviato dalla pressione del pulsante di avvio, si interrompe quando viene premuto il pulsante di stop.

Si esaminano le diverse modalità di funzionamento. ▶


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Ciclo singolo e valvola bistabile

In FIGURA **37** viene riportato lo schema pneumatico e il corrispondente diagramma delle fasi.

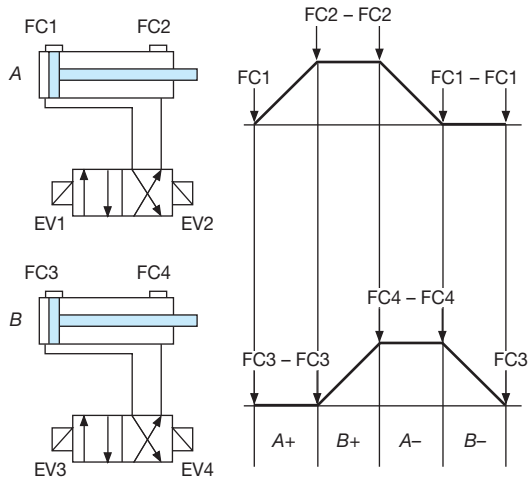



FIGURA **37**
Schema pneumatico e diagramma delle fasi.

Lo schema in logica elettromeccanica viene riportato in FIGURA **38**.

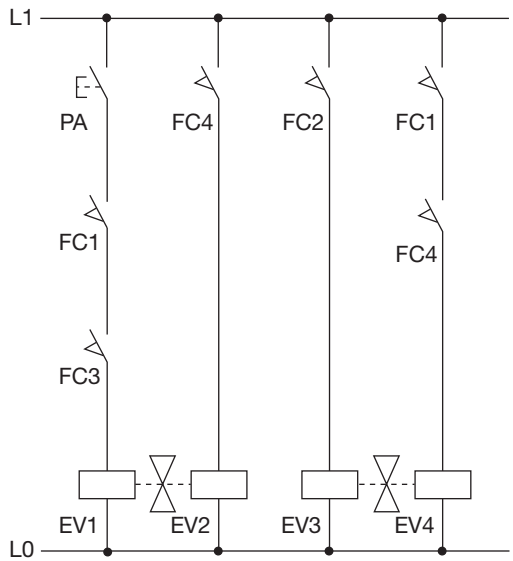



FIGURA **38**
Schema in logica elettromeccanica.

La fase *A*+ ha inizio con la pressione del pulsante di avvio che attiva la bobina EV1; i contatti di FC1 ed FC3 sono inizialmente chiusi perché sollecitati; la presenza di entrambi i finecorsa (in realtà per l'avvio sarebbe necessario soltanto FC3) garantisce che la fase venga attivata solo con entrambi i cilindri nella posizione *tutto dentro*.

La fase *B*+ ha inizio con la chiusura del contatto di FC2 che attiva la bobina EV3.

La fase *A*– ha inizio con la chiusura del contatto di FC4 che attiva la bobina FC2.

La fase *B*– ha inizio con la chiusura contemporanea dei contatti di FC1 ed FC4 e la conseguente attivazione della bobina EV4; la chiusura del solo contatto di EV1 comporterebbe l'attivazione dell'elettrovalvola ancora prima della pressione del pulsante di avvio; aggiungendo il contatto di EV4 il consenso all'attivazione della fase viene invece dato solo nel momento desiderato.

Si definiscono di seguito le caratteristiche del software (programma in linguaggio ladder) e dell'hardware (cablaggio con il PLC).

Allo schema in logica elettromeccanica corrisponde il programma scritto in linguaggio ladder riprodotto in FIGURA **39**.

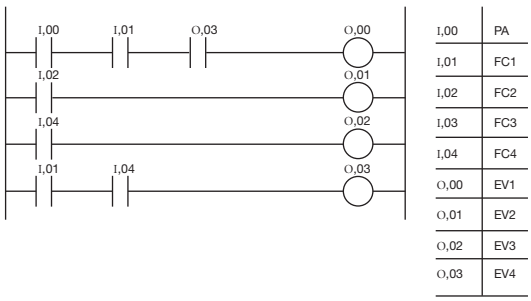



FIGURA **39**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

A lato del programma viene riportata la corrispondenza tra le variabili di programma e le variabili dello schema in logica elettromeccanica.

Al bit interno B,00 corrisponde il relè ausiliario RA che non compare quindi nello schema di cablaggio.

Conformemente al programma viene riportato in FIGURA **40** il corrispondente schema di cablaggio con il PLC.

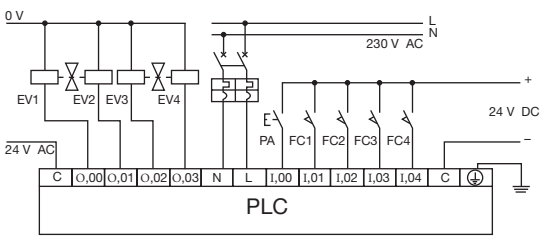



FIGURA **40**
Cablaggio con il PLC.

## Ciclo continuo e valvola bistabile

Come per il caso precedente in FIGURA **41** viene riportato lo schema pneumatico e il corrispondente diagramma delle fasi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

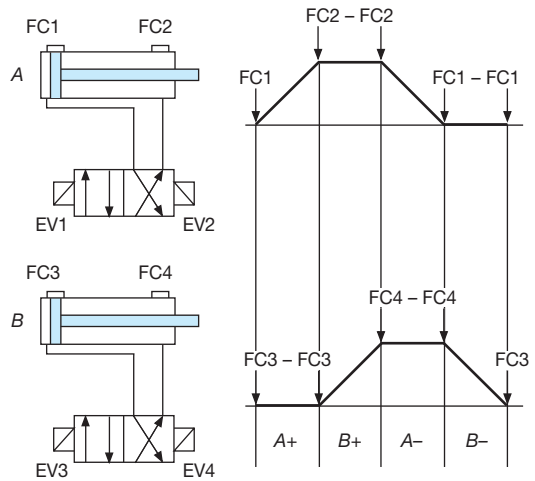



FIGURA **41**
Schema pneumatico e diagramma delle fasi.

Lo schema in logica elettromeccanica viene riportato in FIGURA **42**.

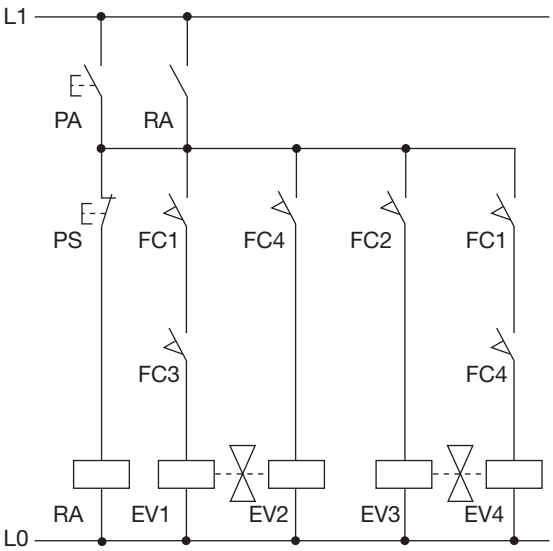



FIGURA **42**
Schema in logica elettromeccanica.

L'azionamento ha inizio premendo il pulsante di avvio che attiva la bobina di un relè ausiliario; la chiusura del corrispondente contatto di autoritenuta garantisce il mantenimento dell'azionamento anche al cessare della pressione del pulsante e contemporaneamente determina, con l'eccitazione della bobina EV1, l'inizio della fase *A*+.

In serie alla bobina EV1 sono presenti i contatti di FC1 ed FC3 per garantire l'attivazione della fase solo quando i cilindri sono entrambi nella posizione *tutto dentro*.

La fase *B*+ ha inizio con la chiusura del contatto di FC2 che attiva la bobina EV3, la fase *A*– con la chiusura del contatto di FC4 che attiva la bobina EV2.

La fase *B*– ha inizio con la chiusura contemporanea dei contatti di FC1 ed FC4 e la conseguente attivazione della bobina EV4.

La continuità del ciclo è garantita dal ripristino delle condizioni iniziali (contatti di FC1 ed FC3 chiusi con i due cilindri in posizione *tutto dentro*).

L'azionamento si interrompe premendo il pulsante di stop che agisce sul circuito del relè ausiliario.

Allo schema in logica elettromeccanica corrisponde il programma scritto in linguaggio ladder riprodotto in FIGURA **43**.

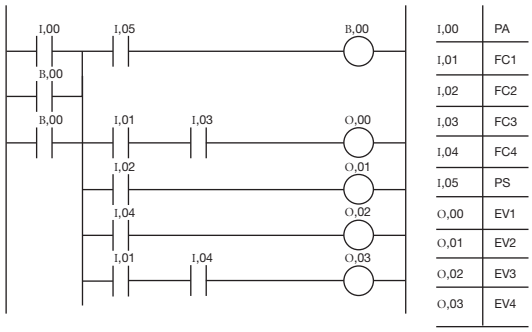



FIGURA **43**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

A lato del programma viene riportata la corrispondenza tra le variabili di programma e le variabili dello schema in logica elettromeccanica.

Al bit interno B,00 corrisponde il relè ausiliario RA che non compare quindi nello schema di cablaggio.

Conformemente al programma viene riportato in FIGURA **44** il corrispondente schema di cablaggio con il PLC.

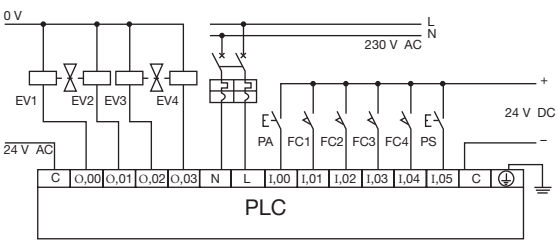



FIGURA **44**
Cablaggio con il PLC.

## Ciclo singolo e valvola monostabile

In FIGURA **45** viene riportato lo schema pneumatico e il corrispondente diagramma delle fasi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

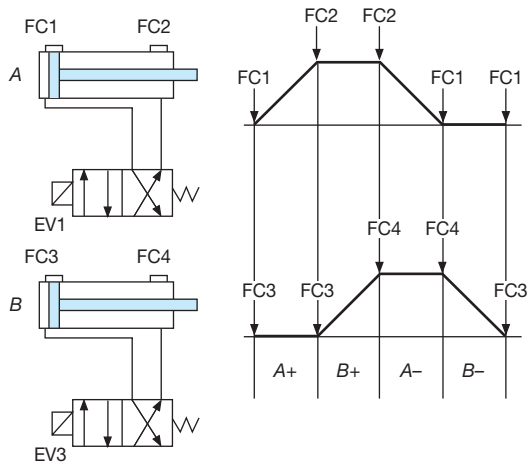



FIGURA **45**
Schema pneumatico e diagramma delle fasi.

Lo schema in logica elettromeccanica viene riportato in FIGURA **46**.

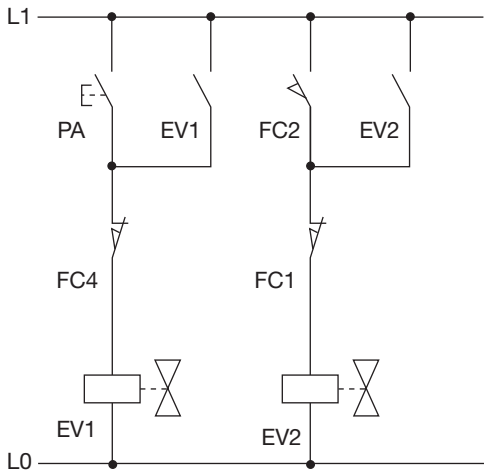



FIGURA **46**
Schema in logica elettromeccanica.

Il finecorsa FC3 che non compare nello schema non viene evidentemente utilizzato.

La fase *A*+ ha inizio con la pressione del pulsante di avvio che attiva la bobina EV1; poiché le valvole monostabili tornano spontaneamente nella posizione di riposo una volta cessata l'eccitazione della loro bobina, è necessario inserire il contatto di autoritenuta della bobina in parallelo al pulsante stesso.

La fase *B*+ ha inizio con la chiusura del contatto di EV2 che attiva la bobina EV2; il contatto di autoritenuta viene ora inserito in parallelo al contatto stesso.

La fase *A*– ha inizio con l'apertura del contatto di FC4 che, disattivando la bobina EV1, determina il rientro del cilindro.

La fase *B*– ha inizio con l'apertura del contatto di FC1 che, disattivando la bobina EV2, determina il rientro del cilindro.

Allo schema in logica elettromeccanica corrisponde il programma scritto in linguaggio ladder riprodotto in FIGURA **47**.

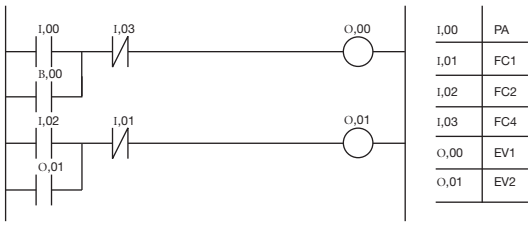



FIGURA **47**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

A lato del programma viene riportata la corrispondenza tra le variabili di programma e quelle dello schema in logica elettromeccanica.

Conformemente al programma viene riportato in FIGURA **48** il corrispondente schema di cablaggio con il PLC.

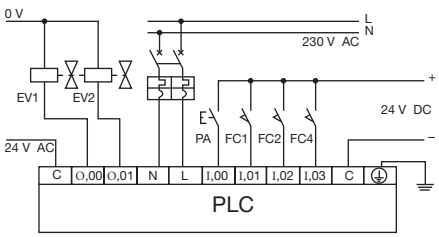



FIGURA **48**
Cablaggio con il PLC.

## Ciclo continuo e valvola monostabile

In FIGURA **49** viene riportato lo schema pneumatico e il corrispondente diagramma delle fasi.

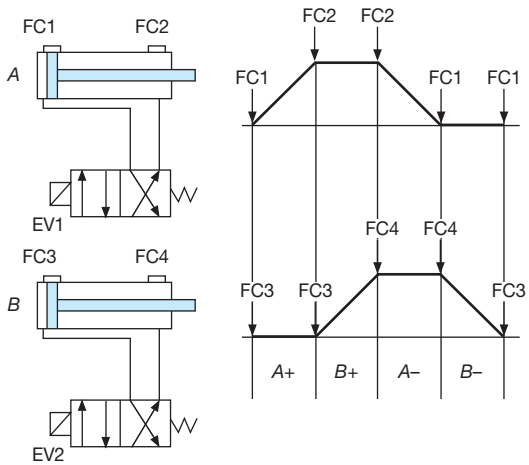



FIGURA **49**
Schema pneumatico e diagramma delle fasi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Lo schema in logica elettromeccanica viene riportato in FIGURA **50**.

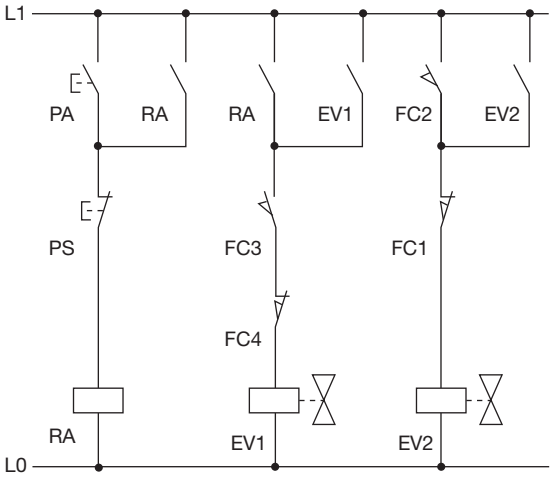



FIGURA **50**
Schema in logica elettromeccanica.

L'azionamento ha inizio premendo il pulsante di avvio che attiva la bobina di un relè ausiliario; contemporaneamente si chiude il contatto di autoritenuta.

Sempre nello stesso istante un ulteriore contatto del relè ausiliario si chiude e determina, con l'eccitazione della bobina EV1, l'inizio della fase *A*+.

Per garantire la ripresa del ciclo deve essere inserito in serie al contatto del relè un contatto di FC3 (inizialmente chiuso perché sollecitato); non è invece necessario il contatto aperto di FC1 perché, in assenza di alimentazione, la valvola monostabile torna spontaneamente a riposo.

Il contatto di autoritenuta di EV1 viene posto in parallelo alla serie tra contatto del relè ausiliario e contatto di FC3.

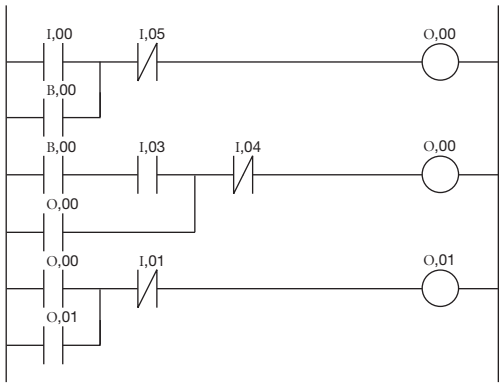
La fase *B*+ ha inizio con la chiusura del contatto di FC2 che attiva la bobina EV2; il contatto di autoritenuta di EV2 viene posto direttamente in parallelo al contatto di FC2.

La fase *A*– ha inizio con l'apertura del contatto di FC4 che, disattivando la bobina EV1, determina il rientro del cilindro.

La fase *B*– ha inizio con l'apertura del contatto di FC1 che, disattivando la bobina EV2, determina il rientro del cilindro.

L'azionamento si interrompe premendo il pulsante di stop che agisce sul circuito del relè ausiliario.

Allo schema in logica elettromeccanica corrisponde il programma scritto in linguaggio ladder riprodotto in FIGURA **51**.




| | |
|---|---|
| I,00 | PA |
| I,01 | FC1 |
| I,02 | FC2 |
| I,03 | FC3 |
| I,04 | FC4 |
| I,05 | PS |
| O,00 | EV1 |
| O,01 | EV2 |

FIGURA **51**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

Accanto allo schema ladder viene riportata la corrispondenza tra le variabili di programma e quelle dello schema in logica elettromeccanica.

Al bit interno B,00 corrisponde il relè ausiliario RA che non compare quindi nello schema di cablaggio.

Conformemente al programma viene riportato in FIGURA **52** il corrispondente schema di cablaggio con il PLC.

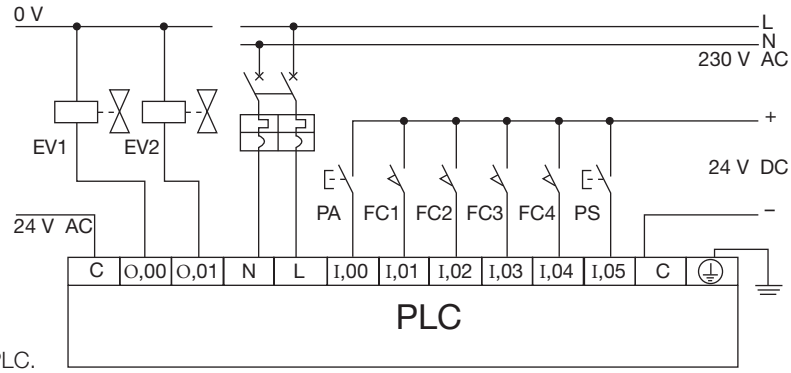



FIGURA **52**
Cablaggio con il PLC.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 6

Si vuole realizzare un impianto elettropneumatico che consenta la marcatura di un oggetto per mezzo di un cilindro verticale che effettua una sequenza di andata e ritorno e lo spostamento mediante un cilindro orizzontale che effettua anch'esso una sequenza di andata e ritorno; i movimenti richiesti vengono schematizzati in FIGURA **53**.

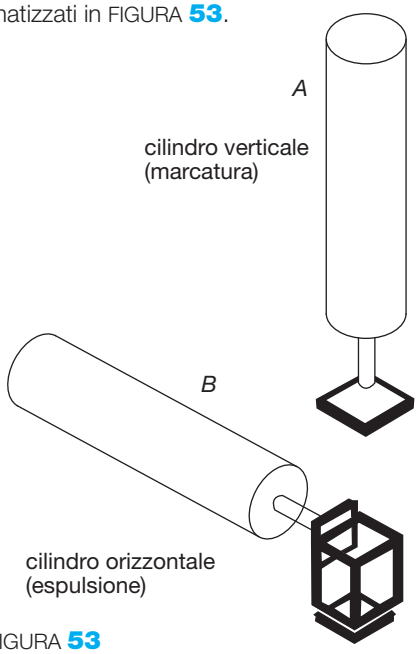



FIGURA **53**
Marcatura ed espulsione di un oggetto.

Si prevedono due modalità di funzionamento:

– *ciclo singolo e valvola bistabile*;
– *ciclo singolo e valvola monostabile*.

## Soluzione

Per il funzionamento dell'impianto è necessario azionare nell'ordine:

– il cilindro A per la marcatura e di seguito per il rientro;
– il cilindro B per l'espulsione e di seguito per il rientro.

Per la sequenza risulta quindi l'espressione:

*A+/A–/B+/B–*

Si ipotizza l'impiego di finecorsa per segnalare le posizioni estreme della corsa dei cilindri; si precisa che:

– FC1 ed FC2 individuano rispettivamente le posizioni tutto dentro e tutto fuori del cilindro A;
– FC3 ed FC4 le corrispondenti posizioni del cilindro B.

L'azionamento, avviato dalla pressione di un pulsante, si interrompe automaticamente una volta concluso il ciclo.

Si esaminano le diverse modalità di funzionamento.

### Ciclo singolo e valvola bistabile

In FIGURA **54** viene riportato lo schema pneumatico e il corrispondente diagramma delle fasi.

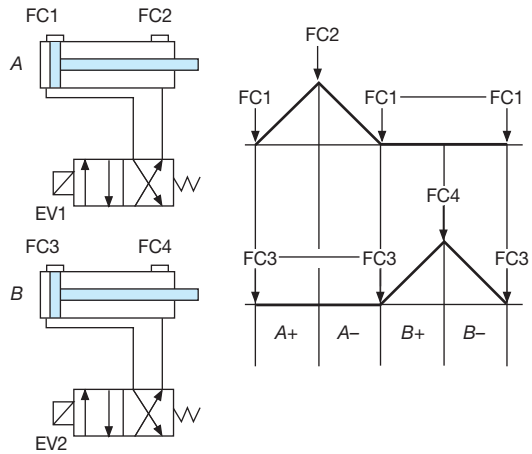



FIGURA **54**
Schema pneumatico e diagramma delle fasi.

Lo schema in logica elettromeccanica viene riportato in FIGURA **55**.

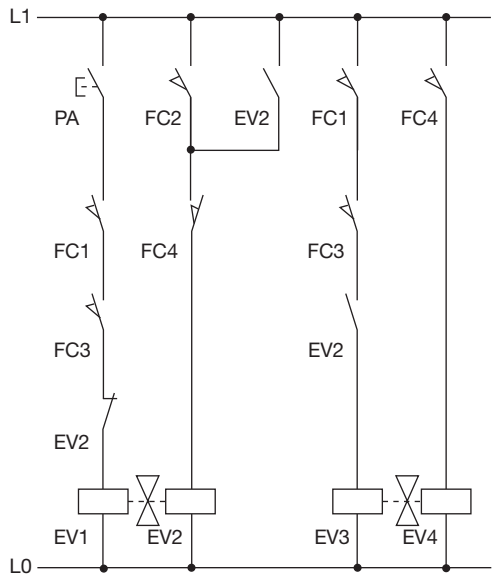



FIGURA **55**
Schema in logica elettromeccanica.

La fase *A+* ha inizio con la pressione del pulsante di avvio che eccita la bobina EV1; i contatti di FC1 ed FC3 sono inizialmente chiusi perché sollecitati (entrambi i cilindri si trovano infatti nella posizione *tutto dentro*); l'azionamento deve essere possibile solo se la bobina EV2 non è stata ancora eccitata (per questo motivo viene inserito in serie un suo contatto chiuso).

La fase *A–* ha inizio con la chiusura del contatto di FC2 che eccita la bobina EV2; si deve mantenere la memoria dell'avvenuto azionamento tramite il contatto di autoritenuta di EV2; il processo termina quando la bobina viene diseccitata dal contatto di FC4.

La fase *B+* ha inizio se i cilindri sono nella posizione ▶


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

*tutto dentro* (quando i contatti di FC1 ed FC3 sono chiusi) e se la bobina EV2 è già stata eccitata (per questo motivo viene inserito in serie un suo contatto aperto).

La fase *B*– ha inizio con la chiusura del contatto di FC4 che eccita la bobina EV4.

Allo schema in logica elettromeccanica corrisponde il programma scritto in linguaggio ladder riprodotto in FIGURA **56**.

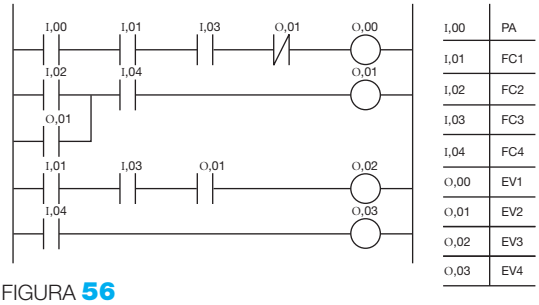



FIGURA **56**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

Accanto allo schema ladder viene riportata la corrispondenza tra le variabili di programma e quelle dello schema in logica elettromeccanica.

Conformemente al programma viene riportato in FIGURA **57** il corrispondente schema di cablaggio con il PLC.

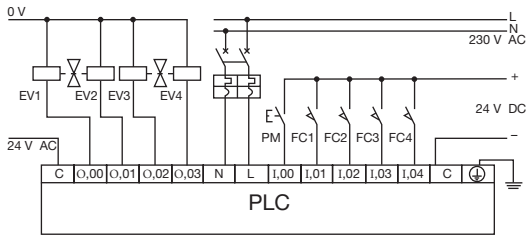



FIGURA **57**
Cablaggio con il PLC.

## Ciclo singolo e valvola monostabile

In FIGURA **58** viene riportato lo schema pneumatico e il corrispondente diagramma delle fasi.

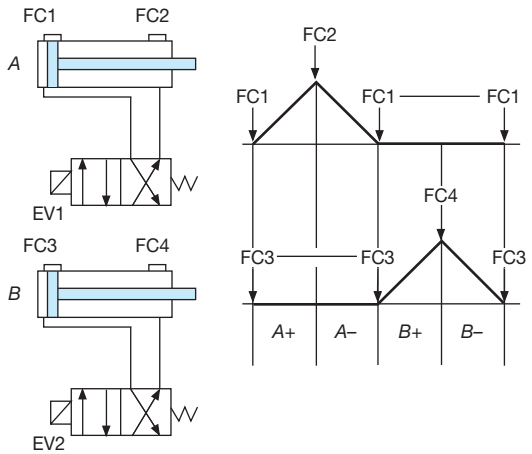



FIGURA **58**
Schema pneumatico e diagramma delle fasi.

Lo schema in logica elettromeccanica viene riportato in FIGURA **59**.

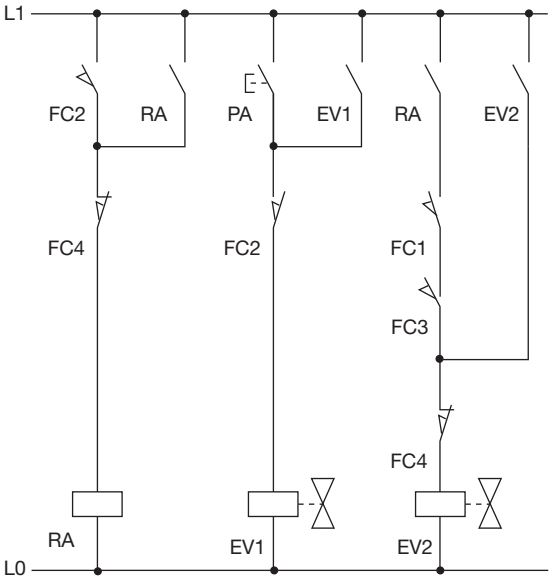



FIGURA **59**
Schema in logica elettromeccanica.

La fase *A*+ ha inizio con la pressione del pulsante di avvio che attiva la bobina EV1; poiché le valvole monostabili tornano spontaneamente nella posizione di riposo una volta cessata l'eccitazione della loro bobina, è necessario inserire il contatto di autoritenuta della bobina in parallelo al pulsante stesso; la fase termina con l'apertura del contatto di FC2.

La fase *A*– ha inizio con l'apertura del contatto di FC2 che, diseccitando la bobina EV1, determina il rientro del cilindro.

La fase *B*+ ha inizio quando i cilindri sono entrambi nella posizione *tutto dentro* (FC1 ed FC3 sollecitati) e quando il contatto del relè ausiliario RA (che esercita la funzione di memoria dell'avvenuto azionamento del primo cilindro) si chiude; il contatto di autoritenuta di EV2 garantisce il mantenimento dell'eccitazione della bobina.

La fase *B*– ha inizio con l'apertura dei due contatti di FC4 che diseccitano la bobina EV2 e il relè ausiliario RA.

Allo schema in logica elettromeccanica corrisponde il programma scritto in linguaggio ladder riprodotto in FIGURA **60**.

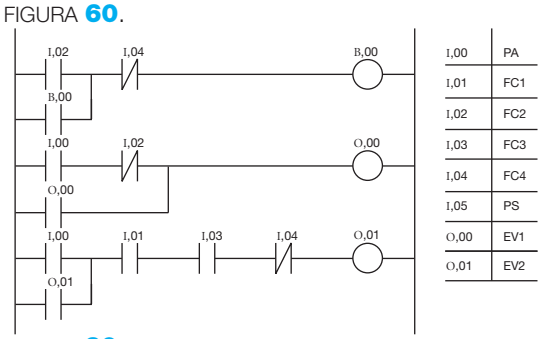



FIGURA **60**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 6

Accanto allo schema ladder viene riportata la corrispondenza tra le variabili di programma e quelle dello schema in logica elettromeccanica.

Al bit interno B,00 corrisponde il relè ausiliario RA che non compare quindi nello schema di cablaggio.

Conformemente al programma viene riportato in FIGURA **61** il corrispondente schema di cablaggio con il PLC.

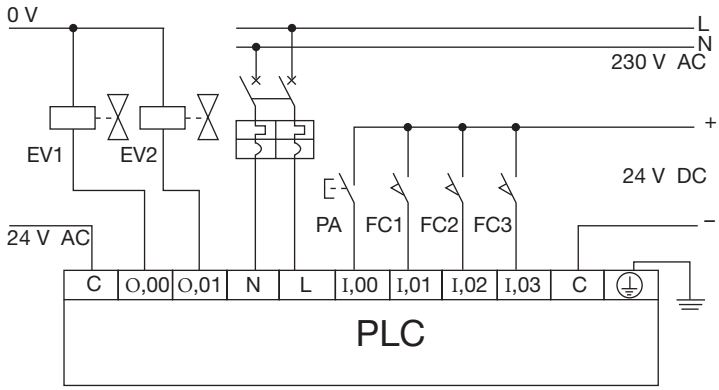



FIGURA **61**
Cablaggio con il PLC.

ESEMPIO 7

Si vuole realizzare un impianto elettropneumatico in logica cablata e in logica programmata che consenta lo spostamento di un oggetto mediante un cilindro orizzontale, la sua marcatura per mezzo di un cilindro verticale che effettua uno spostamento di andata e ritorno, e il successivo ritorno del primo cilindro; i movimenti richiesti vengono schematizzati in FIGURA **62**.

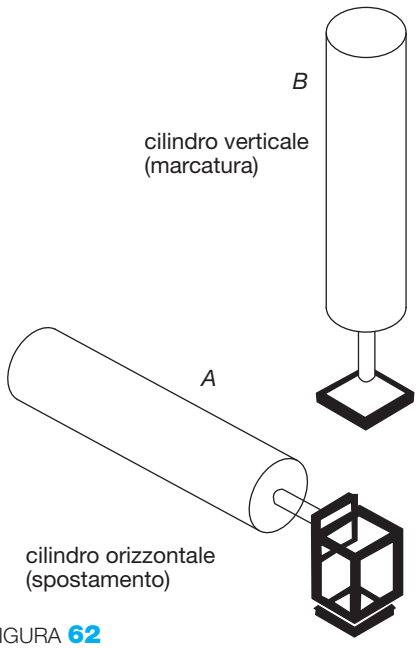



FIGURA **62**
Marcatura ed espulsione di un oggetto.

Si prevede il funzionamento con *ciclo singolo* e *valvola bistabile*.

## Soluzione

Per il funzionamento dell'impianto è necessario azionare nell'ordine:

- il cilindro A per lo spostamento;
- il cilindro B per la marcatura;
- il cilindro B per il rientro;
- il cilindro A per il rientro.

Per la sequenza risulta quindi l'espressione:

$$A+/B+/B-/A-$$

Si ipotizza l'impiego di finecorsa per segnalare le posizioni estreme della corsa dei cilindri:

- FC1 ed FC2 individuano rispettivamente le posizioni tutto dentro e tutto fuori del cilindro A;
- FC3 ed FC4 le corrispondenti posizioni del cilindro B.

L'azionamento, avviato dalla pressione di un pulsante, si interrompe automaticamente una volta concluso il ciclo.

In FIGURA **63** viene riportato lo schema pneumatico e il corrispondente diagramma delle fasi.

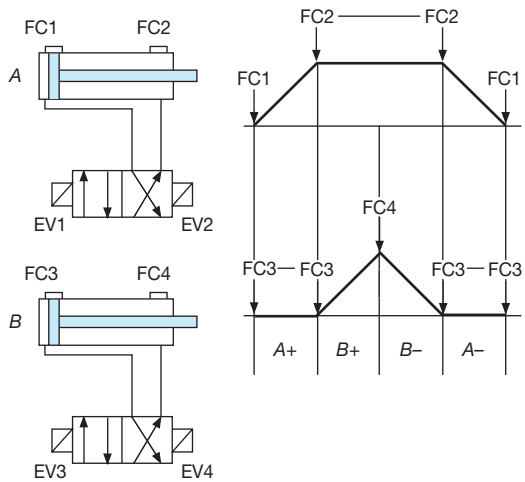



FIGURA **63**
Schema pneumatico e diagramma delle fasi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Lo schema in logica elettromeccanica viene riportato in FIGURA **64**.

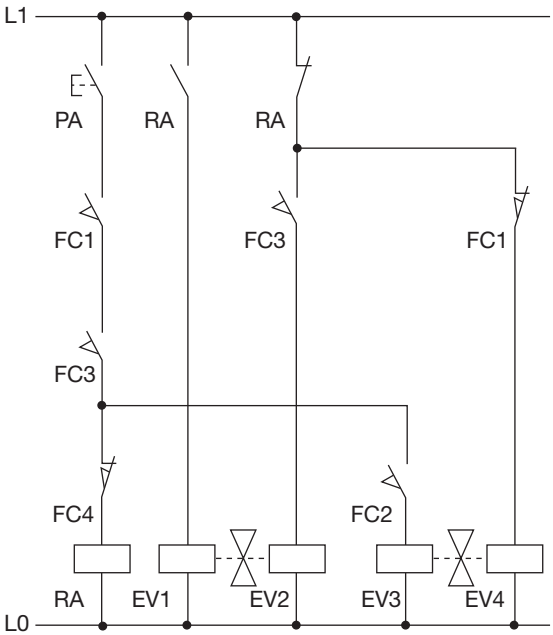



FIGURA **64**
Schema in logica elettromeccanica.

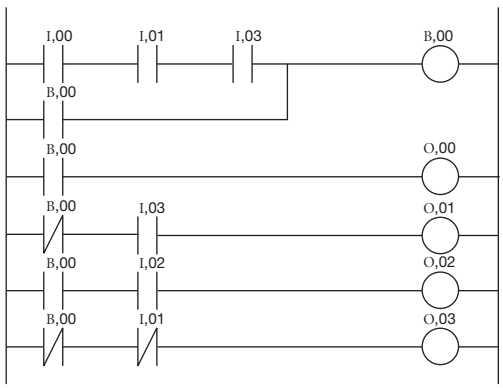
La fase *A*+ ha inizio con la pressione del pulsante di avvio che eccita la bobina del relè ausiliario RA; di conseguenza si chiude il contatto di autoritenuta e si eccita la bobina EV1; l'avviamento deve avvenire solo se entrambi i cilindri si trovano nella posizione *tutto dentro*; per questo motivo si inseriscono i contatti di FC1 ed FC3 in serie (all'avviamento risultano infatti chiusi perché sollecitati).

La fase *B*+ ha inizio (essendo il contatto di RA già chiuso con la pressione del pulsante di avvio) quando si chiude il contatto di FC2 che attiva la bobina EV3.

La fase *B*– ha inizio con l'apertura del contatto di FC4 che diseccita la bobina RA; come conseguenza si chiude il contatto di RA (aperto durante le prime due fasi), si eccita la bobina EV4 e si riaprono i contatti di RA in serie con EV1 ed EV3; il contatto di FC1 in serie alla bobina EV4 è chiuso perché non sollecitato dopo la pressione del pulsante di avvio.

La fase *A*– ha inizio con la chiusura del contatto di FC3 che eccita la bobina EV2 per il rientro del cilindro A.

Allo schema in logica elettromeccanica corrisponde il programma scritto in linguaggio ladder riprodotto in FIGURA **65**.




| | |
|---|---|
| I,00 | PA |
| I,01 | FC1 |
| I,02 | FC2 |
| I,03 | FC3 |
| I,04 | FC4 |
| O,00 | EV1 |
| O,01 | EV2 |
| O,02 | EV3 |
| O,03 | EV4 |

FIGURA **65**
Schema ladder e assegnazione degli ingressi e delle uscite.

Accanto allo schema ladder viene riportata la corrispondenza tra le variabili di programma e le variabili dello schema in logica elettromeccanica.

Al bit interno B,00 corrisponde il relè ausiliario RA che non compare quindi nello schema di cablaggio.

Conformemente al programma viene riportato in FIGURA **66** il corrispondente schema di cablaggio con il PLC.

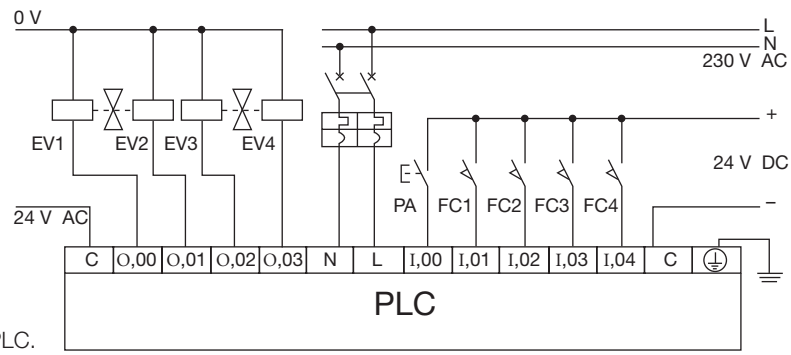



FIGURA **66**
Cablaggio con il PLC.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# DOMANDE a risposta aperta

**1** **Identificare le principali funzioni svolte da un PLC.**

**2** **Evidenziare la differenza tra PLC modulari e PLC compatti.**

**3** **Rappresentare graficamente lo schema a blocchi funzionale di un generico PLC.**

**4** **Identificare la tipologia di collegamento tra i diversi blocchi funzionali interni al PLC.**

**5** **Spiegare anche con esempi il significato dei termini autocontrollo, ridondanza e sicurezza positiva.**

**6** **Definire la tipologia degli elementi costitutivi di un sistema di comunicazione tra PLC.**

**7** **Classificare le diverse tipologie di linguaggi di programmazione di un PLC evidenziandone le caratteristiche.**

**8** **Completare la** FIGURA **67** **riportando nelle caselle che si trovano accanto ai simboli il significato dei medesimi.**

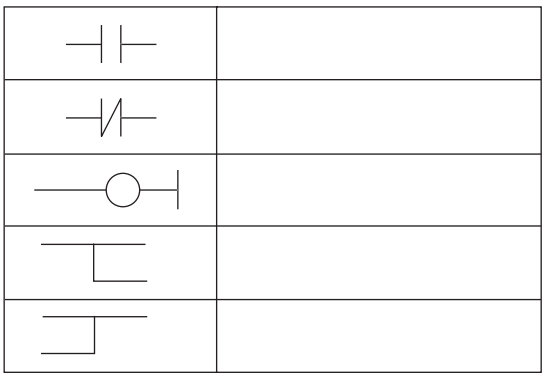


FIGURA **67**

**9** **Realizzare lo schema ladder corrispondente allo schema in logica elettromeccanica riportato in** FIGURA **68.**

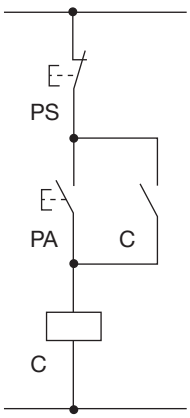



FIGURA **68**

**10** **Realizzare lo schema ladder corrispondente allo schema in logica elettromeccanica riportato in** FIGURA **69.**

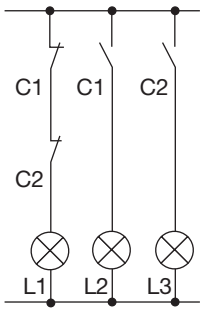



FIGURA **69**

**11** **Realizzare lo schema ladder corrispondente allo schema in logica elettromeccanica riportato in** FIGURA **70.**

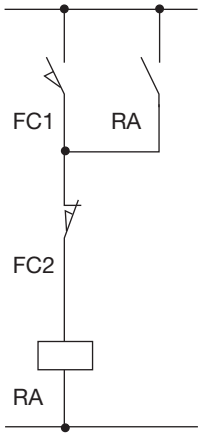



FIGURA **70**

**12** **Realizzare lo schema ladder corrispondente allo schema in logica elettromeccanica riportato in** FIGURA **71.**

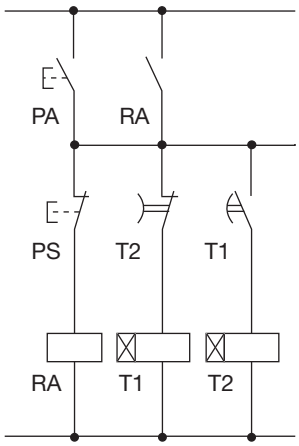



FIGURA **71**

**13** **Rappresentare il diagramma delle fasi relativo al seguente ciclo di funzionamento di due cilindri pneumatici:**

***A+/B+/A–/B–***

**14** **Rappresentare il diagramma delle fasi relativo al ciclo di funzionamento di due cilindri pneumatici:**

***A+/A–/B+/B–***

**15** **Rappresentare il diagramma delle fasi relativo al ciclo di funzionamento di due cilindri pneumatici:**

***A+/B+/B–/A–***



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**1** **Il termine PLC identifica l'apparecchiatura nota come:**

A computer logico programmabile
B controllore logico programmabile
C codificatore logico programmabile
D cavo logico programmabile

**2** **Un optoisolatore è un componente interno del PLC che trasferisce un segnale tramite:**

A emissione luminosa
B emissione acustica
C collegamento elettrico
D fibra ottica

**3** **Con il termine risoluzione si intende:**

A la massima variazione di un segnale analogico avvertita da un convertitore A/D
B la massima variazione di un segnale digitale avvertita da un convertitore A/D
C la minima variazione di un segnale digitale avvertita da un convertitore A/D
D la minima variazione di un segnale analogico avvertita da un convertitore A/D

**4** **Il diagramma delle fasi riportato in** FIGURA **72** **rappresenta la sequenza:**

A *A+/B+/B–/A–*
B *A+/A–/B+/B–*
C *A+/B+/A–/B–*
D *B+/A+/B–/A–*

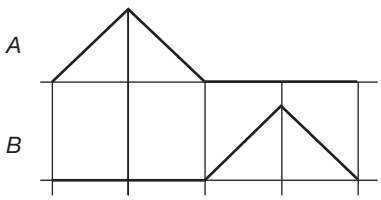



FIGURA **72**

**5** **Il diagramma delle fasi riportato in** FIGURA **73** **rappresenta la sequenza:**

A *A+/B+/B–/A–*
B *A+/A–/B+/B–*
C *A+/B+/A–/B–*
D *B+/A+/B–/A–*

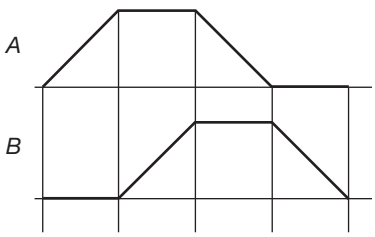



FIGURA **73**

**6** **Il diagramma delle fasi riportato in** FIGURA **74** **rappresenta la sequenza:**

A *A+/B+/B–/A–*
B *A+/A–/B+/B–*
C *A+/B+/A–/B–*
D *B+/A+/B–/A–*

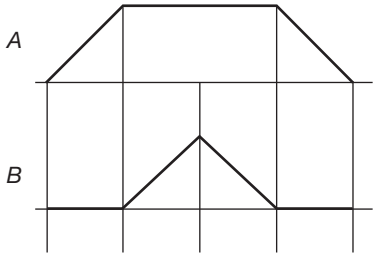



FIGURA **74**

**7** **Le combinazioni possibili per il segnale digitale in un convertitore A/D a 10 bit sono:**

A 2048
B 516
C 1024
D 256

**8** **Una connessione Darlington prevede l'impiego di:**

A un transistor
B un transistor e un diodo
C due transistor
D due diodi

**9** **Per definire sinteticamente il linguaggio ladder può essere utilizzata la sigla:**

A SFC
B KOP
C FUP
D FBS

**10** **Per definire sinteticamente il linguaggio booleano può essere utilizzata la sigla:**

A ST
B FBD
C HLL
D AWL

**11** **Per definire sinteticamente il linguaggio Grafcet può essere utilizzata la sigla:**

A KOP
B FUP
C FSC
D AWL



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 6 Esercitazioni applicate al PLC

## 1 Concetti introduttivi

Vengono di seguito proposte delle esercitazioni di simulazione che riguardano il PLC in generale e il linguaggio ladder in particolare.

Gli strumenti utilizzati sono:

- il programma di simulazione *Multisim*;
- il software *Zelio Soft 2* proprio dei PLC compatti e modulari Zelio.

Le applicazioni, essenzialmente di tipo didattico e volte a familiarizzare con la programmazione in linguaggio ladder, riguardano in particolare:

- comandi per l'accensione di lampade (con *Multisim*);
- comandi per l'avviamento di motori (con *Zelio Soft 2*).

## 2 Impiego di Multisim per la simulazione con il PLC

Il programma di simulazione *Multisim* è uno strumento di *progettazione* che fornisce all'utente tutti i componenti e gli strumenti necessari per creare con il computer un progetto senza fare ricorso a componenti e strumenti reali.

Allo stato attuale l'ultima versione del programma è *Multisim 11*.

Il programma viene di seguito utilizzato per il tracciamento di schemi ladder per la programmazione del PLC.

I componenti che si utilizzano negli schemi si ricavano da:

- *Advanced Peripherals* e *Ladder Diagrams*, come viene evidenziato in FIGURA **1**, per i componenti necessari alla realizzazione degli schemi ladder (contatti e bobine);
- da *Indicators* e da *Basic*, come viene evidenziato in FIGURA **2**, rispettivamente per la lampada di segnalazione (*Lamp*) che simula le uscite e per l'interruttore (*Switch*) che simula gli ingressi.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

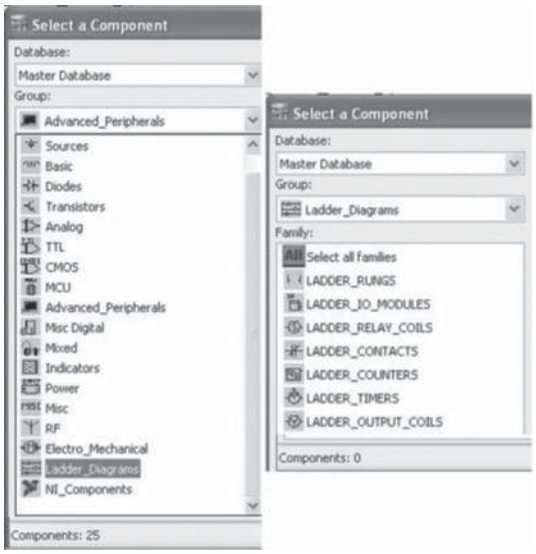



FIGURA **1**
Selezione dei componenti degli schemi ladder.

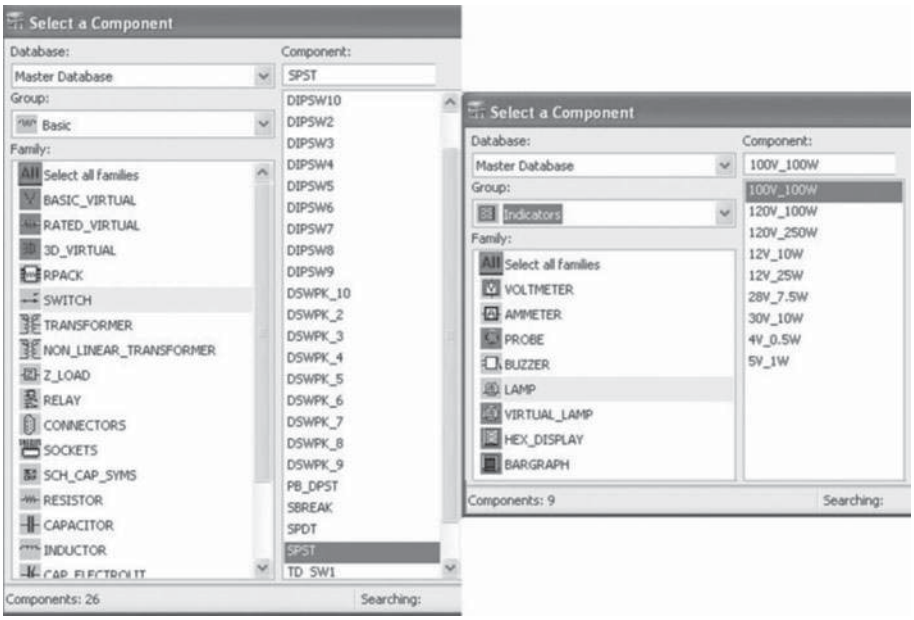



FIGURA **2**
Selezione della lampada di segnalazione e dello switch.

Per reperire i componenti degli schemi ladder nel seguito utilizzati da *Ladder Diagrams*, come evidenziato in FIGURA **3**, si devono selezionare:

- *LADDER RUNGS* per le linee di alimentazione;
- *LADDER CONTACTS* per i contatti NA ed NC;

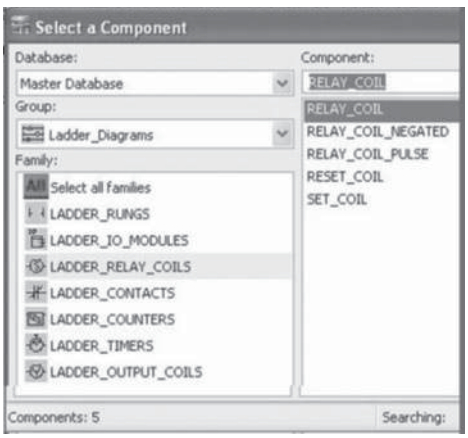



FIGURA **3**
Componenti di Ladder Diagrams.

- *LADDER RELAY COILS* per le bobine dei relè;
- *LADDER OUTPUT COILS* per le bobine dei moduli di ingresso/uscita;
- *LADDER TIMERS* per i temporizzatori;
- *LADDER IO MODULE* per i moduli d'ingresso e d'uscita.

In FIGURA **4** viene riportato in particolare il simbolo del temporizzatore e la finestra di dialogo relativa alle sue proprietà (*Properties*).

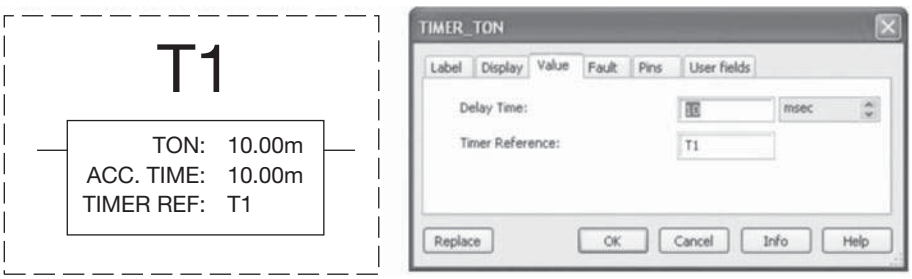



FIGURA **4**
Proprietà dei temporizzatori.

A questo tipo di temporizzatore (*TIMER ON*) deve essere assegnato il tempo di ritardo (*Delay Time*) ovvero il tempo che intercorre tra l'attivazione della sua bobina e il cambiamento di stato dei suoi contatti.

In FIGURA **5** viene invece riportato un esempio di modulo d'uscita e di bobina riservata all'attivazione delle uscite (*LADDER OUTPUT COILS*).

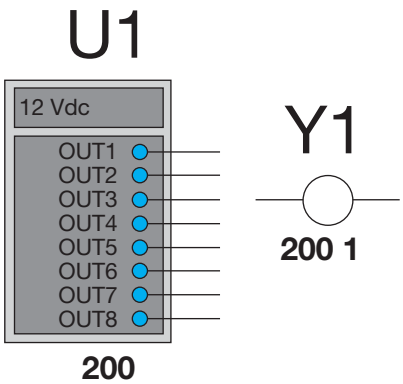



FIGURA **5**
Esempio di modulo d'uscita e corrispondente bobina di attivazione.

Il modulo ha otto uscite collegabili ad altrettante periferiche; ciascuna delle uscite deve essere associata a una bobina dalla cui attivazione consegue quella dell'uscita corrispondente.

Nel corso delle esercitazioni viene utilizzata anche la periferica avanzata (*Advanced Peripherals*) denominata TRAFFIC LIGHT SINGLE che si ricava, come evidenziato in FIGURA **6**, dalla libreria *Advanced Peripherals*.

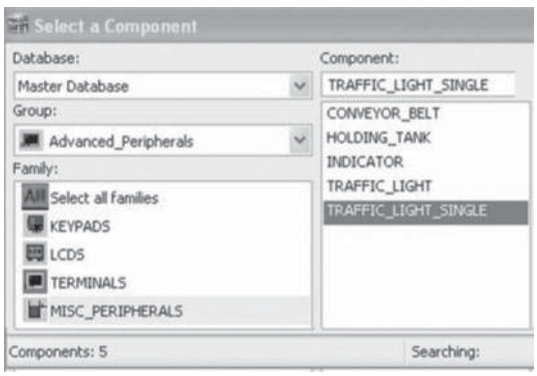



FIGURA **6**
Selezione del componente TRAFFIC LIGHT SINGLE.

Il componente viene utilizzato per la simulazione di un impianto semaforico e viene quindi considerato come uscita.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Nella libreria *Advanced Peripherals* sono disponibili altre periferiche avanzate da utilizzarsi per la simulazione del funzionamento di altri impianti; esse sono:

- TRAFFIC LIGHT, per la simulazione di un incrocio semaforico;
- HOLDING TANK, per la simulazione di un serbatoio;
- CONVEYOR BELT, per la simulazione di un nastro trasportatore.

In FIGURA **7** viene riportato lo schema per la simulazione di un incrocio semaforico proposto nella *guida in linea* fornita con il software.

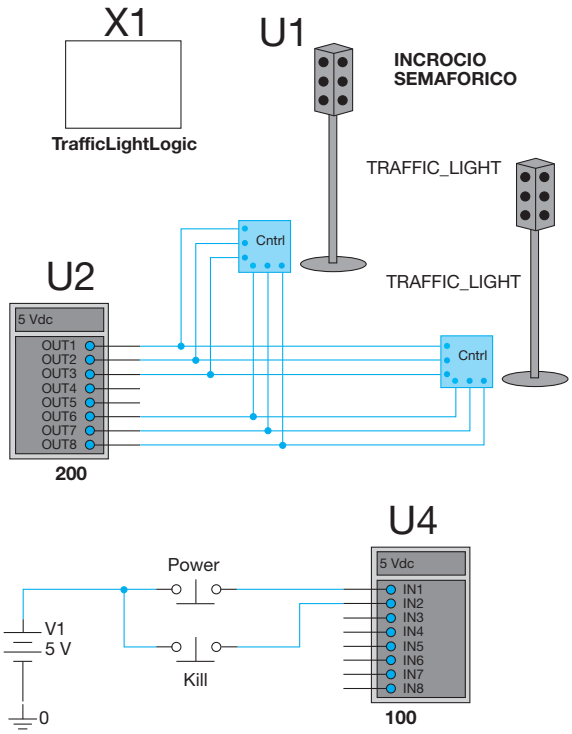



FIGURA **7**
Schema per la simulazione dell'impianto semaforico.

In FIGURA **8** viene riportato lo schema per la simulazione di un serbatoio proposto nella *guida in linea* fornita con il software.

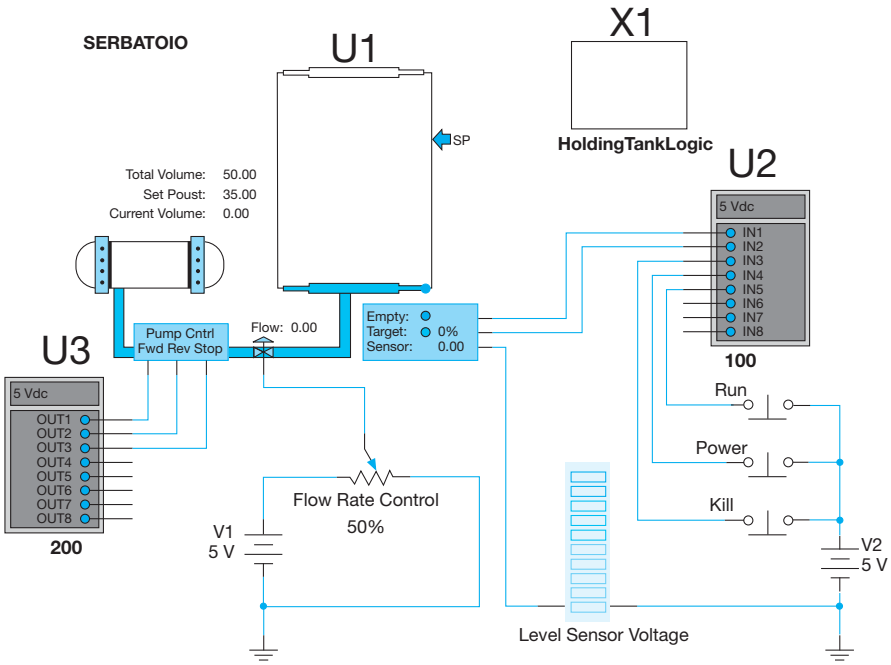



FIGURA **8**
Schema per la simulazione di un serbatoio.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In FIGURA **9** viene riportato lo schema per la simulazione di un nastro trasportatore proposto nella *guida in linea* fornita con il software.

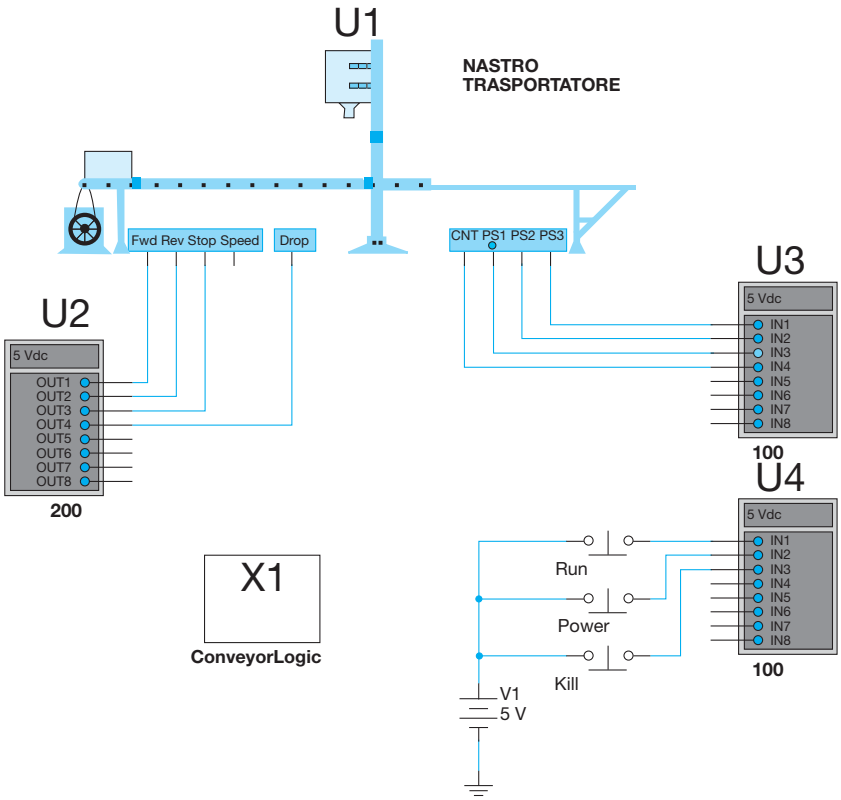



FIGURA **9**
Schema per la simulazione di un nastro trasportatore.

## 3 Applicazioni di Multisim

Vengono di seguito proposte alcune esercitazioni di programmazione del PLC facendo uso degli schemi ladder utilizzando gli strumenti messi a disposizione dal programma.

Gli argomenti che sono oggetto delle esercitazioni sono i seguenti:

- esercitazione 1 – Contatti in serie che comandano una lampada
- esercitazione 2 – Contatti in parallelo che comandano una lampada
- esercitazione 3 – Simulazione del contatto di autoritenuta
- esercitazione 4 – Comando in sequenza di due lampade
- esercitazione 5 – Simulazione del funzionamento di un semaforo singolo

### Esercitazione 1 – Contatti in serie che comandano una lampada

Scopo della prova è di verificare il funzionamento di un utilizzatore X3 (lampada) in relazione allo stato degli ingressi simulati con due interruttori S1 ed S2.

I due interruttori attivano due bobine i cui contatti NA posti tra loro in serie comandano l'utilizzatore.

Vengono effettuate quattro prove:

- prova 1 con S1 ed S2 entrambi aperti come in FIGURA **10**;
- prova 2 con S1 chiuso ed S2 aperto come in FIGURA **11**;


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- prova 3 con S1 aperto ed S2 chiuso come in FIGURA **12**;
- prova 4 con S1 ed S2 entrambi chiusi come in FIGURA **13**.

Il funzionamento è quello tipico di una porta logica NAND; nel quarto caso la lampada si accende.

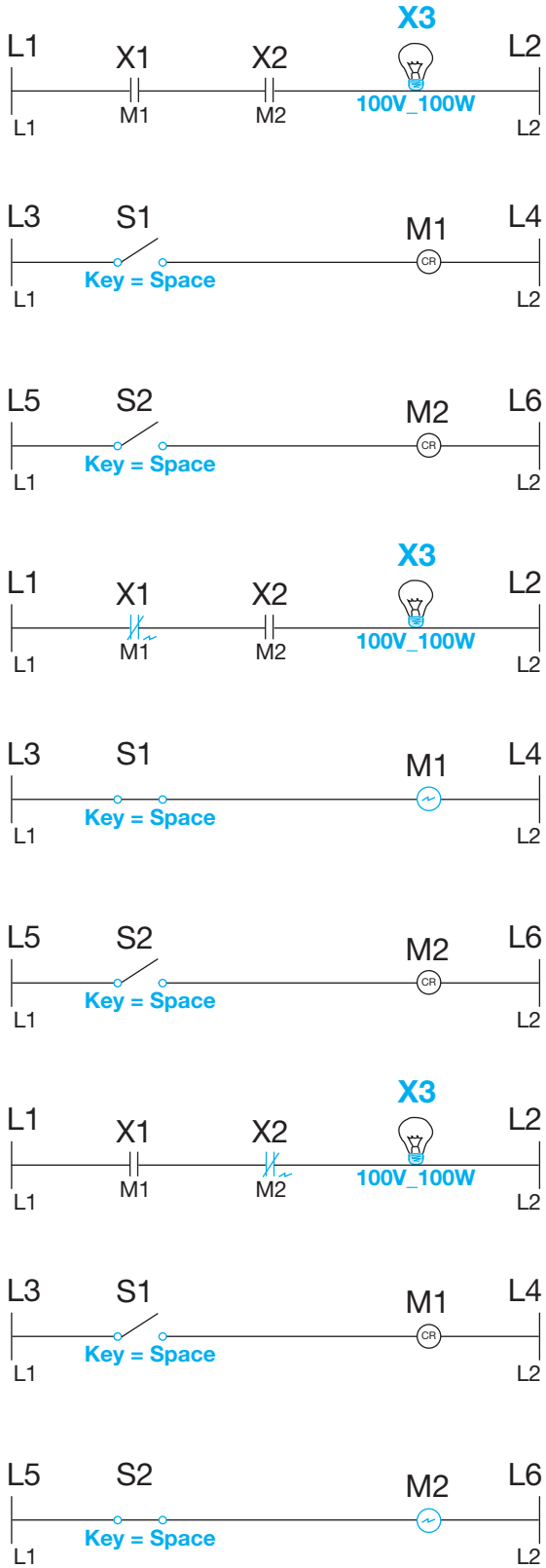



FIGURA **10**
Prova con S1 ed S2 entrambi aperti.

FIGURA **11**
Prova con S1 chiuso ed S2 aperto.

FIGURA **12**
Prova con S1 aperto ed S2 chiuso.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

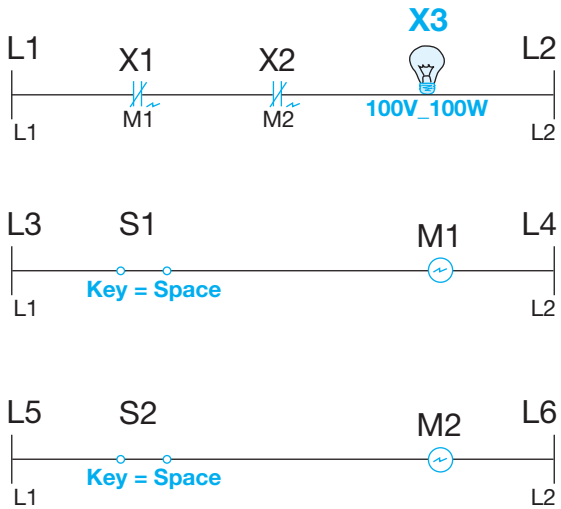



FIGURA **13**
Prova con S1 ed S2 entrambi chiusi.

## Esercitazione 2 – Contatti in parallelo che comandano una lampada

Scopo della prova è di verificare il funzionamento di un utilizzatore X3 (lampada) in relazione allo stato degli ingressi simulati con due interruttori S1 ed S2.

I due interruttori attivano due bobine M1 ed M2 i cui contatti NA, posti tra loro in parallelo, comandano l'utilizzatore.

Vengono effettuate quattro prove:

- prova 1 con S1 ed S2 entrambi aperti come in FIGURA **14**;
- prova 2 con S1 chiuso ed S2 aperto come in FIGURA **15**;
- prova 3 con S1 aperto ed S2 chiuso come in FIGURA **16**;
- prova 4 con S1 ed S2 entrambi chiusi come in FIGURA **17**.

Il funzionamento è quello tipico di una porta logica OR; solo nel primo caso la lampada si accende.

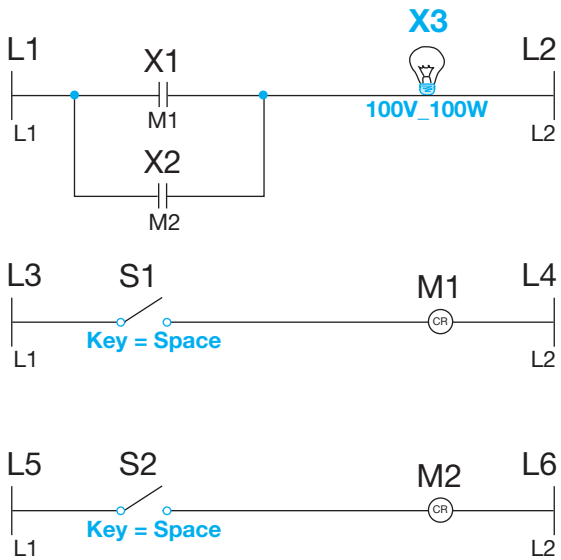



FIGURA **14**
Prova 1 con S1 ed S2 entrambi aperti.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

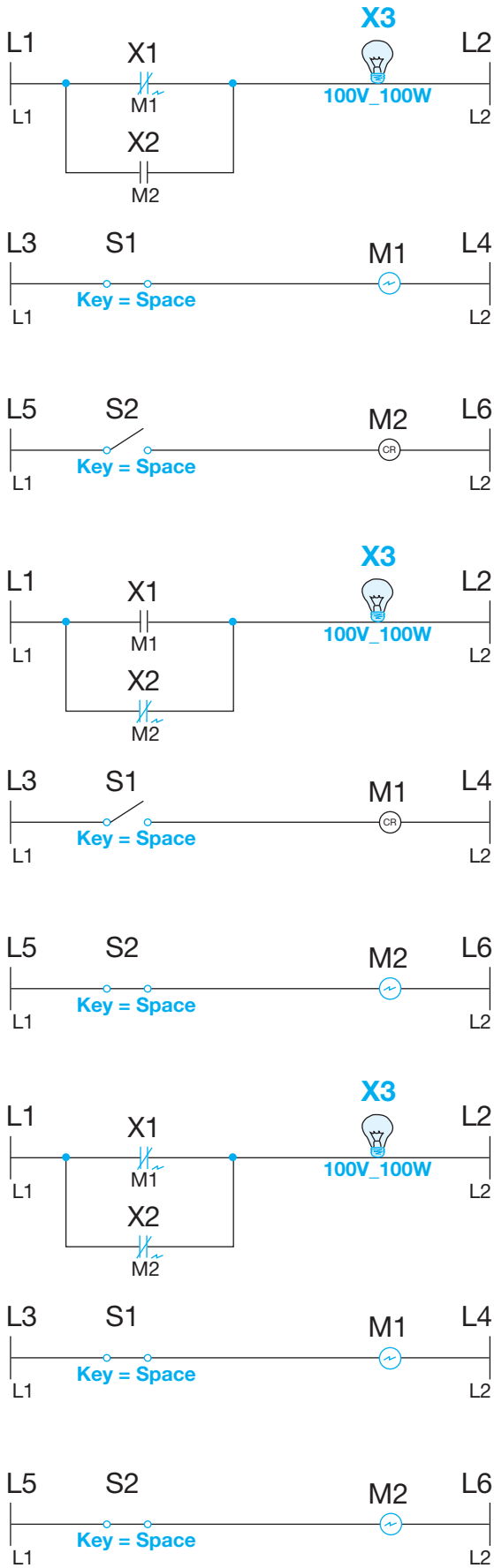



FIGURA **15**
Prova 2 con S1 chiuso ed S2 aperto.

FIGURA **16**
Prova 3 con S1 aperto ed S2 chiuso.

FIGURA **17**
Prova 4 con S1 ed S2 entrambi chiusi.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Esercitazione 3 – Simulazione del contatto di autoritenuta

Scopo della prova è di verificare il funzionamento di un utilizzatore X5 (lampada) in relazione allo stato degli ingressi simulati con due interruttori S1 ed S2.

Le specifiche della simulazione sono le seguenti:

- i due interruttori attivano due bobine M1 ed M2;
- l'utilizzatore viene a trovarsi in serie al contatto NA di una bobina M3;
- il contatto NA di M1 simula il pulsante di avvio di un impianto;
- il contatto NC di M2 simula il pulsante di stop del medesimo;
- la bobina M3 viene collegata in serie con il pulsante di stop e con il parallelo tra il pulsante di avvio e un contatto NA di M3 che simula pertanto il *contatto di autoritenuta*.

Vengono effettuate quattro prove:

- prova 1 con S1 ed S2 entrambi aperti come in FIGURA **18**;
- prova 2 con S1 che si chiude come in FIGURA **19**;
- prova 3 con S1 che si riapre come in FIGURA **20**;
- prova 4 con S2 che si chiude come in FIGURA **21**.

All'inizio della simulazione (prova 1) gli interruttori sono entrambi aperti e la lampada rimane spenta.

Chiudendo l'interruttore S1 (prova 2) la lampada si accende; si precisa che la chiusura di S1 simula la pressione del pulsante di avvio.

Riaprendo l'interruttore S1 (prova 3) la lampada rimane accesa; si precisa che la riapertura di S1 simula il rilascio del pulsante di avvio; la lampada rimane accesa in quanto il mantenimento dell'alimentazione avviene attraverso il contatto di autoritenuta che rimane chiuso.

Chiudendo l'interruttore S2 (prova 4) viene interrotta l'alimentazione e la lampada si spegne; si precisa che la chiusura di S2 simula la pressione del pulsante di stop.

Riaprendo l'interruttore S2 si ritorna nelle condizioni iniziali; si precisa che la riapertura di S2 simula il rilascio del pulsante di stop.

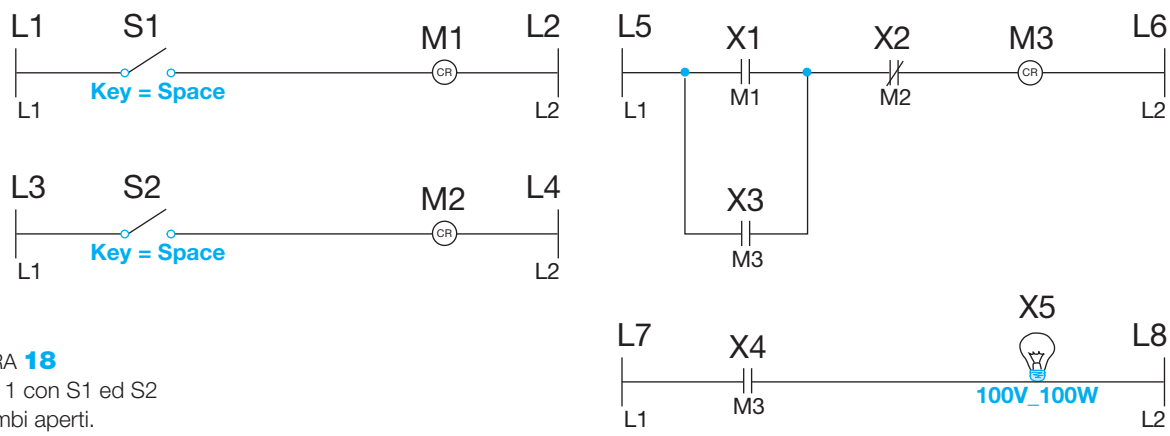



FIGURA **18**
Prova 1 con S1 ed S2 entrambi aperti.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

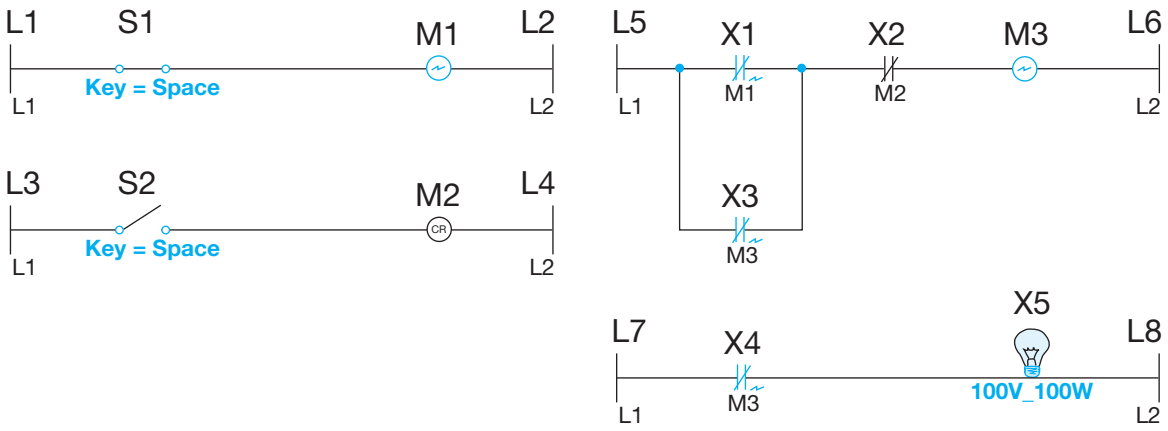



FIGURA **19**
Prova 2 con S1 che si chiude.

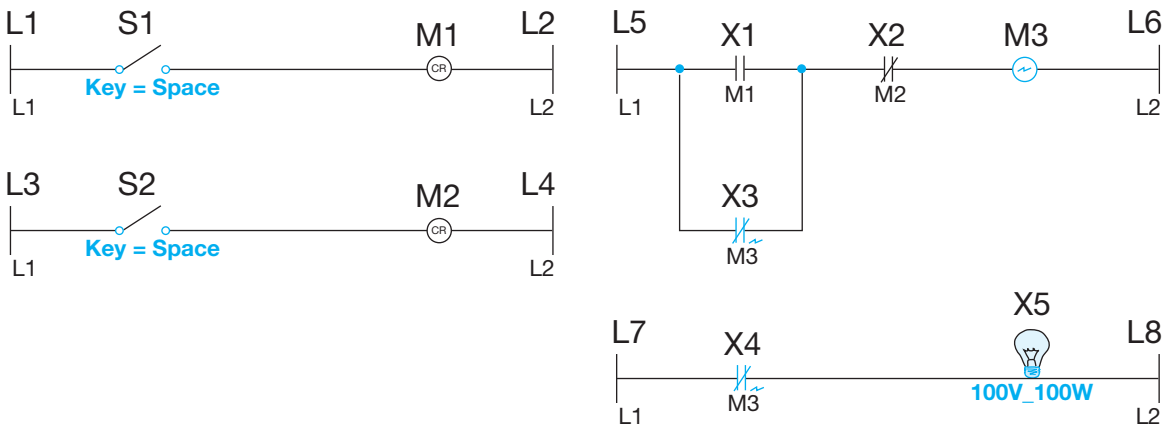



FIGURA **20**
Prova 3 con S1 che si riapre.

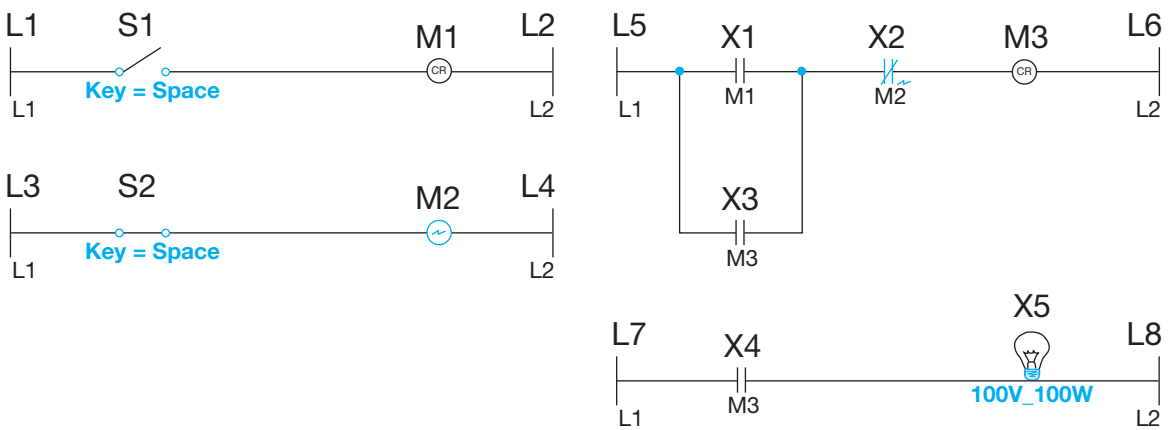



FIGURA **21**
Prova 4 con S2 che si chiude.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## Esercitazione 4 – Comando in sequenza di due lampade

Scopo della prova è di verificare il funzionamento di due utilizzatori X5 e X6 (lampade) in relazione all'attivazione di un ingresso simulato attraverso l'interruttore S1.

Le specifiche della simulazione sono le seguenti:

- chiudendo l'interruttore la bobina M1 si eccita e innesca un processo di accensione in sequenza delle due lampade;
- il temporizzatore T1 inizia il conteggio e, al termine del tempo di conteggio prefissato, si accende la lampada X5;
- in contemporanea con l'accensione della prima lampada inizia il conteggio del temporizzatore T2;
- al termine del conteggio si accende la lampada X6.

Le modalità di funzionamento specificate sono possibili per il fatto che:

- il contatto NA di M1 eccita il temporizzatore T1;
- il contatto NA di T1 attiva la lampada X5 ed eccita il temporizzatore T2;
- il contatto NA di T2 attiva la lampada X6.

La prova di funzionamento evidenzia le diverse fasi della sequenza e precisamente:

- la fase 1 (stato iniziale) con S1 aperto come in FIGURA **22**;
- la fase 2 con il conteggio di T1 e le lampade ancora spente come in FIGURA **23**;
- la fase 3 con il conteggio di T2 e la prima lampada accesa come in FIGURA **24**;
- la fase 4 con le due lampade entrambe accese come in FIGURA **25**.

Per riportare il sistema nelle condizioni iniziali è sufficiente la riapertura dell'interruttore.

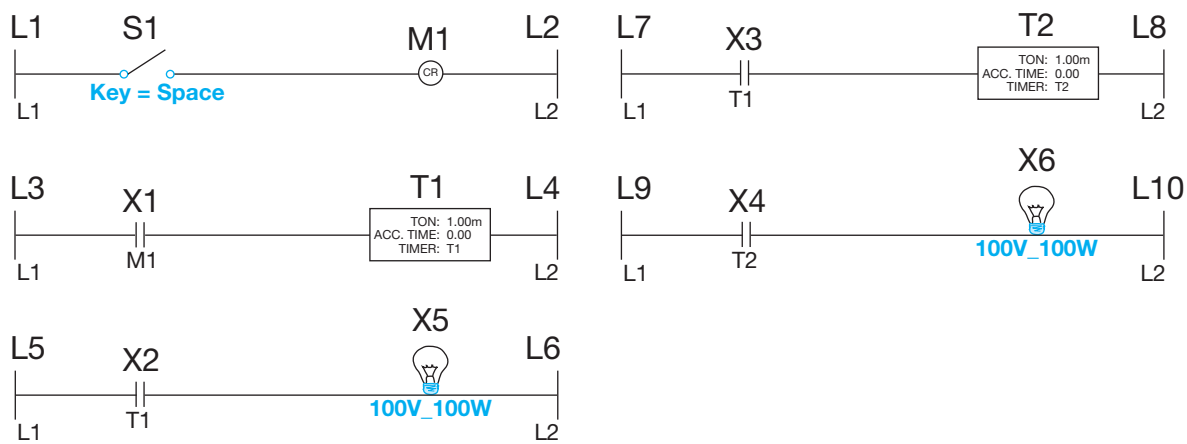



FIGURA **22**
Fase 1 con il sistema nello stato iniziale.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

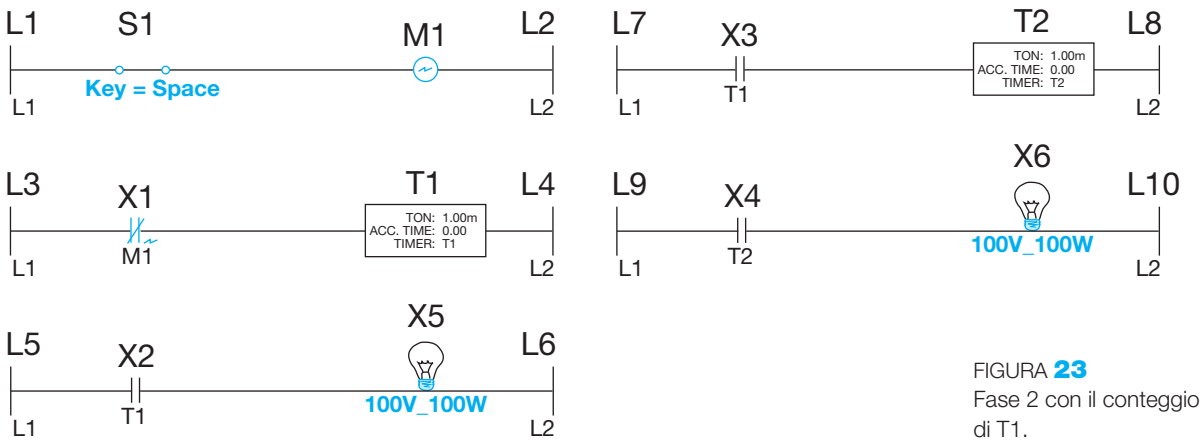



FIGURA **23**
Fase 2 con il conteggio di T1.

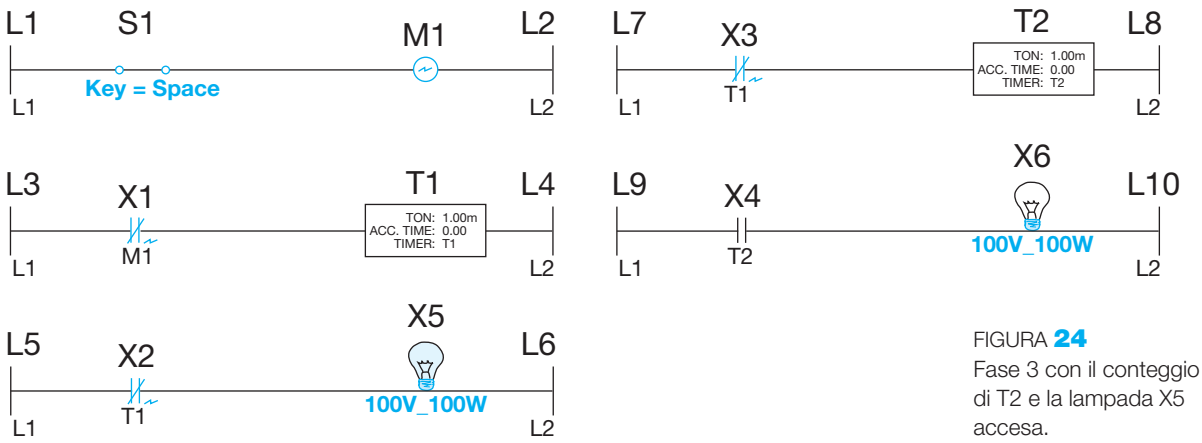



FIGURA **24**
Fase 3 con il conteggio di T2 e la lampada X5 accesa.

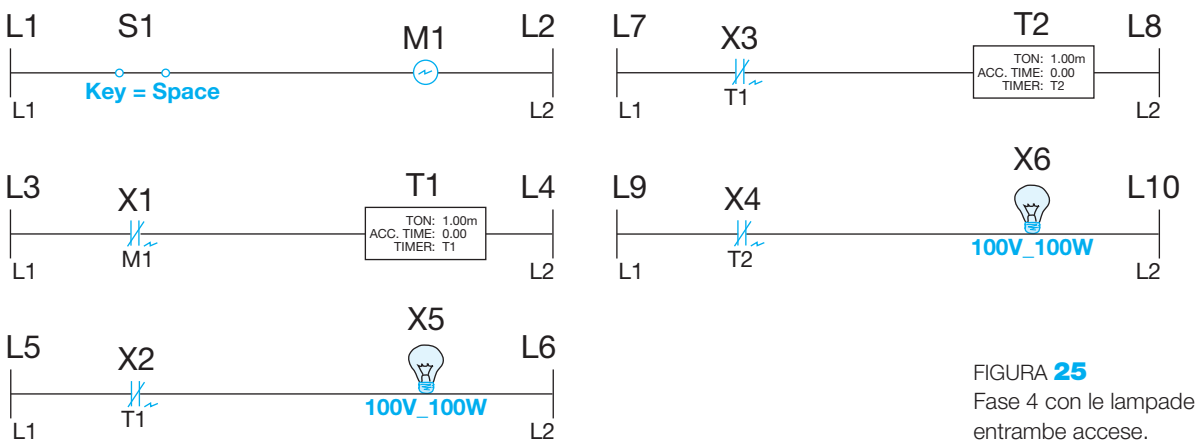



FIGURA **25**
Fase 4 con le lampade entrambe accese.

## Esercitazione 5 – Simulazione del funzionamento di un semaforo singolo

Scopo della prova è di verificare il funzionamento della periferica avanzata *semaforo singolo* (TRAFFIC LIGHT SINGLE) per la simulazione del funzionamento della medesima secondo la seguente sequenza di accensione delle lampade:

- verde (fase 1);
- verde e gialla (fase 2);
- rossa (fase 3).



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Chiudendo l'interruttore S1 che attiva la bobina M1 viene abilitato il funzionamento dell'impianto.

Per la sequenza si ha che:

- in contemporanea con l'attivazione della lampada verde inizia il conteggio del temporizzatore T1;
- alla fine del conteggio di T1 si accende anche la lampada gialla (in quanto attivata dal contatto NA di T1 che si chiude) e inizia il conteggio del temporizzatore T2 (attivato dal contatto NA di T1 che si chiude);
- alla fine del conteggio di T2 si accende la lampada rossa (in quanto attivata dal contatto NA di T2 che si chiude), le lampade verde e gialla si spengono (in quanto disattivate dai contatti NC di T2 che si aprono) e inizia il conteggio del temporizzatore T3 (attivato dal contatto NA di T2 che si chiude);
- alla fine del conteggio di T3 la lampada rossa si spegne e il sistema riprende il ciclo (che inizia con la lampada verde accesa) per la presenza del contatto NC di T3 in serie.

La prova di funzionamento evidenzia le diverse fasi della sequenza e precisamente:

- la condizione iniziale con l'interruttore aperto come in FIGURA **26**;
- la prima fase con la lampada verde accesa come in FIGURA **27**;
- la seconda fase con le lampade verde e gialla entrambe accese come in FIGURA **28**;
- la terza fase con la lampada rossa accesa come in FIGURA **29**.

Per riportare il sistema nelle condizioni iniziali è sufficiente la riapertura dell'interruttore.

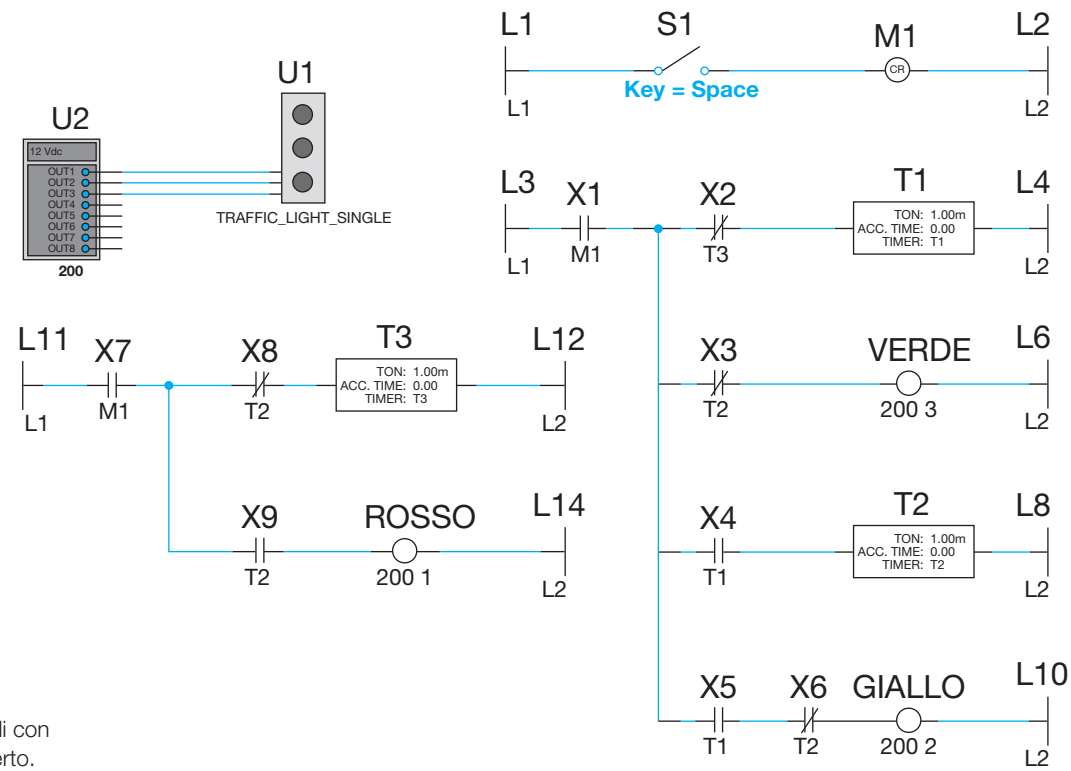



FIGURA **26**
Condizioni iniziali con l'interruttore aperto.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

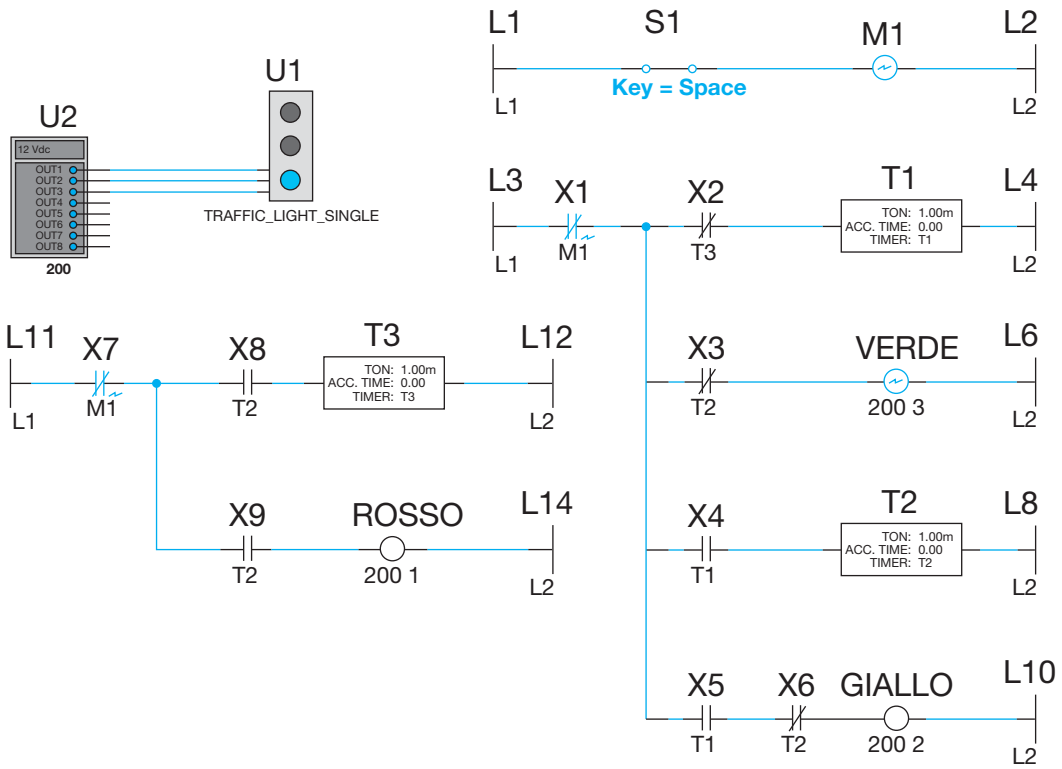



FIGURA **27**
Prima fase con la lampada verde accesa.

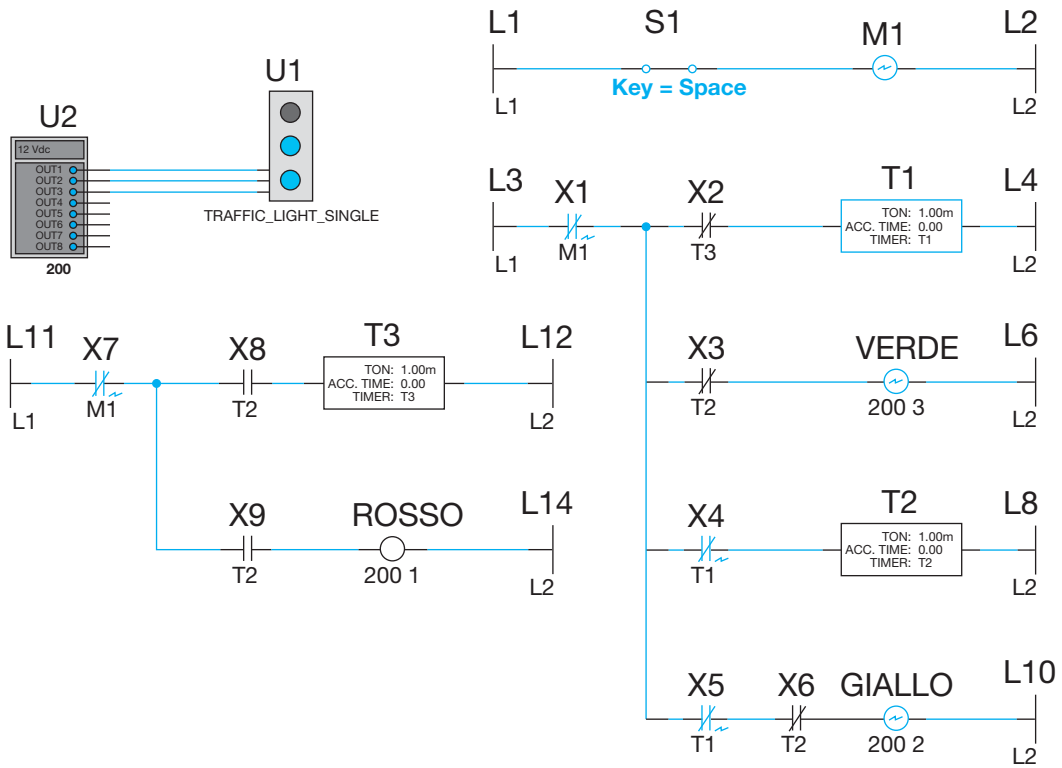



FIGURA **28**
Seconda fase con le lampade verde e gialla accese.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

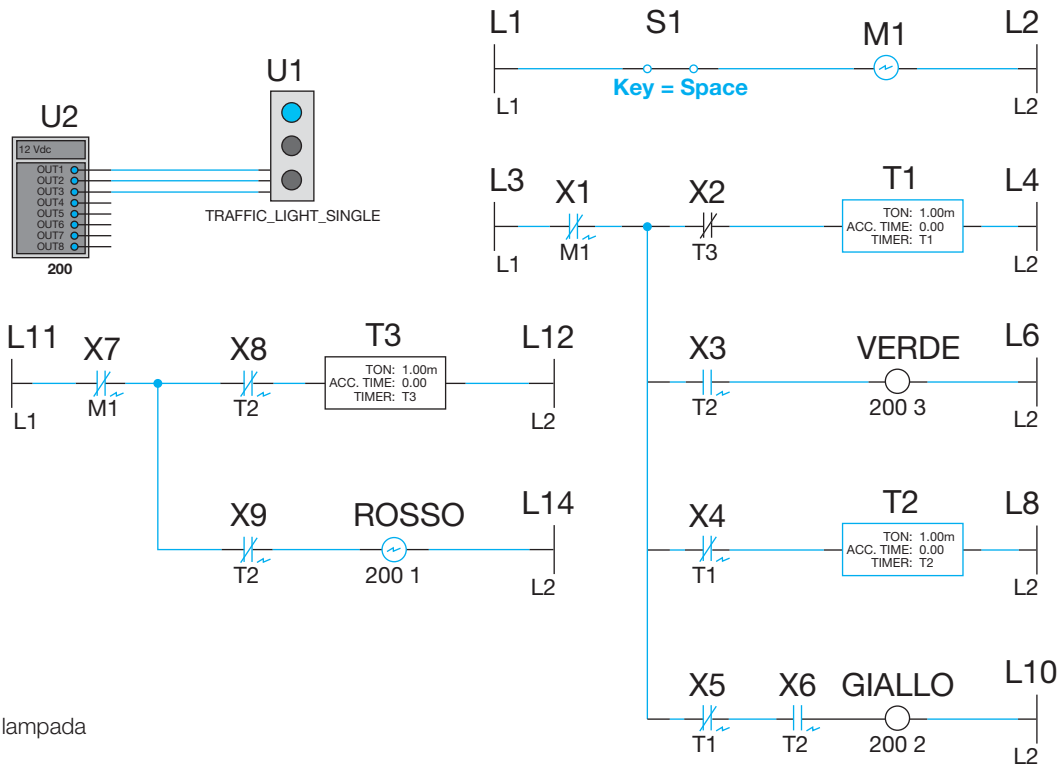



FIGURA **29**
Terza fase con la lampada rossa accesa.

## 4 Moduli Zelio Logic

I *moduli logici programmabili Zelio* vengono distribuiti dalla *Schneider Electric.*

Come viene evidenziato in FIGURA **30** vengono costruiti *moduli Zelio Logic* compatti e modulari.

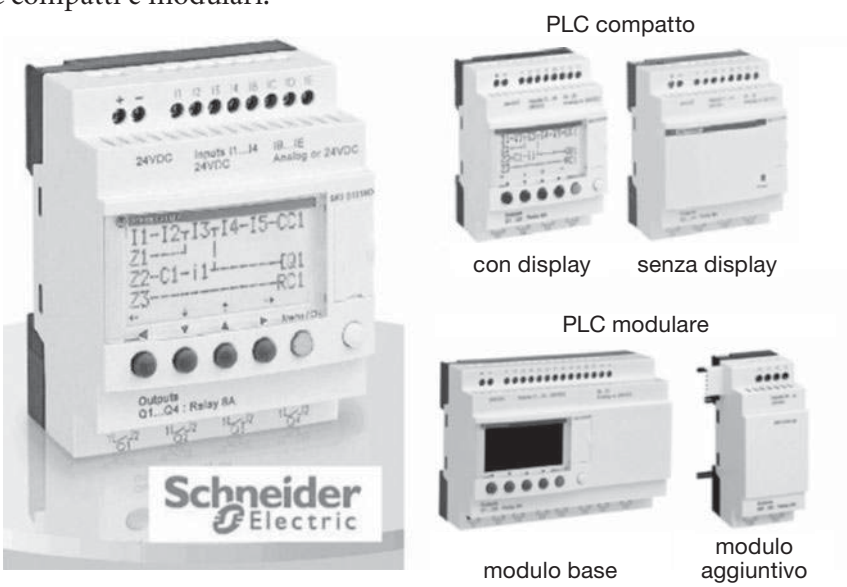



FIGURA **30**
Moduli logici compatti e modulari.

I *moduli logici Zelio Logic* sono adatti alla realizzazione di *piccoli sistemi di automazione* e vengono utilizzati prevalentemente nei settori industriale e terziario.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Più precisamente nel *settore industriale* possono essere utilizzati per:

- automatismi di piccole macchine di finitura, confezione, assemblaggio e imballaggio;
- automatismi ausiliari di macchine complesse e di grandi dimensioni nel settore tessile, dell'industria plastica e di trasformazione dei materiali;
- automatismi per macchine agricole (irrigazione, pompaggio, serre).

Nel settore terziario possono essere, per esempio, utilizzati per:

- automazione dei sistemi d'accesso (barriere, cancelli);
- automatismi dei sistemi di illuminazione;
- automatismi dei compressori e dei sistemi di climatizzazione.

Gli strumenti di programmazione consentono di collegare un modulo Zelio Logic a un PC dotato del software *Zelio Soft 2*.

I moduli Zelio Logic, come evidenziato in FIGURA **31**, possono essere collegati a un PC utilizzando:

- un cavo di collegamento su porta USB;
- un collegamento senza fili (*interfaccia Bluetooth*);
- una cartuccia memoria di salvataggio che consente di copiare il programma in un altro modulo identico.

Cavo di collegamento

Interfaccia Bluetooth

FIGURA **31**
Alcuni dispositivi di collegamento dei moduli al PC.

I *moduli di comunicazione* riprodotti in FIGURA **32** (*Modbus* ed *Ethernet* entrambi *slave*) consentono il collegamento con altri dispositivi quali visualizzatori, pannelli operatori e controllori programmabili.

Modulo di comunicazione Modbus

Modulo di comunicazione Ethernet

FIGURA **32**
Moduli di comunicazione.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

I dispositivi per la *comunicazione via Modem* illustrati in FIGURA **33** sono composti da:

- un'*interfaccia di comunicazione*;
- un Modem del tipo *RTC* (*rete telefonica commutata*) o *GSM* (*Global System Mobile*);
- un software dedicato *Zelio Logic Alarm* (per la ricezione di allarmi su PC).

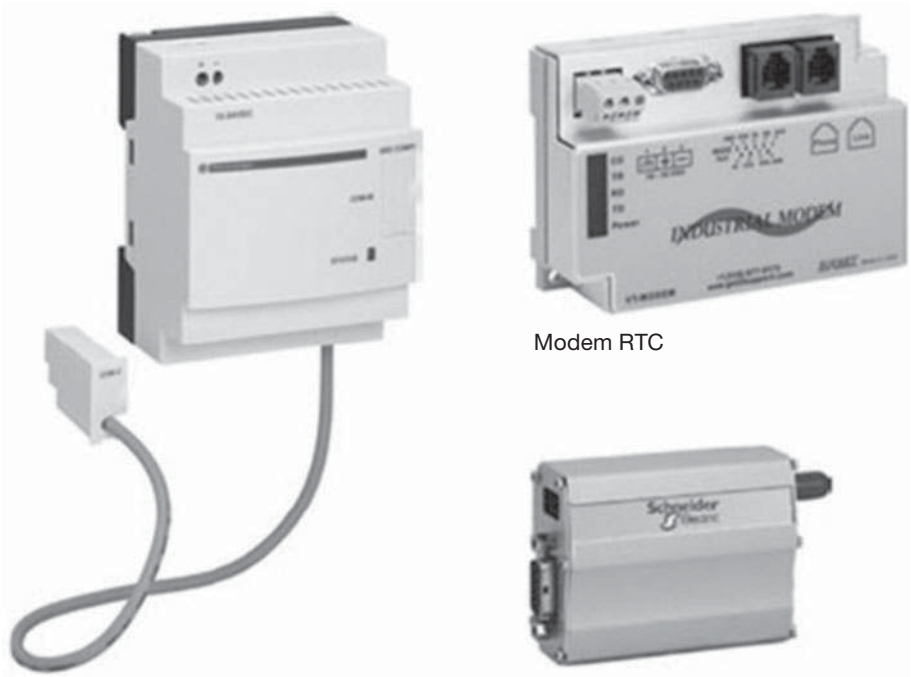



FIGURA **33**
Prodotti per la comunicazione via Modem.

Sono dispositivi che vengono utilizzati per il telecomando e la supervisione di macchine o impianti che non si avvalgono della presenza di personale di controllo.

## 4.1 Programmazione

Il software di programmazione consente:

- la simulazione, il monitoraggio e la supervisione;
- il caricamento e lo scaricamento dei programmi;
- la stampa di report personalizzati;
- la compilazione automatica di programmi;
- l'aiuto in linea.

Il software verifica la correttezza delle applicazioni; il minimo errore di programmazione viene evidenziato in rosso ed è sufficiente un clic sul mouse per localizzare il problema.

Per il test dei programmi possono essere utilizzate due modalità denominate rispettivamente:

- *modalità simulazione*;
- *modalità monitoring*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

La *modalità di simulazione* consente di testare il programma senza che sia connesso al PC alcun modulo Zelio; in particolare consente di:

- simulare l'attivazione degli ingressi digitali;
- visualizzare lo stato delle uscite simulate;
- simulare la variazione di tensione degli ingressi analogici;
- simulare la pressione dei tasti di programmazione;
- simulare il programma applicazione in tempo reale o accelerato;
- visualizzare dinamicamente e in rosso i diversi elementi attivi del programma.

La *modalità monitoring* consente l'interazione con il programma realmente eseguito dal modulo; in particolare permette di:

- visualizzare in linea il programma;
- forzare gli ingressi, le uscite, i relè ausiliari e i valori correnti dei blocchi funzione;
- impostare l'ora;
- passare dal modo di arresto (STOP) al modo di funzionamento (RUN) e viceversa.

In *modalità simulazione e monitoring* la *finestra di supervisione* consente di visualizzare lo stato del modulo relativamente alle sole sezioni dell'applicazione che interessa osservare ed eventualmente controllare.

Nella finestra di supervisione possono essere visualizzati disegni e immagini anche importati da altri programmi che rappresentano il sistema automatizzato.

I linguaggi utilizzabili sono grafici e precisamente il *linguaggio ladder* e il *linguaggio a blocchi funzione*.

Il linguaggio a contatti consente la scrittura del programma utilizzando funzioni elementari e blocchi funzione derivati, contatti, bobine e variabili (questi ultimi eventualmente commentabili).

Sul grafico è inoltre possibile l'inserimento di testo.

È possibile programmare fino a 120 linee ciascuna delle quali costituita da cinque contatti e da una bobina.

Per quanto riguarda le funzioni, sono a disposizione:

- 16 blocchi funzione testo;
- 16 temporizzatori;
- 16 contatori bidirezionali;
- 1 contatore rapido a 1000 impulsi al secondo;
- 16 comparatori di valori analogici;
- 8 orologi;
- 28 relè ausiliari;
- 8 comparatori di contatore;
- display LCD con retroilluminazione programmabile;
- passaggio automatico ora legale/ora solare;
- funzioni bobina, memoria (Set/Reset), teleruttore, contattore;
- 28 blocchi messaggi con interfaccia di comunicazione (per invio e ricezione SMS).


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

FIGURA **34**
Simbologia adottata per i blocchi funzione.

In FIGURA **34** viene riprodotta la simbologia adottata per i blocchi funzione.

FIGURA **35**
Simbologia adottata per le funzioni elementari.

In FIGURA **35** viene riprodotta la simbologia adottata per le funzioni elementari.

| Funzione | Schema elettrico | Linguaggio LADDER | Commento |
|---|---|---|---|
| Contatto | 13 14 o 21 22 | I o I | I corrisponde all'immagine reale del contatto collegato sull'ingresso del modulo. i corrisponde all'immagine inversa del contatto collegato sull'ingresso del modulo. |
| Bobina classica | A1 A2 | ( ) | La bobina è eccitata quando i contatti ai quali è collegata sono in conduzione. |
| Bobina ad aggancio (Set) | A1 A2 | (S) | La bobina è eccitata quando i contatti ai quali è collegata sono in conduzione. Resta chiusa quando i contatti non sono più in conduzione. |
| Bobina di sgancio (Reset) | A1 A2 | (R) | La bobina è diseccitata quando i contatti ai quali è collegata sono in conduzione. Resta disattivata quando i contatti non sono più in conduzione. |

## 4.2 Simulazione

Aprendo il programma che consente la realizzazione e la simulazione del funzionamento di uno schema a contatti relativo a un determinato sistema compare la videata riprodotta in FIGURA **36**.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

FIGURA **36**
Videata iniziale del programma.

Dalla videata iniziale si può aprire un nuovo documento o riaccedere a un documento esistente.

Aprendo un nuovo documento si deve scegliere, come evidenziato in FIGURA **37**, il tipo di modulo su cui lavorare.

FIGURA **37**
Scelta del modulo.

Scelto il modulo, come evidenziato in FIGURA **38**, il programma riporta le sue caratteristiche.

FIGURA **38**
Caratteristiche del modulo.

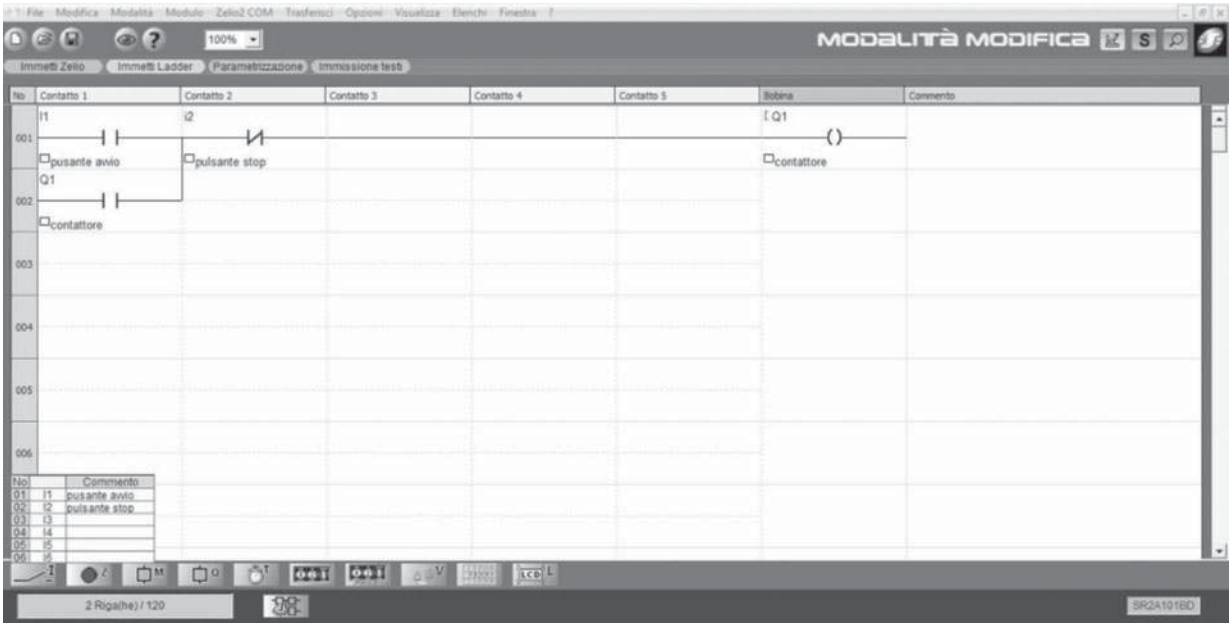


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Proseguendo si apre la pagina in *modalità modifica* per la realizzazione dello schema; in basso a destra si trovano i componenti da prelevare.

La videata della pagina in *modalità modifica* viene riprodotta in FIGURA **39**.

FIGURA **39**
Realizzazione dello schema in modalità modifica.

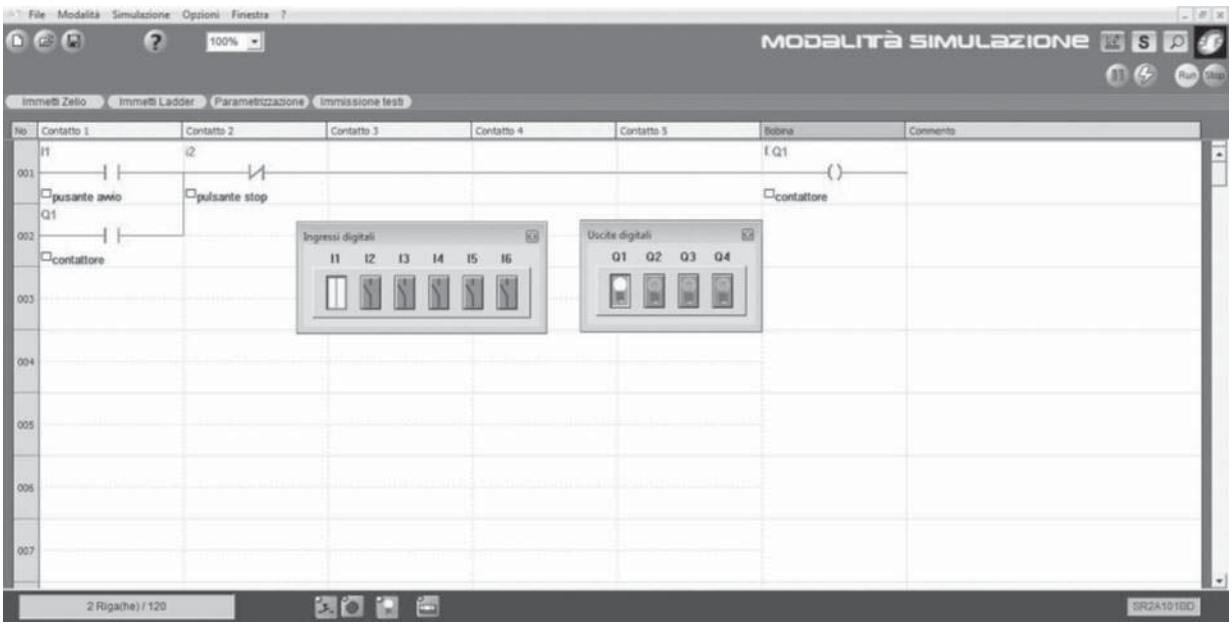



Passando in *modalità simulazione* (si può selezionare l'icona *S* posta in alto a destra) si verifica il funzionamento dello schema; la simulazione può essere avviata, ridotta e messa in pausa.

Sulla videata stessa viene simulata la presenza degli ingressi e delle uscite; l'attivazione degli elementi che compongono lo schema viene evidenziata con dei cambiamenti di colore.

La videata della pagina in *modalità simulazione* viene riportata in FIGURA **40**.

FIGURA **40**
Verifica di funzionamento in modalità simulazione.






Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 4.3 Guida in linea

La descrizione del funzionamento dei componenti viene descritta nei minimi dettagli nella *guida in linea* del programma (scritta in italiano).

La guida propone anche diversi esempi applicativi interessanti come per esempio quello per la *gestione dell'apertura automatica delle persiane di una serra.*

Il programma gestisce l'apertura e la chiusura delle persiane di aerazione poste sul tetto della serra.

In questo caso la serra ha due persiane che assicurano il ricambio d'aria. L'apertura di tali persiane è comandata da un motore; due sensori indicano se le persiane sono aperte o chiuse.

Vengono previste le seguenti specifiche di funzionamento:

- durante il giorno le persiane si aprono dalle ore 12 alle ore 15 per consentire l'aerazione nel momento in cui, teoricamente, la temperatura è più alta;
- se la temperatura è inferiore a 10 °C, le persiane non si aprono o si chiudono nel caso in cui siano già aperte;
- le persiane si aprono nelle rimanenti ore della giornata anche se la temperatura raggiunge i 25 °C;
- se la temperatura scende nuovamente al di sotto di 25 °C le persiane devono chiudersi;
- di notte le persiane devono rimanere chiuse indipendentemente dalla temperatura.

Le fasce orarie sono pertanto tre:

- fascia 1: *notte*, dalle ore 21 alle ore 7;
- fascia 2: *giorno*, dalle ore 7 alle ore 12 e dalle ore 15 alle ore 21;
- fascia 3: *mezzogiorno*, dalle ore 12 alle ore 15.

Si considerano ingressi del programma.

- la segnalazione di persiana aperta (digitale);
- la segnalazione di persiana chiusa (digitale);
- il valore di temperatura (analogico).

Si considerano uscite del programma:

- il comando per l'apertura delle persiane;
- il comando per la chiusura delle persiane.

In FIGURA **41** vengono descritte le specifiche di funzionamento del sistema.

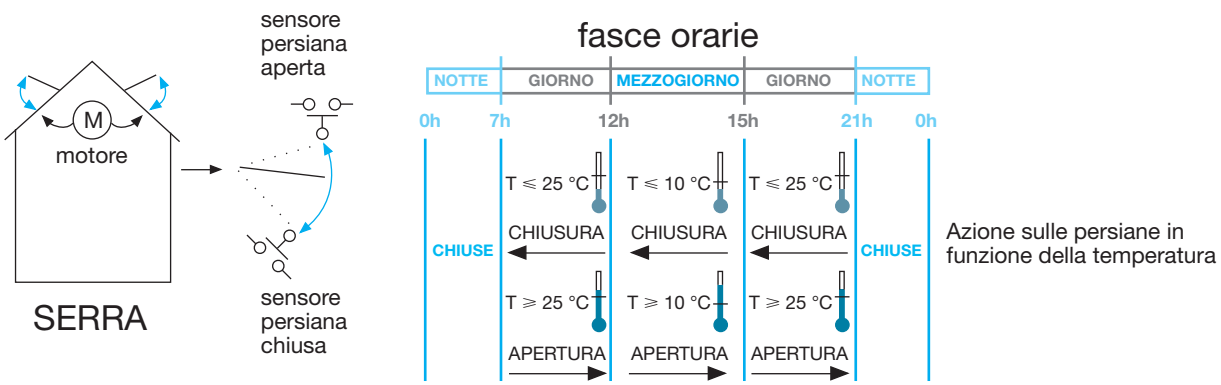



FIGURA **41** Specifiche relative al comando per l'apertura automatica delle persiane di una serra.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 5 Applicazioni del software Zelio Soft 2

Vengono di seguito proposte alcune esercitazioni di simulazione riguardanti gli schemi di comando e segnalazione per la movimentazione di motori.

Gli argomenti che sono oggetto delle esercitazioni sono i seguenti:

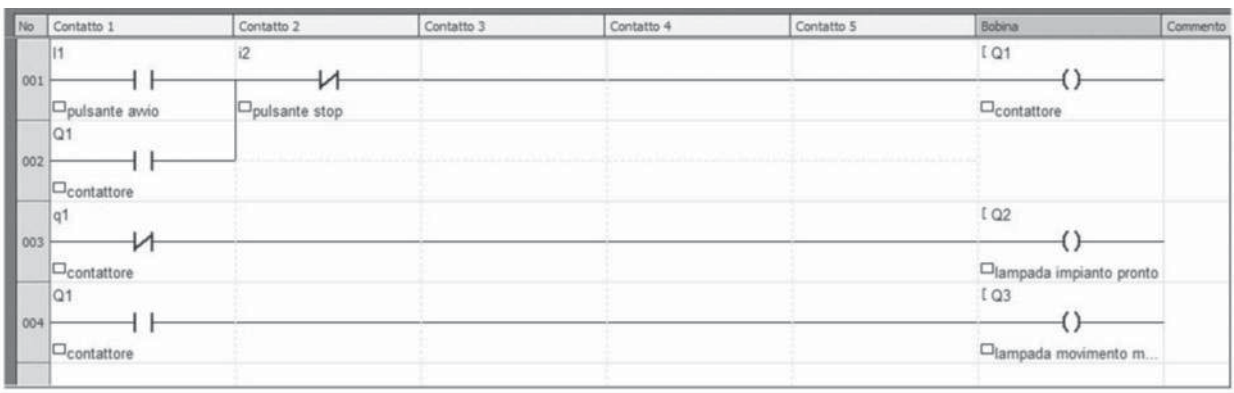
- esercitazione 1 – Schema di avviamento e segnalazione per la movimentazione di un motore
- esercitazione 2 – Schema per la movimentazione di tre motori
- esercitazione 3 – Schema per il comando in sequenza di due motori

## Esercitazione 1 – Schema di avviamento e segnalazione per la movimentazione di un motore

Scopo della prova è di verificare il funzionamento di uno schema ladder per il comando di un motore e delle relative lampade che segnalano rispettivamente impianto pronto per l'avviamento e motore in movimento.

Lo schema viene riportato in FIGURA **42**.

FIGURA **42**
Schema ladder per l'avviamento di un motore.




Gli ingressi del sistema in esame sono:

- il pulsante di avvio dell'impianto;
- il pulsante di stop.

I pulsanti vengono simulati utilizzando due ingressi digitali (interruttori).

Affinché un ingresso digitale svolga la funzione di pulsante l'operatore deve azionare l'interruttore in fase di simulazione tramite un doppio clic sul mouse.

Le uscite sono:

- la bobina del contattore;
- la lampada che fornisce la segnalazione di impianto pronto a partire;
- la lampada che segnala il movimento del motore.

Passando in modalità simulazione e selezionando RUN compare la videata riprodotta in FIGURA **43**.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

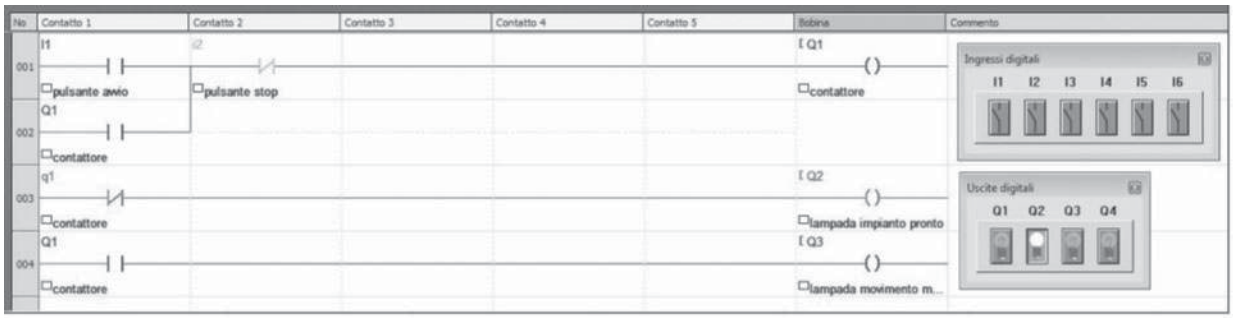



FIGURA **43**
Inizio della simulazione.

L'uscita corrispondente alla lampada di impianto pronto ha cambiato colore ed è quindi attiva.

Con un doppio clic sull'ingresso digitale corrispondente al pulsante di avvio si perviene alla situazione riportata in FIGURA **44** in cui sono attive le uscite corrispondenti alla bobina e alla lampada che segnala il movimento del motore.

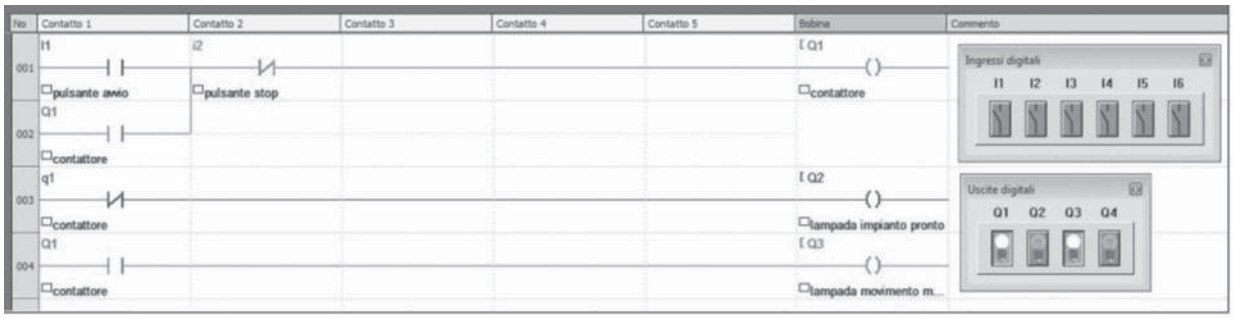



FIGURA **44**
Fase di movimento del motore.

Infine con un doppio clic sull'ingresso digitale corrispondente al pulsante di stop si ritorna nelle condizioni iniziali in cui è attiva soltanto la lampada di segnalazione di impianto pronto.

## Esercitazione 2 – Schema per la movimentazione di tre motori

Scopo della prova è di verificare il funzionamento di uno schema ladder per la movimentazione di tre motori.

I tre motori vengono avviati premendo i rispettivi pulsanti di avvio che vengono simulati utilizzando i *tasti Zx* che non sono ingressi digitali ma pulsanti di prova.

Un pulsante di stop comune, sempre simulato utilizzando un *tasto Zx*, interrompe il funzionamento di tutti i motori che in quel momento sono in movimento.

Il funzionamento dei tre motori deve rispettare le seguenti specifiche:

- il motore 3 può essere avviato solo se i motori 1 e 2 sono già in movimento;
- il motore 2 può essere avviato solo se il motore 1 è in movimento;
- il motore 1 può essere avviato indipendentemente dagli altri due.

Lo schema ladder corrispondente come si presenta all'inizio della simulazione viene riportato in FIGURA **45**.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

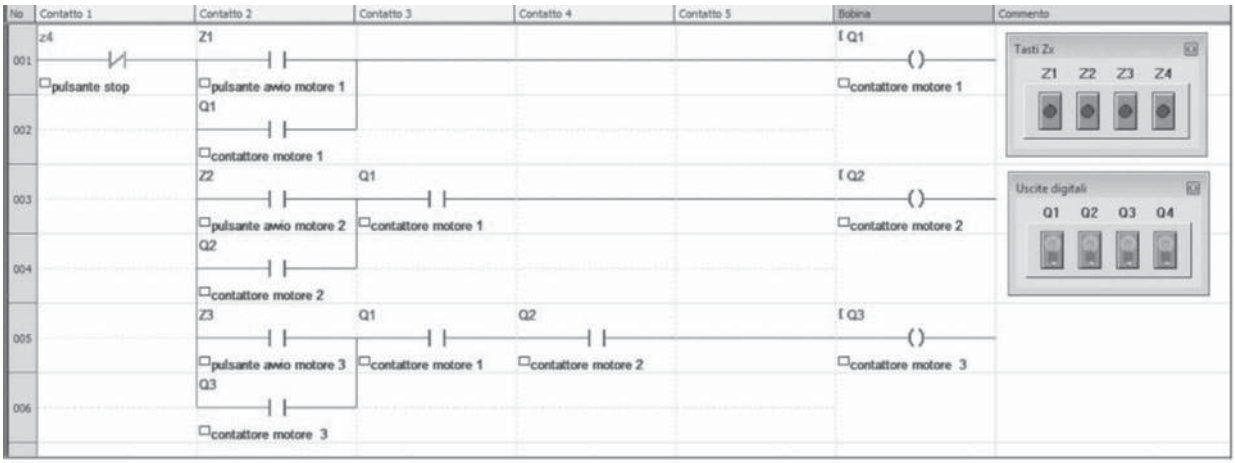



FIGURA **45**
Inizio della simulazione.

Premendo nella sequenza 1-2-3 i tasti corrispondenti ai pulsanti di avvio dei tre motori si perviene alla situazione evidenziata in FIGURA **46** nella quale le uscite corrispondenti ai tre motori sono contemporaneamente attive.

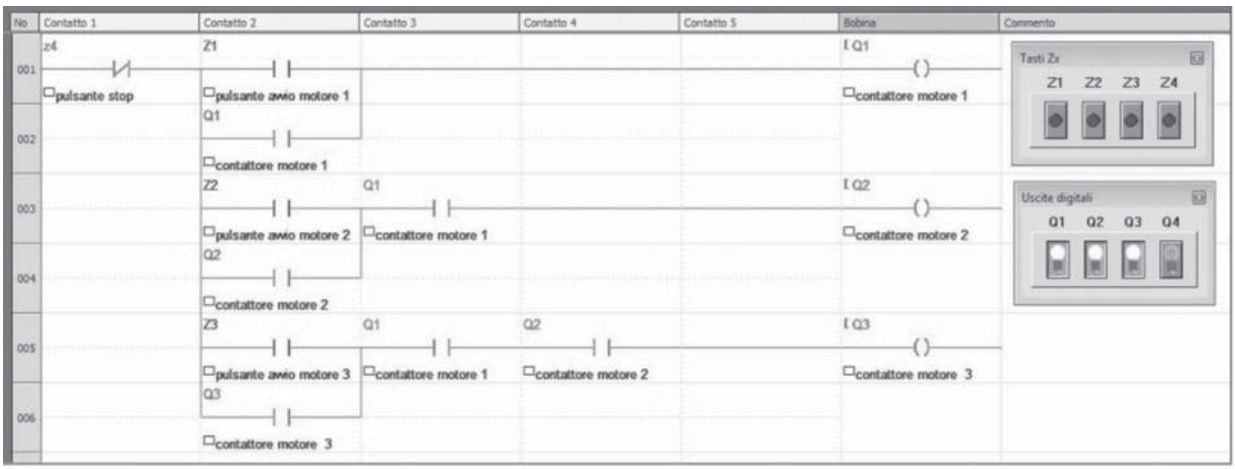



FIGURA **46**
Fase di movimento dei tre motori.

È facile verificare che sequenze differenti nella pressione dei tasti non sono possibili.

## Esercitazione 3 – Schema per il comando in sequenza di due motori

Scopo della prova è di verificare il funzionamento di uno schema ladder per la movimentazione in sequenza di due motori.

Più precisamente si deve verificare che:

- un pulsante di avvio mette in movimento il primo motore;
- il secondo motore si mette automaticamente in movimento dopo che è trascorso un tempo prefissato (ottenuto tramite un timer) dalla pressione del pulsante di avvio;
- un pulsante di stop interrompe la sequenza.

La sequenza viene avviata premendo il pulsante di avvio che viene simulato utilizzando un *tasto Zx* che non è un ingresso digitale ma un pulsante di prova.

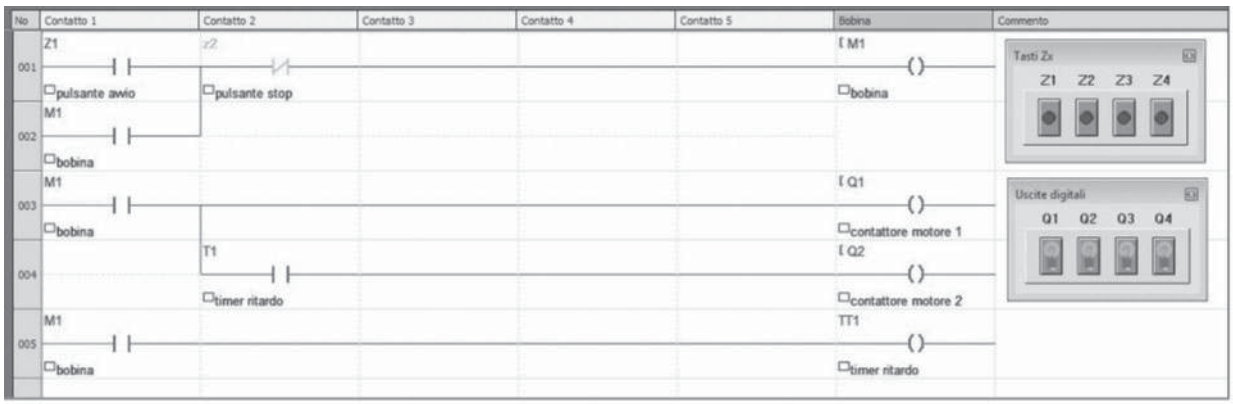
Un pulsante di stop comune, sempre simulato utilizzando un *tasto Zx*,


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

interrompe il funzionamento di tutti i motori che in quel momento sono in movimento.

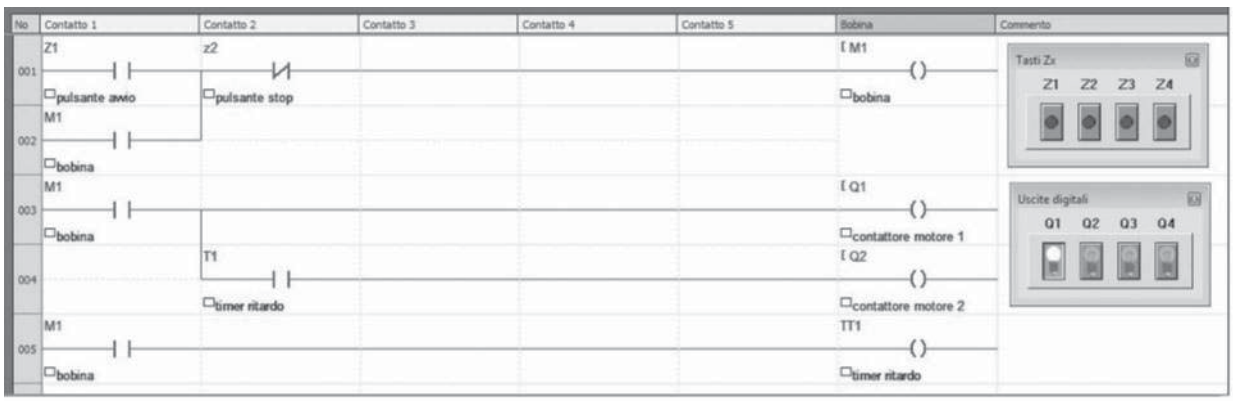
Lo schema ladder corrispondente a come si presenta il sistema all'inizio della simulazione viene riportato in FIGURA **47**.

FIGURA **47**
Inizio della simulazione.




In FIGURA **48** viene riprodotta la situazione che si ha premendo il pulsante di avvio quando il primo motore si mette in movimento e contemporaneamente il temporizzatore inizia il conteggio.

FIGURA **48**
Avviamento del primo motore.




In FIGURA **49** viene riprodotta la situazione che si ha quando il temporizzatore ha esaurito il conteggio e, di conseguenza, anche il secondo motore è in movimento.

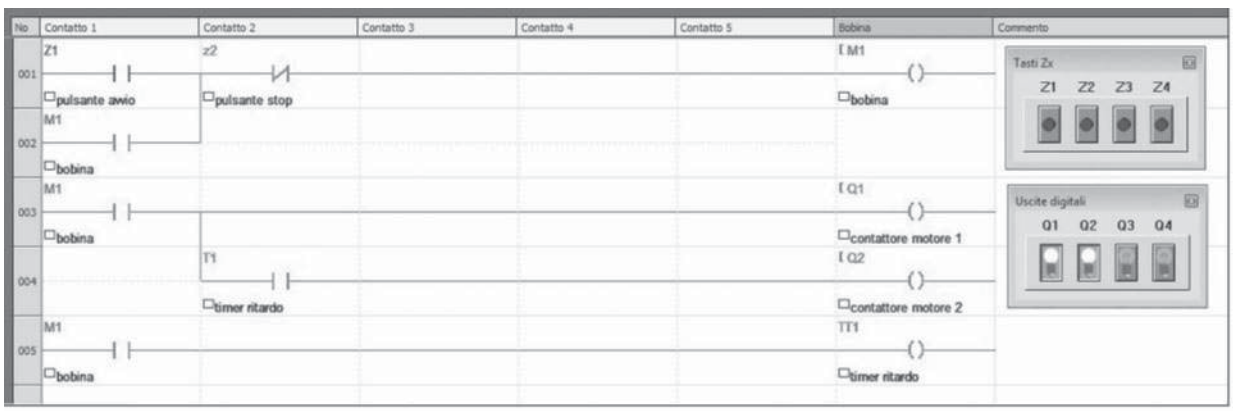



FIGURA **49**
Movimento del secondo motore.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**1** **Realizzare con il programma *Multisim* uno schema ladder che consenta il comando di due lampade che si possono accendere singolarmente o contemporaneamente premendo due pulsanti predisposti a tale scopo; simularne di seguito il funzionamento.**

**2** **Realizzare con il programma *Multisim* uno schema ladder che consenta il comando di due lampade secondo le seguenti specifiche:**

- **la lampada L1 si accende premendo il pulsante predisposto a tale compito;**
- **la lampada L2 si accende premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se la lampada L1 è accesa.**

**Simularne di seguito il funzionamento.**

**3** **Realizzare con il programma *Multisim* uno schema ladder che consenta il comando di due lampade secondo le seguenti specifiche:**

- **la lampada L1 si accende premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se la lampada L2 è spenta;**
- **la lampada L2 si accende premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se la lampada L1 è spenta.**

**Simularne di seguito il funzionamento.**

**4** **Realizzare con il programma *Multisim* uno schema ladder che consenta il comando in sequenza di due lampade secondo le seguenti specifiche:**

- **la lampada L1 si accende premendo il pulsante predisposto a tale compito;**
- **la lampada L2 si accende 1 minuto dopo l'accensione della lampada L1;**
- **contemporaneamente all'accensione della lampada L2 la lampada L1 si spegne;**
- **il funzionamento del sistema viene interrotto premendo un pulsante di stop che ripristina quindi le condizioni iniziali.**

**Simularne di seguito il funzionamento.**

**5** **Modificando in modo opportuno l'esercitazione 5 relativa al programma *Multisim* procedere alla simulazione del funzionamento di un semaforo singolo con ciclo di funzionamento verde/giallo/rosso.**

**6** **Utilizzando il componente TRAFFIC LIGHT e facendo riferimento all'esercitazione 5 procedere alla simulazione del funzionamento di un semaforo per incrocio utilizzando il programma *Multisim*.**

**7** **Realizzare con il programma *Multisim* uno schema ladder che consente il comando in sequenza di due lampade secondo le seguenti specifiche:**

- **la lampada L1 si accende premendo il pulsante predisposto a tale compito;**
- **la lampada L2 si accende 1 minuto dopo l'accensione della lampada L1;**
- **contemporaneamente all'accensione della lampada L2 la lampada L1 si spegne;**
- **trascorso un minuto dall'accensione di L2 si accende la lampada L3;**
- **contemporaneamente all'accensione della lampada L3 la lampada L2 si spegne;**
- **il funzionamento del sistema viene interrotto premendo il pulsante di stop che ripristina quindi le condizioni iniziali.**

**Simularne di seguito il funzionamento.**

**8** **Realizzare con il programma *Zelio Soft 2* uno schema ladder che consenta il comando di due motori che si possono avviare singolarmente o contemporaneamente premendo due pulsanti predisposti a tale scopo e simularne di seguito il funzionamento.**

**9** **Realizzare con il programma *Zelio Soft 2* uno schema ladder che consenta il comando di due motori secondo le seguenti specifiche:**

- **il motore M1 si avvia premendo il pulsante predisposto a tale compito;**
- **il motore M2 si avvia premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se il motore M1 è in movimento.**

**Simularne di seguito il funzionamento.**

**10** **Realizzare con il programma *Zelio Soft 2* uno schema ladder che consenta il comando di due motori secondo le seguenti specifiche:**

- **il motore M1 si avvia premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se il motore M2 non è in movimento;**
- **il motore M2 si avvia premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se il motore M1 non è in movimento.**

**Simularne di seguito il funzionamento.**

**11** **Dalla guida in linea del programma *Zelio Soft 2* ricavare le informazioni necessarie per poter realizzare lo schema ladder relativo al sistema automatizzato per il controllo delle persiane di una serra e simularne di seguito il funzionamento.**

**12** **Realizzare con il programma *Zelio Soft 2* uno schema ladder che consente il comando di tre motori secondo le seguenti specifiche:**

- **il motore M1 si avvia premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se il motore M2 non è in movimento;**
- **il motore M2 si avvia premendo il pulsante predisposto a tale compito solo se il motore L1 non è in movimento;**
- **il motore M3 si avvia indipendentemente dagli altri due premendo il pulsante predisposto a tale compito.**

**Simularne di seguito il funzionamento.**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# Introduzione ai sistemi a microprocessore

# 7

## 1 Concetti introduttivi

▶ Un **microprocessore** (sinteticamente $\mu P$) è, dal punto di vista fisico, un componente elettronico programmabile a larghissima scala di integrazione (*VLSI*).

La diffusione di questo componente ha rivoluzionato il modo di progettare.

Dalla corrispondenza univoca tra progetto e hardware tipico della *logica cablata* si è passati alla *logica programmata* che prevede l'impiego del medesimo hardware per progetti differenti; questa versatilità viene consentita dalla programmabilità del componente; è sufficiente modificare il software per adattare l'hardware a progetti differenti.

La struttura del *microprocessore*, pur mantenendo le caratteristiche di base, ha subito nel tempo una rapida evoluzione.

La sua costituzione interna può variare principalmente in relazione a:

- *tipo e numero di registri interni*;
- *numero di bit dei bus interni*;
- *frequenza di funzionamento*.

Una struttura differente comporta anche una differenza nel software che ne regola il funzionamento e una diversa natura dei segnali di controllo.

Nonostante queste diversità è possibile evidenziare nei microprocessori dei blocchi funzionali comuni.

▶ Il *microprocessore* è l'elemento centrale di un **sistema a microprocessore** che comunica tramite un'*architettura a bus* con gli altri elementi costitutivi del sistema che sono essenzialmente le memorie (*ROM* e *RAM*) e i dispositivi di ingresso/uscita (*dispositivi di I/O*).

In FIGURA **1** viene schematizzata la struttura tipica di una **architettura a bus**.

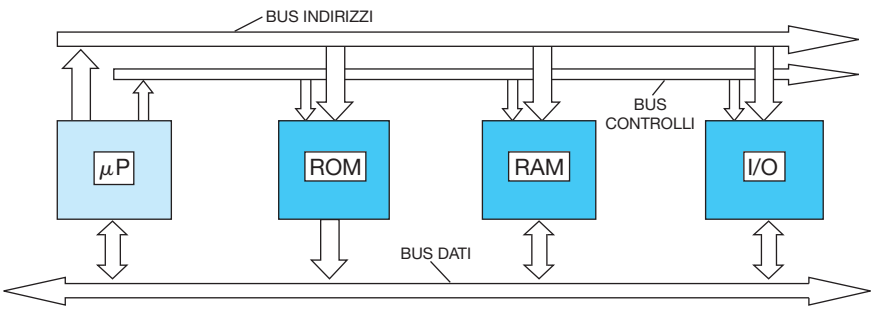



FIGURA **1** Architettura a bus di un sistema a microprocessore.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Nella *memoria ROM* sono residenti i programmi *necessari per l'avviamento e la gestione del sistema* (praticamente un *sistema operativo*).

Nella *memoria RAM* si trova il *programma utente* nel momento in cui il sistema viene utilizzato.

I dispositivi di I/O consentono di comunicare con l'ambiente esterno al sistema e in particolare di acquisire i dati da elaborare e di fornire i risultati dell'elaborazione.

Nel sistema descritto sono evidenti tre tipologie di bus:

- il *bus dati* sul quale transitano i dati e le istruzioni trattati dal sistema;
- il *bus indirizzi* sul quale transitano gli indirizzi delle locazioni di memoria e dei dispositivi di I/O che di volta in volta vengono selezionati;
- il *bus controlli* sul quale transitano i segnali di controllo necessari per la sincronizzazione e il comando di tutte le operazioni svolte dal sistema.

La potenzialità di un *sistema a microprocessore* dipende anche dal numero di bit che viaggiano contemporaneamente sui bus del sistema di cui fa parte.

## 2 Struttura interna del microprocessore

Si analizza di seguito il microprocessore dal punto di vista funzionale.

Nei microprocessori sono individuabili i seguenti *blocchi funzionali* fondamentali:

- *registro istruzioni*;
- *decodificatore*;
- *accumulatore*;
- *unità logico aritmetica*;
- *registri di uso generale*;
- *contatore di programma*;
- *registro di stato*;
- *registro di stack*;
- *circuito di temporizzazione*;
- *unità di controllo*;
- *buffer bus dati*;
- *buffer bus indirizzi*.

A scopo esemplificativo viene fatto riferimento alla FIGURA **2** che riporta la struttura interna del *microprocessore Z80* commercializzato nel 1976 dalla *Zilog*.

Pur essendo un componente abbastanza datato, è ancora adatto per scopi didattici per la sua semplicità strutturale.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

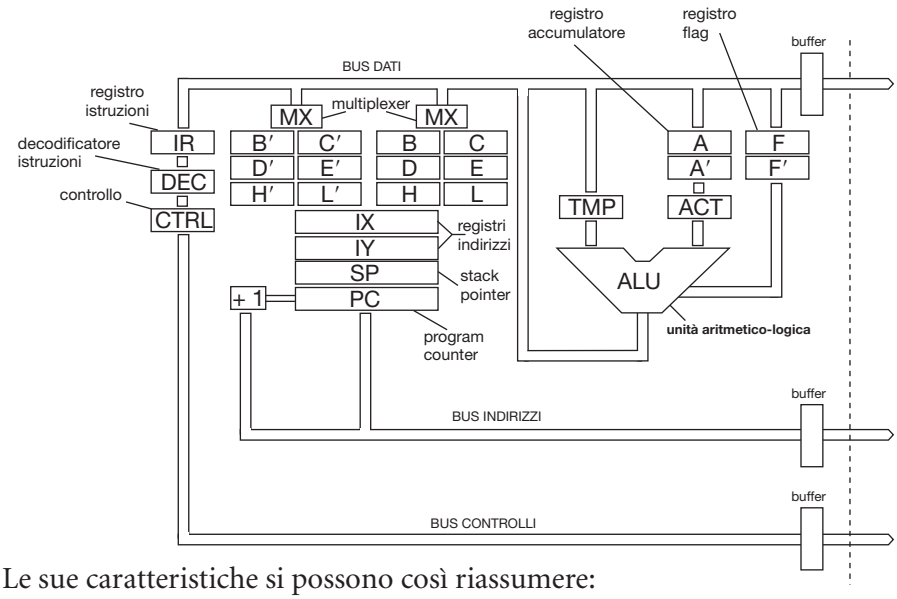



FIGURA **2**
Struttura interna del microprocessore Z80.

Le sue caratteristiche si possono così riassumere:

- realizzato con tecnologia MOS;
- contenitore di tipo *dual-pin* con 20 pin su entrambi i lati;
- frequenza del segnale di clock 2,5 MHz per la versione base;
- alimentazione +5 V;
- bus dati a 8 bit;
- bus indirizzi a 16 bit;
- set di 158 istruzioni.

## 2.1 Registro istruzioni

Il **registro istruzioni** (*IR*, *Instruction Register*) serve per memorizzare il *codice operativo* di un'istruzione che viene prelevato da quella parte di memoria nella quale viene scritto il programma; il codice operativo transita attraverso il *bus dati*.

Questo registro comanda un *circuito di decodifica* che invia ai diversi blocchi funzionali che si trovano all'interno del microprocessore i *segnali di sincronismo e di controllo* necessari per l'esecuzione dell'istruzione stessa.

La sequenza viene scandita da un *clock*, un segnale elettrico di determinata frequenza inviato al microprocessore o generato internamente.

## 2.2 Decodificatore

Il **decodificatore delle istruzioni** riceve il codice operativo contenuto nel *registro istruzioni* e lo traduce in un codice comprensibile all'unità di controllo per le successive elaborazioni.

## 2.3 Accumulatore

Il **registro accumulatore** viene utilizzato prevalentemente per depositare i


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

dati necessari allo sviluppo delle operazioni logiche e aritmetiche eseguite dal microprocessore.

Il programmatore, con specifiche istruzioni, può accedere all'*accumulatore* per immettervi o estrarne dati.

## 2.4 Unità logico aritmetica

L'**unità logico aritmetica** (*ALU*) è un elemento fondamentale della struttura interna di un microprocessore che esegue le funzioni più tipiche dell'elaborazione come le operazioni matematiche e quelle di controllo.

## 2.5 Registri di uso generale

Sono **registri interni** costituiti da celle di memoria in cui depositare i risultati parziali dell'elaborazione.

Alcuni di essi sono accessibili da parte dell'operatore facendo uso di apposite istruzioni del linguaggio di programmazione.

Tali registri sono presenti in ogni microprocessore dove di solito sono indicati da sigle composte da una o più lettere (per esempio *A*, *B*, *AX*, *BX*).

Il loro numero e la loro capacità variano tuttavia a seconda del tipo di microprocessore; anche questi registri sono in genere accessibili al programmatore e sono utilizzati per depositarvi temporaneamente i dati o trasferirli in altri registri.

## 2.6 Contatore di programma

Il **registro contatore di programma** (*PC*, *Program Counter*) contiene l'indirizzo dell'istruzione da eseguire.

La *fase di prelievo delle istruzioni* (*fetch*) viene eseguita fornendo sul *bus indirizzi* il contenuto del *contatore di programma*.

Il contatore viene quindi automaticamente incrementato di uno per indirizzare l'istruzione successiva permettendo di leggere sequenzialmente le locazioni di memoria ove sono contenuti i codici del programma.

Con particolari istruzioni (*salti* e *chiamate a sottoprogrammi*) il *contatore di programma* può inoltre essere caricato con l'indirizzo della locazione di memoria relativa al salto o alla chiamata.

Il registro contatore possiede un numero di bit pari a quello del bus indirizzi.

## 2.7 Registro di stato

Il **registro di stato** o dei *flag* comunica con l'unità logico aritmetica e ha il compito di controllare il verificarsi di determinate condizioni del sistema.

I bit in esso contenuti rappresentano con il loro stato logico (0 o 1) alcune particolari condizioni che si verificano dopo l'esecuzione di operazioni logiche e aritmetiche.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Tipici esempi sono:

- il *flag di riporto* (*carry*) che indica che nell'operazione precedentemente eseguita c'è stato un riporto o un prestito;
- il *flag di zero* che indica la nullità del risultato dell'operazione.

Lo stato dei singoli bit del registro può essere verificato con opportune istruzioni che permettono, a seconda del valore riscontrato, di variare l'andamento del programma.

## 2.8 Registro di stack

Il **registro di stack** (**SP**, *Stack Pointer*) è un registro che, in corrispondenza di particolari istruzioni, trasferisce il suo contenuto sul bus indirizzi, puntando una cella di memoria nella quale viene immesso il contenuto di particolari registri del microprocessore.

Il *registro di stack* contiene quindi l'indirizzo di una zona della memoria detta **area di stack** (*catasta*).

Per esempio prima di passare dal programma principale a un sottoprogramma il microprocessore memorizza nell'*area di stack* il valore corrente del *contatore di programma*; in tal modo, al termine del lavoro connesso all'esecuzione del sottoprogramma, riprende l'esecuzione del programma principale esattamente dal punto in cui era avvenuta l'interruzione.

Lo *stack* è organizzato con la *modalità LIFO* (*Last In First Out*), ossia l'ultimo dato inserito è il primo a essere estratto; la *memoria di stack* viene infatti scritta in modo sequenziale, una locazione dopo l'altra; il *registro di stack*, che agisce da puntatore, viene ogni volta incrementato o decrementato di un passo a seconda che si stia operando una lettura o una scrittura di dati.

Il programmatore può utilizzare lo *stack* per memorizzarvi il contenuto dei vari registri; in ragione del suo utilizzo lo *stack pointer* ha un numero di bit pari a quelli del bus indirizzi.

## 2.9 Circuito di temporizzazione

La successione delle operazioni sviluppate dal microprocessore si svolge secondo una cadenza ben precisa, sincronizzata tramite un segnale denominato **clock del sistema**.

Il segnale viene generato da un circuito oscillante stabilizzato con un quarzo in genere collocato all'esterno del microprocessore; il collegamento avviene tramite un apposito piedino (*pin*).

## 2.10 Unità di controllo

L'**unità di controllo** ha il compito di gestire ogni fase delle operazioni svolte dal microprocessore, inviando i segnali necessari a coordinare il trasferimento dei dati tra i vari blocchi sia all'interno sia all'esterno del microprocessore; più precisamente ciò avviene:


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- in concordanza con i segnali ricevuti dal decodificatore delle istruzioni;
- in sincronismo con il *segnale di clock*.

Tra le più importanti linee gestite dall'*unità di controllo*, presenti in genere in ogni microprocessore, si citano a scopo esemplificativo quelle dedicate ai seguenti due compiti:

- *lettura* (trasmissione di dati dalla memoria o da una periferica);
- *scrittura* (invio di dati a una memoria o a una periferica).

### 2.11 Buffer bus dati

Il **buffer bus dati** è un registro che ha il compito di mantenere temporaneamente in memoria dei dati in transito per poterli poi mettere a disposizione degli elementi che li richiedono al momento del loro utilizzo.

Sulle linee del *bus dati* viaggiano sia i codici delle istruzioni sia i dati; tale connessione è di tipo *bidirezionale* dovendo consentire sia operazioni di lettura sia operazioni di scrittura; il numero di linee che lo compongono varia in relazione al tipo di microprocessore.

### 2.12 Buffer bus indirizzi

Il **buffer bus indirizzi** è un registro con compiti analoghi a quelli del *buffer bus dati*; le informazioni che in esso vengono depositate sono però quelle relative agli indirizzi delle locazioni di memoria o delle periferiche ai quali invia o dai quali riceve dati.

Il *bus indirizzi* è monodirezionale in quanto i segnali che transitano nelle sue linee sono uscenti dal microprocessore.

## 3 Trasferimento dati

Il microprocessore comunica con l'ambiente attraverso le *unità di ingresso/uscita* chiamate più sinteticamente *unità di I/O* o anche *periferiche*.

Quando una di queste unità necessita di mettersi in contatto con il microprocessore occorre che siano soddisfatte le seguenti esigenze:

- venga individuata l'unità che richiede il servizio;
- venga attivato un programma di trasferimento dati adatto all'unità selezionata.

Per la realizzazione del collegamento e per il relativo trasferimento dati vengono brevemente esaminate le seguenti possibilità:

- *polling*;
- *interrupt*;
- *accesso diretto in memoria* (*DMA*).

Viene inoltre fatto riferimento alla tipologia di trasmissione dei dati e alle caratteristiche delle periferiche adatte che possono essere:

- *periferiche I/O parallele*;
- *periferiche I/O seriali*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 3.1 Polling

Il termine *polling* significa *sondaggio*.

Le diverse unità vengono ciclicamente ispezionate dal microprocessore per verificare se qualcuna di esse richiede servizio.

L'operazione avviene esaminando le periferiche una alla volta; se l'unità esaminata in un determinato istante chiede servizio si passa all'esecuzione del suo programma di lavoro; in caso contrario si passa all'esame di un'altra periferica e così via.

La tecnica di *polling* effettua le operazioni di sondaggio mediante un apposito programma; l'accesso alle periferiche è controllato dal microprocessore in modo sincrono con programma in esecuzione.

Tale tecnica, pur presentando il vantaggio della semplicità, ha il grave svantaggio di dover impiegare gran parte del tempo a ispezionare unità che non hanno richiesto servizio diminuendo così l'operatività del microprocessore stesso.

La disponibilità della periferica a ricevere o a trasmettere viene verificata ispezionando un apposito *bit di stato* disponibile sull'interfaccia della periferica in questione; tale segnale contiene l'informazione corrispondente alla richiesta o meno di servizio.

Se l'esame ha dato esito positivo viene attivato un adeguato *sottoprogramma*, collocato in memoria, che predispone l'unità all'esecuzione del lavoro in conformità alle modalità specifiche richieste (per esempio lettura di un disco, emissione di caratteri su modem) ed effettua il trasferimento dei dati vero e proprio.

Successivamente le operazioni descritte vengono ripetute per le altre periferiche.

Il procedimento, supponendo l'esistenza di tre periferiche, viene schematizzato in FIGURA **3**.

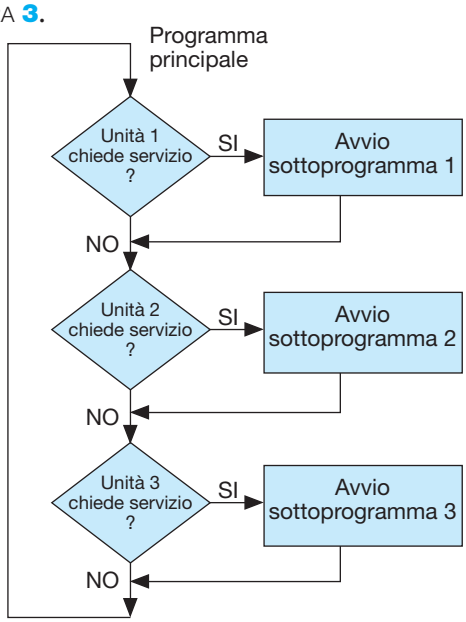



FIGURA **3**
Trasferimento dati tramite polling.

## 3.2 Interrupt

Il termine *interrupt* assume il significato di *interruzione*.

La periferica può richiedere servizio al microprocessore attraverso la *li-*



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

*nea di interrupt* che è un ingresso particolare del microprocessore collegato alla sua logica interna.

Il meccanismo di interruzione procede attraverso i seguenti passi:

- il microprocessore sta svolgendo un programma;
- in un certo istante non previsto arriva dalla periferica una *richiesta di interruzione*;
- il microprocessore interrompe il programma che sta svolgendo ed esegue il *programma di risposta*.

Il procedimento viene schematizzato in FIGURA **4**.

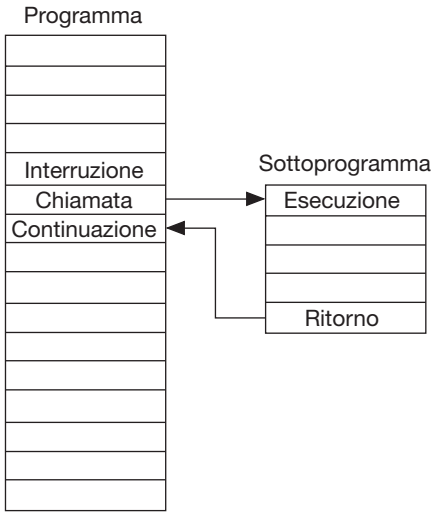



FIGURA **4**
Trasferimento dati tramite interrupt.

Si esaminano ora più in dettaglio la fase di *richiesta di interruzione* e il *programma di risposta*.

## Richiesta di interruzione

La *richiesta di interruzione* avviene attraverso l'attivazione del **segnale di interruzione**.

Il microprocessore non può prevedere quando o con quale frequenza ci sarà una richiesta in tal senso; l'interruzione è quindi un evento *asincrono* rispetto al programma in corso perché avviene in momenti non prevedibili.

Non sempre è accettabile che un programma sia interrotto in un punto qualunque delle sue operazioni.

Ogni microprocessore ha la possibilità di accettare o non accettare le interruzioni a seconda dell'informazione contenuta in un registro opportunamente predisposto e denominato *registro di stato*.

Se un programma non può essere interrotto l'esecuzione dell'interruzione viene bloccata fino a quando non viene modificato il contenuto di tale registro.

## Programma di risposta

Il *programma di risposta* si svolge secondo le seguenti fasi:

- *salvataggio*;
- *riconoscimento della periferica*;
- *gestione servizio*;
- *ripristino*;
- *uscita dall'interruzione*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il **salvataggio** consiste nell'inserire i contenuti dei vari registri del microprocessore nell'*area di stack*.

Nell'istante considerato il *program counter* contiene l'indirizzo dell'istruzione successiva a quella eseguita che viene quindi memorizzata in vista di un ulteriore riutilizzo.

Il **riconoscimento della periferica** consiste nell'individuare quale tra le diverse periferiche ha chiesto l'interruzione.

La **gestione servizio** consiste nell'eseguire le operazioni relative alla periferica che ha causato l'interruzione.

Il **ripristino** consiste nel recuperare dall'*area di stack* i dati precedentemente salvati ripristinando così lo stato in cui si trovava il microprocessore prima del verificarsi dell'interruzione.

L'**uscita dall'interruzione** si verifica quando, al termine del programma di risposta, si incontra un'istruzione che permette il ritorno al programma principale con il recupero del contenuto che aveva il contatore di programma prima dell'interruzione.

## 3.3 Accesso diretto in memoria (DMA)

Il trasferimento di dati tra una periferica e la memoria avviene generalmente in due tempi attraverso il microprocessore.

Le periferiche veloci (unità a dischi o computer) possono però accedere alla memoria direttamente, senza passare attraverso il microprocessore, usando la **tecnica del DMA** (*Accesso Diretto in Memoria*).

In questo caso viene utilizzato un dispositivo, il *DMA controller*, che assume il controllo del *bus degli indirizzi*.

Il *DMA* è collegato alla periferica con un'interfaccia e al microprocessore con il bus.

Al *DMA* vengono assegnati due compiti:

- comunicare con il programma e la periferica per ricevere ordini;
- rendere operativi tali ordini.

Utilizzando un apposito *programma driver* il microprocessore ha la facoltà di comunicare con il *DMA controller* seguendo le regole per lo scambio di informazioni (*protocolli*).

In particolare il *programma driver* stabilisce l'inizio e la fine della trasmissione dei dati; il *controller* può solo eseguire comandi e comunicare al microprocessore la fine del trasferimento.

La memoria ha in questo caso la funzione di memorizzare i dati durante un'operazione di *ingresso* e di metterli a disposizione della periferica durante un'operazione di *uscita*.

## 3.4 Periferiche I/O parallele

Nei sistemi a microprocessore vi è l'esigenza di acquisire e trasmettere dati.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

▶ Quando i dati vengono convogliati in contemporanea su diversi conduttori si dice che la trasmissione è di tipo *parallelo*.

### Interfacce parallele

Per poter essere acquisiti i dati di ingresso devono transitare attraverso il *bus dati* su cui avvengono tutti gli scambi di informazione necessari alla gestione del microprocessore.

Tra l'unità periferica che genera i segnali e il *bus* viene interposto un opportuno dispositivo di interfaccia che ne sincronizza l'accesso.

Tale dispositivo viene controllato dal segnale proveniente dal microprocessore che abilita la trasmissione dei dati provenienti dalle periferiche sul *bus dati*.

L'interfaccia può essere semplicemente un registro (*buffer*) con uscita a tre stati:

- i primi due rappresentano i valori logici 0 e 1;
- il terzo corrisponde a un circuito aperto (*alta impedenza*).

In corrispondenza di un apposito segnale proveniente dal *bus indirizzi* il dato di ingresso viene abilitato, in caso contrario il dato viene isolato dal *bus dati*.

### Interfacce programmabili

A volte a richiedere il collegamento, invece del microprocessore, è la periferica stessa; a tal fine occorre che dall'interfaccia venga generato un segnale che dichiari la sua disponibilità ad accogliere o inviare un nuovo dato.

La periferica deve così collegarsi al sistema sia mediante l'interfaccia sia tramite una porta per la gestione degli *interrupt*.

Per garantire all'interfaccia parallela una struttura che possa adattarsi a periferiche sia di ingresso sia di uscita, vengono usati dei dispositivi programmabili chiamati ***PIO*** (*Parallel Input Output*) o ***PPI*** (*Programmable Peripheral Interface*).

Tali dispositivi, tramite l'invio da parte del microprocessore di opportuni codici di controllo nei loro registri interni, consentono la configurazione dell'interfaccia in relazione alle esigenze specifiche della particolare applicazione.

Un dispositivo di questo tipo rende accessibili all'esterno dei gruppi di segnali, detti *porte*, assieme ai segnali di controllo della comunicazione con la periferica esterna (*segnali di handshake*).

Il collegamento con il microprocessore avviene tramite il *bus dati* e i normali segnali di sincronismo necessari per attivare il componente esterno alla scrittura o alla lettura.

## 3.5 Periferiche I/O seriali

▶ Quando i dati vengono convogliati sul medesimo conduttore uno di seguito all'altro si dice che la trasmissione è di tipo *serie*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

La trasmissione di tipo parallelo non risulta conveniente quando occorra trasportare segnali a distanze notevoli.

In questi casi è opportuno ricorrere a un collegamento seriale ottenendo il vantaggio di un minor numero di conduttori ma lo svantaggio derivato da una velocità minore di quella ottenibile mediante comunicazione parallela.

Un vantaggio ulteriore è costituito dal fatto di poter disporre di linee già installate per altri scopi, come quelle telefoniche o elettriche.

In questi casi occorre però tenere conto della possibilità che al segnale si aggiungano dei *disturbi*; facendo uso di appositi segnali di controllo è però possibile comunicare gli eventuali errori e in alcuni casi addirittura correggerli.

In una *trasmissione seriale* è importante la *sincronizzazione*, cioè la possibilità di individuare l'inizio e la fine dei dati trasmessi.

Dal modo in cui tale informazione viene inserita nella sequenza di dati da trasmettere si possono distinguere i due seguenti tipi di trasmissione seriale:

- *trasmissione sincrona*;
- *trasmissione asincrona*.

Nella **trasmissione sincrona** l'informazione relativa alla sincronizzazione viene fornita una sola volta per ogni blocco di dati trasmessi.

La lunghezza dei blocchi deve essere nota al ricevitore in modo da poter effettuare una corretta separazione fra dati e bit di controllo.

Nella **trasmissione asincrona** il sincronismo è inviato per ogni dato trasmesso; inizialmente viene inviato *un bit di START*; seguono i bit che formano il dato da trasmettere (in genere da 5 a 8 a seconda del codice usato); la fine del messaggio viene segnalata da uno o più *bit di STOP*.

Se si vuole operare in modo da segnalare o evitare errori dovuti a disturbi, ai dati del messaggio vanno aggiunti i *bit di parità* caratteristici del codice con cui si effettua la trasmissione.

La tecnica di trasmissione asincrona è la più diffusa grazie alla sua semplicità.

# 4 Caratteristiche del microprocessore Z80

Con lo scopo di poter affrontare la programmazione dello Z80 si descrivono più dettagliatamente le principali caratteristiche del microprocessore e in particolare:

- piedinatura;
- caratteristiche dei segnali;
- temporizzazioni;
- registri interni;
- tipologie di istruzioni.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 4.1 Piedinatura

Il microprocessore Z80 è un integrato provvisto di 40 pin.

Di seguito si esamina la sua piedinatura con i pin raggruppati per tipologia di funzione e non in base alla loro effettiva posizione.

Nella FIGURA **5**, in cui viene rappresentata la piedinatura dello Z80 dal punto di vista funzionale, vengono evidenziate le seguenti informazioni:

- i nomi assegnati ai singoli segnali;
- il corrispondente numero di pin;
- la direzione del segnale (la freccia evidenzia il fatto che il segnale può essere di ingresso, di uscita, bidirezionale);
- lo stato di attivazione del segnale (se a livello alto o a livello basso).

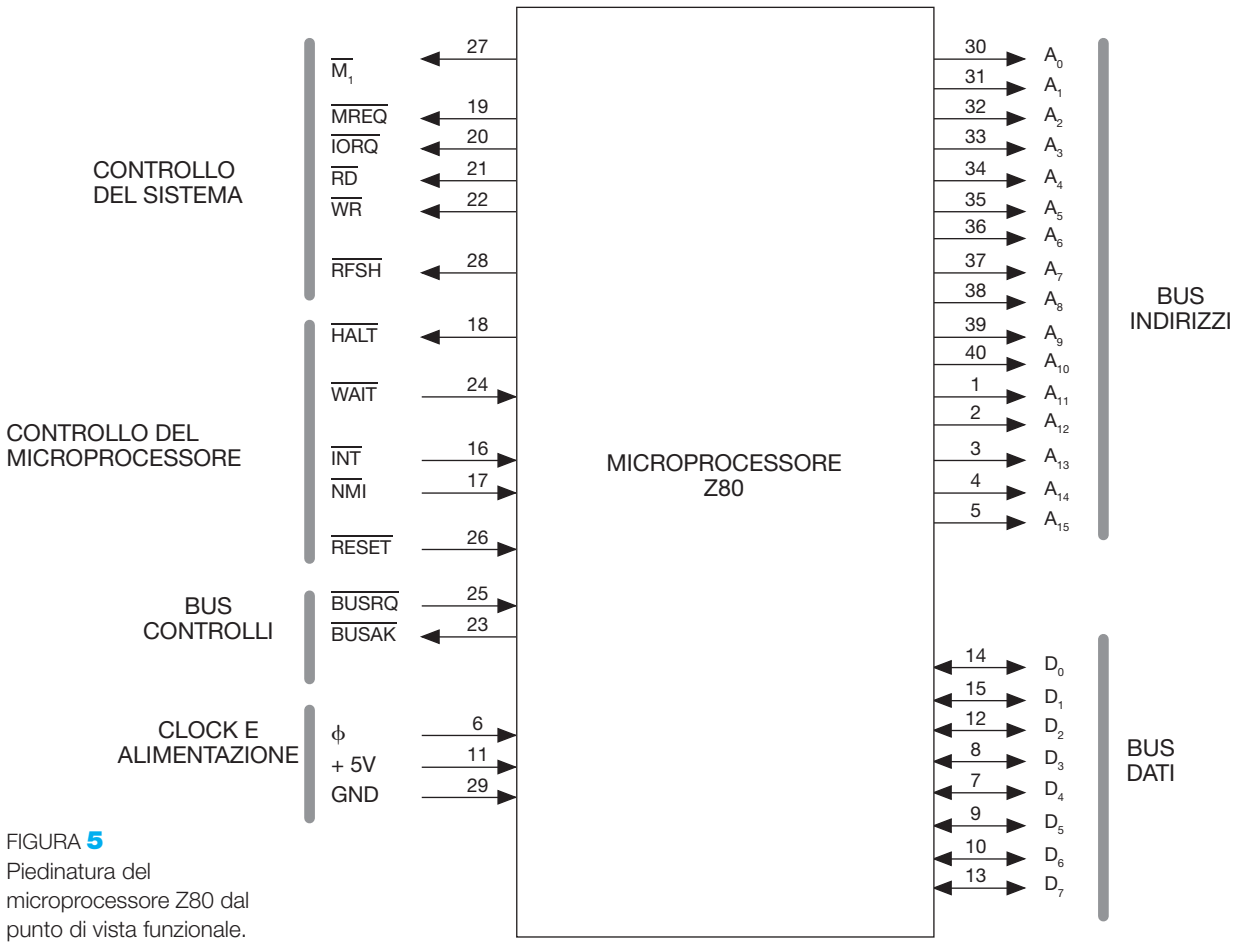



FIGURA **5**
Piedinatura del microprocessore Z80 dal punto di vista funzionale.

Sul lato destro si trovano:

- i pin del bus indirizzi contraddistinti dai segnali da A0 ad A15;
- i pin del bus dati contraddistinte dai segnali da D0 a D7.

Sul lato sinistro si trovano:

- i pin dedicati al controllo del sistema che danno la possibilità al microprocessore di controllare i dispositivi esterni;
- i pin dedicati al controllo del microprocessore che consentono ai


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

dispositivi esterni di intervenire sul funzionamento del microprocessore;
- i pin del bus controlli;
- i pin per l'alimentazione dell'integrato.

## 4.2 Caratteristiche dei segnali

Si descrive di seguito la funzionalità dei segnali (attivi a livello basso) situati sul lato sinistro dell'integrato.

***M1* (*Primo* Ciclo Macchina)**
Segnala che è in corso la lettura di un codice operativo quando il microprocessore è nella *fase di fetch*.

***MREQ* (*Memory Request*)**
Segnala che sul bus indirizzi è presente l'indirizzo valido di una locazione di memoria operativa.

***IOREQ* (*I/O Request*)**
Segnala la fase di lettura e/o scrittura su un dispositivo di I/O.

***RD* (*Read*)**
Segnala il trasferimento di dati dalla memoria e/o da un dispositivo di I/O verso il microprocessore ed è attivo insieme ai segnali *MREQ* e/o *IOREQ*.

***WD* (*Write*)**
Segnala il trasferimento dati dal microprocessore alla memoria e/o a un dispositivo di I/O ed è attivo insieme ai segnali *MREQ* e/o *IOREQ*.

***RFSH* (*Refresh*)**
Segnala che è in corso il *refresh delle memorie DRAM* eventualmente presenti nel sistema ed è attivo durante la fase di fetch.

***HALT***
Segnala che il microprocessore è in uno *stato di NOP* (*not operation*) nel quale si limita ad attivare le sole operazioni di *refresh* (l'uscita dallo stato di *HALT* avviene tramite una *Interrupt* oppure azionando il *Reset*).

***INT* (*Interrupt Request*)**
Se è attivo in contemporanea con il segnale *BUSRQ*, il microprocessore esegue una interruzione mascherabile nella quale:
- blocca l'esecuzione del programma principale;
- esegue il sottoprogramma corrispondente alla richiesta;
- ritorna successivamente all'esecuzione del programma principale.

***NMI* (*Non Maskable Interrupt*)**
Se è attivo in contemporanea con il segnale *BUSRQ*, il microprocessore esegue una *interruzione non mascherabile* nella quale:
- blocca l'esecuzione del programma principale;


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- esegue il sottoprogramma partendo dall'indirizzo 0066;
- ritorna successivamente all'esecuzione del programma principale.

### *WAIT*

Il segnale viene attivato ogni volta che un dispositivo esterno non è pronto a ricevere e/o trasmettere dati al microprocessore; testando la linea del *WAIT* il microprocessore allunga i tempi di lettura e/o scrittura di dati da/verso dispositivi esterni.

### *RESET*

È il segnale che inizializza il funzionamento del sistema.

### *BUSRQ (Bus Request)*

Il segnale viene attivato da un dispositivo di I/O che richiede il controllo dei bus del sistema.

Con la richiesta il microprocessore termina l'istruzione in corso e successivamente si pone in uno stato di *HALT* portando in *alta impedenza* le sue linee di comunicazione.

Un esempio tipico di richiesta di bus si ha quando si esegue una *DMA* (*Direct Memory Access*) nella quale i dispositivi di I/O dialogano con le memorie operative del sistema.

### *BUSAK (Bus Acknowledge)*

È il segnale di risposta inviato dal microprocessore per comunicare l'accettazione di un *Bus Request*; senza l'attivazione di questo segnale la periferica non può iniziare il controllo dei bus.

### *Clock*

Il segnale, *TTL compatibile*, permette la sincronizzazione delle operazioni del microprocessore (accetta frequenze comprese tra 2 MHz e 8 MHz).

## 4.3 Temporizzazioni

Le istruzioni vengono eseguite in sequenza dal microprocessore; i modi e i tempi di procedere vengono stabiliti dalla *logica di controllo*.

Nell'eseguire un'istruzione il microprocessore svolge una serie di operazioni elementari denominate *cicli macchina*; si hanno così:

- il *ciclo di lettura del codice operativo dell'istruzione*;
- i *cicli di lettura/scrittura in memoria*;
- i *cicli di lettura/scrittura nei dispositivi di I/O*;
- i *cicli di riconoscimento delle interruzioni*.

Ciascuna operazione elementare può richiedere da tre a sei *periodi di clock* per essere portata a termine.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

I *periodi di clock elementari*, identificati con il termine **ciclo T**, non sono altro che i *periodi del segnale di clock* del microprocessore.

Le operazioni elementari vengono invece identificate con il termine **cicli M** (*cicli macchina*).

Le istruzioni vengono lette una dopo l'altra in quella parte di memoria che, come viene evidenziato in FIGURA **6**, è destinata a ospitare il programma.

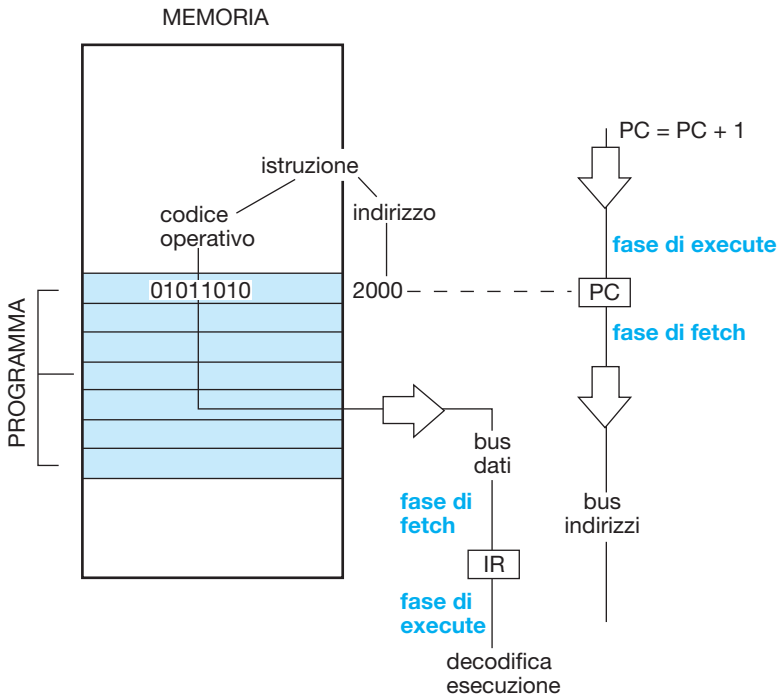



FIGURA **6**
Memoria di programma.

L'indirizzo dell'istruzione che si deve eseguire viene trasferito nel *registro contatore di programma*, il codice operativo nel *registro istruzioni*.

Il ciclo necessario per completare l'esecuzione di una istruzione (*ciclo di una istruzione*) è costituito da una sequenza di *cicli M* formati a sua volta da un numero variabile di *cicli T*.

Per ciascuna istruzione si definiscono in particolare:

- la *fase di fetch*;
- la *fase di execute*.

Durante la **fase di fetch** si verificano i seguenti due eventi:

- l'indirizzo contenuto nel contatore di programma viene trasferito sul bus degli indirizzi;
- il contenuto della locazione di memoria indirizzata (che è poi il codice operativo dell'istruzione) viene trasferito sul bus dati e quindi nel registro istruzioni.

Durante la **fase di execute** si verificano i seguenti eventi:

- il contatore di programma viene incrementato per prepararlo al successivo ciclo di acquisizione;
- l'istruzione viene decodificata utilizzando il decodificatore delle istruzioni ed eseguita utilizzando la ALU e i diversi registri interni.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

L'andamento nel tempo dei segnali che coinvolgono la *fase di fetch* viene riportato in FIGURA **7**.

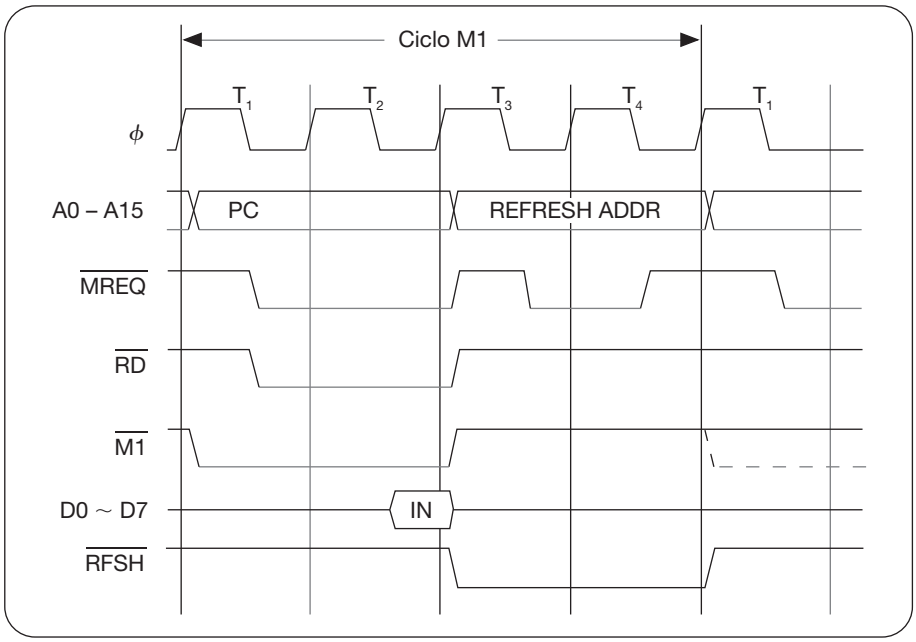



FIGURA **7**
Diagrammi temporali relativi alla fase di fetch.

Il *ciclo di fetch*, indicato come *ciclo M1* (*primo ciclo macchina*), è di solito costituito da *4 cicli T*.

L'andamento nel tempo dei segnali relativi al *ciclo di lettura in memoria* (che avviene nella *fase di execute*) viene riportato in FIGURA **8**.

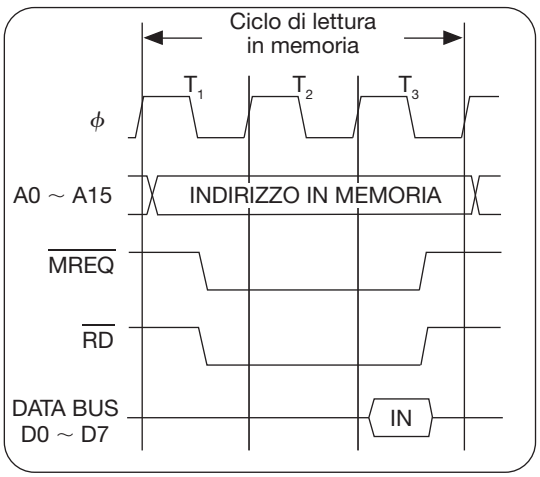



FIGURA **8**
Diagrammi temporali relativi al ciclo di lettura in memoria.

L'andamento nel tempo dei segnali relativi al *ciclo di scrittura in memoria* (che avviene anch'esso nella *fase di execute*) viene riportato in FIGURA **9**.

Nel suo complesso l'andamento nel tempo dei segnali relativi al ciclo completo di una istruzione con tre *cicli M* e dieci *cicli T* viene rappresentato in FIGURA **10**.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

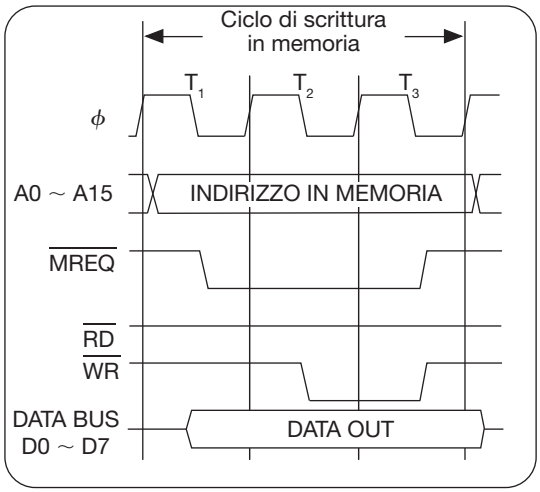



FIGURA **9**
Diagrammi temporali relativi al ciclo di scrittura in memoria.

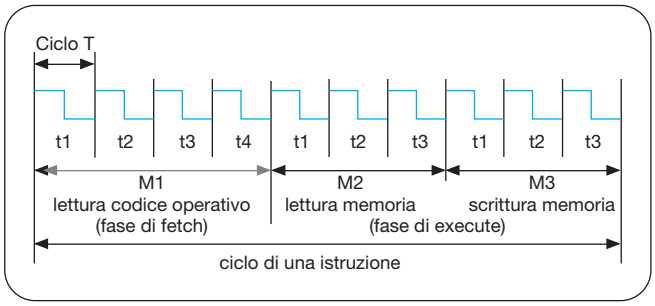



FIGURA **10**
Esempio di diagrammi temporali relativi al ciclo completo di una istruzione.

## 4.4 Registri interni

I registri interni dello Z80 sono registri a 8 bit e a 16 bit; i primi sono contraddistinti da una lettera, i secondi da due lettere.

I **registri a 8 bit** vengono denominati:

- *registri di uso generale* A, B, C, D, E, F, H;
- *registri copia dei registri generali* A′, B′, C′, D′, E′, F′, H′, L′;
- *registro d'interrupt* I;
- *registro di refresh* R.

I **registri di uso generale** sono otto e vengono denominati A, B, C, D, E, F, H, L.

I registri di uso generale possono diventare registri a 16 bit utilizzando gli accoppiamenti AF, BC, DE, HL.

Di particolare importanza è l'uso del registro HL con un proprio set d'istruzioni particolari utilizzate per le operazioni aritmetiche e per l'indirizzamento e il trasferimento dati dalla memoria.

In particolare:

- il registro A viene denominato **registro accumulatore**;
- il registro F viene denominato **registro dei flag**.

I singoli bit del registro dei flag hanno, come evidenziato in FIGURA **11**, il seguente significato:

- S = *flag di segno* (indica se il risultato di un'operazione è positivo o negativo);
- Z = *flag di zero* (indica se il risultato di un'operazione è uguale a zero o è diverso da zero);
- H = *flag di half carry* (indica se a seguito di un'operazione si ha riporto sul quarto bit del registro accumulatore);


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- P/V = *flag di parity/overflow* (indica se il numero dei bit posti a 1 nel risultato di un'operazione è pari o se il segno del risultato è errato);
- N = *flag di addizione/sottrazione* (indica se l'operazione effettuata è un'addizione o un decremento);
- C = *flag di carry* (indica se a seguito di un'operazione si ha riporto sull'ultimo bit).

FIGURA **11**
Suddivisione del registro dei flag.

| BIT | FLAG | VALORE | RISULTATO |
|---|---|---|---|
| 7 | S | 0 | risultato positivo |
| 6 | Z | 0 | risultato diverso da zero |
| 5 | X | x | X |
| 4 | H | 0 | no mezzo riporto |
| 3 | X | x | X |
| 2 | P/V | 0 | no parità/overflow |
| 1 | N | 0 | no sottrazione/decremento |
| 0 | C | 0 | no riporto |

Due bit, il 3 e il 5, non vengono utilizzati e perciò vengono identificati con X.

I **registri a 16 bit** vengono denominati:

- *Stack Pointer* SP;
- *Program Counter* PC;
- *Registri indice* IX, IY.

## 4.5 Tipologie di istruzioni

Le istruzioni possono essere suddivise in relazione alle operazioni eseguite nelle seguenti categorie:

- caricamento a 8 bit;
- caricamento a 16 bit;
- scambio, ricerca e trasferimento di blocchi;
- operazioni aritmetiche di uso generale;
- operazioni aritmetiche a 16 bit;
- rotazione e spostamenti;
- operazioni sui bit di set, reset, e test;
- salti;
- operazioni di ingresso/uscita.

Di seguito viene fatto riferimento alle istruzioni principali.

### Istruzioni di caricamento e scambio

Le istruzioni di caricamento (*load*) muovono i dati tra i diversi registri che si trovano all'interno del microprocessore oppure tra i registri e la memoria esterna.

Il codice di queste istruzioni deve contenere:

- la locazione sorgente dalla quale il dato deve essere prelevato;
- una locazione di destinazione.

Le istruzioni di caricamento non modificano la locazione sorgente.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Istruzioni aritmetiche e logiche

Le istruzioni aritmetiche e logiche operano sui dati posti nel registro accumulatore, negli altri registri di uso generale o in locazioni della memoria esterna.

Il risultato dell'operazione viene posto nel registro accumulatore e i *flag* sono posizionati in accordo con il risultato stesso.

Un esempio di operazione aritmetica può essere la somma dell'accumulatore con il contenuto di una locazione della memoria esterna; il risultato dell'addizione viene posto nell'accumulatore.

### Istruzioni di rotazione e scorrimento

Le istruzioni di rotazione e scorrimento (*rotate e shift*) consentono di far ruotare verso destra o verso sinistra il contenuto di un qualsiasi registro o locazione di memoria con o senza l'utilizzo del bit di riporto (*carry*) in modo aritmetico o logico.

Inoltre il gruppo di 4 bit di ordine più basso (*nibble*) posto nel registro accumulatore può essere fatto ruotare a destra o a sinistra congiuntamente ad altri due *nibble* posti in una qualunque posizione di memoria.

### Istruzioni di manipolazione dei bit

Le istruzioni di manipolazione dei bit consentono in particolare di porre a *1 logico* (*set*) e *0 logico* (*reset*) o di esaminare (*test*) un qualsiasi bit dell'accumulatore, di un registro di uso generale o di una posizione qualunque di memoria.

### Istruzioni di salto, chiamata e ritorno

Le istruzioni di salto (*jump*), chiamata (*call*) e ritorno (*ret*) sono utilizzate per passare da una istruzione del programma a un'altra.

Nell'esecuzione di queste istruzioni viene coinvolto il *program counter*; vengono utilizzate diverse tecniche per ottenere il nuovo valore del *program counter* a partire da una specifica posizione di memoria.

### Istruzioni di ingresso/uscita

Le istruzioni di ingresso/uscita consentono il trasferimento di dati tra memoria esterna, registri di uso generale e dispositivi esterni di I/O.

Nel corso delle operazioni di ingresso/uscita gli 8 bit meno significativi del bus degli indirizzi contengono l'informazione necessaria per identificare la periferica coinvolta nello scambio di dati.

## 5 Programmazione dei microprocessori

La programmazione consiste nella scrittura sulla memoria di programma di tutte le istruzioni che si rendono necessarie per ottenere un determinato funzionamento.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Un microprocessore e quindi il sistema di cui fa parte necessitano per il loro funzionamento logico ed elettrico di impulsi codificati nei due soli stati che esso è in grado di riconoscere (quelli associabili ai valori logici 0 e 1).

Un codice formato esclusivamente da tali simboli è il **linguaggio macchina** del microprocessore che ha quindi il compito di presiedere all'elaborazione e al trasferimento di dati tra i diversi blocchi funzionali che si trovano al suo interno o verso l'esterno.

I programmi, intesi come sequenze di istruzioni, vengono scritti nella memoria del sistema proprio in linguaggio macchina.

Ciascuna istruzione, che ha un suo **codice operativo** formato da una o più sequenze di bit, va a occupare delle **locazioni di memoria** caratterizzate ciascuna da un proprio **indirizzo**.

La lettura di un codice scritto in linguaggio macchina risulta in genere piuttosto difficoltosa.

Un'informazione scritta nella forma comprensibile al microprocessore potrebbe essere per esempio formata dalla sequenza dei due byte **11000000** e **11000011**.

Per il programmatore non è facile ricordare sequenze del genere.

Proprio per questo motivo si utilizzano codici come l'esadecimale che interpreterebbe la sequenza binaria **0101/1111/0011/0000** come **5F30**.

Per rendere ancora più agevole il compito del programmatore le case costruttrici forniscono per ogni istruzione anche un *codice mnemonico* formato da lettere che richiamano il tipo di operazione svolta da quella determinata istruzione.

L'insieme delle istruzioni espresse mediante *codici mnemonici* costituiscono il **linguaggio assembly** del microprocessore.

Ogni istruzione scritta in *linguaggio assembly* è composta dai seguenti elementi:

- un **indirizzo** ovvero la locazione di memoria che conterrà il codice;
- un **codice operativo** che indica l'operazione che il microprocessore deve compiere;
- un **operando** che può assumere valori e significati diversi a seconda del tipo d'istruzione;
- un **commento** (non obbligatorio) che consiste in un'aggiunta di frasi e spiegazioni delle soluzioni adottate con lo scopo di rendere più comprensibili i programmi scritti.

Il codice mnemonico utilizza per definire le istruzioni abbreviazioni di termini inglesi che indicano il compito da svolgere; si citano come esempi ***ADD*** per indicare una somma, ***SUB*** per una sottrazione, ***JUMP*** per un salto, ***HALT*** per far terminare il programma.

Poiché ogni microprocessore possiede un proprio *linguaggio assembly* non vi è la possibilità di poter usare programmi scritti per un determinato microprocessore su un altro che possiede delle caratteristiche differenti.

L'insieme delle istruzioni che vengono messe a disposizione per la stesu-


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ra di un programma viene definito **set di istruzioni** e contribuisce in parte a definire le potenzialità del microprocessore.

Per la loro codifica può essere impiegata la **carta di riferimento** derivata dal manuale tecnico del microprocessore.

Una volta scritto il *programma sorgente*, esso viene tradotto in programma oggetto, ovvero in una serie d'istruzioni scritte in linguaggio macchina (*codice binario*).

Gli **assemblatori** sono i programmi che consentono il passaggio dal *programma sorgente* al *linguaggio macchina*.

## 6 Carta di riferimento dello Z80

Viene fatto ora specifico riferimento alla *programmazione assembly dello Z80* e in particolare:

- alla sua *carta di riferimento*;
- alla descrizione delle principali istruzioni.

La **carta di riferimento** contiene le seguenti informazioni:

- il codice mnemonico dell'istruzione;
- il significato dell'operazione in forma simbolica;
- lo stato in cui si trovano i flag a seguito dell'esecuzione dell'istruzione;
- il codice operativo dell'istruzione;
- il numero dei byte dell'istruzione;
- il numero dei *cicli M*;
- il numero degli *stati T*;
- eventuali commenti.

Un estratto della *carta di riferimento* viene proposto nelle tabelle che seguono e precisamente:

- le istruzioni di caricamento a 8 bit nella TABELLA **1**;
- le istruzioni di caricamento a 16 bit nella TABELLA **2**;
- le istruzioni di scambio, trasferimento di blocchi e ricerca nella TABELLA **3**;
- le istruzioni aritmetiche e logiche a 8 bit nella TABELLA **4**;
- le istruzioni di uso generale e di controllo del microprocessore nella TABELLA **5**;
- le istruzioni aritmetiche a 16 bit nella TABELLA **6**;
- le istruzioni di rotazione e scorrimento nella TABELLA **7**;
- le istruzioni di set, reset e test di bit nella TABELLA **8**;
- le istruzioni di chiamata e ritorno nella TABELLA **9**;
- le istruzioni di salto nella TABELLA **10**;
- le istruzioni di ingresso e uscita nella TABELLA **11**;
- le operazioni sui flag nella TABELLA **12**.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di caricamento a 8 bit**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag | | | | | | Codice OP | | | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Z | P/V | S | N | H | 76 | 543 | 210 | | | | |
| LD r, r′ | r ← r′ | • | • | • | • | • | • | 01 | r | r′ | 1 | 1 | 4 | |
| LD r, n | r ← n | • | • | • | • | • | • | 00<br>←<br>n | r | 110<br>→ | 2 | 2 | 7 | |
| LD r, (HL) | r ← (HL) | • | • | • | • | • | • | 01 | r | 110 | 1 | 2 | 7 | |
| LD r, (IX + d) | r ← (IX + d) | • | • | • | • | • | • | 11<br>01<br>←<br>d | 011<br>r | 101<br>110<br>→ | 3 | 5 | 19 | |
| LD r, (IY + d) | r ← (IY + d) | • | • | • | • | • | • | 11<br>01<br>←<br>d | 111<br>r | 101<br>110<br>→ | 3 | 5 | 19 | |
| LD (HL), r | (HL) ← r | • | • | • | • | • | • | 01 | 110 | r | 1 | 2 | 7 | |
| LD (IX + d), r | (IX + d) ← r | • | • | • | • | • | • | 11<br>01<br>←<br>d | 011<br>110 | 101<br>r<br>→ | 3 | 5 | 19 | |
| LD (IY + d), r | (IY + d) ← r | • | • | • | • | • | • | 11<br>01<br>←<br>d | 111<br>110 | 101<br>r<br>→ | 3 | 5 | 19 | |
| LD (HL), n | (HL) ← n | • | • | • | • | • | • | 00<br>←<br>n | 110 | 110<br>→ | 2 | 3 | 10 | |
| LD (IX + d), n | (IX + d) ← n | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>d<br>←<br>n | 011<br>110 | 101<br>110<br>→<br>→ | 4 | 5 | 19 | |
| LD (IY + d), n | (IY + d) ← n | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>d<br>←<br>n | 111<br>110 | 101<br>110<br>→<br>→ | 4 | 5 | 19 | |
| LD A, (BC) | A ← (BC) | • | • | • | • | • | • | 00 | 001 | 010 | 1 | 2 | 7 | |
| LD A, (DE) | A ← (DE) | • | • | • | • | • | • | 00 | 011 | 010 | 1 | 2 | 7 | |
| LD A, (nn) | A ← (nn) | • | • | • | • | • | • | 00<br>←<br>n<br>←<br>n | 111 | 010<br>→<br>→ | 3 | 4 | 13 | |
| LD (BC), A | (BC) ← A | • | • | • | • | • | • | 00 | 000 | 010 | 1 | 2 | 7 | |
| LD (DE), A | (DE) ← A | • | • | • | • | • | • | 00 | 010 | 010 | 1 | 2 | 7 | |
| LD (nn), A | (nn) ← A | • | • | • | • | • | • | 00<br>←<br>n<br>←<br>n | 110 | 010<br>→<br>→ | 3 | 4 | 13 | |
| LD A, I | A ← I | • | ↕ | IFF | ↕ | 0 | 0 | 11<br>01 | 101<br>010 | 101<br>111 | 2 | 2 | 9 | |
| LD A, R | A ← R | • | ↕ | IFF | ↕ | 0 | 0 | 11<br>01 | 101<br>011 | 101<br>111 | 2 | 2 | 9 | |
| LD I, A | I ← A | • | • | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>000 | 101<br>111 | 2 | 2 | 9 | |
| LD R, A | R ← A | • | • | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>001 | 101<br>111 | 2 | 2 | 9 | |

| r, r′ | registro |
|---|---|
| 000 | B |
| 001 | C |
| 010 | D |
| 011 | E |
| 100 | H |
| 101 | L |
| 111 | A |

**Note:** r, r′ significano uno qualsiasi dei registri A, B, C, D, E, H, L.
IFF significa che il contenuto del flip-flop di abilitazione delle interruzioni (IFF) è copiato nel flag P/V.

**Flag:** • = flag non modificato 0 = reset del flag 1 = set del flag X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **1**
Istruzioni di caricamento a 8 bit.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di caricamento a 16 bit**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag C | Flag Z | Flag P/V | Flag S | Flag N | Flag H | Codice OP 76 | Codice OP 543 | Codice OP 210 | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LD dd, nn | dd ← nn | • | • | • | • | • | • | 00<br>←<br>← | dd0<br>n<br>n | 001<br>→<br>→ | 3 | 3 | 10 | dd / coppia<br>00 BC<br>01 DE<br>10 HL<br>11 SP |
| LD IX, nn | IX ← nn | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>← | 011<br>100<br>n<br>n | 101<br>001<br>→<br>→ | 4 | 4 | 14 | |
| LD IY, nn | IY ← nn | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>← | 111<br>100<br>n<br>n | 101<br>001<br>→<br>→ | 4 | 4 | 14 | |
| LD HL, (nn) | H ← (nn + 1)<br>L ← (nn) | • | • | • | • | • | • | 00<br>←<br>← | 101<br>n<br>n | 010<br>→<br>→ | 3 | 5 | 16 | |
| LD dd, (nn) | $dd_H$ ← (nn + 1)<br>$dd_L$ ← (nn) | • | • | • | • | • | • | 11<br>01<br>←<br>← | 101<br>dd1<br>n<br>n | 101<br>011<br>→<br>→ | 4 | 6 | 20 | |
| LD IX, (nn) | $IX_H$ ← (nn + 1)<br>$IX_L$ ← (nn) | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>← | 011<br>101<br>n<br>n | 101<br>010<br>→<br>→ | 4 | 6 | 20 | |
| LD IY, (nn) | $IY_H$ ← (nn + 1)<br>$IY_L$ ← (nn) | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>← | 111<br>101<br>n<br>n | 101<br>010<br>→<br>→ | 4 | 6 | 20 | |
| LD (nn), HL | (nn + 1) ← H<br>(nn) ← L | • | • | • | • | • | • | 00<br>←<br>← | 100<br>n<br>n | 010<br>→<br>→ | 3 | 5 | 16 | |
| LD (nn), dd | (nn + 1) ← $dd_H$<br>(nn) ← $dd_L$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>01<br>←<br>← | 101<br>dd0<br>n<br>n | 101<br>011<br>→<br>→ | 4 | 6 | 20 | |
| LD (nn), IX | (nn + 1) ← $IX_H$<br>(nn) ← $IX_L$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>← | 011<br>100<br>n<br>n | 101<br>010<br>→<br>→ | 4 | 6 | 20 | |
| LD (nn), IY | (nn + 1) ← $IY_H$<br>(nn) ← $IY_L$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>00<br>←<br>← | 111<br>100<br>n<br>n | 101<br>010<br>→<br>→ | 4 | 6 | 20 | |
| LD SP, HL | SP ← HL | • | • | • | • | • | • | 11 | 111 | 001 | 1 | 1 | 6 | |
| LD SP, IX | SP ← IX | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 011<br>111 | 101<br>001 | 2 | 2 | 10 | |
| LD SP, IY | SP ← IY | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 111<br>111 | 101<br>001 | 2 | 2 | 10 | qq / coppia<br>00 BC<br>01 DE<br>10 HL<br>11 AF |
| PUSH qq | (SP – 2) ← $qq_L$<br>(SP – 1) ← $qq_H$ | • | • | • | • | • | • | 11 | qq0 | 101 | 1 | 3 | 11 | |
| PUSH IX | (SP – 2) ← $IX_L$<br>(SP – 1) ← $IX_H$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 011<br>100 | 101<br>101 | 2 | 4 | 15 | |
| PUSH IY | (SP – 2) ← $IY_L$<br>(SP – 1) ← $IY_H$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 111<br>100 | 101<br>101 | 2 | 4 | 15 | |
| POP qq | $qq_H$ ← (SP + 1)<br>$qq_L$ ← (SP) | • | • | • | • | • | • | 11 | qq0 | 001 | 1 | 3 | 10 | |
| POP IX | $IX_H$ ← (SP + 1)<br>$IX_L$ ← (SP) | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 011<br>100 | 101<br>001 | 2 | 4 | 14 | |
| POP IY | $IY_H$ ← (SP + 1)<br>$IY_L$ ← (SP) | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 111<br>100 | 101<br>001 | 2 | 4 | 14 | |

**Note:** dd significa una qualsiasi delle coppie di registri BC, DE, HL, SP.
qq significa una qualsiasi delle coppie di registri AF, BC, DE, HL.
$(COPPIA)_H$, $(COPPIA)_L$ indicano il byte più significativo o il byte meno significativo della coppia indicata.
per eseÜio: $BC_L$ = C, $AF_H$ = A

**Flag:** • = flag non modificato 0 = reset del flag 1 = set del flag X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **2** Istruzioni di caricamento a 16 bit.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di scambio, trasferimento di blocchi e ricerca**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag | | | | | | Codice OP | | | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Z | P/V | S | N | H | 76 | 543 | 210 | | | | |
| EX DE, HL | DE ↔ HL | • | • | • | • | • | • | 11 | 101 | 011 | 1 | 1 | 4 | |
| EX AF, AF′ | AF ↔ AF′ | • | • | • | • | • | • | 00 | 001 | 000 | 1 | 1 | 4 | |
| EXX | $\begin{pmatrix}BC\\DE\\HL\end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix}BC'\\DE'\\HL'\end{pmatrix}$ | • | • | • | • | • | • | 11 | 011 | 001 | 1 | 1 | 4 | Scambio dei due banchi di registri |
| EX (SP), HL | H ↔ (SP + 1)<br>L ↔ (SP) | • | • | • | • | • | • | 11 | 100 | 011 | 1 | 5 | 19 | |
| EX (SP), IX | $IX_H$ ↔ (SP + 1)<br>$IX_L$ ↔ (SP) | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 011<br>100 | 101<br>011 | 2 | 6 | 23 | |
| EX (SP), IY | $IY_H$ ↔ (SP + 1)<br>$IY_L$ ↔ (SP) | • | • | •<br>① | • | • | • | 11<br>11 | 111<br>100 | 101<br>011 | 2 | 6 | 23 | |
| LDI | (DE) ← (HL)<br>DE ← DE + 1<br>HL ← HL + 1<br>BC ← BC – 1 | • | • | ↕ | • | 0 | 0 | 11<br>10 | 101<br>100 | 101<br>000 | 2 | 4 | 16 | Load di (HL) in (DE), incremento dei puntatori e decremento del contatore di byte (BC) |
| LDIR | (DE) ← (HL)<br>DE ← DE + 1<br>HL ← HL + 1<br>BC ← BC – 1<br>Ripete finché<br>BC = 0 | • | • | 0<br>① | • | 0 | 0 | 11<br>10 | 101<br>110 | 101<br>000 | 2<br>2 | 5<br>4 | 21<br>16 | Se BC ≠ 0<br>SE BC = 0 |
| LDD | (DE) ← (HL)<br>DE ← DE – 1<br>HL ← HL – 1<br>BC ← BC – 1 | • | • | ↕ | • | 0 | 0 | 11<br>10 | 101<br>101 | 101<br>000 | 2 | 4 | 16 | |
| LDDR | (DE) ← (HL)<br>DE ← DE – 1<br>HL ← HL – 1<br>BC ← BC – 1<br>Ripete finché<br>BC = 0 | • | •<br>② | 0<br>① | • | 0 | 0 | 11<br>10 | 101<br>111 | 101<br>000 | 2<br>2 | 5<br>4 | 21<br>16 | Se BC ≠ 0<br>Se BC = 0 |
| CPI | A – (HL)<br>HL ← HL + 1<br>BC ← BC – 1 | • | ↕<br>② | ↕<br>① | ↕ | 1 | ↕ | 11<br>10 | 101<br>100 | 101<br>001 | 2 | 4 | 16 | |
| CPIR | A – (HL)<br>HL ← HL + 1<br>BC ← BC – 1<br>Ripete finché<br>A = (HL) o<br>BC = 0 | • | ↕<br>② | ↕<br>① | ↕ | 1 | ↕ | 11<br>10 | 101<br>110 | 101<br>001 | 2<br>2 | 5<br>4 | 21<br>16 | Se BC = 0 e A ≠ (HL)<br>Se BC = 0 e A = (HL) |
| CPD | A – (HL)<br>HL ← HL – 1<br>BC ← BC – 1 | • | ↕<br>② | ↕<br>① | ↕ | 1 | ↕ | 11<br>10 | 101<br>101 | 101<br>001 | 2 | 4 | 16 | |
| CPDR | A – (HL)<br>HL ← HL – 1<br>BC ← BC – 1<br>Ripete finché<br>A = (HL) o<br>BC = 0 | • | ↕ | ↕ | ↕ | 1 | ↕ | 11<br>10 | 101<br>111 | 101<br>001 | 2<br>2 | 5<br>4 | 21<br>16 | Se BC = 0 e A ≠ (HL)<br>Se BC = 0 e A = (HL) |

**Note:** ① P/V è 0 se il risultato di BC – 1 = 0, altrimenti P/V = 1.
② Il Flag Z è 1 se A = (HL), altrimenti Z = 0.

**Flag:** • = flag non modificato  0 = reset del flag  1 = set del flag  X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **3**
Istruzioni di scambio, trasferimento di blocchi e ricerca.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni aritmetiche e logiche a 8 bit**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag C | Flag Z | Flag P/V | Flag S | Flag N | Flag H | Codice OP 76 | Codice OP 543 | Codice OP 210 | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ADD A , r | A ← A + r | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 10 | 000 | r | 1 | 1 | 4 | r / registro: 000 B, 001 C, 010 D, 011 E, 100 H, 101 L, 111 A |
| ADD A, n | A ← A + n | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 11 ← | 000 n | 110 → | 2 | 2 | 7 | |
| ADD A, (HL) | A ← A + (HL) | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 10 | 000 | 110 | 1 | 2 | 7 | |
| ADD A, (IX + d) | A ← A + (IX + d) | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 11<br>10 ←<br>011<br>000 d | | 101<br>110 → | 3 | 5 | 19 | |
| ADD A, (IY +d) | A ← A + (IY + d) | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 11<br>10 ←<br>111<br>000 d | | 101<br>110 → | 3 | 5 | 19 | |
| ADC A, s | A ← A + s + CY | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | | 001 | | | | | s può essere r, n, (HL), (IX + d), (IY + d) come è dimostrato per l'istruzione ADD |
| SUB s | A ← A – s | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | | 010 | | | | | |
| SBC A, s | A ← A – s – CY | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | | 011 | | | | | |
| AND s | A ← A ∧ s | 0 | ↕ | P | ↕ | 0 | 1 | | 100 | | | | | |
| OR s | A ← A v s | 0 | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 110 | | | | | I bit indicati sostituiscono 000 indicato per l'istruzione ADD. |
| XOR s | A ← A ⊕ s | 0 | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 101 | | | | | |
| CP s | A – s | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | | 111 | | | | | |
| INC r | r ← r + 1 | • | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 00 | r | 100 | 1 | 1 | 4 | |
| INC (HL) | (HL) ← (HL) +1 | • | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 00 | 110 | 100 | 1 | 3 | 11 | |
| INC (IX + d) | (IX + d) ← (IX + d) +1 | • | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 11<br>00 ←<br>011<br>110 d | | 101<br>100 → | 3 | 6 | 23 | |
| INC (IY + d) | (IY + d) ← (IY + d) +1 | • | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | 11<br>00 ←<br>111<br>110 d | | 101<br>100 → | 3 | 6 | 23 | |
| DEC m | m ← m – 1 | • | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | | | 101 | | | | m può essere r, (HL), (IX + d), (IY + d), come è mostrato per l'istruzione INC. Identici stati e formato dell'istruzione INC. Sostituire 100 con 101 nel codice OP. |

**Note:** Il simbolo v nella colonna del flag P/V indica che il flag P/V contiene l'overflow del risultato dell'operazione. In modo simile il simbolo P indica parità, v = 1 significa overflow, v = 0 significa mancanza di overflow, P = 1 significa che la parità del risultato è pari, P = 0 significa che essa è dispari.

**Flag:** • = flag non modificato 0 = reset del flag 1 = set del flag X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **4**
Istruzioni aritmetiche e logiche a 8 bit.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di uso generale e di controllo del microprocessore**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag | | | | | | Codice OP | | | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Z | P/V | S | N | H | 76 | 543 | 210 | | | | |
| DAA | Converte il contenuto dell'Accumulatore in BCD dopo somma o sottrazione con operandi BCD | ↕ | ↕ | P | ↕ | • | ↕ | 00 | 100 | 111 | 1 | 1 | 4 | Aggiustamento decimale dell'accumulatore. |
| CPL | $A \leftarrow \overline{A}$ | • | • | • | • | 1 | 1 | 00 | 101 | 111 | 1 | 1 | 4 | CoÜletamento dell'accumulatore (complemento a uno). |
| NEG | $A \leftarrow 0 - A$ | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | 11<br>01 | 101<br>000 | 101<br>100 | 2 | 2 | 8 | Negazione dell'accumulatore (coÜlemento a due). |
| CCF | $CY \leftarrow \overline{CY}$ | ↕ | • | • | • | 0 | X | 00 | 111 | 111 | 1 | 1 | 4 | CoÜlemento del flag di riporto. |
| SCF | $CY \leftarrow 1$ | 1 | • | • | • | 0 | 0 | 00 | 110 | 111 | 1 | 1 | 4 | Set del flag di riporto. |
| NOP | Nessuna oper. | • | • | • | • | • | • | 00 | 000 | 000 | 1 | 1 | 4 | |
| HALT | Alt. della CPU | • | • | • | • | • | • | 01 | 110 | 110 | 1 | 1 | 4 | |
| DI | $IFF \leftarrow 0$ | • | • | • | • | • | • | 11 | 110 | 011 | 1 | 1 | 4 | |
| EI | $IFF \leftarrow 1$ | • | • | • | • | • | • | 11 | 111 | 011 | 1 | 1 | 4 | |
| IM 0 | Seleziona il modo 0 di inter. | • | • | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>000 | 101<br>110 | 2 | 2 | 8 | |
| IM 1 | Seleziona il modo 1 di inter. | • | • | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>010 | 101<br>110 | 2 | 2 | 8 | |
| IM 2 | Seleziona il modo 2 di inter. | • | • | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>011 | 101<br>110 | 2 | 2 | 8 | |

**Note:** IFF indica il flip-flop di abilitazione delle interruzioni.
CY indica il flip-flop di riporto (carry).

**Flag:** • = flag non modificato  0 = reset del flag  1 = set del flag  X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **5**
Istruzioni di uso generale e di controllo del microprocessore.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni aritmetiche a 16 bit**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag | | | | | | Codice OP | | | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Z | P/V | S | N | H | 76 | 543 | 210 | | | | |
| ADD HL, ss | HL ← HL + ss | ↕ | • | • | • | 0 | X | 00 | ss1 | 001 | 1 | 3 | 11 | ss \| registro<br>00 \| BC<br>01 \| DE<br>10 \| HL<br>11 \| SP |
| ADC HL, ss | HL ← HL + ss + CY | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | X | 11<br>01 | 101<br>ss1 | 101<br>010 | 2 | 4 | 15 | |
| SBC HL, ss | HL ← HL – ss – CY | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | X | 11<br>01 | 101<br>ss0 | 101<br>010 | 2 | 4 | 15 | |
| ADD IX, pp | IX ← IX + pp | ↕ | • | • | • | 0 | X | 11<br>00 | 011<br>pp1 | 101<br>001 | 2 | 4 | 15 | pp \| registro<br>00 \| BC<br>01 \| DE<br>10 \| IX<br>11 \| SP |
| ADD IY, rr | IY ← IY + rr | ↕ | • | • | • | 0 | X | 11<br>00 | 111<br>rr1 | 101<br>001 | 2 | 4 | 15 | rr \| registro<br>00 \| BC<br>01 \| DE<br>10 \| IY<br>11 \| SP |
| INC ss | ss ← ss + 1 | • | • | • | • | • | • | 00 | ss0 | 011 | 1 | 1 | 6 | |
| INC IX | IX ← IX + 1 | • | • | • | • | • | • | 11<br>00 | 011<br>100 | 101<br>011 | 2 | 2 | 10 | |
| INC IY | IY ← IY + 1 | • | • | • | • | • | • | 11<br>00 | 111<br>100 | 101<br>011 | 2 | 2 | 10 | |
| DEC ss | ss ← ss – 1 | • | • | • | • | • | • | 00 | ss1 | 011 | 1 | 1 | 6 | |
| DEC IX | IX ← IX – 1 | • | • | • | • | • | • | 11<br>00 | 011<br>101 | 101<br>011 | 2 | 2 | 10 | |
| DEC IY | IY ← IY – 1 | • | • | • | • | • | • | 11<br>00 | 111<br>101 | 101<br>011 | 2 | 2 | 10 | |

**Note:** ss è uno qualsiasi della coppia di registri BC, DE, HL, SP.
pp è uno qualsiasi della coppia di registri BC, DE, IX, SP.
rr è uno qualsiasi della coppia di registri BC, DE, IY, SP.

**Flag:** • = flag non modificato 0 = reset del flag 1 = set del flag X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **6**
Istruzioni aritmetiche a 16 bit.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di rotazione e scorrimento**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag C | Flag Z | Flag P/V | Flag S | Flag N | Flag H | Codice OP 76 | Codice OP 543 | Codice OP 210 | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RLCA | CY ← 7 ← 0 ← A | ↕ | • | • | • | 0 | 0 | 00 | 000 | 111 | 1 | 1 | 4 | Rotazione circolare a sinistra dell'accumulatore. |
| RLA | CY ← 7 ← 0 ← A | ↕ | • | • | • | 0 | 0 | 00 | 010 | 111 | 1 | 1 | 4 | Rotazione a sinistra dell'accumulatore. |
| RRCA | 7 → 0 → CY, A | ↕ | • | • | • | 0 | 0 | 00 | 001 | 111 | 1 | 1 | 4 | Rotazione circolare a destra dell'accumulatore. |
| RRA | 7 → 0 → CY, A | ↕ | • | • | • | 0 | 0 | 00 | 011 | 111 | 1 | 1 | 4 | Rotazione a destra dell'accumulatore. |
| RLC r | CY ← 7 ← 0 ← r, (HL), (IX + d), (IY + d) | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | 11<br>00 | 001<br>000 | 011<br>r | 2 | 2 | 8 | Rotazione circolare a sinistra del registro r. |
| RLC (HL) | | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | 11<br>00 | 001<br>000 | 011<br>110 | 2 | 4 | 15 | |
| RLC (IX + d) | | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | 11<br>11<br>←<br>00 | 011<br>001<br>d<br>000 | 101<br>→<br>→<br>110 | 4 | 6 | 23 | |
| RLC (IY + d) | | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | 11<br>11<br>←<br>00 | 111<br>001<br>d<br>000 | 101<br>011<br>→<br>110 | 4 | 6 | 23 | |
| RL m | CY ← 7 ← 0 ← m = r, (HL), (IX + d), (IY + d) | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 010 | | | | | Il formato dell'istruzione e gli stati sono uguali a quelli di RLC, m. Per formare il nuovo codice operativo sostituire 000 di RLC, m con il codice indicato. |
| RRC m | 7 → 0 → CY, m = r, (HL), (IX + d), (IY + d) | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 001 | | | | | |
| RR m | 7 → 0 → CY, m = r, (HL), (IX + d), (IY + d) | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 011 | | | | | |
| SLA m | CY ← 7 ← 0 ← 0, m = r, (HL), (IX + d), (IY + d) | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 100 | | | | | |
| SRA m | 7 → 0 → CY, m = r, (HL), (IX + d), (IY + d) | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 101 | | | | | |
| SRL m | 0 → 7 → 0 → CY, m = r, (HL), (IX + d), (IY + d) | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | | 111 | | | | | |
| RLD | A 7 4 3 0 7 4 3 0 (HL) | • | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | 11<br>01 | 101<br>101 | 101<br>111 | 2 | 5 | 18 | Rotazione di un digit a sinistra e a destra attraverso l'accumulatore e la posizione (HL). Il contenuto della metà superiore dell'accumulatore non è modificato. |
| RRD | A 7 4 3 0 7 4 3 0 (HL) | • | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | 11<br>01 | 101<br>100 | 101<br>111 | 2 | 5 | 18 | |

| r | registro |
|---|---|
| 000 | B |
| 001 | C |
| 010 | D |
| 011 | E |
| 100 | H |
| 101 | L |
| 111 | A |

**Flag:** • = flag non modificato  0 = reset del flag  1 = set del flag  X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **7**
Istruzioni di rotazione e scorrimento.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di set, reset e test di bit**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag C | Flag Z | Flag P/V | Flag S | Flag N | Flag H | Codice OP 76 | Codice OP 543 | Codice OP 210 | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BIT b, r | $Z \leftarrow \overline{r_b}$ | • | ↕ | X | X | 0 | 1 | 11<br>01 | 001<br>b | 011<br>r | 2 | 2 | 8 | |
| BIT b, (HL) | $Z \leftarrow \overline{(HL)_b}$ | • | ↕ | X | X | 0 | 1 | 11<br>01 | 001<br>b | 011<br>110 | 2 | 3 | 12 | |
| BIT b, (IX + d) | $Z \leftarrow \overline{(IX + d)_b}$ | • | ↕ | X | X | 0 | 1 | 11<br>11<br>←<br>01 | 011<br>001<br>d<br>b | 101<br>011<br>→<br>110 | 4 | 5 | 20 | |
| BIT b, (IY + d) | $Z \leftarrow \overline{(IY + d)_b}$ | • | ↕ | X | X | 0 | 1 | 11<br>11<br>←<br>01 | 111<br>001<br>d<br>b | 101<br>011<br>→<br>110 | 4 | 5 | 20 | |
| SET b, r | $r_b \leftarrow 1$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>[11] | 001<br>b | 011<br>r | 2 | 2 | 8 | |
| SET b, (HL) | $(HL)_b \leftarrow 1$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>[11] | 001<br>b | 011<br>110 | 2 | 4 | 15 | |
| SET b, (IX + d) | $(IX + d)_b \leftarrow 1$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>11<br>←<br>[11] | 011<br>001<br>d<br>b | 101<br>011<br>→<br>110 | 4 | 6 | 23 | |
| SET b, (IY + d) | $(IY + d)_b \leftarrow 1$ | • | • | • | • | • | • | 11<br>11<br>←<br>[11] | 111<br>001<br>d<br>b | 101<br>011<br>→<br>110 | 4 | 6 | 23 | |
| RES b, m | $s_b \leftarrow 0$<br>m ≡ r, (HL),<br>(IX + d),<br>(IY + d) | • | • | • | • | • | • | [10] | | | | | | Per formare il nuovo codice OP, sostituire [11] di SET b, m con [10]. Flag e stati uguali alla istruzione di SET. |

| r | registro |
|---|---|
| 000 | B |
| 001 | C |
| 010 | D |
| 011 | E |
| 100 | H |
| 101 | L |
| 111 | A |

| b | bit testato |
|---|---|
| 000 | 0 |
| 001 | 1 |
| 010 | 2 |
| 011 | 3 |
| 100 | 4 |
| 101 | 5 |
| 110 | 6 |
| 111 | 7 |

**Note:** La notazione $s_b$ indica il bit b (da 0 a 7) della posizione di memoria s.

TABELLA **8**
Istruzioni di set, reset e test di bit.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di chiamata e ritorno**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag | | | | | | Codice OP | | | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Z | P/V | S | N | H | 76 | 543 | 210 | | | | |
| CALL nn | (SP – 1) ← $PC_H$<br>(SP – 2) ← $PC_L$<br>PC ← nn | • | • | • | • | • | • | 11<br>←<br>← | 001<br>n<br>n | 101<br>→<br>→ | 3 | 5 | 17 | |
| CALL cc, nn | Se la condizione cc è falsa continua, altrimenti come CALL nn | • | • | • | • | • | • | 11<br>←<br>← | cc<br>n<br>n | 100<br>→<br>→ | 3<br><br>3 | 3<br><br>5 | 10<br><br>17 | Se cc è falso<br><br>Se cc è vero |
| RET | $PC_L$ ← (SP)<br>$PC_H$ ← (SP + 1) | • | • | • | • | • | • | 11 | 001 | 001 | 1 | 3 | 10 | |
| RET cc | Se la condizione cc è falsa continua, altrimenti come RET | • | • | • | • | • | • | 11 | cc | 000 | 1<br><br>1 | 1<br><br>3 | 5<br><br>11 | Se cc è falso<br><br>Se cc è vero |
| RETI | Ritorno dalla interruzione | • | • | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>001 | 101<br>101 | 2 | 4 | 14 | |
| RETN | Ritorno dalla interruzione non mascherabile | • | • | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>000 | 101<br>101 | 2 | 4 | 14 | |
| RST p | (SP – 1) ← $PC_H$<br>(SP – 2) ← $PC_L$<br>$PC_H$ ← 0<br>$PC_L$ ← P | • | • | • | • | • | • | 11 | t | 111 | 1 | 3 | 11 | |

| cc | Condizione |
|---|---|
| 000 | NZ non zero |
| 001 | Z zero |
| 010 | NC non carry |
| 011 | C carry |
| 100 | PO par. odd |
| 101 | PF par. even. |
| 110 | P sign posit. |
| 111 | M sign.negat. |

| t | P |
|---|---|
| 000 | 00H |
| 001 | 08H |
| 010 | 10H |
| 011 | 18H |
| 100 | 20H |
| 101 | 28H |
| 110 | 30H |
| 111 | 38H |

TABELLA **9**
Istruzioni di chiamata e ritorno.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Istruzioni di salto**

| Codice mnemonico | Operazione simbolica | Flag C | Flag Z | Flag P/V | Flag S | Flag N | Flag H | Codice OP 76 | Codice OP 543 | Codice OP 210 | N. di byte | N. di cicli M | N. di stati T | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| JP nn | PC ← nn | • | • | • | • | • | • | 11<br>←<br>← | 000<br>n<br>n | 011<br>→<br>→ | 3 | 3 | 10 | |
| JP cc, nn | Se la condizione cc è vera PC ← nn, altrimenti continua | • | • | • | • | • | • | 11<br>←<br>← | cc<br>n<br>n | 010<br>→<br>→ | 3 | 3 | 10 | |
| JR e | PC ← PC + e | • | • | • | • | • | • | 00<br>← | 011<br>e – 2 | 000<br>→ | 2 | 3 | 12 | |
| JR C, e | Se C = 0, continua<br>Se C = 1, PC ← PC + e | • | • | • | • | • | • | 00<br>← | 111<br>e – 2 | 000<br>→ | 2<br>2 | 2<br>3 | 7<br>12 | Se la condizione non è assolta<br>Se la condizione è assolta |
| JR NC, e | Se C = 1, continua<br>Se C = 0, PC ← PC + e | • | • | • | • | • | • | 00<br>← | 110<br>e – 2 | 000<br>→ | 2<br>2 | 2<br>3 | 7<br>12 | Se la condizione non è assolta<br>Se la condizione è assolta |
| JR Z, e | Se Z = 0, continua<br>Se Z = 1, PC ← PC + e | • | • | • | • | • | • | 00<br>← | 101<br>e – 2 | 000<br>→ | 2<br>2 | 2<br>3 | 7<br>12 | Se la condizione non è assolta<br>Se la condizione è assolta |
| JR NZ, e | Se Z = 1, continua<br>Se Z = 0, PC ← PC + e | • | • | • | • | • | • | 00<br>← | 100<br>e – 2 | 000<br>→ | 2<br>2 | 2<br>3 | 7<br>12 | Se la condizione non è assolta<br>Se la condizione è assolta |
| JP (HL) | PC ← HL | • | • | • | • | • | • | 11 | 101 | 001 | 1 | 1 | 4 | |
| JP (IX) | PC ← IX | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 011<br>101 | 101<br>001 | 2 | 2 | 8 | |
| JP (IY) | PC ← IY | • | • | • | • | • | • | 11<br>11 | 111<br>101 | 101<br>001 | 2 | 2 | 8 | |
| DJNZ, e | B ← B – 1<br>Se B = 0, continua<br>Se B ≠ 0, PC ← PC + e | • | • | • | • | • | • | 00<br>← | 010<br>e – 2 | 000<br>→ | 2<br>2 | 2<br>3 | 8<br>13 | Se B = 0<br>Se B ≠ 0 |

| cc | Condizione |
|---|---|
| 000 | NZ non zero |
| 001 | Z zero |
| 010 | NC non carry |
| 011 | C carry |
| 100 | PO par. odd |
| 101 | PE par. even. |
| 110 | P sign posit. |
| 111 | M sign negat. |

**Note:** e rappresenta l'estensione nel modo di indirizzamento relativo.
e è un numero con segno, coÜlemento a due coÜreso nel valore < – 126, 129 >.
e – 2 nel codice operativo fornisce un indirizzo reale PC + e, poiché il Program Counter viene incrementato di 2 prima della somma con e.

**Flag:** • = flag non modificato  0 = reset del flag  1 = set del flag  X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **10**
Istruzioni di salto.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

| Istruzioni di ingresso e uscita | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Codice mnemonico** | **Operazione simbolica** | **Flag** | | | | | | **Codice OP** | | | **N. di byte** | **N. di cicli M** | **N. di stati T** | **Commenti** |
| | | **C** | **Z** | **P/V** | **S** | **N** | **H** | **76** | **543** | **210** | | | | |
| IN A, (n) | A ← (n) | • | • | • | • | • | • | 11<br>← | 011<br>n | 011<br>→ | 2 | 3 | 11 | n su $A_0 \sim A_7$<br>Acc su $A_8 \sim A_{15}$ |
| IN r, (C) | r ← (C)<br>se r = 110<br>solamente i flag saranno modi-ficati | • | ↕<br>① | P | ↕ | 0 | ↕ | 11<br>01 | 101<br>r | 101<br>000 | 2 | 3 | 12 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| INI | (HL) ← (C)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL + 1 | • | ↕ | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>100 | 101<br>010 | 2 | 4 | 16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| INIR | (HL) ← (C)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL + 1<br>Ripete finché B = 0 | • | 1<br>① | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>110 | 101<br>010 | 2<br>2 | 5<br>(Se B ≠ 0)<br>4<br>(Se B = 0) | 21<br>16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| IND | (HL) ← (C)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL – 1 | • | ↕ | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>101 | 101<br>010 | 2 | 4 | 16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| INDR | (HL) ← (C)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL – 1<br>Ripete finché B = 0 | • | 1 | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>111 | 101<br>010 | 2<br>2 | 5<br>(Se B ≠ 0)<br>4<br>(Se B = 0) | 21<br>16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| OUT (n), A | (n) ← A | • | • | • | • | • | • | 11<br>← | 010<br>n | 011<br>→ | 2 | 3 | 11 | n su $A_0 \sim A_7$<br>Acc su $A_8 \sim A_{15}$ |
| OUT (C), r | (C) ← r | • | •<br>① | • | • | • | • | 11<br>01 | 101<br>r | 101<br>001 | 2 | 3 | 12 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| OUTI | (C) ← (HL)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL + 1 | • | ↕ | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>100 | 101<br>011 | 2 | 4 | 16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| OTIR | (C) ← (HL)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL + 1<br>Ripete finché B = 0 | • | 1<br>① | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>110 | 101<br>011 | 2<br>2 | 5<br>(Se B ≠ 0)<br>4<br>(Se B = 0) | 21<br>16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| OUTD | (C) ← (HL)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL – 1 | • | ↕ | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>101 | 101<br>011 | 2 | 4 | 16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |
| OTDR | (C) ← (HL)<br>B ← B – 1<br>HL ← HL – 1<br>Ripete finché B = 0 | • | 1 | X | X | 1 | X | 11<br>10 | 101<br>111 | 101<br>011 | 2<br>2 | 5<br>(Se B ≠ 0)<br>4<br>(Se B = 0) | 21<br>16 | C su $A_0 \sim A_7$<br>B su $A_8 \sim A_{15}$ |

**Note:** ① Se il risultato di B – 1 è zero il flag Z viene posto a uno, altrimenti è posto a zero.

**Flag:** • = flag non modificato 0 = reset del flag 1 = set del flag X = flag posizionato casualmente
↕ = il flag viene modificato in accordo col risultato dell'operazione

TABELLA **11**
Istruzioni di ingresso e uscita.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

**Operazioni sui flag**

| Istruzione | C | Z | P/V | S | N | H | Commenti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ADD A, s; ADC A, s | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | Somma a 8-bit o somma a 8-bit con riporto |
| SUB s; SBC A, s; CP s, NEG | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | Sottrazione a 8-bit, sottrazione con riporto, confronto e negazione dell'accumulatore |
| AND s | 0 | ↕ | P | ↕ | 0 | 1 | } Operazioni logiche |
| OR s; XOR s | 0 | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | |
| INC s | • | ↕ | v | ↕ | 0 | ↕ | Incremento a 8-bit |
| DEC m | • | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | Decremento a 8-bit |
| ADD DD, ss | ↕ | • | • | • | 0 | X | Somma a 16-bit |
| ADC HL, ss | ↕ | ↕ | v | ↕ | 0 | X | Somma a 16-bit con riporto |
| SBC HL, ss | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | X | Sottrazione a 16-bit con riporto |
| RLA; RLCA, RRA, RRCA | ↕ | • | • | • | 0 | 0 | Rotazione dell'accumulatore |
| RL m; RLC m; RR m; RRC m<br>SLA m; SRA m; SRL m | ↕ | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | Rotazione e scorrimento di posizione di memoria |
| RLD, RRD | • | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | Rotazione di un digit a sinistra o a destra |
| DAA | ↕ | ↕ | P | ↕ | • | ↕ | Aggiustamento decimale dell'accumulatore |
| CPL | • | • | • | • | 1 | 1 | Complemento dell'accumulatore |
| SCF | 1 | • | • | • | 0 | 0 | Set del flag di riporto (carry) |
| CCF | ↕ | • | • | • | 0 | X | Complemento del flag di riporto (carry) |
| IN r, (C) | • | ↕ | P | ↕ | 0 | 0 | Input indiretto |
| INI; IND; OUTI; OUTD | • | ↕ | X | X | 1 | X | } Input o output di un blocco di dati |
| INIR; INDR; OTIR; OTDR | • | 1 | X | X | 1 | X | } Z = 0 se B ≠ 0, altrimenti Z = 1 |
| LDI, LDD | • | X | ↕ | X | 0 | 0 | } Istruzioni di trasferimento di un blocco di dati |
| LDIR, LDDR | • | X | 0 | X | 0 | 0 | } P/V = 1 se BC ≠ 0, altrimenti P/V = 0 |
| CPI, CPIR, CPD, CPDR | • | ↕ | ↕ | X | 1 | X | Istruzioni di ricerca in un blocco di dati<br>Z = 1 se A = (HL), altrimenti Z = 0<br>P/V = 1 se BC ≠ 0, altrimenti P/V = 0 |
| LD A, I; LD A, R | • | ↕ | IFF | ↕ | 0 | 0 | Lo stato del flip-flop di abilitazione delle interruzioni (IFF) è copiato nel flag P/V |
| BIT b, s | • | ↕ | X | X | 0 | 1 | Lo stato del bit b della posizione di memoria s è copiato nel flag z |
| NEG | ↕ | ↕ | v | ↕ | 1 | ↕ | Negazione dell'accumulatore |

In questa tabella sono adottate le seguenti istruzioni:

| Simbolo | Operazione |
|---|---|
| C | Flag di riporto (carry). C = 1 se l'operazione ha generato un riporto dal bit più significativo dell'operando o del risultato. |
| Z | Flag di zero. Z = 1 se il risultato dell'operazione è zero. |
| S | Flag di segno. S = 1 se il bit più significativo del risultato è 1. |
| P/V | Flag di parità/traboccamento (parity/overflow). La parità (P) e il traboccamento (V) utilizzano lo stesso flag. Le operazioni logiche modificano questo flag con la parità del risultato, mentre le operazioni aritmetiche modificano questo flag con l'eventuale overflow del risultato. Se P/V indica parità, P/V = 1 se il risultato è pari, P/V = 0 se il risultato è dispari. P/V = 1 se il risultato dell'operazione genera un overflow. |
| H | Riporto parziale (half carry). H = 1 se la somma o la sottrazione generano un riporto nel (o un riporto negativo dal) bit 4 dell'accumulatore. |
| N | Flag di somma/sottrazione. N = 1 se la precedente operazione era una sottrazione. |
| ↕ | Il flag è modificato in accordo con il risultato dell'operazione. |
| • | Il flag non viene modificato dall'operazione. |
| 0 | Il flag viene posto a 0 dall'operazione. |
| 1 | Il flag viene posto a 1 dall'operazione. |
| X | Il flag viene posizionato casualmente. |
| V | Il flag P/V viene modificato in accordo con l'overflow risultante. |
| P | Il flag P/V viene modificato in accordo con la parità risultante. |
| r | Uno qualsiasi dei registri A, B, C, D, E, H, L della CPU. |
| s | Qualsiasi singola posizione di memoria (8-bit). |
| ss | Qualsiasi doppia posizione di memoria (16-bit). |
| ii | Uno dei due registri indice IX o IY. |
| R | Contatore di rinfresco. |
| n | Un numero a 8-bit, cioè nel campo < 0, 255 >. |
| nn | Un numero a 16-bit, cioè nel campo <0, 65535 >. |
| m | Qualsiasi posizione di memoria a 8-bit. |

TABELLA **12**
Operazioni sui flag.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Tra quelle presenti nella *carta di riferimento* alcune istruzioni, quelle di uso più immediato, vengono di seguito esaminate in dettaglio; esse sono:

- *istruzioni di caricamento*;
- *istruzioni aritmetiche*;
- *istruzioni di salto*;
- *istruzioni logiche*;
- *istruzioni di rotazione*.

## 6.1 Istruzioni di caricamento

Per definire i codici mnemonici delle istruzioni di caricamento si utilizza la notazione *LD*.

Ogni istruzione di caricamento ha la seguente forma sintetica:

***LD destinazione, sorgente***

La sorgente indica la locazione di memoria o il registro contenente il dato che deve essere trasferito, mentre la destinazione è la locazione di memoria o il registro sul quale deve essere trasferito il dato.

Le modalità di caricamento possono assumere diverse forme definite:

- di *indirizzamento tra registri*;
- di *indirizzamento diretto*;
- di *indirizzamento immediato*.

### Indirizzamento tra registri

L'*indirizzamento tra registri* prevede lo scambio di dati tra registri interni.

Un'istruzione di questo tipo assume la forma generale

***LD r, r′***

in cui:

- *r* è il registro destinazione;
- *r′* è il registro sorgente.

L'istruzione si compone di un solo byte di codice operativo.

Con l'istruzione ***LD A,D*** si trasferisce nel registro accumulatore il dato contenuto nel registro sorgente D; al termine dell'istruzione il registro accumulatore e il registro D contengono il medesimo dato.

### Indirizzamento diretto

L'indirizzamento diretto prevede lo scambio di dati nei due sensi tra il registro accumulatore e una locazione di memoria.

Un'istruzione di questo tipo assume la forma generale

***LD A,(nn)***

in cui:

- *A* è il registro accumulatore;
- *nn* è l'indirizzo della locazione di memoria in cui si trova il dato da trasferire nell'accumulatore.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

L'istruzione che esegue l'operazione inversa assume la forma generale

***LD (nn),A***

con lo stesso significato visto in precedenza.

In entrambi i casi l'indirizzo della locazione di memoria nella quale è contenuto il dato deve essere racchiuso obbligatoriamente tra parentesi.

Sono istruzioni formate da un byte di codice operativo e da due byte di operandi che costituiscono l'indirizzo di memoria.

Con l'istruzione ***LD A,(5000)*** si trasferisce il contenuto della locazione di memoria di indirizzo 5000 nel registro accumulatore.

Con l'istruzione ***LD (5000),A*** si trasferisce invece nella locazione di memoria di indirizzo 5000 il contenuto del registro accumulatore.

### Indirizzamento immediato

L'*indirizzamento immediato* prevede il caricamento diretto di un dato in un registro interno.

Un'istruzione di questo tipo assume la forma generale

***LD r,n***

in cui:

- *r* è il registro destinazione;
- *n* è il dato sorgente di 8 bit.

Sono istruzioni formate da un byte di codice operativo e da un byte di operando che rappresenta il dato.

Con l'istruzione ***LD D,FF*** si trasferisce nel registro D il dato ossia il valore esadecimale FF.

## 6.2 Istruzioni aritmetiche

Il microprocessore è in grado di svolgere direttamente soltanto operazioni di addizione e sottrazione; si evidenziano in particolare:

- *istruzioni di addizione* (*ADD*);
- *istruzioni di sottrazione* (*SUB*);
- *istruzioni di incremento* (*INC*);
- *istruzioni di decremento* (*DEC*);
- *istruzioni di confronto* (*CP*).

### Addizione

L'addizione può essere effettuata:

- tra il contenuto del registro accumulatore e un dato;
- tra i contenuti del registro accumulatore e di un altro registro.

Nel primo caso l'istruzione assume la forma generale

***ADD A,n***

in cui:

- *A* è il registro accumulatore;
- *n* è il dato di 8 bit che si somma al contenuto del registro accumulatore.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

È un'istruzione formata da un byte di codice operativo e da un byte di operando che rappresenta il dato.

Con l'istruzione ***ADD A,FF*** si esegue la somma tra il contenuto del registro accumulatore e il dato ossia il valore esadecimale FF.

Nel secondo caso l'istruzione assume la forma generale

***ADD A,r***

in cui:

- *A* è il registro accumulatore;
- *r* è il registro il cui contenuto si somma a quello del registro accumulatore.

È un'istruzione formata da un solo byte di codice operativo.

Con l'istruzione ***ADD A,B*** si somma il contenuto del registro accumulatore con quello del registro B.

In entrambi i casi il risultato viene posto nel registro A.

Le istruzioni determinano la modifica dei bit del registro di flag.

### Sottrazione

La sottrazione può essere effettuata:

- tra il contenuto del registro accumulatore e un dato;
- tra i contenuti del registro accumulatore e di un altro registro.

Nel primo caso l'istruzione assume la forma generale

***SUB A,n***

in cui:

- *A* è il registro accumulatore;
- *n* è il dato di 8 bit che si sottrae al contenuto del registro accumulatore.

È un'istruzione formata da un byte di codice operativo e da uno di operando che rappresenta il dato.

Con l'istruzione ***SUB A,FF*** si esegue la sottrazione tra il contenuto del registro accumulatore e il dato ossia il valore esadecimale FF.

Nel secondo caso l'istruzione assume la forma generale

***SUB A,r***

in cui:

- *A* è il registro accumulatore;
- *r* è il registro il cui contenuto si somma a quello del registro accumulatore.

È un'istruzione formata da un solo byte di codice operativo.

Con l'istruzione ***SUB A,B*** si sottrae il contenuto del registro accumulatore al contenuto del registro B.

In entrambi i casi il risultato viene posto nel registro A.

Le istruzioni determinano la modifica dei bit del registro di flag.

### Incremento

L'istruzione di incremento determina l'incremento di 1 del contenuto di un registro.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

L'istruzione assume la forma generale

***INC r***

in cui *r* è il registro di cui si vuole incrementare il contenuto.

È un'istruzione formata da un solo byte di codice operativo.

L'istruzione determina la modifica di alcuni bit del registro di flag.

Con l'istruzione ***INC B*** si incrementa di 1 il contenuto del registro B.

### Decremento

L'istruzione di decremento determina il decremento di 1 del contenuto di un registro.

L'istruzione assume la forma generale

***DEC r***

in cui *r* è il registro di cui si vuole decrementare il contenuto.

È un'istruzione formata da un solo byte di codice operativo e determina la modifica di alcuni bit del registro di flag.

Con l'istruzione ***DEC B*** si decrementa di 1 il contenuto del registro B.

### Confronto

Le istruzioni di confronto eseguono delle sottrazioni tra il registro A e il registro o il dato al quale l'istruzione è applicata.

Nel primo caso l'istruzione assume la forma generale

***CP r***

in cui *r* è il registro sul quale viene effettuato il confronto.

Nel primo caso l'istruzione assume la forma generale

***CP n***

in cui *r* è il dato sul quale viene effettuato il confronto.

L'istruzione non ha evidentemente destinazione e, quando viene eseguita, va a modificare il contenuto del solo registro dei flag.

Nel primo caso si ha un byte di istruzione, nel secondo invece due byte.

## 6.3 Istruzioni di salto

Le istruzioni di salto, modificando il contenuto del *program counter*, consentono di intervenire sull'ordine di esecuzione delle istruzioni di un programma.

Le istruzioni di salto si suddividono in:

- *istruzioni di salto incondizionato*;
- *istruzioni di salto condizionato*.

### Istruzioni di salto incondizionato

Con questa tipologia di istruzione si comanda al programma di modificare incondizionatamente la sequenza di esecuzione del programma.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

L'istruzione assume la forma generale

*JP nn*

in cui *nn* è l'indirizzo della locazione di memoria dalla quale ripartire nell'esecuzione del programma.

### Istruzioni di salto condizionato

Con questa tipologia di istruzione si comanda al programma di modificare la sequenza di esecuzione del programma solo se si verificano determinate condizioni.

L'istruzione assume la forma generale

*JP cc,nn*

in cui *cc* è la condizione che si deve verificare affinché avvenga il salto e *nn* l'indirizzo della locazione di memoria dal quale ripartire nell'esecuzione del programma.

Le condizioni che si devono verificare affinché avvenga il salto sono le seguenti:

- con *JP Z,nn* si ha il salto se $Z = 1$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente è zero);
- con *JP NZ,nn* si ha il salto se $Z = 0$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente non è zero);
- con *JP C,nn* si ha il salto se $C = 1$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente ha generato un riporto);
- con *JP NC,nn* si ha il salto se $C = 0$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente non ha generato un riporto);
- con *JP M,nn* si ha il salto se $S = 1$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente è negativo);
- con *JP P,nn* si ha il salto se $S = 0$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente è positivo);
- con *JP PE,nn* si ha il salto se $P/V = 1$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente genera un overflow);
- con *JP PO,nn* si ha il salto se $P/V = 0$ (cioè se il risultato dell'operazione precedente non genera un overflow).

È un'istruzione formata da tre byte di codice operativo.

## 6.4 Istruzioni logiche

Appartengono a questa categoria:

- le istruzioni che simulano il comportamento delle porte logiche;
- le istruzioni che realizzano le operazioni di complemento a 1 e a 2 del contenuto del registro accumulatore.

### Prodotto logico

L'istruzione che esegue il prodotto logico tra il contenuto del registro accumulatore e il contenuto di un altro registro assume la forma generale

*AND r*

essendo *r* il registro diverso dall'accumulatore.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il risultato dell'operazione si trova nel registro accumulatore.
L'istruzione occupa due byte di spazio di memoria.

### Somma logica

L'istruzione che esegue la somma logica tra il contenuto del registro accumulatore e il contenuto di un altro registro assume la forma generale

***OR r***

essendo *r* il registro diverso dall'accumulatore.
Il risultato dell'operazione si trova nel registro accumulatore.
L'istruzione occupa due byte di spazio di memoria.

### Prodotto logico

L'istruzione che esegue il prodotto logico tra il contenuto del registro accumulatore e il contenuto di un altro registro assume la forma generale

***AND r***

essendo *r* il registro diverso dall'accumulatore.
Il risultato dell'operazione si trova nel registro accumulatore.
L'istruzione occupa due byte di spazio di memoria.

### Complemento a 1

L'istruzione ***CPL*** esegue il complemento a 1 del contenuto del registro accumulatore.
Il risultato dell'operazione si trova nel registro accumulatore.
L'istruzione occupa un byte di spazio di memoria.

### Complemento a 2

L'istruzione ***NEG*** esegue il complemento a 2 del contenuto del registro accumulatore.
Il risultato dell'operazione si trova nel registro accumulatore.
L'istruzione occupa due byte di spazio di memoria.

## 6.5 Istruzioni di rotazione

Le istruzioni di rotazione permettono di spostare verso sinistra o verso destra i bit di un registro o di una locazione di memoria; in particolare le istruzioni che consentono la rotazione dei bit del registro accumulatore sono:

- l'istruzione ***RLA*** (*Rotate Left*) per la rotazione a sinistra;
- l'istruzione ***RRA*** (*Rotate Right*) per la rotazione a destra;
- l'istruzione ***RLCA*** (*Rotate Left with Carry*) per la rotazione a sinistra con riporto;
- l'istruzione ***RRCA*** (*Rotate Right with Carry*) per la rotazione a destra con riporto.

Sono istruzioni a un byte.
Mentre la rotazione a sinistra corrisponde a un'operazione di moltiplicazione per due la rotazione a destra corrisponde a un'operazione di divisione per due.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 7 Esempi di programmazione

La scrittura di un programma in un determinato linguaggio rappresenta dal punto di vista informatico la fase finale della risoluzione di un problema.

Una procedura risolutiva tipica consiste in una successione di tre fasi nel corso delle quali:

- si analizza il problema di partenza;
- si individua un possibile algoritmo risolutivo;
- si traduce nel linguaggio di programmazione prescelto.

Per quanto riguarda la stesura di programmi scritti in linguaggio assembly che coinvolgono sistemi a microprocessore è tipico procedere nel modo seguente:

- si fissa l'indirizzo di memoria di inizio programma;
- si scrive il listato in codice mnemonico;
- si traduce il listato in codice oggetto;
- si riportano le note di commento.

Si riportano di seguito alcuni esempi in cui trovano applicazione le istruzioni di più immediato utilizzo.

**ESEMPIO 1**

Si realizzi un programma in *linguaggio macchina* (*codice esadecimale*) e nel corrispondente *linguaggio assembly* per effettuare la somma dei due numeri 8 e 9 caricati rispettivamente nei registri A e B.

## Soluzione

Per la stesura del programma si utilizzano:

– istruzioni di caricamento;
– l'istruzione di somma;
– l'istruzione di fine programma.

Dopo aver caricato i due numeri nei registri A e B si procede effettuando la somma.

Dopo l'operazione di somma il risultato è contenuto nel registro accumulatore.

In FIGURA **12** vengono riportati i listati dei due programmi e precisamente:

– nella colonna 1 l'indirizzo di memoria;
– nella colonna 2 il codice mnemonico;
– nella colonna 3 il corrispondente linguaggio macchina;
– nella colonna 4 il commento.

| Indirizzo memoria | Codice mnemonico | Linguaggio macchina | Commento |
|---|---|---|---|
| *1800* | *LD A, 08* | *3E 08* | Carica 08 in A |
| *1802* | *ADD B, 09* | *06 09* | Carica 09 in B |
| *1804* | *ADD A, B* | *80* | Somma A con B |
| *1805* | *HALT* | *76* | Fine programma |

FIGURA **12**
Listato dei programmi in linguaggio assembly e in linguaggio macchina.

**ESEMPIO 2**

Si realizzi un programma in *linguaggio macchina* (*codice esadecimale*) e nel corrispondente *linguaggio assembly* per effettuare la somma di quattro numeri contenuti rispettivamente nei registri B, C, D ed E.

## Soluzione

Per la stesura del programma si utilizzano:

– istruzioni di caricamento;
– l'istruzione di somma;
– l'istruzione di fine programma.

Non essendovi nulla di specificato a priori si sceglie di caricare la somma nel registro accumulatore; il procedimento da utilizzare per la stesura del programma potrebbe essere il seguente:


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 2

– si carica in A il contenuto di B;
– si effettua la somma tra A e C;
– si effettua la somma tra A e D;
– si effettua la somma tra A ed E.

In FIGURA **13** vengono riportati i listati dei due programmi e precisamente:

– nella colonna 1 l'indirizzo di memoria;
– nella colonna 2 il codice mnemonico;
– nella colonna 3 il corrispondente linguaggio macchina;
– nella colonna 4 il commento.

| Indirizzo memoria | Codice mnemonico | Linguaggio macchina | Commento |
|---|---|---|---|
| *1800* | *LD A, B* | *78* | Carico B in A |
| *1801* | *ADD A, C* | *81* | Sommo A con C |
| *1802* | *ADD A, D* | *82* | Sommo A con D |
| *1803* | *ADD A, E* | *83* | Sommo A con E |
| *1804* | *HALT* | *76* | Fine programma |

FIGURA **13**
Listato dei programmi in linguaggio assembly e in linguaggio macchina.

ESEMPIO 3

Si realizzi un programma in *linguaggio macchina* (*codice esadecimale*) e nel corrispondente *linguaggio assembly* che effettui il prodotto logico tra il contenuto dei registri A e B nei quali vengono inizialmente caricati i numeri esadecimali A2 e D3.

Al termine del programma:

– il registro C deve contenere il prodotto logico;
– i registri A e B devono mantenere il contenuto iniziale.

## Soluzione

Il procedimento è il seguente:

– si caricano i numeri nei registri A e B;
– si utilizza un ulteriore registro D per mantenere il contenuto di A che verrebbe distrutto dall'operazione di prodotto logico;
– si esegue l'operazione di prodotto logico e lo si trasferisce nel registro C;
– per ripristinare il contenuto di A si trasferisce il contenuto del registro D nel registro A.

In FIGURA **14** vengono riportati i listati dei due programmi e precisamente:

– nella colonna 1 l'indirizzo di memoria;
– nella colonna 2 il codice mnemonico;
– nella colonna 3 il corrispondente linguaggio macchina;
– nella colonna 4 il commento.

| Indirizzo memoria | Codice mnemonico | Linguaggio macchina | Commento |
|---|---|---|---|
| *1800* | *LD A, A2* | *3E A2* | Carico A2 nel registro A |
| *1802* | *ADD B, D3* | *06 D3* | Carico D3 nel registro B |
| *1804* | *LD D, A* | *57* | Trasferisco il contenuto del registro A nel registro D |
| *1805* | *AND B* | *83* | Eseguo il prodotto logico tra i contenuti dei registri A e B |
| *1806* | *LD C, A* | *4F* | Trasferisco il contenuto del registro A nel registro C |
| *1807* | *LD A, D* | *7A* | Trasferisco il contenuto del registro D nel registro A |
| *1808* | *HALT* | *76* | Fine programma |

FIGURA **14**
Listato dei programmi in linguaggio assembly e in linguaggio macchina.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 4

Si consideri il programma in *linguaggio assembly* riprodotto in FIGURA **15**.

| Indirizzo memoria | Codice mnemonico |
|---|---|
| *1800* | *LD A, F9* |
| *1802* | *ADD A, 01* |
| *1804* | *LD B, A* |
| *1805* | *LD A, 00* |
| *1807* | *AND B* |

FIGURA **15**
Listato del programma in linguaggio assembly.

Si individui il contenuto in esadecimale dei registri interni A e B una volta completata l'esecuzione del programma.

## Soluzione

### Registro A

Con la prima istruzione il registro A viene caricato con il numero esadecimale F9 (249 nel sistema decimale).

Con la seconda istruzione, sommando 01, il registro A contiene il numero FA (250 nel sistema decimale).

Con la terza istruzione il contenuto di A non cambia.

Con la quarta istruzione il contenuto di A diventa 00.

Con la quinta istruzione il contenuto di A mantiene il suo contenuto in quanto non alterato dall'esecuzione del prodotto logico.

### Registro B

Con la terza istruzione il registro B viene caricato con il contenuto del registro A al termine della seconda istruzione ossia FA.

La quinta istruzione, essendo un'operazione di prodotto logico, non cambia il contenuto del registro B.

ESEMPIO 5

Si realizzi con un programma in *linguaggio assembly* un ciclo di ritardo di durata prefissata che sia in grado di ritardare l'esecuzione dell'istruzione immediatamente successiva al ciclo stesso.

Si calcoli poi, in relazione alle istruzioni utilizzate e facendo uso della carta di riferimento del microprocessore, la durata del ciclo di ritardo.

## Soluzione

### Programma

Un metodo classico di procedere è il seguente:

- si carica in un registro scelto arbitrariamente un numero prefissato che definisce il tempo di ritardo;
- si controlla se il numero caricato è uguale a zero;
- se è diverso si decrementa di uno il contenuto del registro;
- se è uguale si fa terminare il ciclo.

In pratica il controllo viene ripetuto un numero di volte pari al valore caricato inizialmente.

In FIGURA **16** viene riportato il diagramma di flusso corrispondente alle operazioni descritte.

Nel diagramma non si evidenziano i blocchi di inizio e fine programma per il fatto che il ciclo di ritardo viene considerato come facente parte di un programma più complesso.

In FIGURA **17** viene riportato il listato del programma e precisamente:

- nella colonna 1 l'indirizzo di memoria;

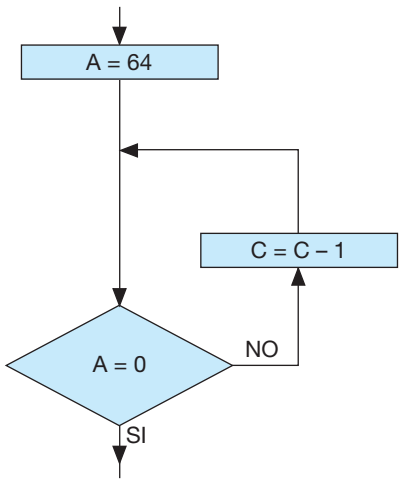



FIGURA **16**
Diagramma di flusso.

- nella colonna 2 il codice mnemonico;
- nella colonna 3 il commento.

### Calcolo del ritardo

Per effettuare il calcolo del ritardo introdotto nell'esecuzione di due istruzioni contigue dalla presenza del ciclo bisogna consultare la carta di riferimento del microprocessore e calcolare il numero di cicli T necessari per l'esecuzione del ciclo stesso.

Le istruzioni *JP Z,185B* (10 cicli T), *DEC A* (4 cicli T) e *JP1854* (10 cicli T) devono essere ripetute 100 volte in quanto il numero caricato nel registro accumulatore vale 100 nel sistema decimale.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 5

In totale si hanno 24 cicli T per sequenza; in totale nel corso del ciclo di ritardo si eseguono quindi 240 cicli T.

Con una frequenza del segnale di clock di 2,5 MHz si ha un periodo di 4 $\mu$s.

Complessivamente quindi la durata del ciclo è di 960 $\mu$s.

Il tempo ottenuto è poco significativo ai fini pratici; per ottenere tempi più elevati si deve procedere inserendo opportunamente dei cicli di ritardo uno all'interno dell'altro.

| Indirizzo memoria | Codice mnemonico | Commento |
|---|---|---|
| *1800* | | Inizio programma |
| ---------- | | ---------- |
| *1850* | *LD A, 64* | Inizio del ciclo di ritardo, il numero prefissato viene caricato nel registro accumulatore |
| *1852* | *ADD A, 00* | Si aggiunge 0 al contenuto del registro accumulatore per movimentare il flag Z |
| *1854* | *JP Z, 185B* | Se la condizione (risultato dell'operazione precedente uguale a 0) è vera il programma deve saltare alla locazione di indirizzo 185B per riprendere l'esecuzione del programma |
| *1857* | *DEC A* | Se la condizione precedente non è vera deve essere decrementato di una unità il contenuto del registro A |
| *1858* | *JP 1854* | Il programma salta alla locazione di indirizzo 1854 per effettuare un nuovo controllo |
| *185B* | | Riprende l'esecuzione del programma |
| ---------- | | ---------- |
| *1880* | *HALT* | Fine programma |

FIGURA **17**
Listato dei programmi in linguaggio assembly.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## DOMANDE a risposta aperta

**1** **Definire sinteticamente un microprocessore dal punto di vista fisico.**

**2** **Definire sinteticamente un microprocessore dal punto di vista funzionale.**

**3** **Completare la** FIGURA **18** **inserendo i termini corrispondenti ai bus e ai blocchi logici di cui il sistema è costituito.**

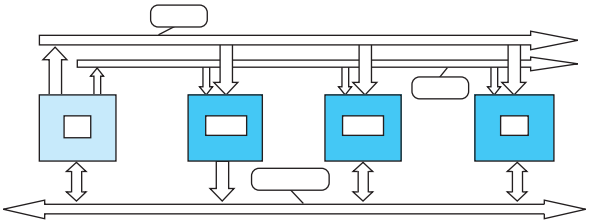


FIGURA **18**

**4** **Evidenziare le funzioni svolte dal registro istruzioni di un microprocessore.**

**5** **Evidenziare le funzioni svolte dal registro accumulatore di un microprocessore.**

**6** **Evidenziare le funzioni svolte dal contatore di programma di un microprocessore.**

**7** **Definire le caratteristiche dei registri interni di uso generale soffermandosi in particolare sul registro accumulatore e sul registro dei flag.**

**8** **Spiegare il significato dei termini *ciclo T* e *ciclo M*.**

**9** **Spiegare il significato dei termini fase di fetch e fase di execute.**

**10** **Spiegare il significato dell'espressione *LD destinazione, sorgente*.**

**11** **Spiegare la differenza tra istruzioni di salto condizionato e istruzioni di salto incondizionato.**

**12** **Completare la** FIGURA **19** **inserendo nei rispettivi riquadri i termini corrispondenti alle funzioni svolte dai gruppi di segnali tipici del microprocessore Z80.**

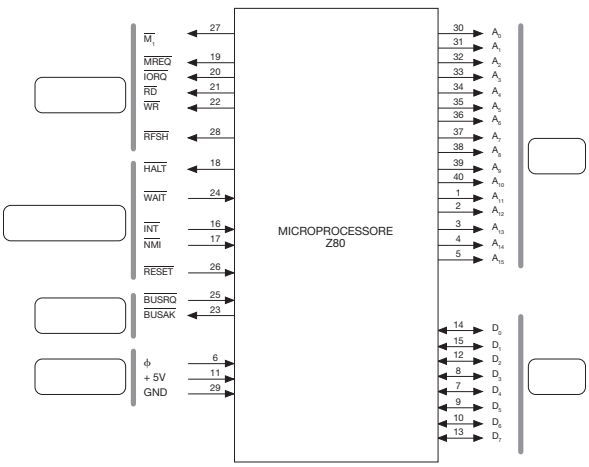



FIGURA **19**

## DOMANDE a risposta multipla

**1** **L'istruzione LD A,B serve per:**

A trasferire il contenuto del registro A nel registro B
B eseguire la somma aritmetica tra contenuto del registro A e contenuto del registro B
C trasferire il contenuto del registro B nel registro A
D eseguire la somma logica tra contenuto del registro A e contenuto del registro B

**2** **Per sommare il contenuto del registro A con il contenuto del registro E si deve utilizzare l'istruzione:**

A ADD A,B
B ADD B,E
C ADD E,A
D ADD A,E

**3** **La frequenza del segnale di clock del microprocessore Z80 nella versione base è di:**

A 25 MHz
B 2,5 MHz
C 2,0 kHz
D 250 MHz

**4** **Il microprocessore Z80 ha un bus indirizzi di:**

A 32 bit
B 16 bit
C 8 bit
D 4 bit

**5** **I bit non utilizzabili del registro dei flag sono:**

A 3
B 1
C 5
D 2

**6** **Il microprocessore Z80 ha un set di:**

A 1580 istruzioni
B 158 istruzioni
C 37 istruzioni
D 256 istruzioni

**7** **Per spostare verso sinistra i bit di un registro con indicazione del riporto si utilizza l'istruzione:**

A RLA
B RRA
C RLCA
D RRCA

**8** **Per spostare verso destra i bit di un registro senza indicazione del riporto si utilizza l'istruzione:**

A RRCA
B RLCA
C RRA
D RLA



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# Introduzione ai microcontrollori

# 8

## 1 Concetti introduttivi

▶ Con il termine **microcontrollore** (sinteticamente MCU) si intende comunemente un sistema a microprocessore integrato su un unico chip che, oltre al microprocessore vero e proprio, comprende:

– una memoria di programma solitamente di sola lettura (PROM, EPROM o EEPROM);
– una memoria RAM, generalmente di dimensioni ridotte, per i risultati intermedi dell'elaborazione e per lo stack;
– interfacce di I/O e periferiche di diverse tipologie.

In altri termini il microcontrollore può essere considerato un sistema a microprocessore completo, integrato in un solo chip.

Come viene evidenziato schematicamente in FIGURA **1** un microprocessore può essere considerato come parte integrante di un microcontrollore.

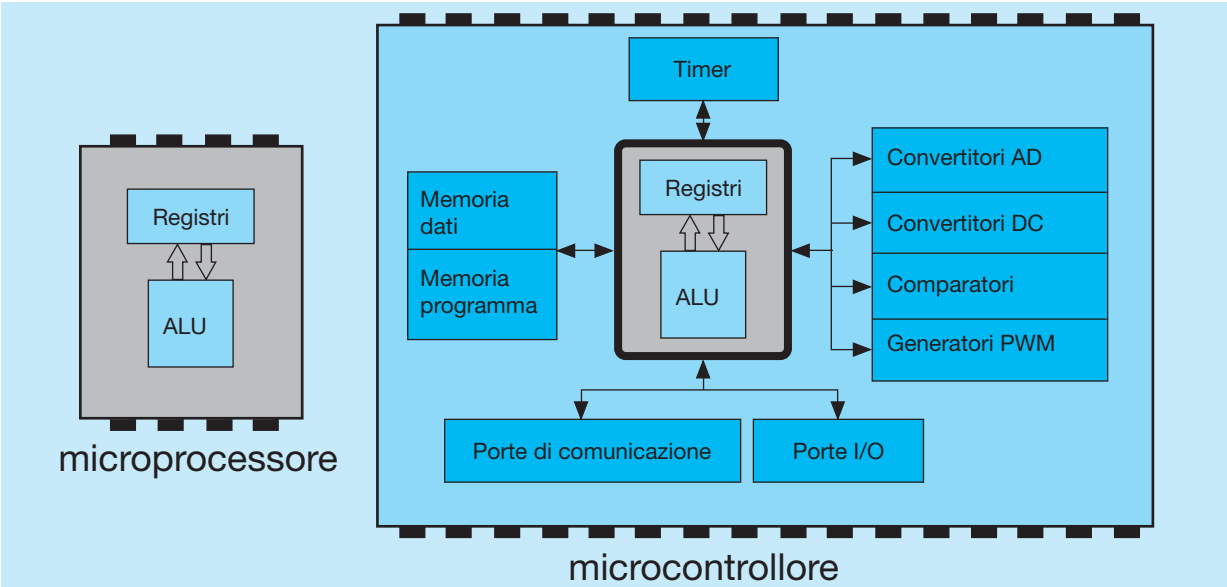



FIGURA **1** Differenza tra microprocessore e microcontrollore.

Un microcontrollore viene progettato per ottenere la massima autosufficienza funzionale e ottimizzare il rapporto tra costo e prestazione per una specifica applicazione; questo li differenzia dai microprocessori impiegati nei personal computer, adatti per un uso più generale.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

I microcontrollori, concepiti soprattutto per applicazioni industriali di controllo, possono essere considerati la forma più diffusa e più invisibile di computer.

I settori in cui trovano applicazione sono molteplici; si citano per esempio i seguenti:

- elettrodomestici intelligenti;
- automobilismo;
- apparati per le telecomunicazioni;
- robotica;
- apparati elettromedicali;
- alta fedeltà;
- elaborazione dei segnali audio e video;
- sicurezza.

Per questi dispositivi viene utilizzato il termine **embedded** perché, una volta programmati per una particolare applicazione, vengono incorporati nell'apparecchio che devono controllare.

I microcontrollori hanno praticamente sostituito all'interno degli apparecchi stessi i circuiti di controllo analogici e digitali.

I microcontrollori si distinguono tra loro in particolare per le seguenti caratteristiche:

- *parallelismo di memoria* (8, 16, 32 bit);
- *set di istruzioni* più o meno esteso;
- *complessità circuitale interna* che può comprendere comparatori, convertitori A/D e D/A, generatori di segnali PWM;
- *potenza di calcolo* come nel caso dei microcontrollori di tipo *DSP* (*digital signal processor*) progettati per il trattamento digitale di segnali analogici (per esempio nei settori audio, immagini, telefonia mobile, controllo di azionamenti come motori).

Il grande successo dei microcontrollori ha indotto tutte le grandi case costruttrici di semiconduttori come *Intel*, *Philips Semiconductors*, *Nec*, *Texas Instruments*, *Amtel*, *Zilog*, *Microchip Technology* e altre a offrire sul mercato una vasta gamma di microcontrollori.

## 1.1 Microcontrollori PIC

Tra questi hanno trovato più larga diffusione i **PIC** (*Programmable Integrated Controller*) che sono la famiglia di microcontrollori prodotti dalla *Microchip Technology*.

A differenza dei classici microprocessori con *struttura di tipo Von Neumann* caratterizzati da un'unica memoria, i PIC hanno una *struttura di tipo Harvard* caratterizzata dal fatto che *memoria dati* e *memoria istruzioni* sono separate e ciascuna con il proprio bus.

Sono microcontrollori di tipo **RISC** (*Reduced Instruction Set Computer*) ovvero microcontrollori che hanno un set di poche istruzioni e si contrappongono ai microcontrollori di tipo **CISC** (*Complex Instruction Set Computer*).


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Ci sono vantaggi e svantaggi derivanti dall'uso dell'una o dell'altra tipologia; in particolare i *microcontrollori RISC* sono più efficienti e veloci; nonostante le istruzioni siano più semplici la programmazione è però più difficoltosa.

I PIC si possono classificare in relazione all'ampiezza del set di istruzioni che mettono a disposizione del programmatore; si hanno così:

- PIC a basso livello;
- PIC a medio livello;
- PIC ad alto livello.

In relazione al numero di bit dei dati che possono essere trattati dal microcontrollore si definiscono invece:

- PIC a 8 bit;
- PIC a 16 bit;
- PIC a 32 bit.

Si evidenzia il fatto che le sigle commerciali dei PIC (per esempio PIC16, PIC18, PIC24, PIC32) non servono a identificare le loro caratteristiche.

I PIC dispongono di un elemento denominato **watchdog** che, essenziale per le applicazioni industriali, effettua un reset automatico quando un apposito contatore interno termina il conteggio.

Se il programma funziona in modo corretto impedisce al contatore di raggiungere il massimo azzerandolo periodicamente; se per qualche motivo questo non avviene lo *watchdog* attiva il reset.

Di seguito verranno analizzate più in dettaglio le caratteristiche del **PIC 16F84**, un microcontrollore a 8 bit di fascia medio-bassa, di facile impiego e ampiamente trattato nella letteratura tecnica.

Il PIC 16F84 è un microcontrollore con unità centrale di tipo *RISC* dotata di un set di sole 35 istruzioni tutte della stessa lunghezza ciascuna di 14 bit.

I *modi di indirizzamento* possono essere diretto e indiretto; di conseguenza l'hardware di decodifica è piuttosto semplificato.

## 2 Caratteristiche del PIC 16F84

Il *PIC 16F84* è un microcontrollore con unità centrale di tipo *RISC* appartenente alla famiglia dei *PIC 16F8X*, un insieme di microcontrollori che hanno caratteristiche simili e quindi anche la stessa piedinatura.

Dal punto di vista della tecnologia costruttiva sono *integrati di tipo CMOS*.

Tipico è il collegamento tramite bus dei circuiti interni al chip e con le periferiche.

Di seguito vengono riportate le sue principali caratteristiche e in particolare quelle che consentono un primo approccio alla programmazione.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 2.1 Piedinatura

In FIGURA **2** viene riportata la piedinatura del microcontrollore PIC 16F84.

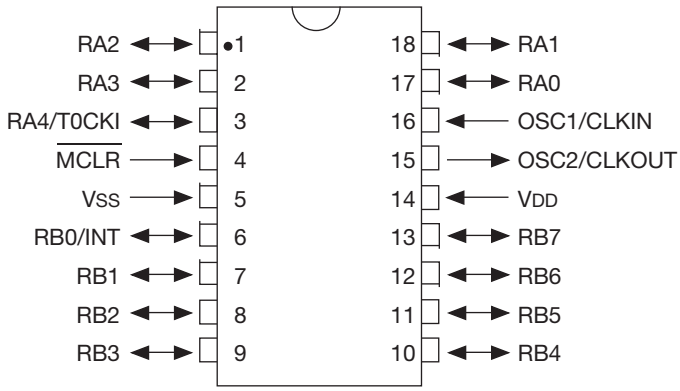



FIGURA **2** Piedinatura del microcontrollore PIC 16F84.

L'integrato è provvisto di 18 pin che hanno le seguenti funzioni:

- $V_{dd}$ per l'alimentazione a + 5 V;
- $V_{ss}$ per la massa;
- due pin per il clock (OSC1 e OSC2) tra i quali si collega un oscillatore a quarzo esterno solitamente da 4 MHz che costituisce, insieme a un amplificatore interno, il generatore di clock del sistema;
- il *master reset* MCLR, pin di ingresso attivo a livello basso, ogni volta che viene attivato carica il *program counter* con l'indirizzo 000H da dove riparte il programma;
- cinque pin (da RA0 a RA4) dedicati all'interfacciamento del *port A di tipo bidirezionale*;
- otto pin (da RB0 a RB7) dedicati all'interfacciamento del *port B di tipo bidirezionale*.

Si evidenzia in particolare che:

- quando il pin RA4 viene utilizzato in uscita bisogna inserire un *resistore di pull up esterno* perché è un *pin open drain*;
- il pin RA4 può essere utilizzato anche come ingresso per il clock del registro TMR0.
- il pin RB0 può essere utilizzato anche come *ingresso di interrupt*;
- anche i pin da RB4 a RB7 possono essere utilizzati come ingressi di interrupt ma attivi sul cambiamento di stato (*edge triggered*).

## 2.2 Schema funzionale

In relazione a quanto ora esposto viene riportato in FIGURA **3** uno schema funzionale del microcontrollore che mette in evidenza la tipologia di alimentazione e i circuiti che generano i segnali di *master reset* e di clock.

In FIGURA **4** viene riportato un ulteriore schema funzionale che mostra un esempio di interfacciamento con le periferiche d'ingresso (*interruttori*) e d'uscita (*led*) attraverso i pin opportunamente predisposti.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

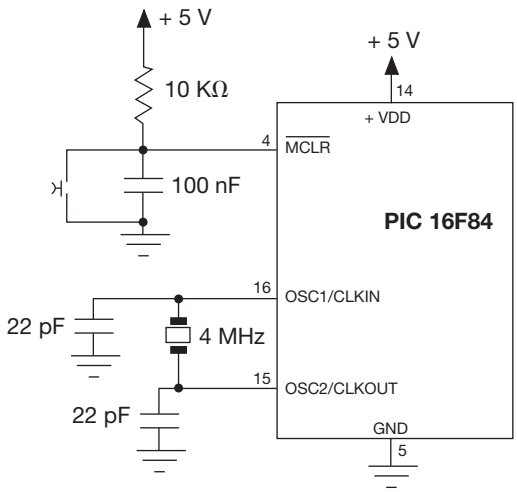



FIGURA **3**
Schema funzionale con alimentazione e circuiti per il master reset e per il clock.

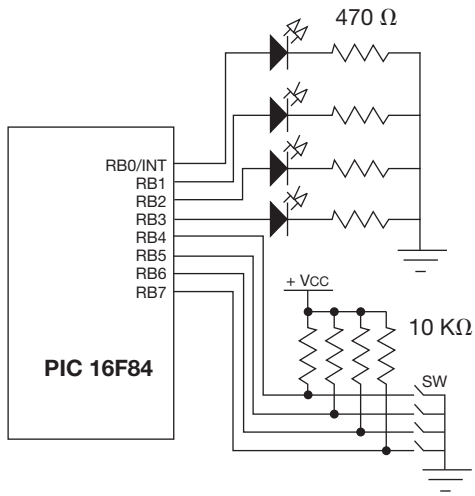
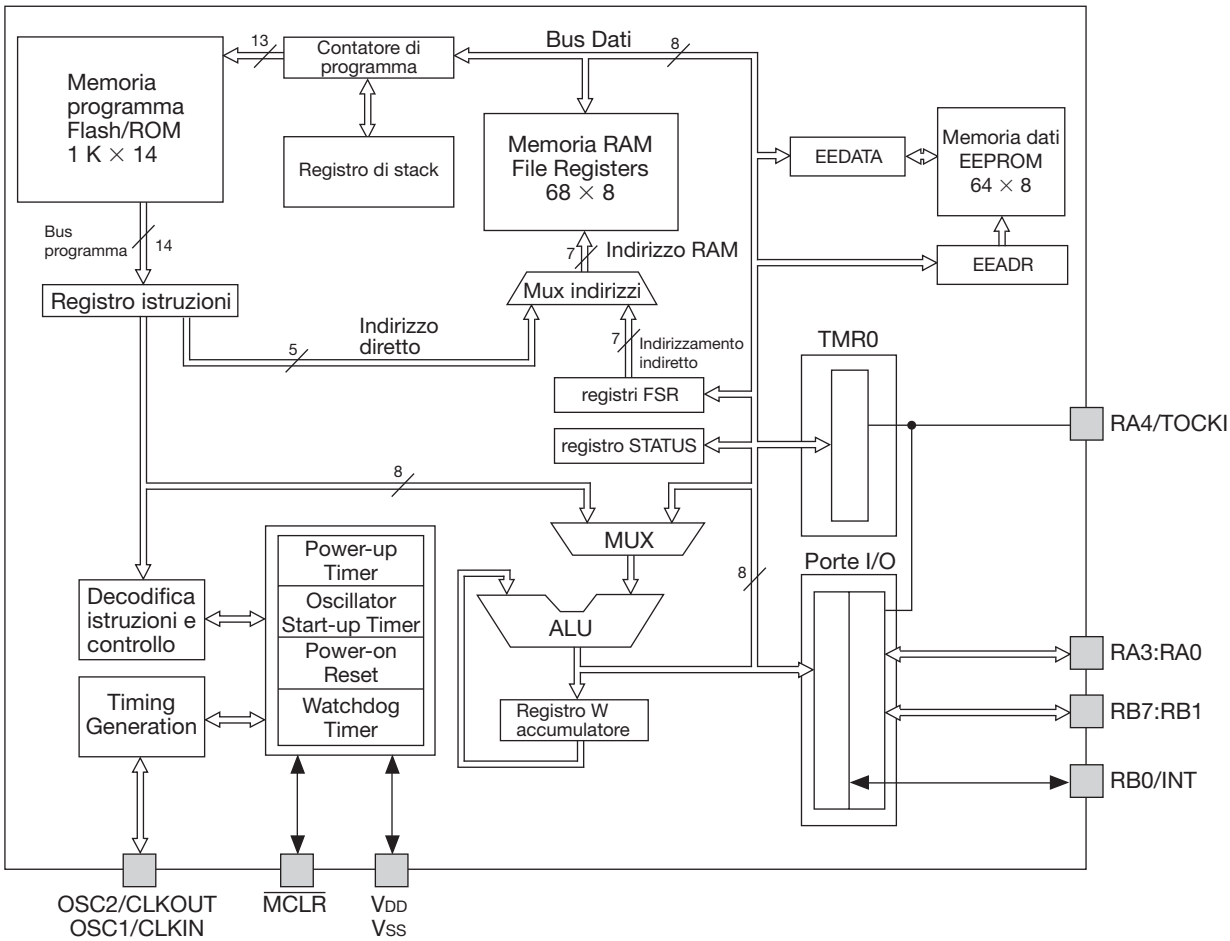



FIGURA **4**
Schema funzionale con esempi di interfacciamento con le periferiche.

# 3 Architettura interna

In FIGURA **5** viene riprodotto uno schema a blocchi che evidenzia l'architettura interna del microcontrollore PIC 16F84.

FIGURA **5**
Schema a blocchi interno del PIC 16F84.






Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

All'interno del microcontrollore si distinguono come componenti principali:

- l'*unità aritmetico logica* ALU utilizzata per lo svolgimento dei calcoli elementari;
- il *registro accumulatore* a 8 bit W che comunica direttamente con l'unità aritmetico-logica che vi inserisce i risultati delle operazioni da essa effettuate ed esegue operazioni di ingresso/uscita sui registri di uso generale;
- il *registro di stack* utilizzato per i sottoprogrammi;
- il *program counter* PC, un registro a 13 bit che contiene i valori delle locazioni di memoria delle istruzioni che si devono eseguire (è possibile indirizzare 8 KB di locazioni di memoria);
- la *memoria EEPROM programma* a 14 bit con 1024 locazioni;
- la *memoria EEPROM dati* a 8 bit con 64 locazioni;
- la *memoria RAM*, denominata *file register* perché contiene registri speciali e registri di uso generale;
- la *porta A* (con 5 linee) e la *porta B* (con 8 linee) configurabili sia in ingresso sia in uscita che sono TTL compatibili e possono erogare o assorbire fino a un massimo di 25 mA;
- il *timing generation* ovvero un circuito utilizzabile sia per la generazione del segnale di clock all'interno del PIC sia per la ricezione di un clock dall'esterno;
- il registro contaimpulsi TMR0.

## 3.1 Memorie

Si esaminano le caratteristiche dei diversi tipi di memoria.

### Memoria EEPROM programma

La *memoria EEPROM programma* ha 14 bit in quanto i codici delle istruzioni del microcontrollore occupano proprio 14 bit.

La memoria ha indirizzi compresi tra 000 e 3FF.

In essa sono contenuti i codici operativi delle istruzioni RESET (locazione 000) e INTERRUPT (locazione 004).

### Memoria RAM

La *memoria RAM*, denominata *register file*, rappresenta l'insieme dei registri del microcontrollore.

La memoria RAM è costituita da 256 registri da 8 bit suddivisi in due banchi di memoria denominati *Banco 0* e *Banco 1*.

Gli indirizzi, in esadecimale, sono compresi tra 00 e 7F (per il *Banco 0*) e tra 80 e FF (per il *Banco 1*).

Una parte della memoria non viene utilizzata.

Nella memoria si distinguono due aree distinte e precisamente:

- l'area riservata ai registri utilizzati per funzioni speciali (registri *SFR*);
- l'area riservata ai registri di uso generale che vengono utilizzati per memorizzare dei dati (registri *GPR*).


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Si evidenzia inoltre il fatto che i registri di uso generale sono 68 e non 136 come potrebbe sembrare in quanto allo stesso registro si può accedere con entrambi gli indirizzi corrispondenti dei due banchi.

Lo schema della memoria RAM del PIC viene riportato in FIGURA **6**.

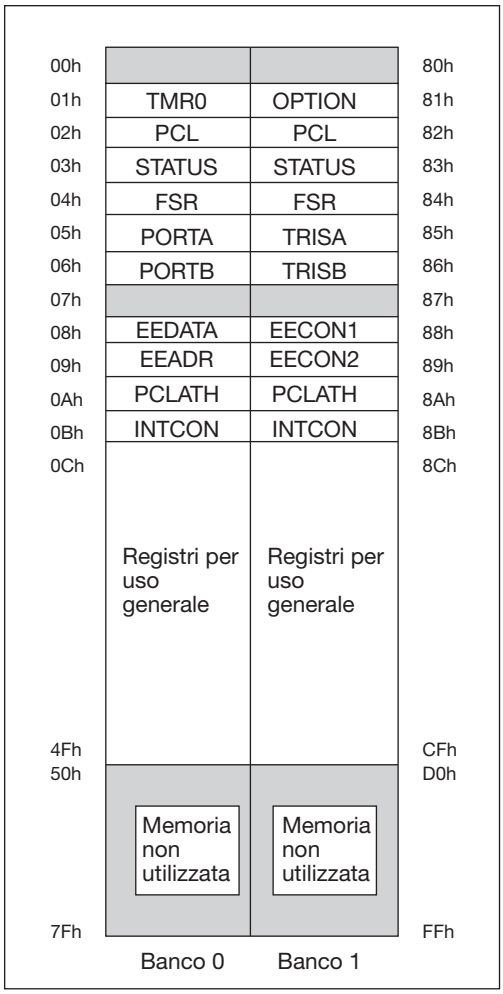



FIGURA **6**
Organizzazione della memoria RAM.

## Memoria EEPROM dati

La memoria EEPROM dati viene utilizzata esclusivamente come memoria dati.

Per le operazioni di lettura e scrittura della memoria dati si utilizzano con differenti funzioni alcuni registri del *register file* e precisamente EEDATA, EEADR, EECON1 ed EECON2.

La funzione di questi registri è la seguente:

- EEDATA contiene il dato da leggere o scrivere nella cella di memoria della EEPROM;
- EEADR contiene l'indirizzo della cella di memoria da leggere o scrivere;
- EECON1 contiene i bit di controllo necessari per selezionare l'operazione di lettura o di scrittura;
- EECON2 viene utilizzato in fase di scrittura per memorizzarvi dei codici predefiniti che consentono il regolare svolgimento dell'operazione.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 3.2 Registri

Si esaminano di seguito caratteristiche e funzioni dei principali registri della memoria RAM.

### Registro STATUS

I bit del registro STATUS sono otto ma soltanto sei effettivamente utilizzabili.

Le funzioni dei bit di più immediato utilizzo sono le seguenti:

- il bit 0 che si indica con C e segnala la presenza di un riporto al termine di determinate operazioni (C = 0 quando non c'è riporto, C = 1 quando c'è riporto);
- il bit 2 che si indica con Z e segnala se il risultato è zero o diverso da zero al termine di determinate operazioni (Z = 0 quando il risultato non è zero, Z = 1 quando il risultato è zero);
- il bit 5 che si indica con RPO e viene utilizzato per selezionare il banco del file register (RPO = 0 quando si vuole selezionare il *Banco 0*, RPO = 1 quando si vuole selezionare il *Banco 1*).

### Registro TMR0

Il registro *TMR0* è un registro contatore che può funzionare in *modalità timer* oppure in *modalità counter*.

In modalità timer conta gli impulsi di un segnale interno avente frequenza pari a 1/4 del segnale di clock; è possibile dividere ulteriormente questa frequenza (per 2, per 4, … per 256); questa particolare funzione che prende il nome di *prescaler* si attiva attraverso i bit PS0, PS1 e PS2 del registro OPTION.

In modalità counter conta gli impulsi applicati dall'esterno al pin RA4/T0CKI della porta A.

### Registri PORTA e PORTB

I registri *PORTA* e *PORTB* contengono il valore dei pin delle Porte A e B.

Se i pin sono configurati come ingressi assumono il valore della periferica collegata, se configurati come uscite il loro valore è stabilito dal programma.

I pin di questi registri possono essere trattati sia singolarmente sia come un'unica parola.

### Registri TRISA e TRISB

I *registri TRISA* e *TRISB* sono utilizzati per configurare le porte A e B (o i loro singoli bit) come ingresso o come uscita.

Mettere un pin di questi registri a **0** significa configurare il corrispondente pin della porta come uscita, mettere un pin a 1 significa configurare il corrispondente pin della porta come ingresso.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 4 Set di istruzioni

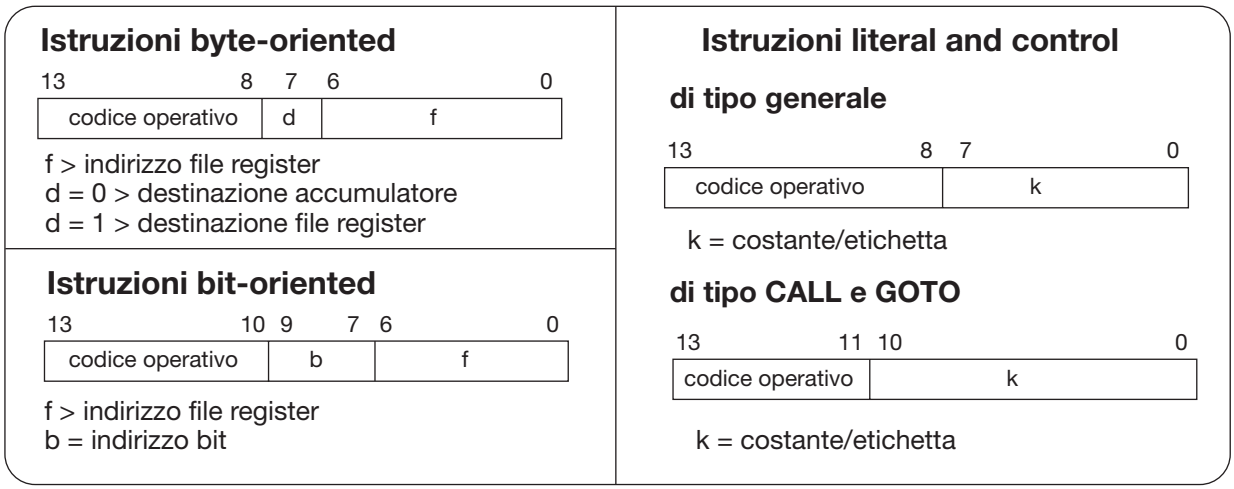
Il microcontrollore ha un set di 35 istruzioni che possono essere di tre tipologie; più precisamente si possono avere:

- *istruzioni byte-oriented*;
- *istruzioni orientate bit-oriented*;
- *istruzioni literal and control*.

Le istruzioni del microcontrollore scritte in linguaggio macchina sono costituite da *stringhe* di 14 bit che, nel loro insieme, formano un *record* costituito a sua volta da *campi*; ampiezza, numero e funzione dei campi variano in relazione alla tipologia di istruzione.

Il formato per le diverse tipologie di istruzione viene riportato in FIGURA **7**.

FIGURA **7**
Formato delle istruzioni.




Codice mnemonico, descrizione in forma sintetica, numero di cicli macchina, bit di codice operativo e bit del registro status modificati al termine dell'esecuzione dell'istruzione vengono riprodotte:

- nella TABELLA **1** per le istruzioni orientate al byte;

TABELLA **1**
Istruzioni orientate al byte.

| Istruzioni orientate al byte | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Codice mnemonico** | | **Descrizione** | **Cicli** | **Bit codice operativo** | | | | **Bit status modificati** |
| ADDWF | f, d | Add W and f | 1 | 00 | 0111 | d f f f | f f f f | C, DC, Z |
| ANDWF | f, d | AND W with f | 1 | 00 | 0101 | d f f f | f f f f | Z |
| CLRF | f | Clear f | 1 | 00 | 0001 | 1 f f f | f f f f | Z |
| CLRW | – | Clear W | 1 | 00 | 0001 | 0xxx | xxxx | Z |
| COMF | f, d | Complement f | 1 | 00 | 1001 | d f f f | f f f f | Z |
| DECF | f, d | Decrement f | 1 | 00 | 0011 | d f f f | f f f f | Z |
| DECFSZ | f, d | Decrement f, Skip if 0 | 1 (2) | 00 | 1011 | d f f f | f f f f | —— |
| INCF | f, d | Increment f | 1 | 00 | 1010 | d f f f | f f f f | Z |
| INCFSZ | f, d | Increment f, Skip if 0 | 1 (2) | 00 | 1111 | d f f f | f f f f | —— |
| IORWF | f, d | Inclusive OR W with f | 1 | 00 | 0100 | d f f f | f f f f | Z |
| MOVF | f, d | Move f | 1 | 00 | 1000 | d f f f | f f f f | Z |
| MOVWF | f | Move W to f | 1 | 00 | 0000 | 1 f f f | f f f f | —— |
| NOP | – | No Operation | 1 | 00 | 0000 | 0xx0 | 0000 | —— |
| RLF | f, d | Rotate Left f through Carry | 1 | 00 | 1101 | d f f f | f f f f | C |
| RRF | f, d | Rotate Right f through Carry | 1 | 00 | 1100 | d f f f | f f f f | C |
| SUBWF | f, d | Subtract W from f | 1 | 00 | 0010 | d f f f | f f f f | C, DC, Z |
| SWAPF | f, d | Swap nibbles in f | 1 | 00 | 1110 | d f f f | f f f f | —— |
| XORWF | f, d | Exclusive OR W with f | 1 | 00 | 0110 | d f f f | f f f f | Z |



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

TABELLA **2**
Istruzioni orientate al bit.

- nella TABELLA **2** per le istruzioni orientate al bit;
- nella TABELLA **3** per le istruzioni con costanti e di controllo.

| Istruzioni orientate al bit | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Codice mnemonico** | | **Descrizione** | **Cicli** | **Bit codice operativo** | | | | **Bit status modificati** |
| BCF | f, b | Bit Clear f | 1 | 01 | 00bb | b f f f | f f f f | nessuno |
| BSF | f, b | Bit Set f | 1 | 01 | 01bb | b f f f | f f f f | |
| BTFSC | f, b | Bit Test f, Skip if Clear | 1 (2) | 01 | 10bb | b f f f | f f f f | |
| BTFSS | f, b | Bit Test f, Skip if Set | 1 (2) | 01 | 11bb | b f f f | f f f f | |

| Istruzioni con costanti e di controllo | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Codice mnemonico** | | **Descrizione** | **Cicli** | **Bit codice operativo** | | | | **Bit status modificati** |
| ADDLW | k | Add literal and W | 1 | 11 | 111x | kkkk | kkkk | C, DC, Z |
| ANDLW | k | AND literal with W | 1 | 11 | 1001 | kkkk | kkkk | Z |
| CALL | k | Call subroutine | 2 | 10 | 0kkk | kkkk | kkkk | —— |
| CLRWDT | – | Clear Watchdog Timer | 1 | 00 | 0000 | 0110 | 0100 | $\overline{TO}$, $\overline{PD}$ |
| GOTO | k | Go to address | 2 | 10 | 1kkk | kkkk | kkkk | —— |
| IORLW | k | Inclusive OR literal with W | 1 | 11 | 1000 | kkkk | kkkk | Z |
| MOVLW | k | Move literal to W | 1 | 11 | 00xx | kkkk | kkkk | —— |
| RETFIE | – | Return from interrupt | 2 | 00 | 0000 | 0000 | 1001 | —— |
| RETLW | k | Return with literal in W | 2 | 11 | 01xx | kkkk | kkkk | —— |
| RETURN | – | Return from Subroutine | 2 | 00 | 0000 | 0000 | 1000 | —— |
| SLEEP | – | Go into standby mode | 1 | 00 | 0000 | 0110 | 0011 | $\overline{TO}$, $\overline{PD}$ |
| SUBLW | k | Subtract W from literal | 1 | 11 | 110x | kkkk | kkkk | C, DC, Z |
| XORLW | k | Exclusive OR literal with W | 1 | 11 | 1010 | kkkk | kkkk | Z |

TABELLA **3**
Istruzioni con costanti e di controllo.

La simbologia adottata per la descrizione delle istruzioni è la seguente:

- *f* indica l'indirizzo di un registro del *register file*;
- *d* indica la destinazione del risultato di un'operazione che può essere un registro del *register file* o il registro accumulatore W;
- *b* indica l'indirizzo di un bit di un registro del *register file*;
- *k* indica una stringa di bit che può essere un valore numerico o un'etichetta.

## 4.1 Temporizzazione

Il *ciclo di istruzione*, determinato dalla frequenza del segnale di clock, viene suddiviso in 4 cicli interni (scanditi dal circuito di temporizzazione interno).

Le istruzioni, escluse quelle di salto, durano tutte otto cicli interni (corrispondenti a due cicli di istruzione); di questi i primi quattro sono utilizzati per la *fase di fetch* (durante la quale avviene il caricamento del codice operativo) mentre i quattro successivi sono dedicati alla *fase di execute* (durante la quale avviene l'esecuzione vera e propria dell'istruzione).

L'architettura del microcontrollore consente il raddoppio della velocità di esecuzione del programma in quanto si possono eseguire contemporaneamente la fase di execute di una istruzione e la fase di fetch dell'istruzione successiva.

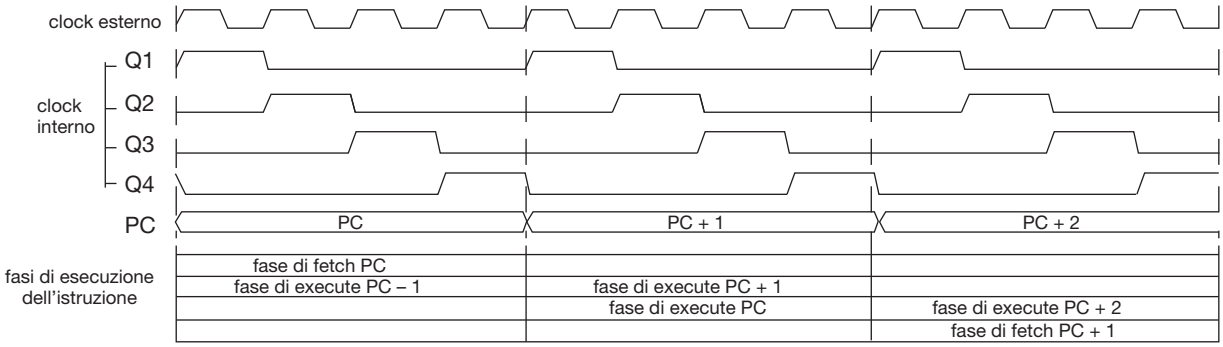

Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

In realtà quindi un'istruzione ha una durata di soli quattro cicli interni con l'eccezione delle istruzioni in cui è previsto un salto che possono avere una durata doppia.

Con un segnale di clock di 4MHz ogni istruzione dura 1 $\mu$s; di conseguenza quelle di salto possono durare 2 $\mu$s.

In FIGURA **8** viene riprodotto l'andamento nel tempo dei segnali che coinvolgono il ciclo di esecuzione di una istruzione.

FIGURA **8**
Ciclo di esecuzione delle istruzioni.




## 4.2 Descrizione delle istruzioni

Una descrizione più estesa delle principali istruzioni viene di seguito proposta seguendo l'ordine che hanno nel manuale della casa costruttrice.

### *ADDWF f,d*

Somma il contenuto del registro accumulatore al contenuto del registro di indirizzo *f* e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.

### *ANDWF f,d*

Esegue il prodotto logico tra i bit del registro di indirizzo *f* e i bit corrispondenti del registro accumulatore e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.

### *CLRF f*

Viene azzerato il contenuto del registro di indirizzo *f*.

### *CLRW*

Viene azzerato il contenuto del registro accumulatore.

### *COMF f,d*

Esegue il complemento a 1 del contenuto del registro di indirizzo *f* e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.

### *DECF f,d*

Sottrae 1 al contenuto del registro di indirizzo *f* e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### *DECFSZ f,d*
Sottrae 1 al contenuto del registro di indirizzo *f* e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*; se il risultato dell'operazione è diverso da zero viene eseguita l'istruzione seguente, se è zero viene saltata ed eseguita quella immediatamente successiva.

### *INCF f,d*
Somma 1 al contenuto del registro di indirizzo *f* e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.

### *INCFSZ f,d*
Somma 1 al contenuto del registro di indirizzo *f* e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*; se il risultato dell'operazione è diverso da zero viene eseguita l'istruzione seguente, se è zero viene saltata ed eseguita quella immediatamente successiva.

### *IORWF f,d*
Esegue la somma logica tra i bit del registro di indirizzo *f* e i bit corrispondenti del registro accumulatore e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.

### *MOVF f,d*
Trasferisce il contenuto del registro di indirizzo *f* nel registro accumulatore o lo mantiene nel registro di indirizzo *f* in relazione al valore assunto dal bit *d*.

### *MOVWF f*
Trasferisce il contenuto del registro accumulatore nel registro di indirizzo *f*.

### *RLF f,d*
Sposta verso destra di una locazione i bit del registro di indirizzo *f* inserendo il bit più significativo nella locazione C del registro STATUS; pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.

### *RRF f,d*
Sposta verso sinistra di una locazione i bit del registro di indirizzo *f* inserendo il bit meno significativo nella locazione C del registro STATUS; pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit d.

### *SUBWF f,d*
Sottrae con il metodo del complemento a due il contenuto del registro di indirizzo *f* al contenuto del registro accumulatore e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

***XORWF f,d***
Esegue l'operazione di OR esclusivo tra i bit del registro di indirizzo *f* e i bit corrispondenti del registro accumulatore e pone il risultato nel registro di indirizzo *f* o nel registro accumulatore in relazione al valore assunto dal bit *d*.

***BCF f,b***
Scrive 0 nella locazione del registro di indirizzo *f* indicata da *b*.

***BSF f,b***
Scrive 1 nella locazione del registro di indirizzo *f* indicata da *b*.

***BTFSC f,b***
Testa il contenuto della locazione del registro di indirizzo *f* indicata da *b*; se il bit vale 1 viene eseguita l'istruzione seguente, se vale 0 viene saltata ed eseguita quella immediatamente successiva.

***BTFSS f,b***
Testa il contenuto della locazione del registro di indirizzo *f* indicata da *b*; se il bit vale 0 viene eseguita l'istruzione seguente, se vale 1 viene saltata ed eseguita quella immediatamente successiva.

***ADDLW k***
Somma il valore indicato da *k* al contenuto del registro accumulatore e pone il risultato nel registro accumulatore.

***ANDLW k***
Esegue il prodotto logico tra i bit del registro accumulatore e i bit corrispondenti indicati da *k*.

***GOTO k***
Esegue un salto incondizionato all'indirizzo della *memoria programma* indicata da *k*.

***IORLW k***
Esegue l'operazione di OR esclusivo tra i bit del registro accumulatore e i bit corrispondenti indicati da *k*.

***MOVLW k***
Trasferisce nel registro accumulatore il valore indicato da *k*.

***SUBLW k***
Sottrae con il metodo del complemento a due il contenuto del registro accumulatore al contenuto indicato da *k*.

***XORLW k***
Esegue l'operazione di OR esclusivo tra i bit del registro accumulatore e i bit corrispondenti del numero indicato da *k*.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 5 Sottoprogrammi e interruzioni

La differenza tra sottoprogramma e interruzione è che mentre con una interruzione non è noto il punto di ritorno del programma in quanto questi può essere interrotto in qualunque momento con un sottoprogramma si ha la certezza che il programma torni all'istruzione successiva a quella che ha chiamato il sottoprogramma.

Il *registro di stack* è una RAM non accessibile direttamente dal programmatore; è provvista di otto locazioni per poter memorizzare otto indirizzi di memoria programma quando viene eseguito un sottoprogramma o si verifica un'interruzione.

La struttura del registro rende possibile l'esecuzione di otto sottoprogrammi consecutivi; quando il registro è completo per poter salvare altri indirizzi vengono cancellati i primi inseriti.

Richiamando un sottoprogramma con l'istruzione CALL nel *registro di stack* viene memorizzato l'indirizzo dell'istruzione successiva alla chiamata del sottoprogramma per riprendere l'esecuzione da quel punto quando nel sottoprogramma si incontra un'istruzione RETURN.

Per un'interruzione il procedimento è identico in quanto quando si verifica un'interruzione deve essere eseguito un sottoprogramma di gestione dell'interruzione che si trova nella memoria programma; terminato il sottoprogramma con l'istruzione RETFIE si ritorna all'esecuzione del programma principale.

Tra i diversi modi di realizzare un evento di interruzione del programma si citano:

- l'applicazione di un impulso sul pin RB0/INT;
- l'applicazione di un impulso sul pin RB4.

## 6 Esempi di programmazione

Si riportano di seguito alcuni esempi di programmazione relativi alla soluzione di semplici problemi in cui trovano applicazione le istruzioni di più immediato utilizzo tra quelle che caratterizzano il set di istruzioni del microcontrollore PIC 16F84.

Più precisamente vengono coinvolte:

- istruzioni di trasferimento dati e di somma;
- istruzioni di configurazione delle porte;
- istruzioni di salto per ottenere cicli di ritardo.

Il listato dei programmi viene suddiviso su quattro colonne che contengono rispettivamente:

- etichetta;
- codice;
- operando;
- commento.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 1

Si vogliono individuare le istruzioni necessarie per la realizzazione delle seguenti operazioni:

– inserire nel registro accumulatore il numero decimale 100;
– inserire nel registro di indirizzo 0F il numero decimale 64.

## Soluzione

L'istruzione da utilizzare per realizzare correttamente la prima operazione è

***MOVLW k***

che trasferisce il valore indicato da *k* nel registro accumulatore.

Pertanto si ha il codice mnemonico

***MOVLW 64***

in cui il numero esadecimale 64 è il corrispondente del numero esadecimale 100.

Per realizzare correttamente la seconda operazione si devono utilizzare due istruzioni:

– una prima istruzione (*MOVLW k*) per trasferire il numero decimale 64 (in esadecimale 36) nel registro accumulatore;
– una seconda istruzione (*MOVWF f*) per trasferire il contenuto del registro accumulatore nel registro di indirizzo 0F.

Si ha pertanto la seguente sequenza di istruzioni:

***MOVLW 36***;
***MOVWF 0F***.

ESEMPIO 2

Si vogliono individuare le istruzioni necessarie per la realizzazione delle seguenti operazioni:

– sommare il contenuto dell'accumulatore al contenuto del registro di indirizzo 0C e porre il risultato nel registro stesso;
– sommare il contenuto dell'accumulatore al contenuto del registro di indirizzo 0E e porre il risultato nel registro accumulatore.

## Soluzione

L'istruzione da utilizzare per realizzare correttamente le due somme è

***ADDWF r,d***

che somma il contenuto del registro accumulatore al registro F e pone il risultato:

– nel registro F quando *d* vale 1;
– nel registro accumulatore quando *d* vale 0.

Nel primo caso deve risultare *f* = 0C e *d* = 1 (in quanto si vuole che il risultato venga posto nel registro di indirizzo 0C) e pertanto si ha il codice mnemonico seguente:

***ADDWF 0C,1***

Nel primo caso deve risultare *f* = 0E e *d* = 0 (in quanto si vuole che il risultato venga posto nel registro accumulatore) e pertanto si ha il codice mnemonico seguente:

***ADDWF 0E,1***

ESEMPIO 3

Si vuole individuare la sequenza di istruzioni necessarie per configurare i pin del PORT B in modo tale che soltanto il pin RB0 sia configurato come uscita.

## Soluzione

Per configurare i pin del PORT B bisogna accedere al registro TRISB che si trova nel *Banco 1* della memoria RAM.

Per accedere al *Banco 1* bisogna porre a 1 il bit RP0 del registro STATUS.

Si deve pertanto utilizzare l'istruzione

***BSF f,b***

per accedere la banco e l'istruzione

***BCF f,b***

per ritornare nelle condizioni normali in cui si ha l'accesso al *Banco 0*.

Poiché per configurarlo come uscita bisogna porre a 0 il bit corrispondente nel registro TRISB bisogna caricare il numero binario 11111110 (FE in esadecimale).

Il numero deve essere caricato nel registro accumulatore e poi trasferito nel registro TRISB.

Si ha pertanto la seguente sequenza di istruzioni:

***BSF STATUS,RPO***;
***MOVLW 0xFE***;
***MOVWF TRISB***;
***BCF STATUS,RPO***.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

ESEMPIO 4

Si vuole individuare la sequenza di istruzioni necessarie per realizzare un ritardo predeterminato tipico di molte applicazioni dell'informatica che prevede l'impiego di un solo contatore e quindi di una struttura a un ciclo.

## Soluzione

Utilizzando un solo contatore si può realizzare un ritardo molto modesto in quanto un registro può essere decrementato al massimo per 256 volte.

In FIGURA **9** viene riportato lo schema a blocchi del ciclo di ritardo.

Il contatore CONT viene inizialmente azzerato e decrementato per 256 volte fino a quando non raggiunge di nuovo lo zero.

Tenuto conto della durata delle singole istruzioni che vengono coinvolte (complessivamente 3 $\mu$s) la durata complessiva del ciclo è di 770 $\mu$s.

In FIGURA **10** viene riportato il listato del programma.

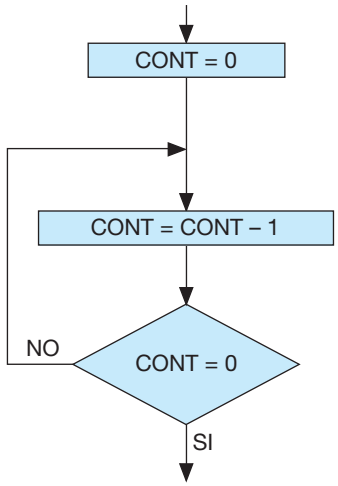



FIGURA **9**
Schema a blocchi del ciclo di ritardo.

| | | | |
|---|---|---|---|
| | *CLRF CONT* | | Azzera il contatore |
| *DEC* | *DECFSZ* | *CONT, 1* | Decrementa il contatore fino a zero |
| | *GOTO* | *DEC* | Ritorna a DEC se non è zero |

FIGURA **10**
Listato del programma.

ESEMPIO 5

Si vuole individuare la sequenza di istruzioni necessarie per realizzare un ritardo predeterminato tipico di molte applicazioni dell'informatica che prevede l'impiego di due contatori e quindi di una struttura con due cicli uno interno all'altro.

## Soluzione

Utilizzando due contatori si può ottenere un numero di ripetizioni pari al massimo a 65536 volte.

I due contatori CONT1 (che realizza il ciclo esterno) e CONT (che realizza il ciclo interno) vengono inizialmente azzerati.

Mentre CONT1 viene decrementato di una volta CONT viene decrementato di 256 volte.

In FIGURA **11** viene riportato lo schema a blocchi del ciclo di ritardo.

In FIGURA **12** viene riportato il listato del programma.

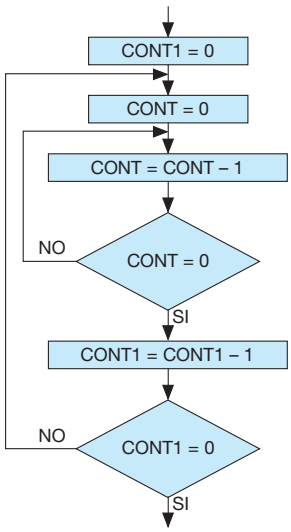



FIGURA **11**
Schema a blocchi del ciclo di ritardo.

| | | | |
|---|---|---|---|
| | *CLRF CONT1* | | Azzera il contatore *CONT1* |
| *DEC1* | *CLRF CONT* | | Azzera il contatore *CONT* |
| *DEC* | *DECFSZ* | *CONT1* | Decrementa il contatore *CONT* fino a zero |
| | *GOTO* | *DEC* | Ritorna a *DEC* se non è zero |
| | *DECFSZ* | *CONT1, 1* | Decrementa il contatore *CONT1* fino a zero |
| | *GOTO* | *DEC1* | Ritorna a *DEC1* se non è zero |

FIGURA **12**
Listato del programma.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## DOMANDE a risposta aperta

**1** **Evidenziare le differenze che sussistono tra microprocessore e microcontrollore facendo riferimento sia alla struttura sia ai settori d'impiego.**

**2** **Spiegare il significato del termine *embedded*.**

**3** **Citare i settori di più comune impiego dei microcontrollori di tipo DISP.**

**4** **Evidenziare le differenze che sussistono tra microcontrollori di tipo RISC e di tipo CISC.**

**5** **Evidenziare le differenze che sussistono tra *struttura di tipo Von Neumann* e *struttura di tipo Harvard*.**

**6** **Spiegare le funzioni caratteristiche svolte dallo *watchdog* nell'ambito di un sistema a microcontrollore.**

**7** **Analizzare le caratteristiche della memoria di programma di un PIC.**

**8** **Analizzare la struttura e spiegare le funzioni svolte dal *registro di stack*.**

**9** **Definire il significato dei termini *registri SFR* e *registri GPR*.**

**10** **Analizzare le caratteristiche della memoria dati e dei registri coinvolti nelle operazioni di lettura e scrittura della medesima.**

**11** **Spiegare le funzioni svolte:**

- **dal bit 5 del registro STATUS**
- **dal registro TMRO**

**12** **Analizzare il significato delle seguenti istruzioni:**

- **MOVF f,d**
- **COMF f,d**
- **MOVLW k**
- **MOVLW 64**
- **ADDWF r,d**
- **ADDWF 0C,1**
- **BSF f,b**
- **BCF f,b**
- **BSF STATUS, RPO**
- **MOVLW 0xFE**
- **MOVWF TRISB**
- **BCF STATUS, RPO**
- **CLRF CONT1**
- **DECFSZ CONT1**
- **GOTO DEC**

## DOMANDE a risposta multipla

**1** **L'istruzione MOVWF *f* serve per:**

A separare il contenuto del registro accumulatore dal contenuto del registro di indirizzo *f*

B trasferire il contenuto del registro di indirizzo *f* nel registro accumulatore

C trasferire il contenuto del registro accumulatore nel registro di indirizzo *f*

D sommare il contenuto del registro accumulatore al contenuto del registro di indirizzo *f*

**2** **Per sommare il contenuto del registro accumulatore al contenuto del registro di indirizzo *f* si deve utilizzare l'istruzione:**

A ADDW d,f

B ADDWF d,f

C ADD d,f

D ADDWF f,d

**3** **Con una frequenza del segnale di clock di 4 MHz il microcontrollore PIC 16F84 esegue un'istruzione senza salti in:**

A 2,5 $\mu$s

B 1 ms

C 4 $\mu$s

D 1 $\mu$s

**4** **Il microcontrollore PIC 16F84 ha una memoria EEPROM programma di:**

A 8 bit

B 16 bit

C 13 bit

D 14 bit

**5** **I bit utilizzabili del registro STATUS sono:**

A 8

B 7

C 6

D 5

**6** **Il microcontrollore PIC 16F84 ha un set di:**

A 350 istruzioni

B 35 istruzioni

C 70 istruzioni

D 45 istruzioni

**7** **Per trasferire nel registro accumulatore un valore numerico costituito da 8 bit si utilizza l'istruzione:**

A MOVLW f

B MOVLW d

C MOVL k

D MOVLW k



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# 9 Sistemi di sviluppo per microcontrollori

## 1 Concetti introduttivi

Il linguaggio prevalentemente utilizzato per produrre il software necessario per la programmazione dei microcontrollori è il linguaggio assembly.

Il programma può essere installato sul microcontrollore utilizzando un apposito *strumento hardware* denominato *programmatore* soltanto quando il codice sorgente scritto in linguaggio assembly viene tradotto in linguaggio macchina da un apposito *strumento software* denominato *compilatore*.

Di conseguenza le fasi che seguono la scrittura del codice vengono denominate *compilazione* e *programmazione*.

Ciò che avviene nella realtà è descritto schematicamente in FIGURA **1**.

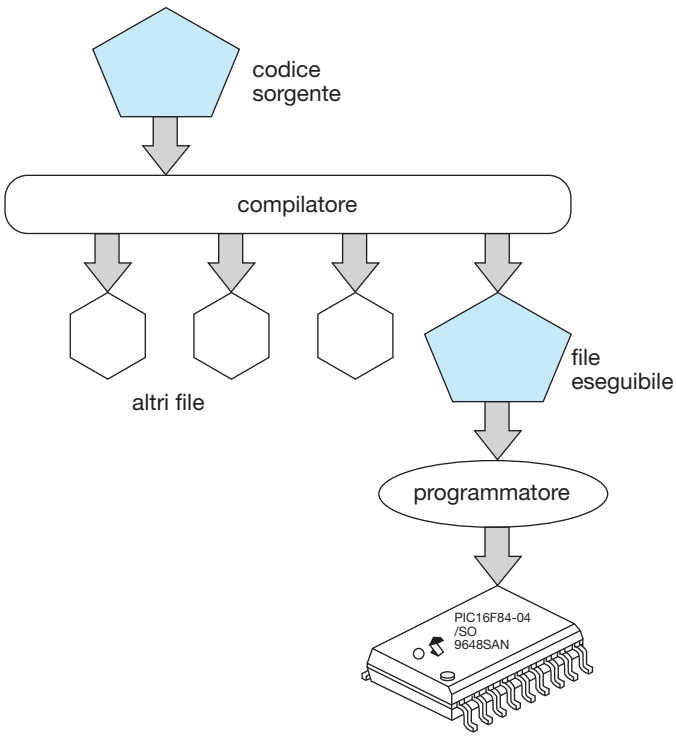



FIGURA **1**
Compilazione e programmazione.

I **sistemi di sviluppo integrati (IDE)** sono dei sistemi completi perché sono in grado di supportare l'operatore in tutte le fasi; più precisamente consentono:

- la realizzazione del programma in linguaggio assembly;
- la sua traduzione in linguaggio macchina;


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

- la verifica della sua correttezza attraverso un'operazione di *debugging*;
- il trasferimento sul microcontrollore di un file eseguibile prodotto dall'assemblatore.

# 2 Compilazione

▶ La **fase di compilazione** utilizza il **compilatore** per tradurre in codice macchina il programma scritto in linguaggio assembly.

Tutti i microcontrollori PIC, anche se ciascuno con la propria architettura interna, hanno il medesimo set di istruzioni; per questo motivo è possibile utilizzare il medesimo compilatore al quale è necessario fornire, insieme al codice sorgente, un file con le specifiche del PIC da programmare.

Il compilatore genera più file come per esempio quello che consente di risalire agli errori di compilazione; il file che permette la programmazione del PIC è il file eseguibile contenente i codici operativi delle istruzioni; esso deve essere trasferito nella memoria programma del PIC attraverso una ulteriore programmazione.

In particolare il compilatore *MPASM* della *Microchip*, a partire dal file sorgente con estensione *.asm*, genera i seguenti file:

- .err (contiene il listato degli errori di compilazione);
- .lst (contiene il listato del codice sorgente);
- .cof (scritto in linguaggio macchina, non è eseguibile e viene denominato file oggetto);
- .hex (derivato dal file .cof, è eseguibile e viene trasferito nella memoria programma del microcontrollore).

## 2.1 Direttive del compilatore

▶ Le **direttive del compilatore** non sono istruzioni di programma vere e proprie in quanto non vengono elaborate durante l'esecuzione del programma ma eseguite soltanto in fase di compilazione.

Di seguito viene fatto riferimento ad alcune direttive proprie del compilatore *MPASM* della *Microchip* e precisamente:

- *ORG*;
- *END*;
- *LIST*;
- *__ CONFIG*;
- *INCLUDE*;
- *EQU*.

### ORG

La direttiva ORG stabilisce l'indirizzo di partenza delle istruzioni nella memoria programma.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

La sintassi assume la forma *ORG <indirizzo>*.

La direttiva *ORG 00* per esempio stabilisce che la locazione di memoria di inizio programma sia proprio 00.

### END

La direttiva END indica la chiusura del programma e pone termine alla compilazione.

### LIST

La direttiva LIST informa il compilatore sul tipo di microcontrollore utilizzato.

La direttiva *p = 16F84* per esempio si utilizza quando il microcontrollore usato è il PIC 16F84.

### __ CONFIG

La direttiva __ CONFIG definisce il valore da memorizzare nella *word di configurazione*.

Le diverse tipologie di PIC sono caratterizzate da una word di configurazione con indirizzi diversi (per il PIC 16F84 per esempio è all'indirizzo 2007).

Sempre per il PIC 16F84 utilizzando la direttiva *__CONFIG 3FF1* si stabilisce che il microcontrollore viene programmato con:

- *protezione del codice* disabilitata;
- *power up timer* abilitato;
- *watchdog* disabilitato;
- oscillatore in *modo XT*.

### INCLUDE

La direttiva INCLUDE definisce il file che contiene informazioni sulla memoria RAM e in particolare i nomi dei registri speciali associati al loro indirizzo.

La sintassi assume la forma *INCLUDE <"nome del file da includere">*.

Con il PIC 16F84 si deve utilizzare la direttiva *INCLUDE "P16F84.INC"*.

### EQU

La direttiva EQU serve per definire una costante; ogni volta che questa viene utilizzata in una istruzione viene sostituita con il valore dichiarato dalla EQU.

La sintassi assume la forma *< nome costante > EQU < valore >*.

Per esempio se si vuole definire la costante *LUNGH* pari a 10 si deve usare la direttiva *LUNGH EQU 10*.

## 3 Programmazione

▶ La **fase di programmazione** utilizza il **programmatore** per trasferire il programma scritto in codice macchina nella *memoria programma* del microcontrollore.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Dal punto di vista fisico il *programmatore* è un circuito alimentato da un computer che viene connesso alla *porta seriale RS232* del computer stesso attraverso un connettore.

Lo schema del circuito viene riprodotto in FIGURA **2**.

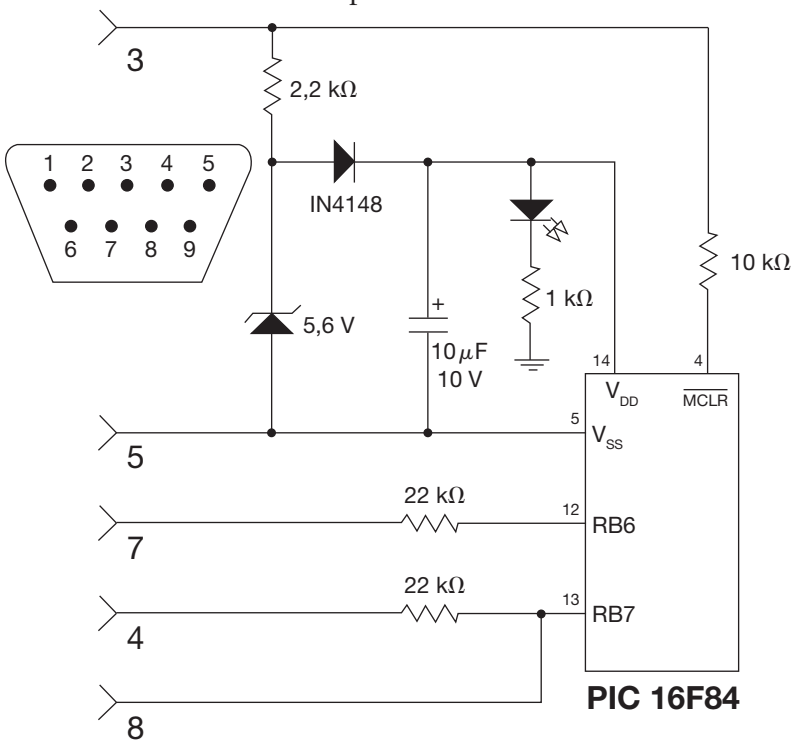



FIGURA **2**
Schema del circuito programmatore.

Per programmare il PIC è sufficiente compiere le seguenti operazioni:

- inserire il PIC stesso sullo zoccolo di cui è provvisto il programmatore;
- effettuare il collegamento alla porta seriale del computer;
- utilizzare un opportuno software di programmazione come per esempio *IC-PROG* della *Microchip* per il trasferimento del programma.

# 4 Sistema di sviluppo MPLAB

Il **sistema di sviluppo MPLAB** della *Microchip* è quello che viene utilizzato per i PIC.

Si fa nel seguito riferimento alla versione *MPLAB IDE v8.83*.

Verranno evidenziate le fasi necessarie alla preparazione del programma da caricare nel microcontrollore:

- *creazione del progetto*;
- *stesura del programma*;
- *compilazione del programma*;
- *simulazione*.

## 4.1 Creazione del progetto

La scrittura del programma in linguaggio assembly è preceduta da una fase preliminare che ha lo scopo di creare una directory denominata *project manager* che contiene i file sorgenti necessari per proseguire il lavoro.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Aprendo il programma si accede alla schermata riprodotta in FIGURA **3**.

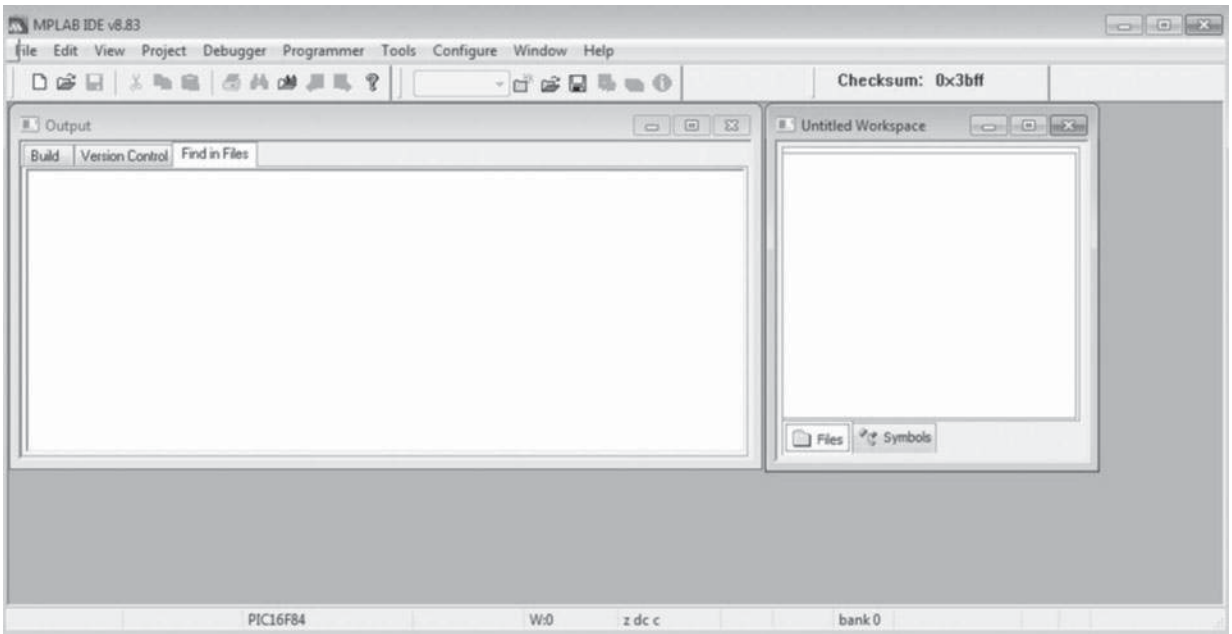



FIGURA **3**
Schermata iniziale del programma.

Per aprire il nuovo progetto, come evidenziato in FIGURA **4**, si seleziona *Project* e successivamente *Project Wizard*.

Con l'apertura della finestra riportata in FIGURA **5** si accede alla fase di definizione guidata del progetto che si compone di quattro passi successivi:

- scelta del microcontrollore;
- scelta dell'assemblatore;
- assegnazione del nome del progetto e suo inserimento in una cartella;
- aggiunta dei file di progetto.

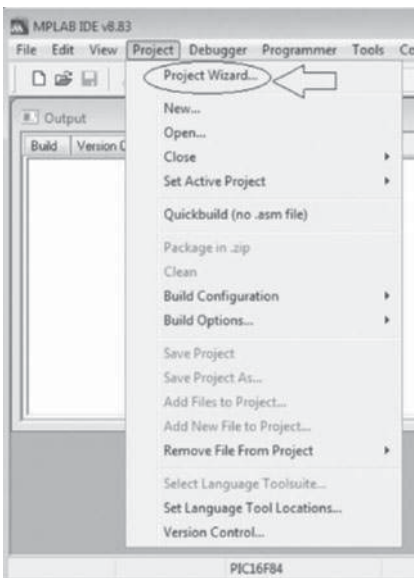



FIGURA **4**
Apertura di un nuovo progetto.

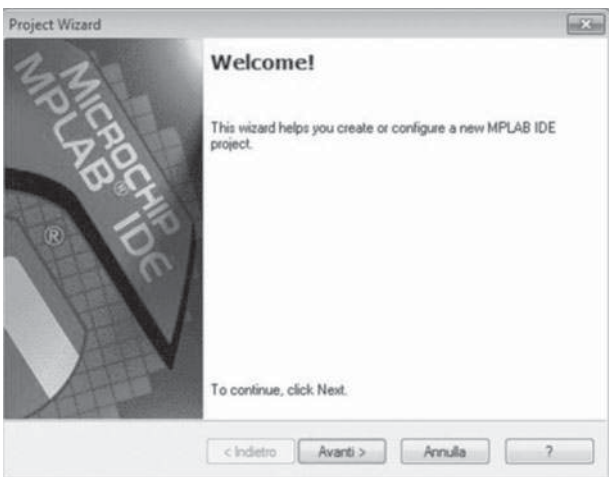



FIGURA **5**
Finestra di apertura del progetto.

## Passo 1

Selezionando *Avanti* si ha accesso alla prima fase che consente la scelta del microcontrollore.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

La finestra relativa viene riprodotta in FIGURA **6**.

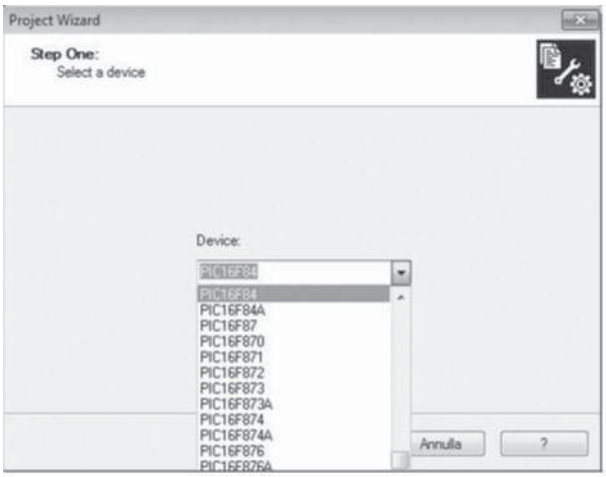



FIGURA **6**
Scelta del microcontrollore.

## Passo 2

Selezionando *Avanti* si ha accesso alla seconda fase che consente la scelta dell'assemblatore.

La finestra relativa viene riprodotta in FIGURA **7**.

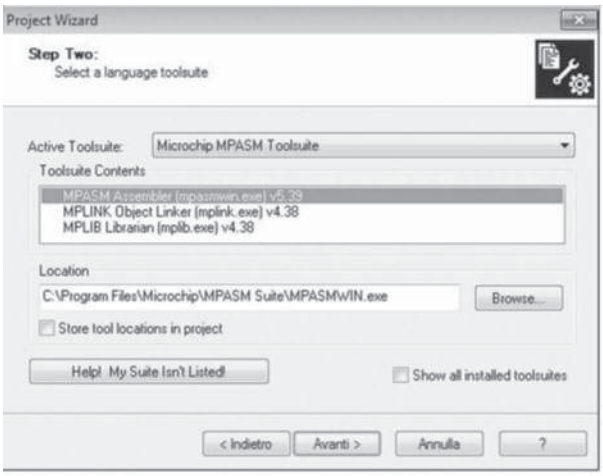



FIGURA **7**
Scelta dell'assemblatore.

## Passo 3

Selezionando *Avanti* si ha accesso alla terza fase che consente di assegnare un nome al nuovo progetto e di inserirlo in una determinata cartella.

La finestra relativa viene riprodotta in FIGURA **8**.

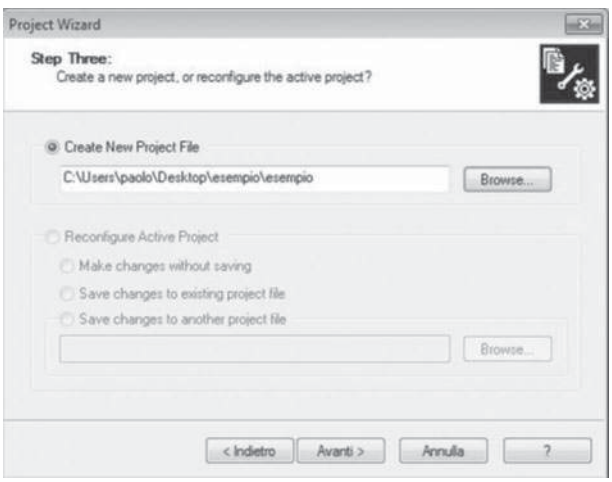



FIGURA **8**
Assegnazione di un nome al progetto e suo inserimento in una cartella.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

### Passo 4

Selezionando *Avanti* si ha accesso alla quarta fase che consente l'aggiunta al progetto di un file sorgente temporaneo con estensione .asm utilizzabile per iniziare a lavorare sul progetto stesso.

Nella directory *C:\Program Files\Microchip\MPASM Suite\Template\Code* si trovano i file provvisori relativi al microcontrollore scelto in precedenza come per esempio il file *16F84tmpo.asm*.

Insieme al codice sorgente deve essere aggiunto un ulteriore file con le specifiche del PIC da programmare che contiene informazioni sulla memoria RAM e in particolare i nomi dei registri speciali associati al loro indirizzo.

Nella directory *C:\Program Files\Microchip\MPASM Suite\Template\Object* si trova il file *P16F84tmpo.inc*.

La finestra relativa viene riprodotta in FIGURA **9**.

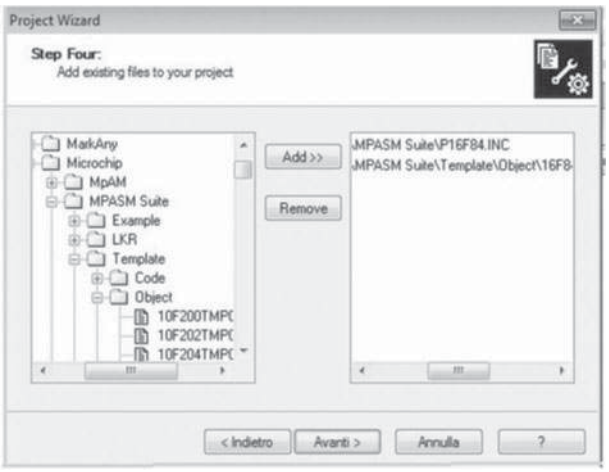



FIGURA **9**
Aggiunta di file al progetto.

Selezionando *Avanti* si completano le quattro fasi preliminari.

Segue il riepilogo delle scelte di progetto operate in precedenza riportato in FIGURA **10**.

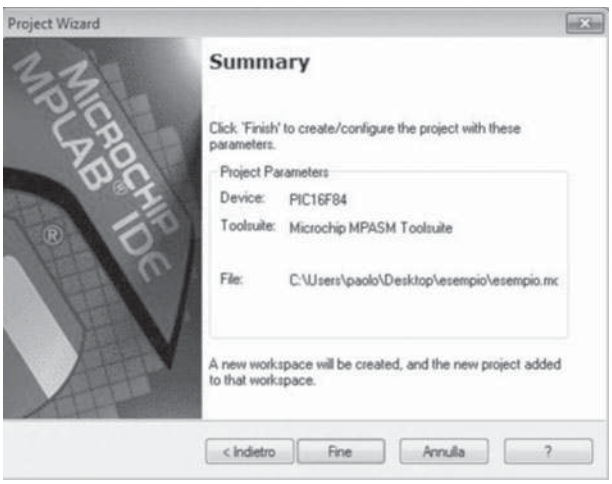



FIGURA **10**
Riepilogo delle scelte di progetto.

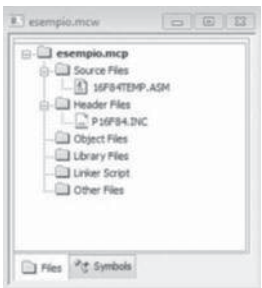



FIGURA **11**
Finestra di progetto.

Selezionando *Fine* compare la finestra relativa al menu di progetto con l'organizzazione delle cartelle e dei file riportata in FIGURA **11**.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

## 4.2 Stesura del programma

A questo punto si ha a disposizione il *file .asm* sul quale si può scrivere il programma nel linguaggio assembly proprio del PIC che si vuole utilizzare.

Per accedere al listato del file, come evidenziato in FIGURA **12**, si seleziona il file medesimo dal menu di progetto e, agendo sul tasto destro del mouse, si seleziona *Edit*.

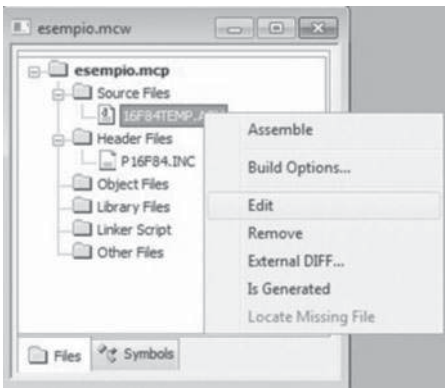



FIGURA **12**
Selezione del file .asm.

Il listato, riportato in FIGURA **13**, deve essere completato con altre istruzioni del compilatore e con il programma.

FIGURA **13**
Listato del file.

```
;*****************************************************************
;                                                                 *
;   This file is a basic code template for assembly code generation  *
;   on the PIC16F84. This file contains the basic code            *
;   building blocks to build upon.                                *
;                                                                 *
;   Refer to the MPASM User's Guide for additional information on *
;   features of the assembler (Document DS33014).                 *
;                                                                 *
;   Refer to the respective PIC data sheet for additional         *
;   information on the instruction set.                           *
;                                                                 *
;*****************************************************************
;    Filename:        xxx.asm                                     *
;    Date:                                                        *
;    File Version:                                                *
;                                                                 *
;    Author:                                                      *
;    Company:                                                     *
;                                                                 *
;*****************************************************************
;                                                                 *
;    Files required: P16F84.INC                                   *
;                                                                 *
;*****************************************************************

     list      p=16F84             ; list directive to define processor
     #include <p16F84.inc>         ; processor specific variable definitions

     __CONFIG    _CP_OFF & _WDT_ON & _PWRTE_ON & _RC_OSC

 ; '__CONFIG' directive is used to embed configuration data within .asm file.
 ; The lables following the directive are located in the respective .inc file.
 ; See respective data sheet for additional information on configuration word.
```

```
;***** VARIABLE DEFINITIONS
w_temp        EQU     0x0C        ; variable used for context saving
status_temp   EQU     0x0D        ; variable used for context saving

;*****************************************************************
RESET_VECTOR      CODE    0x0000  ; processor reset vector
        goto    start             ; go to beginning of program

ISR               CODE    0x0004  ; interrupt vector location

Interrupt:

        movwf   w_temp            ; save off current W register contents
        movf    STATUS,w          ; move status register into W register
        movwf   status_temp       ; save off contents of STATUS register

;  Place ISR Here

        movf    status_temp,w     ; retrieve copy of STATUS register
        movwf   STATUS            ; restore pre-isr STATUS register contents
        swapf   w_temp,f
        swapf   w_temp,w          ; restore pre-isr W register contents
        retfie                    ; return from interrupt

MAIN_PROGRAM    CODE

start:

; remaining code goes here

        goto $

        END                       ; directive 'end of program'
```

## 4.3 Compilazione del programma

Selezionando poi, come evidenziato in FIGURA **14**, *Project* e *Build All* si procede alla compilazione.

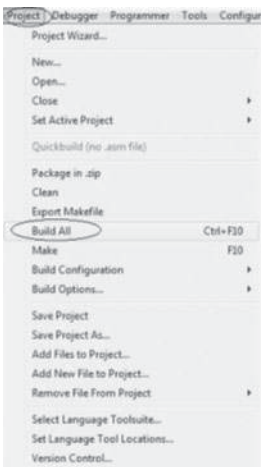



FIGURA **14**
Avvio della compilazione.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Se non sono presenti errori nella finestra di uscita riportata in FIGURA **15** viene segnalato che la compilazione è stata completata con successo.

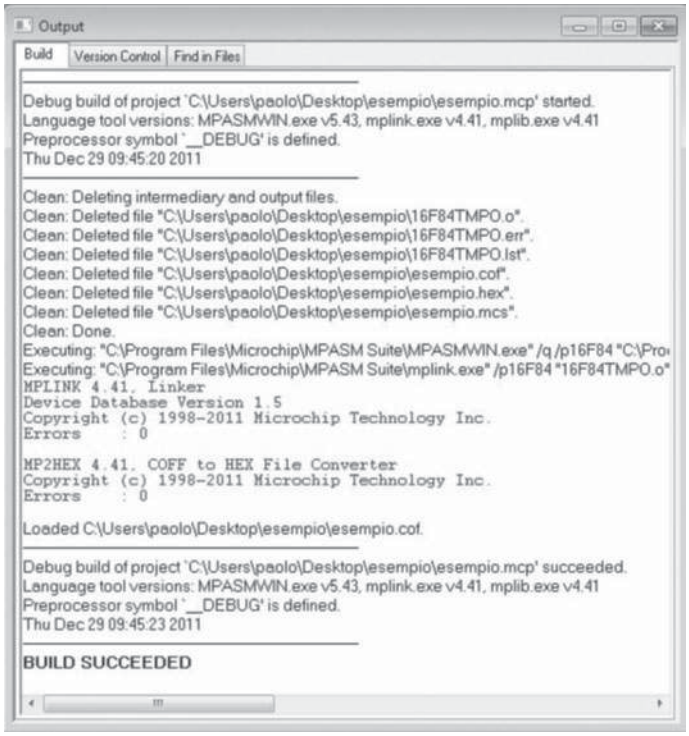



FIGURA **15**
Compilazione completata con successo.

Nella cartella scelta come contenitore del progetto si trovano tutti i file generati dal compilatore.

Un esempio di cartella viene riportato in FIGURA **16**.

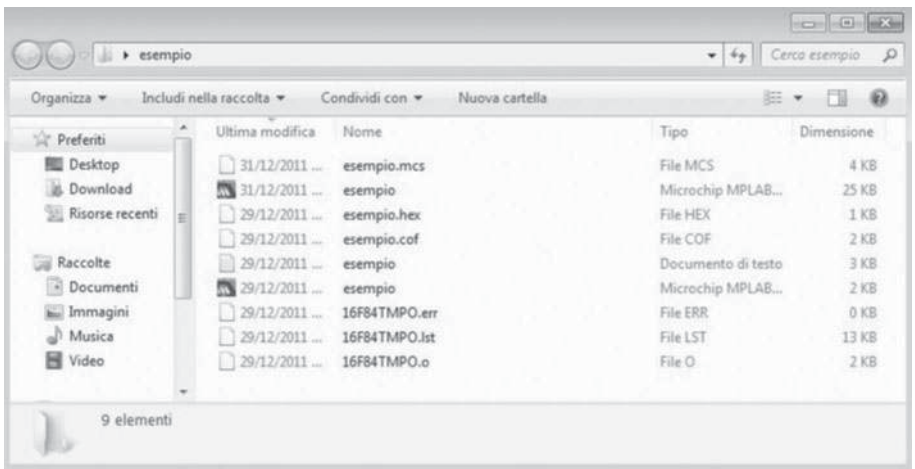



FIGURA **16**
Cartella con i file generati dal compilatore.

## 4.4 Simulazione

Dopo aver scritto il programma è buona norma simulare le reazioni del sistema utilizzando un programma opportunamente predisposto e, successivamente, far girare l'applicazione in un sistema reale.

Il *simulatore* è una parte dell'ambiente MPLAB che consente la verifica del comportamento del programma in relazione alle esigenze per le quali è stato prodotto.


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Il *simulatore*, che esegue il programma linea per linea, consente in particolare il monitoraggio del valore corrente delle variabili utilizzate, dei registri e dello stato delle porte a livello di pin.

Per accedere alla simulazione, come viene evidenziato in FIGURA **17**, si devono selezionare nell'ordine i comandi Debugger, Select TOOLS ed MPLAB SIM.

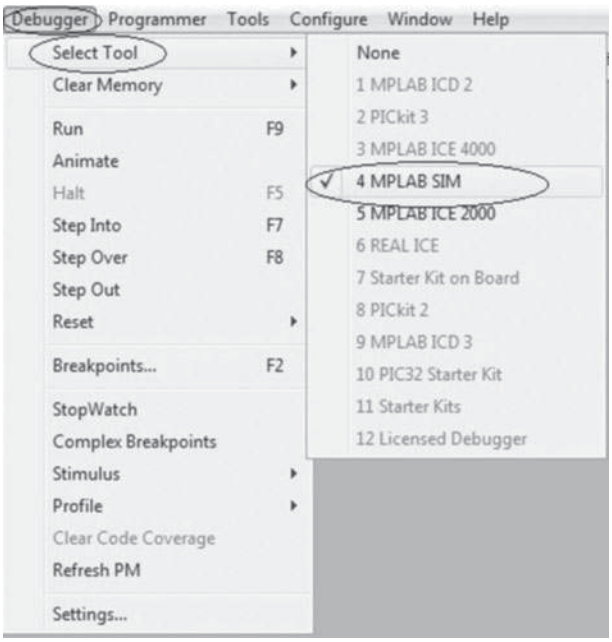



FIGURA **17**
Accesso alla simulazione.

La prima operazione da fare è il reset del microcontrollore che si attua utilizzando i comandi *Debugger*, *Reset* e *Processor Reset*.

Con questa operazione la prima linea del programma viene evidenziata con una freccia.

Un esempio viene riportato in FIGURA **18**.

FIGURA **18**
Simulazione dopo il reset del microcontrollore.

Selezionando il comando *Step Into* si può eseguire la simulazione riga per riga (*step by step*); la freccia si sposta di una riga per ogni accesso al comando; per ripartire con la simulazione bisogna resettare il microcontrollore.

Selezionando il comando *View*, come evidenziato in FIGURA **19**, si può scegliere quello che si vuole visualizzare come uscita per la simulazione (memorie, registri speciali, variabili).

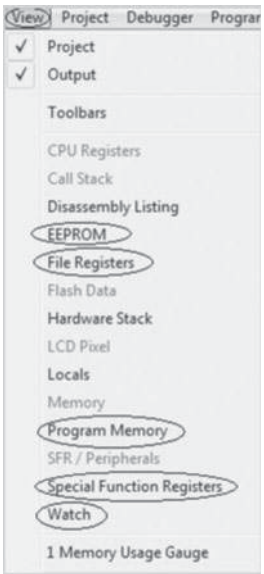



FIGURA **19**
Selezione delle finestre di visualizzazione.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Le finestre corrispondenti vengono riportate in FIGURA **20**.

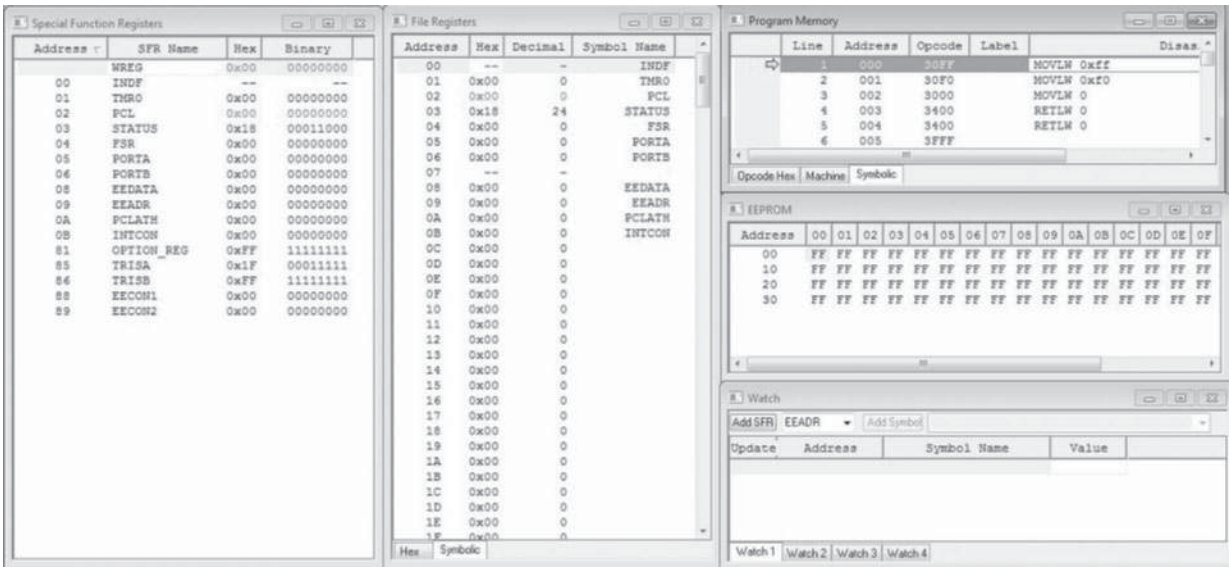



FIGURA **20**
Finestre di visualizzazione.

# 5 Applicazioni con MPLAB

Vengono di seguito proposte delle esercitazioni di simulazione che riguardano l'uso delle istruzioni del microcontrollore e delle direttive del compilatore.

Gli argomenti che sono oggetto delle esercitazioni sono i seguenti:

- esercitazione 1 – Impiego di istruzioni elementari;
- esercitazione 2 – Abilitazione di periferiche.

## Esercitazione 1 – Impiego di istruzioni elementari

Scopo della prova è di esaminare le principali caratteristiche dell'ambiente di sviluppo MPLAB.

Il listato del programma riprodotto in FIGURA **21**, privo di finalità appli-

FIGURA **21**
Listato del programma.

```
C:\Program Files\Microchip\MPASM Suite\Template\Code\16F84TEMP.ASM
1
2          list      p=16F84
3          #include  <p16F84.inc>
4          __CONFIG    _CP_OFF & _WDT_ON & _PWRTE_ON & _RC_OSC
5          ORG       0x000
6     iniz movlw     0xFF        ;carico FF nell'accumulatore
7          movlw     0xF0        ;carico F0 nell'accumulatore
8          movlw     0x00        ;carico 00 nell'accumulatore
9          addlw     0x12        ;aggiungo 12 al contenuto dell'accumulatore
10         movwf     0x0C        ;trasferisco nel registro di indirizzo 0C il contenuto dell'accumulatore
11         nop                   ;non eseguo alcuna operazione
12         movlw     0x03        ;inizio del ciclo con il caricamento di 03 (valore inizio ciclo) nell'accumulatore
13         movwf     0x0D        ;caricamento del valore di inizio ciclo nel registro di indirizzo 0D
14    dec  decfsz    0x0D,1      ;decremento fino a zero il contenuto del registro di indirizzo 0D
15         goto      dec         ;torno a decrementare se il risultato del decremento non è zero
16         nop                   ;esco dal ciclo non eseguendo alcuna operazione se il risultato del decremento è zero
17         movlw     0x00        ;azzera il contenuto dell'accumulatore
18         movwf     0x0C        ;azzera ilcontenuto del registro 0C
19         goto      iniz        ;ritorno inizio programma
20         END
21
```



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

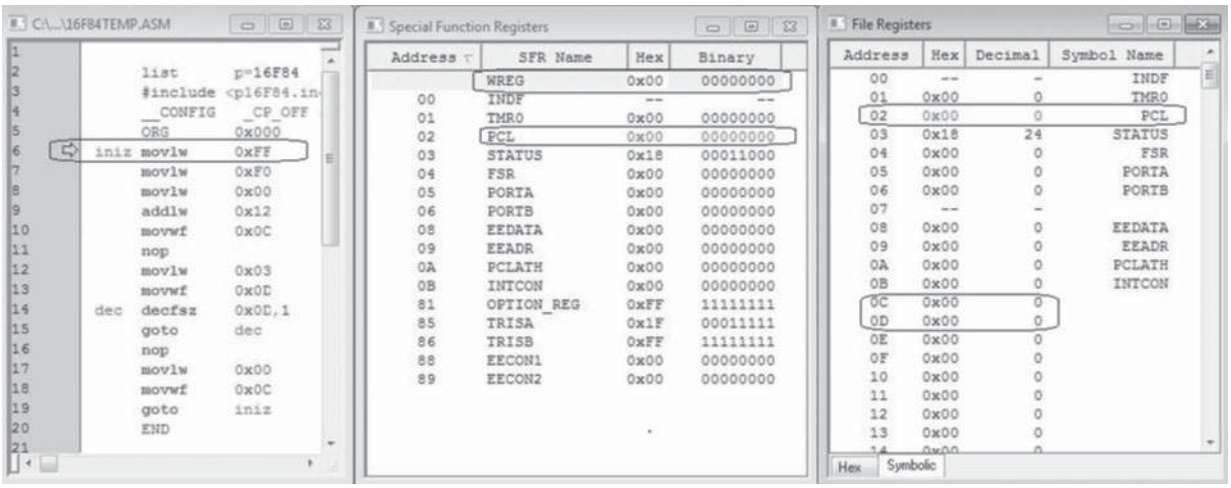
cative, è stato scritto con lo scopo di utilizzare le istruzioni fondamentali e di effettuare una simulazione passo passo.

Le istruzioni, commentate riga per riga, vengono utilizzate per:

- caricare valori numerici nel registro accumulatore;
- sommare valori numerici al contenuto del registro accumulatore;
- trasferire il contenuto dell'accumulatore in un registro;
- esecuzione di un ciclo che decrementa per tre volte il contenuto di un registro;
- esecuzione di un salto incondizionato.

In FIGURA **22** viene mostrato il contenuto del registro accumulatore, del program counter e dei registri 0C e 0D dopo avere effettuato l'operazione iniziale di reset.

FIGURA **22**
Simulazione dopo l'operazione di reset.




In FIGURA **23** vengono mostrati i risultati della simulazione dopo l'esecuzione della prima istruzione.

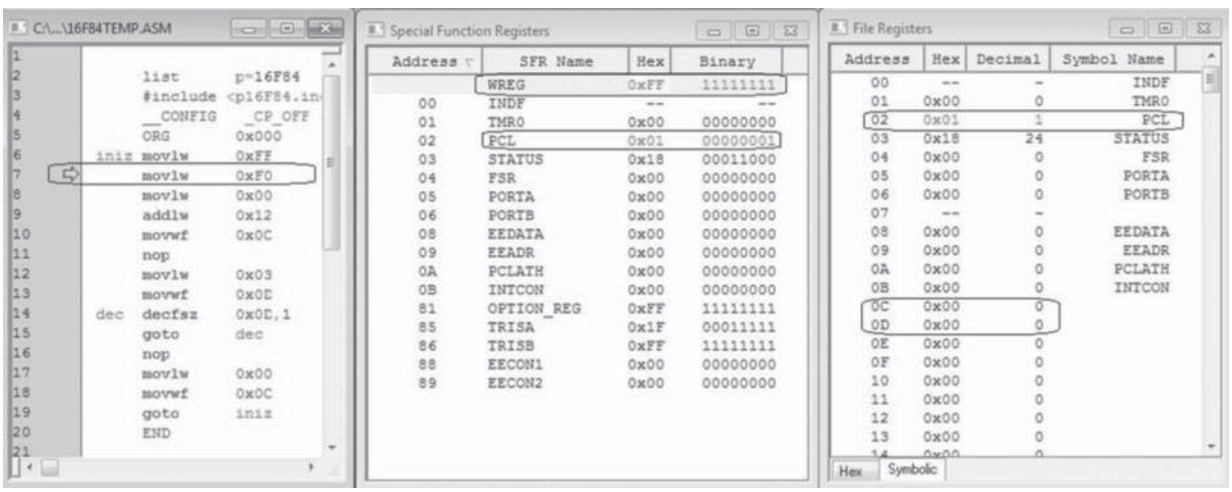



FIGURA **23**
Risultati della simulazione dopo l'esecuzione della prima istruzione.

In FIGURA **24** vengono mostrati i risultati della simulazione prima dell'inizio del ciclo.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

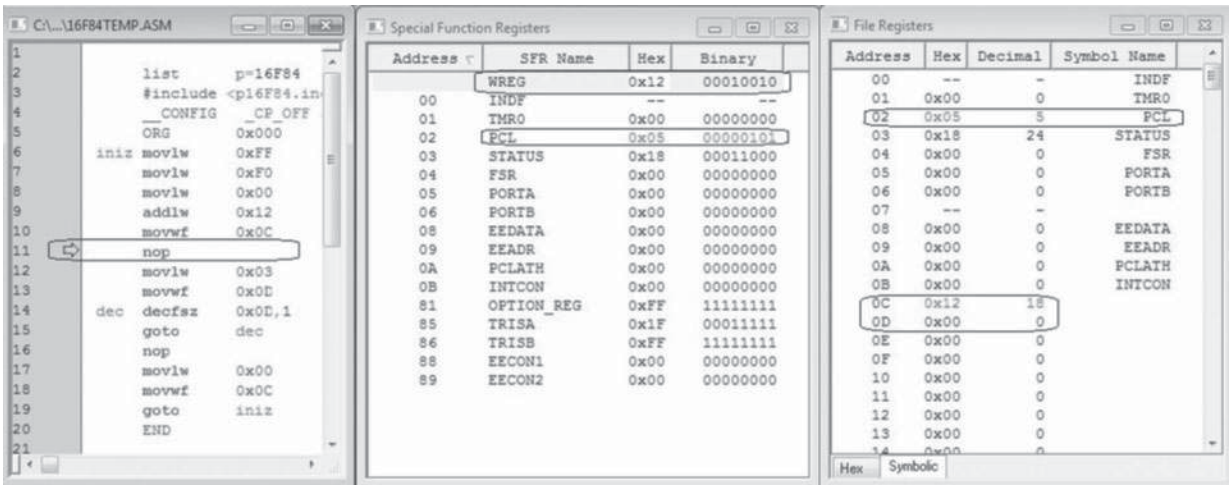



FIGURA **24**
Risultati della simulazione prima dell'inizio del ciclo.

In FIGURA **25** vengono mostrati i risultati della simulazione con l'esecuzione del programma all'interno del ciclo.

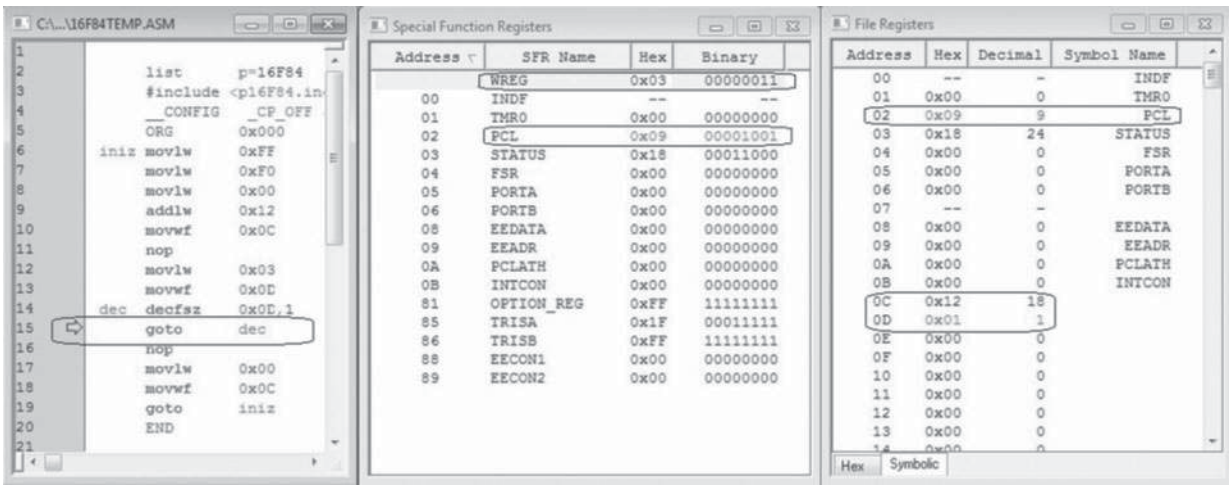



FIGURA **25**
Risultati della simulazione con il programma all'interno del ciclo.

## Esercitazione 2 – Abilitazione di periferiche

Scopo della prova è utilizzare le istruzioni necessarie per l'abilitazione delle periferiche.

In particolare si vogliono abilitare le periferiche d'uscita (per esempio LED) che vengono collegate al PORT B attraverso i pin compresi tra RB0 ed RB3.

Si prevede che le periferiche siano abilitate secondo la seguente sequenza di funzionamento:

- periferica 1;
- periferica 2;
- periferiche 1 e 2 insieme;
- periferica 3.

La sequenza può essere ripetuta un numero indefinito di volte.

La configurazione voluta delle uscite si ottiene ponendo in sequenza nel registro TRISB i byte FE, FD, FC ed FB.

Si può quindi utilizzare, per ottenere la sequenza voluta, un contatore a


Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

decremento con valore iniziale quattro; a ogni passo, partendo da FF, viene decrementato anche il valore del byte da porre nel registro TRISB.

Per svolgere queste funzioni possono essere utilizzati due registri del file register (per esempio quelli con indirizzo 0D e 0E).

Il funzionamento del sistema viene sintetizzato con il diagramma di flusso riportato in FIGURA **26**.

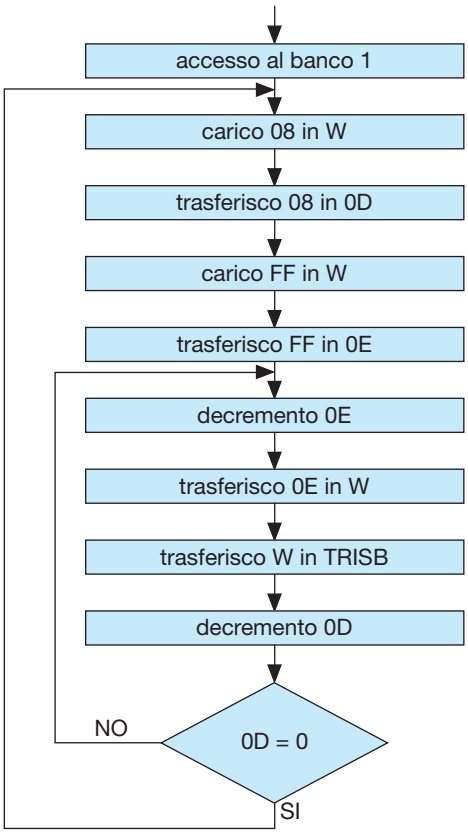



FIGURA **26**
Diagramma di flusso.

Il listato del programma, commentato riga per riga, viene riprodotto in FIGURA **27**.

```
C:\Program Files\Microchip\MPASM Suite\Template\Code\16F84TEMP.ASM
1
2          list      p=16F84
3          #include  <p16F84.inc>
4          __CONFIG   _CP_OFF & _WDT_ON & _PWRTE_ON & _RC_OSC
5          ORG       0x000
6          bsf       83,5          ;si ha l'accesso al banco 1
7     INIZ movlw     0x04          ;inizio del ciclo con il caricamento di 04 (valore inizio ciclo) nell'accumulatore
8          movwf     0x0D          ;carico il valore di inizio ciclo nel registro di indirizzo 0D
9          movlw     0xFF          ;carico FF nell'accumulatore
10         movwf     0x0E          ;carico il contenuto dell'accumulatore nel registro di indirizzo 0E
11    LOOP decf      0E,1          ;decremento di 1 il contenuto del registro 0E
12         movf      0E,0          ;carica nell'accumulatore il contenuto del registro 0E
13         movwf     TRISB         ;trasferisco nel registro TRISB il contenuto dell'accumulatore configurando le uscite
14         decfsz    0D,1          ;decremento fino a zero il contenuto del registro di indirizzo 0D
15         goto      LOOP          ;torno a LOOP se il risultato del decremento non è zero
16         goto      INIZ          ;ritorna a INIZ
17         END
18
19
```

FIGURA **27**
Listato del programma.

La correttezza del programma viene testata attraverso una simulazione passo passo.

In FIGURA **28** vengono riportati i risultati della simulazione dopo l'assegnazione delle condizioni iniziali.



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

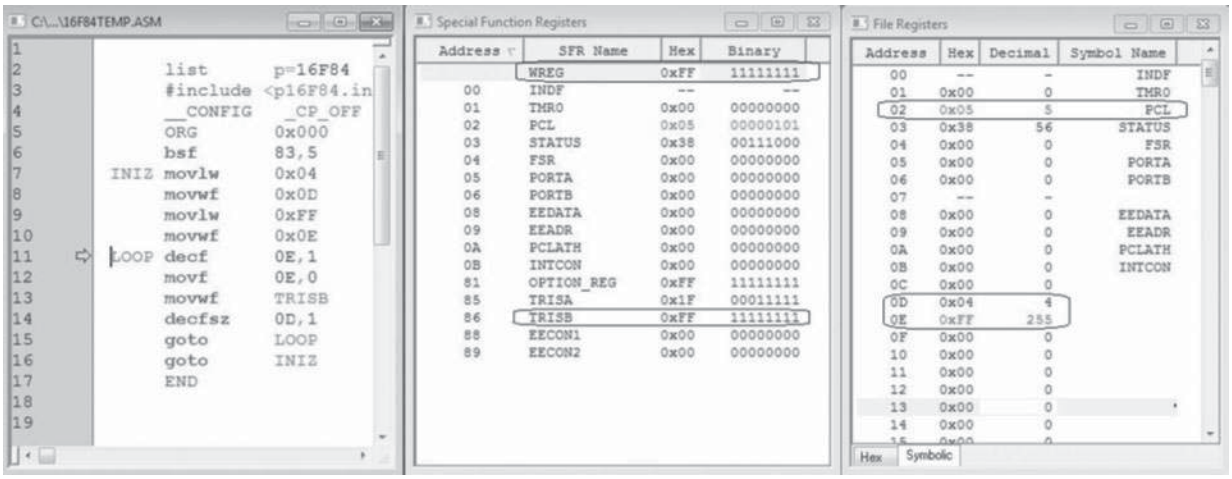



FIGURA **28**
Risultati della simulazione dopo l'assegnazione delle condizioni iniziali.

In FIGURA **29** vengono riportati i risultati della simulazione dopo che sul registro TRISB è stato posto il primo byte.

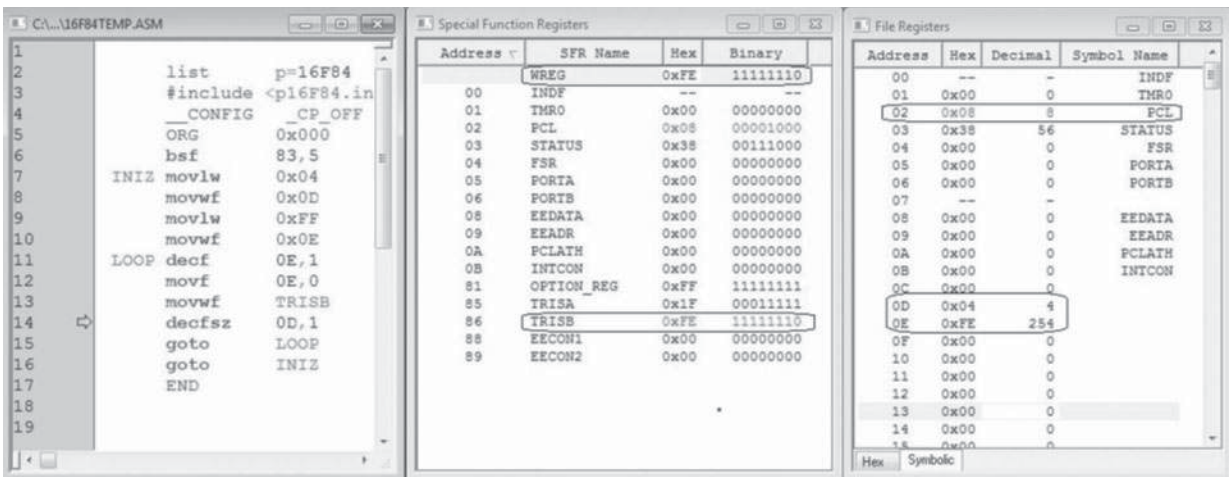



FIGURA **29**
Risultati della simulazione dopo che sul registro TRISB è stato posto il primo byte.

In FIGURA **30** vengono riportati i risultati della simulazione dopo il primo decremento del conteggio.

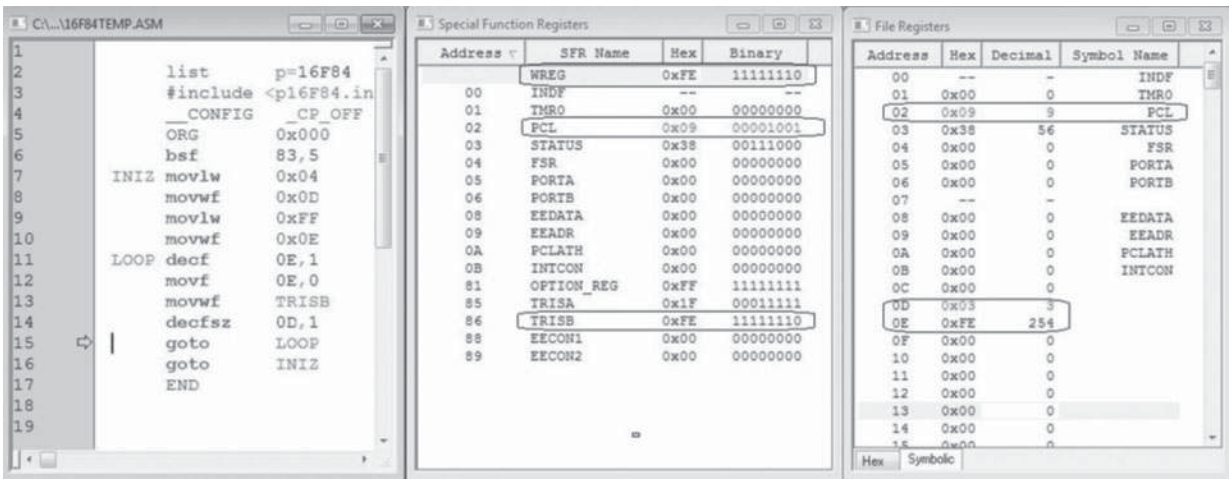



FIGURA **30**
Risultati della simulazione dopo il primo decremento del conteggio.

## DOMANDE a risposta aperta

**1** **Spiegare il concetto dei termini compilatore e programmatore.**

**2** **Evidenziare le funzioni dei sistemi di sviluppo integrati.**

**3** **Definire la tipologia dei file generati dal compilatore della Microchip a partire dal file sorgente.**

**4** **Evidenziare le funzioni svolte dalle direttive del compilatore nell'ambito di un programma.**

**5** **Spiegare il significato delle direttive END, ORG, LIST.**

**6** **Spiegare il significato delle direttive __ CONFIG, INCLUDE, EQU.**

**7** **Definire le caratteristiche fisiche di un programmatore.**

**8** **Facendo riferimento allo schema di programmatore di** FIGURA **31, completare il circuito indicando i nomi dei pin del PIC da programmare.**

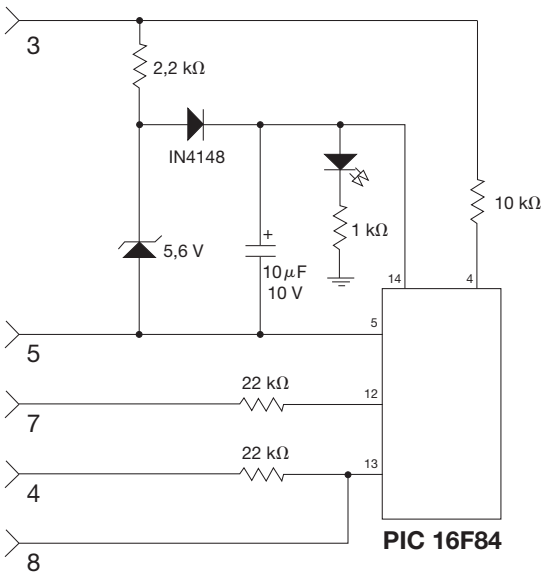



FIGURA **31**

**9** **Elencare in modo schematico le operazioni necessarie per la programmazione di un PIC.**

**10** **Evidenziare le caratteristiche del sistema di sviluppo MPLAB della Microchip facendo particolare riferimento alla fase progettuale.**

**11** **Evidenziare il contesto in cui viene utilizzata la direttiva p = 16F84.**

**12** **Spiegare il significato della direttiva __ CONFIG3FF1 utilizzata per il microcontrollore PIC 16F84.**

## ESERCITAZIONI

**1** **Utilizzando il linguaggio assembly del PIC 16F84 e il sistema di sviluppo MPLAB realizzare un programma che sia in grado di eseguire in sequenza le seguenti operazioni:**

- **inserire nei registri di indirizzo 0C, 0D e 0E i valori numerici esadecimali 05, 15 e 25;**
- **sommarne i contenuti e trasferirli nel registro di indirizzo 0F.**

**2** **Utilizzando il linguaggio assembly del PIC 16F84 e il sistema di sviluppo MPLAB realizzare un programma che sia in grado di eseguire in sequenza le seguenti operazioni:**

- **inserire nei registri di indirizzo 0C e 0D i valori numerici esadecimali 05 e 25;**
- **ripetere per dieci volte la somma e trasferirla nel registro di indirizzo 0E.**

**3** **Utilizzando il linguaggio assembly del PIC 16F84 e il sistema di sviluppo MPLAB realizzare un programma che sia in grado di eseguire in sequenza le seguenti operazioni:**

- **inserire nei registri di indirizzo 0C e 0D i corrispondenti indirizzi espressi nel sistema esadecimale;**
- **decrementarne fino a zero il contenuto.**

**4** **Utilizzando il linguaggio assembly del PIC 16F84 e il sistema di sviluppo MPLAB realizzare un programma che sia in grado di abilitare le periferiche d'uscita (per esempio LED) che vengono collegate al PORT B attraverso i pin compresi tra RB0 ed RB3.**
**Le periferiche devono essere abilitate secondo la seguente sequenza di funzionamento:**

- **periferiche 2, 3 e 4;**
- **periferiche 1, 3 e 4;**
- **periferiche 3 e 4;**
- **periferiche 1, 2 e 4.**

**5** **Utilizzando il linguaggio assembly del PIC 16F84 e il sistema di sviluppo MPLAB realizzare un programma che sia in grado di abilitare le periferiche d'uscita (per esempio LED) che vengono collegate al PORT B attraverso i pin compresi tra RB0 ed RB3.**
**Le periferiche devono essere abilitate secondo la seguente sequenza di funzionamento:**

- **periferiche 3 e 4;**
- **periferiche 1 e 4;**
- **periferiche 2 e 3;**
- **periferiche 1 e 2.**

**6** **Utilizzando il linguaggio assembly del PIC 16F84 e il sistema di sviluppo MPLAB realizzare un programma che sia in grado di abilitare le periferiche d'uscita (per esempio LED) che vengono collegate al PORT A attraverso i bit compresi tra RA2 e RA4.**



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

# Indice analitico


**A**
abilitazione di periferiche, 314
accesso diretto in memoria (DMA), 249
accumulatore, 242, 243, 244
acquisizione di ingressi, 180
AC_VOLTAGE, 98
ADD, 260, 275
ADDWF f,d, 295
Advanced Peripherals, 214, 216, 217
albero a gomiti, 144
algebra di Boole, 152
alimentatore, 173
alimentazione, 178
– degli ingressi e delle uscite, 178
– di pressione, 151
alta impedenza, 250, 254
alte frequenze, 58, 59
ALU, 244
ampiezza, 39
Amtel, 286
analisi della stabilità di un sistema retroazionato, 109
ANDWF f,d, 295
anello chiuso, 152, 153
ANSI, 193
antitrasformata di Laplace, 111
apertura di rami in parallelo, 194
applicazioni 23, 195
– ai sistemi non elettrici, 6
– alle reti elettriche, 5
– con linguaggi evoluti, 113
– con Matlab, 110
– con MPLAB, 312
– con Multisim, 98
– del software Zelio Soft 2, 236
– di azionamenti elettromeccanici, 198
– di azionamenti pneumatici, 203
architettura
– a bus, 241
– dei PLC, 172
– di comunicazione, 189
– interna, 289
area di stack, 245, 249
armonica fondamentale, 33
asincrono, 248
asintoticamente stabile, 22
assemblatori, 261
attuatori, 141
– elettromeccanici, 135
– pneumatici, 136, 141
– pneumatici lineari, 141
autocontrollo, 186
automatismi industriali, 126
automazione, 124, 125
– elementare, 127
– industriale, 124, 125
– integrata, 127
– intermedia, 127
autotest, 174
Avanti, 306, 307, 308
avviamento, 174
avviamento di un motore asincrono trifase, 198
avvolgimenti riscaldanti, 162
AWL, 192
azionamenti, 129
– elettromeccanici, 134
– idropneumatici, 136
– industriali, 127
– lineari, 134
– negativi, 151
– oleoidraulici, 136, 139
– pneumatici, 136, 137
– positivi, 151
– rotativi, 134

**B**
banda passante, 65, 68
Basic, 81, 214
basse frequenze, 58
bit
– di parità, 251
– di stato, 247
– di STOP, 251
– interni, 194
blocchi funzionali, 242
blocco
– con due poli, 60, 62
– con due poli di cui uno nell'origine, 60, 62
– con poli complessi coniugati, 38, 42, 48, 60, 64
– con tre poli, 60, 63
– con tre poli di cui uno nell'origine, 60, 63
– con uno zero, 37, 42, 46
– con uno zero nell'origine e un polo, 60, 61
– con un polo, 36, 42, 43, 60, 61
– con un polo nell'origine, 60
– proporzionale, 36, 42
bobina, 158
Bode, 42
Bode Plotter, 98, 101
buffer, 179, 250
Build All, 309
building automation, 124
bus, 173, 250
– controlli, 173, 242
– dati, 173, 242, 243, 246, 250
– indirizzi, 173, 242, 244, 246, 250
– industriali, 189, 190
– interni, 241
BUSAK, 254
BUSRQ, 253, 254
by-pass, 148

**C**
C, 81
cablaggio, 130, 156
call, 259
capacità idraulica, 6
capacità termica, 8
caratteristiche dei segnali, 253
caricamento dei dati, 179
carry, 245, 259
cartuccia asportabile, 177
catasta, 245
cellula fotoelettrica, 164
centrale di compressione, 137
chiamate a sottoprogrammi, 244
chiusura di rami in parallelo, 194
ciclo
– aperto, 138
– automatico, 152
– continuo, 152
– del cilindro, 155
– di fetch, 256
– di istruzione, 294
– di lettura del codice operativo dell'istruzione, 254
– di lettura in memoria, 256
– di lettura/scrittura in memoria, 254
– di lettura/scrittura nei dispositivi di I/O, 254
– di riconoscimento delle interruzioni, 254
– di scrittura in memoria, 256
– di una istruzione, 255
– M, 255, 256, 261
– macchina, 254, 255
– M1, 256
– semiautomatico, 152
– singolo, 152
– T, 255, 256
cilindro, 140, 141
– a doppio effetto, 143
– a semplice effetto, 142
– pneumatico, 133, 142
CIM, 189
cinematismo, 162
circuito
– di comando, 184
– di decodifica, 243
– di temporizzazione, 242, 245
– optoelettronico, 181
– pneumatico, 152
– pneumatico con comando diretto, 154
– pneumatico con comando indiretto, 154
CISC, 286
classificazione dei PLC, 171
client, 190
clock, 243, 254
clock del sistema, 245
CLRF f, 295
CLRW, 295
codice
– binario, 261
– mnemonico, 260
– operativo, 243, 260
coefficiente di attrito viscoso, 6
comando, 169, 170
– a eventi, 152
– diretto, 154, 184
– di uscite, 183
– indiretto, 154
– sequenziale, 152
COMF f,d, 295
compilatore, 302, 303
compilazione, 179, 302, 303
compilazione del programma, 305, 309
Complex Instruction Set Computer, 286-287
componenti
– elettronici, 130
– per azionamenti pneumatici, 140
– reali, 194
compressore, 137
Computer Integrated Manufacturing, 189
comunicazione via Modem, 230
condizione
– di lavoro, 141
– di riposo, 141
condizioni iniziali, 2
__CONFIG, 303, 304
__CONFIG 3FF1, 304
connessione Darlington, 184
connettori, 172
console, 179
contatore di programma, 242, 244, 245
contatti
– ausiliari, 161
– di autoritenuta, 222
– di potenza, 161
– in apertura, 194
– in chiusura, 194
– principali, 161
– tempo dipendenti, 16
contattore, 157, 161
Control Function Blocks, 100
controller, 249
controllo, 169, 171
– di esecuzione del programma, 179, 180
controllore logico programmabile, 169





Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Control System Toolbox, 110, 111
convertitore
– A/D, 182
– D/A, 186
CONVEYOR BELT, 217
corpo, 141
corsa, 141
– di ritorno, 142
– negativa, 142, 155
– positiva, 142, 155
costante
– della molla, 6
– di accelerazione, 16
– di guadagno, 16
– di posizione, 16
– di proporzionalità, 36
– di tempo infinita, 36, 37
– di velocità, 16
CP, 275
CPU, 172, 173
criterio
– di Bode, 69
– di Nyquist, 69, 72
– di Nyquist semplificato, 72
curva
– approssimata, 42, 44, 45, 47, 49
– asintotica, 42
– effettiva, 42
– reale, 42, 44, 45, 47, 49
custom, 176

## D

debug, 180
Debugger, 311
debugging, 303
DEC, 275
decade, 40
DECF f,d, 295
DECFSZ f,d, 296
decibel, 40
decodificatore, 242, 243
decodificatore delle istruzioni, 243
decremento, 277
Delay Time, 216
derivate, 4
diagramma
– delle ampiezze, 44, 46, 53, 86, 88
– delle fasi, 44, 47, 87, 89, 155
– delle fasi (con poli e zeri distanti), 54
– delle fasi (con poli e zeri ravvicinati), 55
– di Bode, 39
– di Bode di sistemi con due poli complessi coniugati, 107
– di Bode di sistemi con due poli reali coincidenti, 106
– di Bode di sistemi con due poli reali distinti, 105
– di Bode di sistemi con un polo non nullo, 103
– di Bode di sistemi con un polo nullo, 104
– di Bode di un blocco con un polo (curva asintotica), 87
– di Bode di un blocco proporzionale, 86
– di Bode e di Nyquist, 112
– di funzioni notevoli, 60
– di Nyquist, 56
– polare, 57
digital signal processor, 286
Direct Memory Access, 254
direttive del compilatore, 303
display, 179
dispositivo
– di comando ad azionamento manuale, 157
– di comando ad azionamento elettrico, 158
– di comando e controllo, 169
– di controllo e regolazione, 139
– di I/O, 241
– di segnalazione, 157
DMA, 246, 249, 254
DMA controller, 249
dominio astratto, 3
dominio *s*, 3, 5
doppia scala logaritmica, 39
dual-pin, 243

## E

EAROM, 177
Edit, 309
EDU>>, 110
EEPROM, 177
elaboratore elettronico, 132
elementi grafici, 193
elettromagnete, 158
elettromeccanica, 130
elettronica, 130
elettropneumatica
– a logica cablata, 153
– a logica programmabile, 153
elettrovalvole, 145, 151, 157, 159
END, 303, 304
energia idraulica, 140
EPROM, 131, 177, 180
EQU, 303, 304
equazioni algebriche, 2
equazioni differenziali, 2, 3
esempi di programmazione, 280
esecuzione del programma, 174
EWB, 42

## F

fase
– di compilazione, 303
– di execute, 255, 256, 294
– di fetch, 253, 255, 256, 294
– di prelievo delle istruzioni, 244
– di programmazione, 304
– operativa, 174
FBD, 192
FBS, 192
f.d.t. d'anello, 65
f.d.t. in regime sinusoidale, 33
fetch, 244
File, 110
file register, 290
fine corsa, 163
finestra di supervisione, 231
flag, 244, 259
– di addizione/sottrazione, 258
– di carry, 258
– di half carry, 257
– di parity/overflow, 258
– di riporto, 245
– di segno, 257
– di zero, 245, 257
flusso termico, 8
forme fattorizzate della f.d.t., 17, 35
fototransistor, 185
frequenza di funzionamento, 241
frequenze intermedie, 58, 59
funzionamento ciclico di un motore asincrono trifase, 198
funzione
– di autoritenuta, 196
– di trasferimento in *s*, 15
– elementare, 36
– esponenziale e trigonometrica, 9
– immagine $F(s)$, 3
– notevole, 10
– oggetto $f(t)$, 3
– razionale fratta, 12, 15
FUP, 192
fusibili, 163

## G

Global System Mobile, 230
GPR, 290
grafico a dispersione, 82
grandezze
– analogiche, 181
– digitali, 181
GROUND, 98
gruppo vite-madrevite, 135
GSM, 230
guarnizione, 141
guasto per sovraccarico termico del motore, 162

## H

HALT, 253, 254, 260
hardware, 131, 169, 189
HLL, 192
holding tamk, 217
Horizontal, 102

## I

IC-PROG, 305
IDE, 302
IL, 192
immunità ai disturbi elettrici, 132
impianto
– a riposo pronto per essere messo in funzione, 158
– di comando, 127, 128, 130
– di potenza, 127, 129, 131
– di segnalazione, 127, 128
– in logica elettromeccanica, 156
– oleoidraulico, 139
– per l'automazione industriale, 125, 127, 134
– pneumatico, 137
impulso unitario, 2
INC, 275
INCF f,d, 296
INCFSZ f,d, 296
INCLUDE, 303, 304
INCLUDE <"nome del file da includere">, 304
INCLUDE "P16F84.INC", 304
indirizzamento
– diretto, 274
– immediato, 274, 275
– tra registri, 274
inerzia idraulica, 6
ingombro minimo, 132
ingranaggi, 143
ingressi
– ad alta velocità, 181
– analogici, 181
– digitali, 180
– reali, 194
Instruction Register, 243
istruzioni di caricamento e scambio, 258
istruzioni-macchina, 179
INT, 253
integrati di tipo CMOS, 287
interblocchi, 187
interfacce
– parallele, 250
– programmabili, 250
interfacciabilità
– con altri dispositivi, 132
– Bluetooth, 229
– di comunicazione, 230
International Standard Organisation, 189
interrupt, 246, 247, 250, 253
Interrupt Request, 253
interruzione non mascherabile, 253
inversione di marcia di un motore asincrono trifase, 198
INVIO, 110
IOREQ, 253
I/O Request, 253
IORWF f,d, 296
IR, 243
ISO, 189
ISO/IEC 646, 193
ISO-OSI, 189
isolamento ottico, 184, 185
istruzioni
– aritmetiche, 274, 275
– aritmetiche e logiche, 259
– byte-oriented, 293
– di addizione, 275
– di caricamento, 274
– di confronto, 275
– di decremento, 275
– di incremento, 275
– di ingresso/uscita, 259
– di manipolazione dei bit, 259
– di rotazione, 274, 279
– di rotazione e scorrimento, 259
– di salto, 274, 277
– di salto, chiamata e ritorno, 259
– di salto condizionato, 277, 278
– di salto incondizionato, 277
– di sottrazione, 275
– literal and control, 293
– logiche, 274, 278
– orientate bit-oriented, 293

## J

jump, 259
JUMP, 260
Just Basic, 113

## K

KOP, 192

## L

LADDER CONTACTS, 215
Ladder Diagram, 193
Ladder Diagrams, 214, 215
LADDER IO MODULE, 216
LADDER OUTPUT COILS, 216
LADDER RELAY COILS, 216
LADDER RUNGS, 215



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

LADDER TIMERS, 216
lamine bimetalliche, 162
Lamp, 214
Last In First Out, 245
lato+, 159
lato–, 159
LD, 192, 193, 274
led, 288
LED, 128
leva, 150
leva di sgancio, 162
leva rotante, 150
linea di interrupt, 247-248
linguaggio, 191
– a contatti, 192, 193
– ad alto livello, 192
– assembly, 260
– booleano, 192
– di programmazione, 191
– Grafcet, 192
– grafico, 192
– ladder, 192, 231
– macchina, 260, 261
– testuale, 192
LIST, 303, 304
lista di istruzioni, 192
livello
– di comando, 126
– di guida operatore, 126
– d'intervento, 126
– di sorveglianza, 126
load, 258
locazioni di memoria, 260
logica
– cablata, 130, 156, 241
– di comando, 130
– di controllo, 254
– elettromeccanica, 130, 132, 156
– elettronica, 130
– informatica, 132
– pneumatica, 133
– programmabile, 131, 192
– programmata, 241
LUNGH, 304
LUNGH EQU 10, 304

## M

macchina operatrice, 137
Magnitude, 102
marcatura ed espulsione di un oggetto, 203
margine
– di fase, 71
– di fase sufficiente, 71
massa comune, 194
master, 190
– reset, 288
materia prima, 125
MATH WORKS, 110
Matlab, 42, 81, 110
meccanismi di conversione, 135
memoria, 177, 290
– dati, 286
– di lettura e scrittura, 177
– di sistema, 172, 177
– di sola lettura, 177
– di stack, 245
– EEPROM dati, 290, 291
– EEPROM programma, 290
– elettronicamente alterabile, 177
– programmabile, 131
– programmabile cancellabile, 177
– RAM, 177, 242, 290
– ROM, 177, 242
– utente, 172, 177
Memory Request, 253
metodo della scomposizione in fratti semplici, 12
metodo di Heaviside, 12
microcontrollore, 285
– PIC, 286
– RISC, 287
microprocessore, 174, 241
microprocessore Z80, 242
modalità
– counter, 292
– di simulazione, 231
– LIFO, 245
– modifica, 234
– monitoring, 230, 231
– simulazione, 230, 234
– simulazione e monitoring, 231
– timer, 292
Modbus slave ed Ethernet server, 229
modelli
– espandibili, 171
– fissi, 171
modi
– di indirizzamento, 287
– di risposta, 23
modo XT, 304
moduli di comunicazione, 229
moduli logici Zelio Logic, 228
modulo, 39, 172
– di ingresso, 172
– di uscita, 172
– e fase di un blocco con uno zero, 115
– e fase di un blocco con uno zero e un polo, 117
– e fase di un blocco con un polo, 113
montanti, 193
morsettiere, 172
motore, 141
– a commutazione elettronica, 134
– a corrente continua, 134
– a ingranaggi, 144
– a palette, 144
– a riluttanza variabile, 134
– asincrono trifase, 134
– a stantuffi, 144
– brushless, 134
– elettrico, 134, 135
– idraulico, 140
– passo-passo, 134
– pneumatico, 143
– pneumatico dinamico, 143
– pneumatico rotativo, 143
– primo, 139
– tradizionale, 134
MOVF f,d, 296
movimentazioni on-off, 140
movimentazioni proporzionali al segnale di comando, 140
movimento alternativo, 144
movimento di un organo meccanico, 158
movimento rotatorio, 144
MOVWF f, 296
MPASM, 303
MPLAB IDE v8.83, 305
MREQ, 253
multipurpose, 176
Multisim, 81, 98, 214

## N

Nec, 286
New M-file, 110
nibble, 259
NMI, 253
Non Masklabe Interrupt, 253
norma CEI 44-5, 186
norma DIN 19239, 193
not operation, 253

## O

office automation, 124
oleoidraulica, 137
Open Systems Interconnect, 189
optoisolatore, 181, 185
Opzioni assi, 83
ORG, 303
organizzazione modulare, 172
ORG <indirizzo>, 304
ORG 00, 304
OSI, 189

## P

palette, 143, 144
parabola unitaria, 2
Parallel Input Output, 250
parallelismo di memoria, 286
parallelo, 250
Pascal, 81
passo-passo, 135
PC, 244
periferiche, 177, 246
– d'ingresso, 177
– d'uscita, 177
– I/O parallele, 246, 249
– I/O seriali, 246, 250
periodi
– del segnale di clock, 255
– di clock, 254
– di clock elementari, 255
petrolio greggio, 139
pettine di espansione, 173
Phase, 102
Philips Semiconductors, 286
PIC, 286
picco di risonanza, 50
PIC 16F84, 287
PIC 16F8X, 287
piedinatura, 252, 288
pilotaggio
– con transistor, 184
– con transistor e relè, 184, 185
– Darlington, 184
– delle uscite, 174
pin, 245
pin open drain, 288
PIO, 250
pistoni, 133
– pneumatici, 129
Place, 98, 100
PLC, 132, 133, 169, 191
PLC compatti, 171
PLC compatto, 171
PLC master, 190
PLC modulari, 171, 172
PLC slave, 190
pneumatica, 130, 137
poli, 15
– complessi coniugati, 25
– complessi coniugati di molteplicità due, 23, 25
– complessi coniugati di molteplicità uno, 23, 24
– nell'origine, 15
– semplici di molteplicità due, 23, 24
– semplici di molteplicità uno, 23, 24
polling, 246, 247
pompa, 140
– a ingranaggi, 140
– a palette, 140
– a pistoni, 140
– centrifuga, 140
– oleodinamica, 139
– volumetrica, 140
porta seriale RS232, 304
posizione
– di fine corsa, 141
– tutto dentro, 141
– tutto fuori, 141
potenza di calcolo, 286
potere lubrificante e anticorrosivo, 139
power up timer, 304
PPI, 250
prescaler, 292
pressione, 6
prestazioni, 176
prima forma, 35
– fattorizzata, 17
Primo Ciclo Macchina, 253
principio di identità dei polinomi, 12
Processor Reset, 311
problema
– immagine, 3
– oggetto, 3
processi
– e movimentazioni industriali, 169
– produttivi, 125
processore
– di compilazione, 179
– di esecuzione, 179
prodotto
– finito, 125
– logico, 278, 279
progettazione, 98, 214
Program CC, 81
Program Counter, 244, 258
Programmable Integrated Controller, 286
Programmable Peripheral Interface, 250
programma
– di risposta, 248
– driver, 249
– sorgente, 261
– utente, 242
programmatore, 302, 304
programmazione a contatti, 192
programmazione assembly dello Z80, 261
programmazione dei microprocessori, 259
Project, 306, 309
project manager, 305
Project Wizard, 306
prontezza di risposta, 65, 67
protezione del codice, 304
protocolli, 249
protocolli di comunicazione, 189, 190
PSpice, 42
pulsante, 150
– a palmo, 150
– di emergenza, 150
– protetto, 150
– push-pull, 150
pulsazione
– di attraversamento a 0 dB, 69
– di risonanza, 50



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

– di taglio, 44, 46, 50
punto
– all'infinito, 58
– di flesso, 45
– critico, 72

**Q**

4 cicli T, 256

**R**

rack, 172, 189
radici, 15
raffinazione, 139
RAM, 177, 241
rampa unitaria, 2
rapporto costo per ingresso/uscita, 171
rappresentazione
– di funzioni complesse, 52
– di funzioni elementari, 42
– grafica dei diagrammi di Bode e di Nyquist, 111
– grafica della risposta al gradino di un sistema a retroazione unitaria, 111
RD, 253
Read, 253
record, 293
Reduced Instruction Set Computer, 286
Refresh, 253
refresh delle memorie DRAM, 253
refrigeratore, 138
register file, 290, 291, 294
registro, 292
– accumulatore, 243, 257, 290
– a 8 bit, 257
– a 16 bit, 258
– contatore di programma, 244, 255
– copia dei registri generali, 257
– dei flag, 257
– d'interrupt, 257
– di refresh, 257
– di stack, 242, 245, 290
– di stato, 242, 244, 248
– di uso generale, 242, 244, 257
– indice, 258
– interno, 241, 244, 257
– istruzioni, 242, 243, 255
– PORTA e PORTB, 292
– STATUS, 292
– TMR0, 292
– TRISA, 292
– TRISA e registro TRISB, 292
regole
– di tracciamento, 154, 195
– di tracciamento degli schemi, 195
relè
– ausiliari, 157, 158
– interni, 184
– monostabile, 159
– reed, 164
– ritardati all'eccitazione, 160
– temporizzatori, 157, 160
– termico, 162
RESET, 254
resistenza
– idraulica, 6
– termica, 7
resistore di pull up esterno, 288
ret, 259
rete
– di distribuzione, 137, 138
– telefonica commutata, 230
retroazione, 171
Reverse, 102
RFSH, 253
richiesta di interruzione, 248
ricircolazione di sfere, 135
riconoscimento della periferica, 248, 249
ridondanza, 186
– degli ingressi, 187
ripristino, 248, 249
riproduzione in scala, 170
RISC, 286, 287
risoluzione, 182
risonanza, 50
risposta
– al gradino di un sistema a retroazione unitaria, 112
– al gradino unitario, 19
– all'impulso unitario, 20
– a regime, 33
– di un sistema alle sollecitazioni, 19
– forzata, 2
– libera, 2
– nel dominio della frequenza, 33
– nel dominio del tempo, 2
RLA, 279
RLCA, 279
RLF f,d, 296
robustezza meccanica, 132
ROM, 177, 241
rotate, 259
Rotate Left, 279
Rotate Left with Carry, 279
Rotate Right, 279
Rotate Right with Carry, 279
RRA, 279
RRCA, 279
RRF f,d, 296
RS485, 190
RTC, 230
rulli, 135
Run, 102

**S**

salti a sottoprogrammi, 244
salvataggio e caricamento dei programmi, 179, 180
scambiatore di calore, 8
scansione, 174
scansione asincrona di ingressi e uscite, 174
scansione del programma, 174
scansione sincrona di ingressi e uscite, 174
scarichi, 146
scarico di pressione, 151
schema
– a blocchi, 34
– di avviamento e segnalazione per la movimentazione di un motore, 236
– di comando, 127
– di potenza, 127
– di segnalazione, 127
– funzionale, 288
– funzionale in sequenza, 192
– per il comando in sequenza di due motori, 238
– per la movimentazione di tre motori, 237
Schneider Electric, 228
scomposizione in fratti semplici, 12
segnale
– analogico, 152, 153
– comunque variabile nel tempo, 33
– con andamento oscillatorio smorzato, 12
– di clock, 246
– digitale, 152
– di handshake, 250
– di interruzione, 248
– periodico, 33
– periodico con periodo infinito, 33
– di prova, 2, 8
– di sincronismo e di controllo, 243
semaforo singolo, 225
sensori, 157, 163, 171
– elettromeccanici, 163, 164
– magnetici, 163
– ottici, 163, 164
– pneumatici, 163
separazione galvanica, 181
serbatoio, 6, 138
server, 190
set di istruzioni, 192, 261, 286, 293
SFC, 192
SFR, 290
sgancio del relè, 162
shift, 259
sicurezza, 186
sicurezza positiva, 186
Simulate, 101, 102
simulatore, 310, 311
simulazione del contatto di autoritenuta, 222
simulazione del funzionamento di un semaforo singolo, 225
sincronizzazione, 251
sistema
– a microprocessore, 241, 242
– automatico, 125, 126
– delle decisioni, 125
– di attuazione delle decisioni, 125
– di comando, 125
– di comunicazione, 188, 189
– di controllo, 124, 125
– di potenza, 125
– di sviluppo integrato, 302
– di sviluppo MPLAB, 305
– di sviluppo per microcontrollori, 302
– idraulico, 6
– lineare tempo invarianti a costanti concentrate, 15
– meccanico, 6
– operativo, 242
– scarsamente flessibile, 169
– sensoriale, 125
– termico, 8
slave, 190
slot, 172
smorzamento, 50
smorzatore, 6
sollevamento e spostamento di un oggetto, 203
soluzione
– complessa coniugata, 14
– immagine, 3
– multipla, 13
– oggetto, 3
– semplice, 13
somma logica, 279
sondaggio, 247
sorgente, 146
sottoinsiemi, 125
sottoprogramma, 247
Sources, 98, 100
SP, 245
spettro
– delle ampiezze, 33
– delle fasi, 33
spostamento e marcatura di un oggetto, 203
ST, 192
stabilità, 65, 69
stack, 245
Stack Pointer, 245, 258
stato di NOP, 253
stato T, 261
stelo, 141
step by step, 311
Step Into, 311
strumento hardware, 302
strumento software, 302
struttura
– a bus, 173
– a scala, 193
– di tipo Harvard, 286
– di tipo Von Neumann, 286
– hardware, 132
– interna del microprocessore, 242
SUB, 260, 275
SUBWF f,d, 296
Switch, 214

**T**

tasto di reset, 162
tasto Zx, 237, 238
tecnica del DMA, 249
temperatura di ebollizione, 139
tempo
– di ciclo, 174
– di risposta, 67
– di ritardo, 160
temporizzazione, 294
teorema
– del valore finale, 21
– del valore iniziale, 21
– di Fourier, 33
terminale di programmazione, 179
test, 259
testate, 141
Texas Instruments, 286
TIMER ON, 216
timing generation, 290
tiristori, 184
TMR0, 292
TRAFFIC LIGHT, 217
TRAFFIC LIGHT SINGLE, 216, 225
Transfer Function Block, 98, 100
transistor, 184
trasduttori, 171
trasferimento dati, 246
trasformata
– della derivata di una funzione, 5
– dell'integrale di una funzione, 5
– del prodotto di una costante per una funzione, 4
– di Laplace, 2, 3, 111
– di una somma di funzioni, 4
– funzionale, 2, 3
trasformazione diretta, 3



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

trasformazione inversa, 3
trasmissione
– asincrona, 251
– seriale, 251
trasmissione sincrona, 251
triac, 184
trifase a induzione, 135
TRIS B, 292
TTL compatibile, 254
tubazioni, 138
turbine, 143
turbocompressori, 137

**U**

unità
– aritmetico logica, 290
– centrale di processo, 172, 173
– di controllo, 242, 245, 246
– di ingresso/uscita, 246
– di I/O, 246
– di programmazione, 173
– logico aritmetica, 242, 244
1 logico, 259
uscita, 194, 249
– analogica, 186
– dall'interruzione, 248, 249
– digitale, 183
utenze oleoidrauliche, 139

**V**

valvola
– a centri aperti, 146
– a centri chiusi, 146
– ad azionamento elettrico, 145
– ad azionamento manuale, 145, 150
– ad azionamento meccanico, 145, 150
– ad azionamento pneumatico, 145, 151
– a due pressioni, 133, 149
– bidirezionale, 148
– bistabile, 144, 150, 159
– di comando e di regolazione, 140
– di controllo della portata, 138
– di controllo della pressione, 138
– di distribuzione, 144, 145
– di intercettazione, 144, 147
– di regolazione, 144, 148
– distributrice, 138
– di tipo logico, 133, 144, 148
– di tipo proporzionale, 153
– monostabile, 144, 150, 159
– monostabile e bistabile, 150
– NA, 146
– NC, 146
– normalmente aperta, 146
– normalmente chiusa, 146
– pneumatica, 144, 151
– proporzionale, 140
– selettrice, 133, 149
– di blocco, 148
– di stop, 133, 149
– regolatrice di flusso, 148
– selettrice, 149
– speciale, 138
– unidirezionale, 148
variatore di velocità, 135
Vertical, 102
View, 311
viscosità, 139
VLSI, 241

**W**

WAIT, 254
watchdog, 287, 304
WD, 253
Write, 253

**Z**

Zelio Logic Alarm, 230
Zelio Soft 2, 214, 229
zeri, 15
0 logico, 259
zero nell'origine, 37, 47
zero nullo, 37, 42
Zilog, 242, 286



Paolo Guidi **SISTEMI AUTOMATICI - Vol.2** © Zanichelli 2012 *per Elettronica ed elettrotecnica*

Paolo Guidi

# Sistemi automatici

per Elettronica ed elettrotecnica

Risposta dei sistemi nel dominio del tempo e della frequenza
Automazione industriale e PLC
Microcontrollori e microprocessori

Questo testo si caratterizza per una trattazione matematica semplice e rigorosa. Si presentano in maniera sintetica i concetti fondamentali della teoria dei sistemi elettrici, privilegiando l'aspetto applicativo.

## Nel libro

- Numerosi **esempi applicativi**, **esercizi svolti** e **quesiti**.
- **Esercitazioni di simulazione** e **programmazione** che possono essere verificate nella pratica di laboratorio.

NOVITÀ 2012